



Modal Parametre Belirleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması ve Demiryolu Traverslerinin SISO-tipi Vibro-akustik Modal Analizlerle Tahribatsız İncelenmesi

Ferhat ÇEÇEN*¹, Bekir AKTAŞ², Ahmet ÖZBAYRAK²

¹TCDD Beton Travers Fabrikası Müdürlüğü, Sivas, Türkiye

²Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

*ferhatcecen@tcdd.gov.tr

(Alınış/Received: 10.03.2023, Kabul/Accepted: 11.04.2023, Yayımlama/Published: 31.07.2023)

Öz: Bilgisayar ve sensör teknolojilerindeki gelişmeler, titreşim ve ses verilerinin, yüksek çözünürlük ve örnekleme hızlarıyla, ağır iklimsel şartlar altında dahi kayıt altına alınabilmesini sağlamıştır. Bu kritik verilerin, uzay, havacılık, savunma, tıp, afet yönetimi ve her çeşit mühendislik branşında farklı amaçlarla kullanılabilmesi için sürekli yeni yöntemler geliştirilmektedir. Bunlardan biri de tahribatsız modal parametre belirleme yöntemleridir. Bu yöntemler içerisinde ise, günümüzde dünyada en yaygın kullanılan ve kabul göreni, titreşim esaslı deneysel modal analizlerdir (EMA). Ancak bu metodun, temaslı ölçüm gerektirmesi ve lokal ölçüm alması gibi önemli dezavantajları söz konusudur. Bu dezavantajlar, çeşitli sektörlerde analizleri yapılan birçok unsur için geçerli olup, demiryolu taşıt bileşenlerinin veya demiryolu yapı elemanlarının analizleri de buna örnek teşkil etmektedir. Bu çalışmada, literatürde ender incelenmiş bir metod olan, vibro-akustik modal analizlerin (VMT), bu bağlamda, EMA için uygun bir alternatif olup olmayacağı araştırılmıştır. Bu kapsamda, literatürde tespit edilen eksiklikler dikkate alınarak hazırlanan VMT ve EMA test düzenekleri kullanılarak demiryolu traversleri üzerinde karşılaştırmalı modal analizler yapılmıştır. Sonuç olarak, hazırlanan SISO-tipi VMT test metodunun; belirli bir frekans aralığındaki rezonans frekansı, sönümlenme oranı ve mod şekillerinin tahminlerinde, EMA metodu kadar hassas ve tutarlı sonuçlar verebildiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu traversleri, Modal sönümlenme oranı, Frekans yanıt fonksiyonu, FRF FFT grafikleri karşılaştırması, Logaritmik azalma sönümlenme oranı, Modal daire metodu

Comparison of Modal Parameter Estimation Methods and Investigation of Railway Sleepers by Non-Destructive SISO-type Vibroacoustic Modal Analyses

Abstract: Recent developments in computer and sensor technologies have enabled vibration and sound data recording with high resolution and sampling rates, even under severe climatic conditions. New methods are constantly being developed to use these critical data in space, aviation, defense, medicine, disaster management and all kinds of engineering branches. One of them is non-destructive modal parameter estimation methods. Today, among these methods, vibration-based experimental modal analysis (EMA) is the most widely used and accepted one globally. However, this method has significant disadvantages. For example, it requires sensor mounting and takes local measurements. These disadvantages are valid for many elements analyzed in various sectors, and the analysis of railway vehicle components or track elements are two examples. This study investigated whether vibroacoustic modal testing (VMT), a rarely studied method, would be a suitable alternative for EMA in this context. Comparative modal analyses were made on the railway sleepers, using VMT and EMA test setups, reorganized considering the deficiencies identified in the literature. As a result, it has been determined that the prepared SISO-type VMT setup can provide as accurate and consistent results as the EMA in estimating the resonance frequencies, damping ratios and mode shapes in a certain frequency range.

Keywords: Railway sleepers, Modal damping ratio, Frequency response function, FRF FFT graphs comparison, Logarithmic decrement damping ratio, Modal circle method

Atıf için/Cite as: F. Çeçen, B. Aktaş, A. Özbayrak, "Modal parametre belirleme yöntemlerinin karşılaştırılması ve demiryolu traverslerinin siso-tipi vibro-akustik modal analizlerle tahribatsız incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 36-49, July 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1263277

1. Giriş

Titreşim ve ses, geçmişten günümüze birçok yapı ve ekipmanın tasarım, kalite kontrol ve kullanım süreçlerinde yararlanılan en önemli veriler arasındadır. Günümüzde, titreşim ve ses (akustik) analizleri, iki ayrı disiplin olarak değerlendirilmektedir. Bunun nedeni, bu iki farklı etkiyi ölçmek için kullanılan ekipmanların ve teorik arka planlarının bir takım önemli farklılıklara sahip olmasıdır. Ancak titreşen cisimlerin ses üretebilmesi veya ses dalgalarının tesir ettikleri cisimlerde titreşimlere neden olabilmesi nedeniyle bu iki disiplin birbiriyle iç içedir. Bu yüzden çok zaman “vibro-akustik analizler” adında tek bir çatı altında analizler birleştirilmektedir [1]. Bilindiği üzere, titreşim analizlerinde en yaygın kullanılan sensörler ivmeölçerlerdir. Akustik analizlerde en yaygın kullanılan sensörler ise, ses basıncı transformatörleri veya daha yaygın tabiriyle mikrofonlardır. Bu sensörler kullanılarak, zaman-bazında ve frekans-bazında, çeşitli birçok analizler yürütülebilmektedir. Bu analizler içerisinde en önemlilerden biri deneysel modal analizlerdir [2]. Bu analizler sayesinde, çeşitli yapı, sistem ve elamanların istenilen modal parametreleri (rezonansa uğradıkları frekanslar, dinamik yükleri sönümlenme performansları, çeşitli frekanslarda sergiledikleri mod şekilleri vb.), gerek laboratuvar ortamında, gerekse kullanım yerinde, tahribatsız olarak belirlenebilmektedir [2-4]. Tablo 1’de, söz konusu ivmeölçer ve mikrofonlar kullanılarak uygulanabilen dört farklı modal test metodunun; en yaygın girdi, yanıt ve çıktı birimleri, literatürden yararlanılarak [2-5] özetlenmiştir. Sunulan bu modal analiz yöntemlerinin dışında, birçok farklı yöntem de söz konusudur. Ayrıca, sensör ve bilgisayar teknolojilerindeki gelişmelerle, gelecekte yeni yöntemlerin ortaya konulması da mümkündür.

Tablo 1. Titreşim ve akustik esaslı modal test yöntemlerine ait girdi, yanıt ve çıktılarının birimleri

Parametre	Titreşim Esaslı Modal Analiz (EMA)	Akustik Esaslı Modal Analiz (AMT)	Akustik-titreşim Esaslı Modal Analiz (AVMT)	Vibro-akustik Modal Analiz (VMT)
Girdi	Kuvvet (N)	Akustik kuvvet (m^3/s^2)	Akustik kuvvet (m^3/s^2)	Kuvvet (N)
Yanıt	İvme (m/s^2)	Basınç (Pa)	İvme (m/s^2)	Basınç (Pa)
Çıktı (FRF)	$(m/s^2)/N$	$Pa/(m^3/s^2)$	$(m/s^2)/(m^3/s^2)$	Pa/N

Tablo 1’de sunulan modal test yöntemlerinde girdi uygulanması ve yanıt alınması esnasında kullanılan ekipman ve sensörler ve ölçülen veriler farklı olsa da, genel hatlarıyla üç ortak aşamaya sahiptir [2-5]: İlk aşamada, Tablo 1’de “girdi” olarak tanımlanan bir etki ile test elemanı tahrik edilmekte, aynı zamanda, “yanıt” olarak tanımlanan tepki ölçülmektedir. Bu iki parametre, saniyede binlerce veri okuyabilen veri toplama cihazlarıyla, birbiriyle senkronize bir şekilde kayıt altına alınmaktadır. Bu zaman-bazlı kayıtlar, ileride işlenecek ham verileri oluşturmaktadır. Bununla birlikte, bir takım önemli kontrol ve optimizasyonlarda da kullanılır. Örneğin, modal testlerde istenilmeyen “çift vuruş (double hit)” problemi oluşup oluşmadığı, bu kayıtlar sayesinde kontrol edilmektedir. Bu ham veriler, bazı çalışmalarda “genel sönümlenme” performansı analizinde de kullanılmaktadır. Örneğin, Gidrao ve ark. [6], beton numunelerin sönümlenme oranlarını, kuvvet sensörsüz çekiçle tahrikler uygulayıp, mikrofonla kayıt altına aldıkları ses basıncı-zaman verisine logaritmik azalma yöntemiyle eğri uydurarak tahmin etmeye çalışmışlardır. Benzer yöntem Guesser ve Martins [7] tarafından, çeşitli demir alaşımların sönümlenme performanslarının karşılaştırılmasında kullanılmıştır. Bu yöntemin pratik olması ve az ekipman gerektirmesi gibi çeşitli avantajları vardır. Ancak, uygun şekilde kullanılmazsa, önemli dezavantajları da söz konusudur. Çünkü bu yöntemle elde edilen sönümlenme oranı, hem genel, hem de tahrik-endekslidir. Genel olarak nitelendirilmesinin nedeni, bu yöntemle, çeşitli frekanslardaki farklı sönümlenme oranları ayrı ayrı incelenememektedir. Oysaki birçok malzemenin, yüksek ve düşük frekansları sönümlenme performansı birbirinden farklıdır. Tahrik-endeksli olarak nitelendirilmesinin nedeni ise, olası değişken tahrik şiddetlerinin ve frekans yoğunluklarının düzleştirilmeden kullanılmasıdır. Hâlbuki bu parametreler, aynı kişinin aynı test şartlarında uyguladığı farklı tahrikler arasında dahi az-çok değişmektedir. Farklı kişilerin, farklı ekipmanlar kullanarak, farklı şekillerde uyguladığı farklı tahriklerin etkisi ise çok daha fazla

olacaktır. Bu farklılıkların kısmen giderilmesi için çeşitli otomatik tahrik uygulayıcılar geliştirilmiştir. Buna rağmen, aynı darbenin, farklı elastisite modülüne sahip malzemelere uygulanması halinde, ortaya farklı şiddette ve farklı frekans dağılımına sahip dinamik kuvvetler ortaya çıktığı literatürde belirtilmektedir [8-10]. Özetlenirse, zaman-bazlı ham verilerle, frekans-bazlı sönümlenme analizi yapılamamakta ve ileride açıklanacak tahrik düzgünleştirmeli analizler kadar hassas ve evrensel sonuçlar elde edilememektedir [3].

İkinci aşamada, bir önceki aşamada elde edilen zaman-bazlı, ham girdi ve yanıt verileri, uygun modal analiz teknikleriyle (örneğin Hızlı Fourier dönüşümü, Fast Fourier Transform, FFT) işlenmektedir. Bu şekilde zaman-bazlı ham veriler, yarı-işlenmiş, frekans-bazlı veriler hâline dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm ardından elde edilen FFT grafiklerinin yatay eksenini frekans (Hz) cinsinden olup, dikey eksenini, Tablo 1'in 3. satırında örnekleri verilen yanıt birimlerine bağlı olarak değişmektedir. Bu FFT grafikleri yarı-işlenmiş halde olsa da, bir takım önemli kontrollerin ve test süreci optimizasyonlarının yapılmasında da kullanılmaktadır. Örneğin girdi kaydının FFT grafiği incelenerek, test örneğinin istenilen rezonans frekanslarını tahrik etmek açısından yeterli olup olmadığı tahkik edilmektedir. Yanıt kaydının FFT grafiğinden ise, teste tabi tutulan nesnenin (girdi uygulanan ve yanıt alınan noktalarına bağlı olarak bazı) rezonans frekansları belirlenebilmektedir. Nitekim ASTM C215-19 [11], standart ebatlı test numunelerinin temel (ilk) rezonans frekanslarını belirlerken bu FFT grafiklerini kullanmaktadır. Literatürde, bu metodu kullanan birçok çalışma mevcuttur. Örneğin Matsuoka ve Watanabe [12], çeşitli demiryolu beton traverslerinin rezonans frekanslarını, desibel ölçer (mikrofon) ve ivmeölçer kullanarak elde ettikleri FFT grafikleriyle incelemiştir. Çalışma sonunda, bu iki farklı yöntemin birbiriyle oldukça benzer sonuçlar sağladığı raporlanmaktadır. Ayrıca ses bazlı analizlerin, herhangi bir sensör montajı gerektirmediğinden, demiryolu bakım personeline, çatlak içeren traverslerin rezonans frekanslarındaki düşüşlerden yola çıkarak, hasar tespit çalışmalarında oldukça pratik olarak kullanılabilmesi belirtilmektedir. Ancak çalışmada kullanılan desibel ölçerin, saha çalışmalarına uygunluğu, örneğin çevredeki gürültülerden etkilenip etkilenmediği araştırılmamıştır. Öte taraftan, demiryolu traverslerinin rezonans frekanslarının yalnızca çatlak içerikleriyle değişmediği, bu durumun çok daha kompleks olduğu unutulmamalıdır. Örnek verilecek olursa; travers geometrisi, beton karakteristikleri, beton yaşı, nem içeriği, donatılendirme metodu, travers altındaki balast tabakası ve altyapı karakteristikleri rezonans frekanslarını değiştirmektedir. Dolayısıyla bazı traverslerin hasarlı, bazı traverslerin hasarsız olduğunu belirlemek için konunun tüm detaylarıyla daha derinlemesine incelenmesi gerektiğini ifade etmekte yarar vardır. Literatürde, söz konusu FFT grafiklerini kullanarak, modal sönümlenme oranlarını belirlemeyi amaçlayan bazı çalışmalar da söz konusudur. Örneğin, Bekele ve ark. [13], çeşitli asfalt ve beton numunelerinin modal sönümlenme oranlarını, akustik kuvvet ölçümü olmayan bir hoparlörle, giderek artan frekansta ses basınçları uygulayarak elde ettikleri ivme değişim kaydı üzerinden incelemektedir. Bu metod FFT grafiği elde etmenin farklı bir yolu olup, İngilizce literatürde "sweep" olarak adlandırılmaktadır. Çalışmada, akustik kuvvet ölçümü olmayan hoparlör kullanıldığından ve girdi kaydı mevcut olmadığından, yanıt FFT şiddetinin tahrik FFT şiddetine oranlanarak düzeltilmesi mümkün olmamıştır. Bu düzeltme işlemi, hassas sönümlenme oranı tespitleri için büyük önem taşımaktadır. Çünkü kullanılan ekipmana bağlı olarak, uygulanan akustik kuvvetin şiddetinin az-çok değişme ihtimali söz konusudur. Nitekim çalışma sonunda, hoparlör ses seviyesi artıp azaldığında veya tahrik unsuru olarak hoparlör değil de kuvvet ölçümsüz tokmak darbeleri kullanıldığında, rezonans frekanslarının kısmen değiştiği raporlanmıştır. Özet olarak, FFT analizleriyle elde edilen modal sönümlenme oranı, zaman-bazlı analizlerle elde edilen genel sönümlenme oranından farklı olarak, frekans-bazında analiz imkânı sağlamaktadır. Ancak, düzgünleştirme eksikliği, bu analizlerde de hâlen geçerlidir. Dolayısıyla bu yöntemle belirlenen modal parametreler de tahrik-endekslidir ve ileride açıklanacak tahrik düzgünleştirmeli analizler kadar hassas ve evrensel sonuçlar elde edilememektedir [3].

Modal test ve analizlerin üçüncü aşamasında, önceki iki aşama ardından elde edilen yanıt FFT'leri, uygun modal analiz teknikleriyle, girdi FFT'lerine oranlanarak, Tablo 1'in 4. satırında

verilen çıktılar, yani frekans yanıt fonksiyonları (Frequency Response Function, FRF) elde edilmektedir. Bu FRF grafiklerinin yatay eksen, FFT grafikleriyle benzer şekilde frekans (Hz) cinsindedir. Ancak dikey eksen, FFT grafiklerinden farklı olarak, tahrik şiddeti ve frekans yoğunluğu düzgünleştirilmesi (normalization) yapılarak evrenselleştirilmektedir.

Günümüzde dünya genelinde en yaygın uygulanan ve kabul gören deneysel modal test yöntemi, Tablo 1'in ikinci sütunda verilen, titreşim esaslı modal analizlerdir. Bu yüzden, deneysel modal analiz (experimental modal analysis, EMA) tabiri yalnız olarak kullanıldığında, genellikle bu yöntem işaret edilmektedir. Bu yöntem, alternatif modal test yöntemlerinin geçerliliğinin değerlendirilmesinde de kullanılmaktadır [14]. Bu yöntemde, girdi, kuvvet sensörleri ile Newton (N) cinsinden, yanıt ise, ivmeölçer sensörleri ile genellikle m/s^2 cinsinden tespit edilmektedir. Dolayısıyla elde edilen FRF grafiğinin dikey eksen birimi yanıt/girdi, yani $(m/s^2)/N$ olmaktadır. Bu ifade bazen $m/(N.s^2)$ şeklinde de geçmekte olup, aynı şeyi ifade etmektedir. İvme değerinin yer çekim ivmesi (g) biriminden tespit edilmesi halinde ise FRF şiddeti g/N olmaktadır. Titreşim esaslı EMA günümüze kadar birçok çalışmada kullanılmıştır [2-4, 9].

İkinci yöntem, Tablo 1'in üçüncü sütununda verilen akustik esaslı modal testlerdir (AMT). Bu yöntemde girdi şiddeti, akustik tahrik sağlayıcılar (hoparlör) üzerine yerleştirilen ivmeölçer sensörleri ile belirlenmektedir. Bu ivmeölçerin birim alan için ölçtüğü ivme değeri (m/s^2), tüm hoparlör diyafram alanıyla çarpılarak akustik kuvvet veya hacimsel ivme değeri belirlenmektedir ($m^2 \times m/s^2 = m^3/s^2$). Bu akustik kuvvet kaynağı ile analiz edilecek frekans aralığını kapsayan bir "beyaz gürültü" belirli bir süre müddetince test elemanına yönlendirilmektedir. Ses basıncı test elemanına bağlı olarak artırılıp azaltılmakta olup, büyük/rijit test elemanları için güçlü hoparlörler gerekmektedir. Bu yöntemde, yanıt, mikrofonlar ile tespit edilmekte olup, metrik SI birimi doğrultusunda Pascal (Pa) cinsinden ifade edilmektedir. Sonuç olarak AMT metoduyla elde edilen nihai FRF grafiğinin dikey ekseninin birimi $Pa/(m^3/s^2)$ olmaktadır [5]. Guimaraes ve ark. [15] yanma odalarını AMT metoduyla incelemişlerdir. Diğer bir yöntem, Tablo 1'in dördüncü sütunda verilen akustik-titreşim esaslı modal testlerdir (AVMT). Bu yöntemde girdi birimi, AMT metodu ile aynıdır (m^3/s^2). Yanıt ise, EMA metodu gibi ivmeölçer sensörleriyle, m/s^2 cinsinden tespit edilmektedir. Dolayısıyla elde edilen nihai FRF grafiğinin dikey ekseninin birimi yanıt/girdi, yani $(m/s^2)/(m^3/s^2)$ olmaktadır. Bu ifadenin sadeleştirilmiş hâli ise $1/m^2$ 'dir [5].

Tablo 1'de sunulan son yöntem ise, beşinci sütunda verilen vibro-akustik modal testlerdir (VMT). Bu yöntemde girdi, EMA metodundaki gibi kuvvet sensörleri ile N cinsinden belirlenmektedir. Yanıt ise, AMT metodundaki gibi mikrofon sensörleri ile (SI cinsinden) Pascal birimiyle tespit edilmektedir. Dolayısıyla bu yöntemle elde edilen nihai FRF grafiğinin dikey ekseninin birimi yanıt/girdi, yani $Pa/(m^2)$ olmaktadır. Basınç birimi olan Pascal, $1 m^2$ alana uygulanan 1 N kuvveti ifade etmektedir ($1 Pa=1 N/m^2$). Dolayısıyla VMT metoduyla elde edilen FRF grafiklerinin şiddetleri aynı zamanda $(N/m^2)/N$ cinsinden de ifade edilebilmekte olup, bunun sadeleştirilmiş hâli ise, AVMT metoduyla aynı, $1/m^2$ 'dir [5]. VMT metodunun, AMT ve AVMT metodlarına karşı avantajı, bu testler sayesinde (sönümlenme düzeyi veya rijitliği yüksek ve/veya boyutları büyük ve/veya açık alandaki) yapısal elemanların daha kolay tahrik edilebilmesidir [16]. Bu yüzden EMA ve VMT testlerinde uygulanan tahrik için yapısal, AMT ve AVMT testlerinde uygulanan tahrik için akustik tanımlamaları yapılmaktadır. VMT metoduyla ilgili erişilebilen çalışmalardan en kapsamlısı Zhu ve ark. [14]'a aittir. Araştırmacılar, otomobil fren diski ve devre kartı üzerinde yürüttükleri VMT analiz sonuçlarını, EMA sonuçlarıyla karşılaştırmaktadır. Çalışma sonucunda VMT ve EMA metoduyla elde edilen rezonans frekanslarının birbirlerinden en fazla %1 farklı oldukları ve mod şekillerine ait Modal Güvenirlik Kriteri değerlerinin %90'ın üzerinde olduğu belirlenmiştir. Ancak VMT düzenekleriyle belirledikleri modal sönümlenme oranlarının, EMA sonuçlarından kayda değer (%700'e varan) düzeyde farklı olduğu belirtilmektedir. Bu farklılığın, test numunesi ile mikrofonlar arasındaki hava moleküllerinin sönümlenme düzeyini artırmasından kaynaklandığını düşünmektedirler. Ancak sunulan sönümlenme oranları incelendiğinde, analiz edilen 18 rezonanstan yalnız 6 adedinde VMT

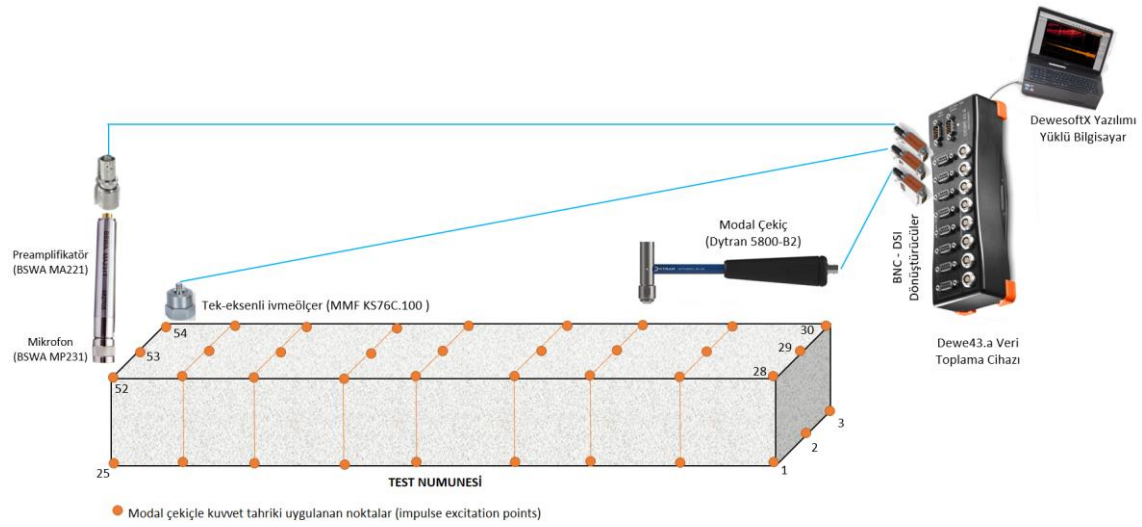
metoduyla belirlenen sönümlenme oranlarının daha yüksek çıktığı, 9 adedinde EMA metoduyla belirlenen sönümlenme oranlarının daha yüksek çıktığı, 3 adedinin ise eşit sonuç verdiği görülmektedir. Dolayısıyla düşünülen bu nedenin dışında veya bunun yanı sıra, başka artırıcı ve azaltıcı etkilerin de araştırılması gerektiğini söylemek yanlış olmayacaktır. Nitekim, çalışmada analiz edilen simetrik ve dairesel test elemanının rezonans frekansları birbirine oldukça yakın olduğundan, kullanılan tek serbestlik dereceli analizlerin (SDOF) bu rezonanslara ait sönümlenme oranlarını belirlerken yetersiz kalabileceği literatürde belirtilmektedir [17]. Test ve analiz düzeneklerindeki eksiklikler nedeniyle VMT metodunun sönümlenme oranlarını belirlemede yetersiz kalacağı çıkarımında bulunmak yanlış olacaktır. Araştırmacılar, hava molekülleri kaynaklı sönümlenme artışlarını sorumlu tutmakla birlikte, bu farklılığın, mikrofonların test numunesine daha yakın konumlandırılması ile giderilip giderilmeyeceğini araştırmamışlardır. Araştırmacılar, ortam gürültüsünün analizleri etkilemesi nedeniyle, oldukça sessiz bir ortamda test yapılmasını önermektedir. Ancak, herhangi bir önlem alınarak bu dezavantajın giderilip giderilemeyeceği çalışma kapsamında araştırılmamıştır. Ayrıca, çalışmada sunulan FRF grafikleri karşılaştırıldığında, EMA testlerine ait FRF şiddet ($m/(N.s^2)$) değerlerinin, VMT testlerine ait şiddet (Pa/N) değerlerinden, ilk rezonans frekansında yaklaşık 100 kat daha zayıf iken, diğer rezonans frekanslarında yaklaşık 100 kat daha güçlü olduğu görülmektedir. Her ne kadar, farklı test yöntemlerine ait FRF şiddet değerlerinin birbiri ile karşılaştırılması doğru olmasa da, frekans değeri değişmesiyle birbiriyle zıt ve 10^4 kata ulaşan bu farklılığın nedeni araştırılmalıdır.

Bu çalışmada, en önemli demiryolu üstyapı elemanlarından biri olan demiryolu traversleri üzerinde deneysel modal testler yapılacaktır. Sunulan literatür özetinden, yaklaşık 270 kg kütleyle sahip demiryolu traversleri için en uygun yöntemin, yukarıda izah edilen “yapısal tahriklerle” yürütülen EMA metodu olduğu, alternatif bir metod uygulanması gerektiğinde ise ikinci en uygun seçeneğin yine “yapısal tahrikler” kullanılan VMT olduğu anlaşılmaktadır. Titreşim esaslı EMA metodunun birçok avantajı bulunmasına rağmen, bazı uygulamalarda çeşitli dezavantajları da söz konusu olmaktadır. Örneğin EMA metodu temaslı ölçüm, yani ivmeölçer yapıştırma işlemi gerektirmekte, yüksek frekansların okunabilmesi için ise daha detaylı (vidalama, özel yapıştırma malzemeleri vb.) işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır [3]. Öte yandan, yapıştırıcı tarzı bağlantıların birçoğunun çeşitli iklimsel şartlar altında frekans iletkenlik katsayıları düşmektedir. Bu sayılan faktörler, birçok uygulamada mümkün ve pratik olmamaktadır. Örneğin kirli/yağlı/ıslak (demiryolu traversleri vb.) numunelerin, çeşitli iklimsel şartlar altında, saha ölçümleri yapılırken bu durum önemli bir dezavantajdır [3, 12, 14]. Yine EMA metodunda, ivmeölçer kaynaklı kütle artışları söz konusudur. Bu durum ise, çok sayıda ivmeölçer kullanılan ve/veya küçük/hafif test elemanlarında sonuçların olumsuz etkilenmesine neden olmakta [3, 14], ayrıca fazladan emek, zaman ve maliyet gerektirmektedir. Yine kullanılan ivmeölçerler noktasal (lokal) ölçüm almaktadır. Bu ise ivmeölçerlerin bağlandıkları noktanın, herhangi bir rezonansa ait modal düğüm noktasına denk gelmesi halinde, bu rezonansın okunamamasına sebebiyet vermektedir [3, 14]. Sonuç olarak, özellikle saha muayenelerinde, temassız ve global ölçüm imkanı sağlayan modal test metodlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Sunulan literatür özetinden anlaşıldığı üzere, temassız ve global ölçüm alan mikrofon sensörleri kullanılan VMT test metodu, bu açılarından önemli avantajlar sağlayabilecektir. Ancak bu konunun öncelikle laboratuvar ortamında yürütülecek testlerle tahkik edilmesi gerekmekte olup, bu çalışmanın amacı da budur. Literatürde VMT metodu kullanılarak modal test yapılan araştırma sayısı oldukça azdır. Demiryolu traverslerini bu metodla inceleyen yayınlanmış herhangi bir çalışmaya ise rastlanılmamıştır.

2. Materyal ve Metot

Titreşim esaslı deneysel modal test ve analizler (EMA), girdi ve yanıt sensörü sayısına ve uygulanma biçimine bağlı olarak çeşitli şekillerde yapılabilmektedir. Bunlardan ilkinde, teste tabi tutulacak nesne, kuvvet sensörlü, metal uçlu bir modal çekiç ile analiz noktalarından (DOF) sırayla tahrik edilmekte (roving hammer) ve tek bir ivmeölçerle, bu nesnenin verdiği yanıt ölçülmektedir (single input-single output, SISO). SISO tipi deneysel modal analizlerin bir diğer

uygulanma biçimi bunun zıddı olup, modal çekiç tahrikinin sürekli sabit bir noktadan yapılmasına karşın ivmeölçerin analiz noktalarına (DOF) sırayla yapıştirılmasıyla (roving response) yapılması şeklindedir. İkinci metot, pratik olmaması ve hafif test unsurlarında hataya sebebiyet verebilmesi nedeniyle zorunlu durumlar haricinde tercih edilmemektedir [17]. EMA için verilen bu yöntemler VMT tipi modal testler için de benzerdir. Tek fark, yanıt verisi alırken ivmeölçer yerine mikrofon sensörü kullanılmasıdır. Bu çalışmada gerek VMT testleri, gerekse EMA testleri esnasında modal çekiç gezdirmeli (roving hammer), SISO-tipi (tek-sensörle, tek eksenle) analiz yapılacaktır. Her iki test için ortak bir test numunesi (LCR-8-tipinde [4, 8, 9, 10] beton demiryolu traversi) kullanılacak, bu ortak test numunesi üzerinde, tüm test aşamaları senkronize halde yürütülecektir (aynı çekiç darbeleri, aynı zamanda, hem mikrofon, hem de ivmeölçerle kayıt altına alınacaktır). Çalışma kapsamında hazırlanan VMT ve EMA test düzenekleri Şekil 1’de sunulmuştur.

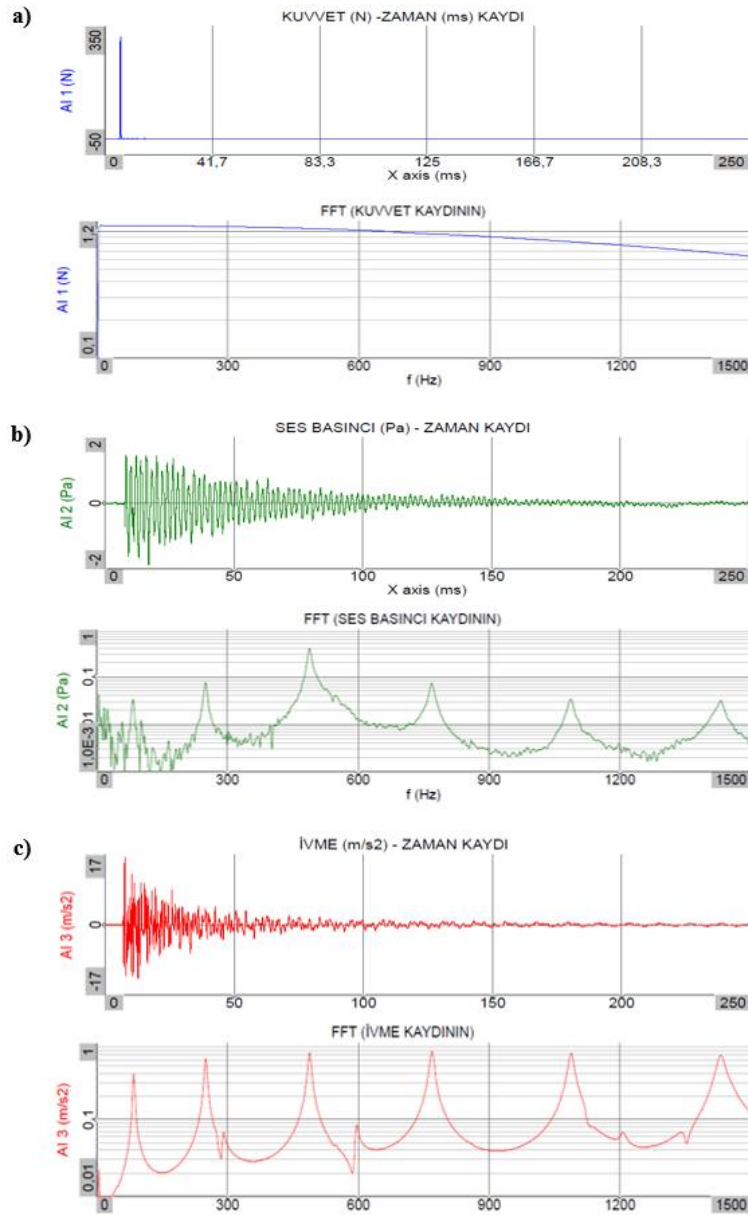


Şekil 1. Çalışma kapsamında hazırlanan VMT ve EMA test düzenekleri

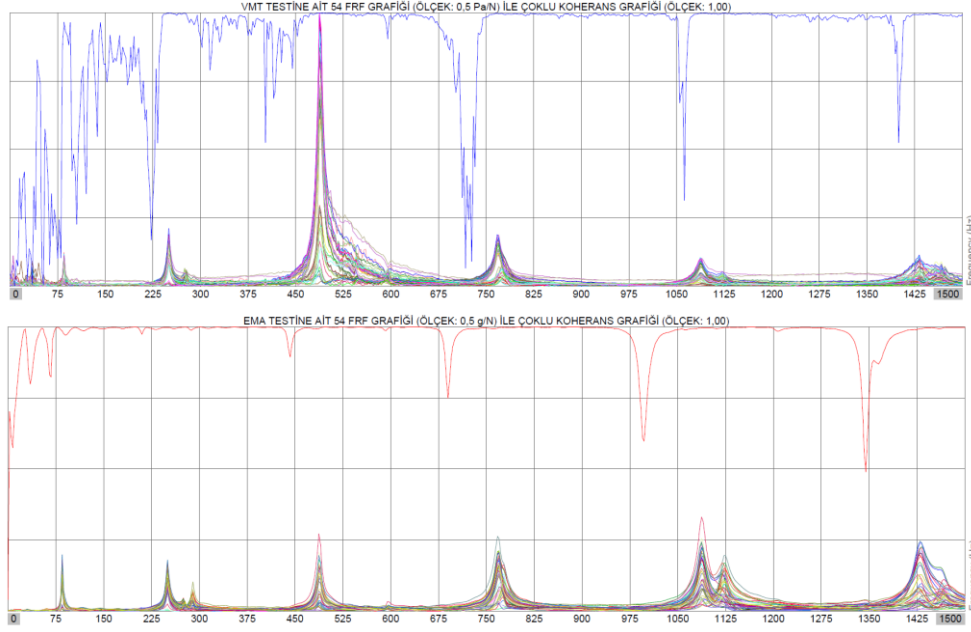
Şekil 1’den görüldüğü üzere, travers numunesi, literatür doğrultusunda [2-4], 600 mm kenar uzunluğuna sahip yumuşak poliüretan küpler üzerine konarak serbest salınım yapmasına imkân tanınmıştır. VMT testleri esnasında, BSWA-MPA-231 modeli, ½ inch diyafram alanına sahip, ön-polarizasyonlu-kapasitif, ICP enerji beslemeli, dış-alan (free-field) tipi mikrofon kullanılmıştır. Kapasitif mikrofonların frekans okumaları, dinamik mikrofonların aksine, mesafeye bağlı olarak değişmemektedir [18]. Ayrıca dış tip mikrofonların, odaklandığı doğrultunun dışından gelen ses dalgalarına karşı duyarlılıkları düşüktür. Bu nedenle aşırı titreşim veya gürültü oluşturan sistemlerde arıza kaynağının tespitinde ve otomobil geçiş testlerinde (pass-by) tercih edilmektedir [19]. Şekil 1’de görüldüğü üzere, teste tabi tutulacak travers 9 düzleme ayrılarak, toplamda 54 analiz noktası (DOF) oluşturulmuştur. Mikrofon sensörü, analiz edilecek frekans bandındaki tüm rezonansları görebileceği bir uç noktaya (52. nokta), travers üst yüzeyine dik (z-ekseninde ölçüm alacak) şekilde konumlandırılmıştır. Test süresince, modal çekiçle, bu 54 analiz noktasından mümkün olanların her birine, sırasıyla 5’er defa, mikrofon sensörüyle aynı (z) eksenle tahrikler uygulanmış, mikrofon standında herhangi bir değişiklik yapılmadan ölçümler

devam ettirilmiştir (roving hammer SISO-type). Testlerin yapıldığı alan olarak, çevresel titreşim ve gürültülerin sürekli mevcut olduğu (yaklaşık 60 dB(A) ortam gürültüsü) bir fabrika atölyesi seçilmiştir. Böylece test alanının, birçok saha ölçümü için yeterli simülasyonu sağlaması durumu gözetilmiştir. Mikrofonun korumasız ve/veya uzak bir noktaya konulmasıyla yapılan ön testlerde, rezonans frekanslarının tespiti mümkün olsa da, sönümlenme oranlarının literatürdeki önceki çalışmalara [14] benzer tutarsız sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu nedenle, mikrofon, Şekil 1’de görüldüğü şekilde, polipropilen bir hazne (ağız çapı: 8,6 cm, taban çapı: 6,5 cm, derinlik: 17 cm) içine yerleştirilmiştir. Haznenin iç çeperlerine herhangi bir yalıtım malzemesi konulmayarak titreşen traverten gelecek ses dalgalarının mikrofonu kolayca iletilebilmesi amaçlanmıştır. Ancak mikrofonun bağlandığı taban kısmına 2,5 cm’lik polystyrene tabaka konarak ses dalgalarının yankı etkisiyle traverse, oradan da tekrar mikrofonu dönmeye elimine edilmiş/ötelenmiştir. Haznenin dış kısmı poliüretan sünger ve EVA ile (yapıştırılmaksızın) esnek kauçuk lastiklerle kaplanmış, bu şekilde düşük ve yüksek frekanslı ses dalgalarının ölçümleri olumsuz etkilememesi amaçlanmıştır. Mikrofonun çevresel titreşimlerden etkilenmemesi ve sağlıklı ölçüm alınabilmesi için uygun bir standla bağlantısı yapılmıştır. Ayrıca mikrofon numuneye yakın konumlandırılarak çevresel gürültülerden daha az etkilenmesi ve hava moleküllerinin sönümlenme parametrelerini olumsuz etkilemesinin önüne geçilmeye çalışılmıştır. EMA testlerinde ise 1 adet MMF-KS76C.100 modeli ivmeölçer (± 60 g ölçüm kapasitesine sahip ve %5’e kadar hata payı sınırlamasıyla ölçebildiği frekans aralığı ($f_{5\%}$) 0,4-18000 Hz olan), VMT testleriyle aynı (z) eksenindeki titreşimleri okuyabilecek şekilde ve analizi edilecek frekans bandındaki tüm rezonansları görebileceği simetrik bir noktaya (54. noktaya) yapıştırılmıştır. Yüksek frekans iletkenliği için, ivmeölçerlerin traverse bağlantısı esnasında balmumu kullanılmıştır [3]. Senkronize bir şekilde yürütülen VMT ve EMA testlerinde, travers numunesinin tahriki için Dytran 5800-B2 modeli, kuvvet sensörlü modal çekiç kullanılmıştır. Kullanılan tüm bu ekipmanlar Şekil 1’de görüldüğü şekilde, Dewe43a tipi veri toplama cihazına bağlanmış ve 50 kHz örnekleme hızıyla testlere başlanmıştır. Şekil 2’de, EMA ve VMT testleri esnasında, uygulanan modal çekiç darbesiyle elde edilen örnek girdi ve yanıt kayıtları ile bu ham verilerin işlenmesiyle elde edilen FFT grafikleri sunulmaktadır. Spektral sızıntıyı (leakage) düşürmek için birçok uygulamada tercih edilen [17] Hanning tipi pencere (window) kullanılmıştır. Bu grafiklerden tahrik şiddetlerinin ve frekans yoğunluğunun, analiz edilen 0-1500 Hz aralığında yeterli geldiği ve çifte vuruş sorunu bulunmadığı görülebilmektedir. Şekil 2’de sunulan ham ve yarı işlenmiş grafikler, travers numunesinin yalnız bir analiz noktasına uygulanan, yalnız bir adet modal çekiç darbesine aittir ve henüz tahrik düzgünleştirilmesi de yapılmamıştır. Giriş kısmında özetlenen FRF hazırlama süreci ile tahrik düzgünleştirilmesi yapılarak FRF grafikleri elde edilecektir. Bu esnada, literatürde önerildiği üzere [3], her bir analiz noktasına 5’er adet tahrik uygulanarak ve elde edilen 5’er adet FRF grafiği sentezlenerek, her analiz noktası için sentezlenmiş tek bir FRF grafiği elde edilmiştir. Bu şekilde, hesaplanacak modal parametrelerin güvenilirliği artırılmış ve her bir ölçüm esnasında elektriksel veri iletimi kaynaklı gürültülerin etkisi azaltılmıştır [3]. Bu sayede ayrıca ölçüm güvenilirliğini gösteren koherans grafikleri de elde edilmiştir. Şekil 3’te VMT ve EMA testleriyle elde edilen 54’er adet FRF grafiği ile bunlara ait çoklu koherans (multiple coherence [17]) grafikleri sunulmaktadır. Şekil 3’teki grafiklerin üst kısımlarında görülen, mavi (VMT) ve kırmızı (EMA) renkli, çoklu koherans grafikleri (MCOH), girdi ile yanıt arasındaki ilişkiyi, frekans bazında vermektedir. Bu ilişki en ideal şekildeyken, grafik zirve noktasına yakın (1,00) seyretmekte, çeşitli nedenlerle ilişki düşünce koherans değeri de düşmektedir. Koherans grafikleriyle asıl amaçlanan, girdi ile yanıt arasındaki ilişkinin çeşitli nedenlerle (elektriksel gürültü, çift-darbe, yetersiz tahrik, sensör hataları vb.) tutarsız olduğunun erken süreçte tespit edilmesidir [3, 17]. Ancak koherans grafiklerindeki her düşüş, yukarıda örnekleri verilen ölçüm hatalarından kaynaklanmamaktadır. Örneğin, Şekil 3’te 0-75 Hz bandında görülen koherans düşüşleri, ölçüm sistemiyle ilgili bir hatadan değil, mesnetleme yönteminin, tam olarak (uzayda) serbest salınım sağlayamadığını gösteren düşüşlerdir. Bu tarz düşüşler istenilirse de, uygulama zorlukları nedeniyle kabul edilebilir limitlerde tutulmaya çalışılmaktadır. Literatürde belirtildiği üzere, ölçüm yapılan nesnenin analiz edilen rezonans frekansları yeterince uzaksa bu durum önemli bir sorun teşkil etmemektedir [4, 20]. Öte taraftan,

VMT çoklu koherans grafiğinde, EMA'dan daha fazla koherans düşüşleri görülmektedir. Bu farklılığın iki nedeni şu şekilde sayılabilir: İlk neden, VMT metodunda, tek eksenli ve lokal ölçüm alan ivmeölçer yerine, çok eksenli ve global ölçüm alan mikrofon kullanılmasıdır. Bu yüzden, traversin diğer eksenlerinde meydana gelen (yatay, boyuna, burulma vb.) rezonansların, VMT koherans grafiklerini daha fazla etkilediği düşünülmektedir. İkinci neden ise, ortamda sürekli mevcut olan gürültülerin, frekans değerlerine bağlı olarak, çeşitli koherans düşüşlerine neden olmasıdır. Bu etkilerin en düşük seviyeye indirgenebilmesi için Şekil 1'de görülen ses dalgası yönlendirici siperlik kullanılmıştır. Geline nokta, EMA kadar olmasa da, oldukça azaltılan bu koherans düşüşlerinin, modal parametre belirlemelerinde tutarsızlığa sebebiyet verip vermeyeceği ilerleyen bölümde incelenecektir. Diğer bir husus, Şekil 3'teki VMT FRF şiddet değerlerinin, EMA'nın aksine, frekans değerleri yükseldikçe düşmesidir. Bu düşüş, çoklu koherans grafiğinde görülmemekle birlikte, modal parametre belirlemelerinde hatalara sebebiyet verebileceği düşünülmektedir. Bu konu da ilerleyen bölümde incelenecektir.



Şekil 2. Senkronize bir şekilde yürütülen EMA ve VMT testlerine ait örnek ham ve yarı işlenmiş veri grafikleri: a) Kuvvet (N)-zaman (milisaniye) kaydı ile FFT analizi, b) Ses basıncı (Pa)-zaman (milisaniye) kaydı ile FFT analizi, c) İvme (m/s^2)-zaman (milisaniye) kaydı ile FFT analizi



Şekil 3. VMT ve EMA metoduyla elde edilen 54 FRF ve bunlara ait çoklu koherans (MCOH) grafikleri

3. Bulgular ve Tartışma

Modal test ve analizler ile elde edilmesi istenilen birinci parametre, rezonans frekanslarıdır. Literatürde belirtildiği üzere, rezonans frekansları, genel hatlarıyla teste tabi tutulan nesnenin elastisite modüllerinden, kütesinden, geometrisinden ve mesnetleme biçiminden etkilenmektedir [3, 21]. Bu parametrelerin değişmediği eşdeğer test koşullarında, uygulanan modal test metodu değişse de, tespit edilen rezonans frekansları değişmemelidir. EMA ve VMT testleri sonucunda elde edilen rezonans frekanslarının karşılaştırılması Tablo 2’de sunulmuştur. Bu tablo incelendiğinde, VMT ve EMA sonuçlarının, kendi içlerinde ve birbirleri arasında oldukça düşük (en fazla %0,17) farklılığa sahip olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sapma yüzdesi, literatürdeki [14] önceki VMT-EMA karşılaştırması çalışmasından (%1) da çok daha düşüktür. Ancak dikkat edilmesi gereken bir husus, EMA-VMT farklılığının 1100 Hz’e kadar çok daha düşük seyrederken (en fazla %0,04), bu frekans değerinden sonra giderek artmasıdır.

Tablo 2. EMA ve VMT metotlarıyla belirlenen rezonans frekanslarının karşılaştırılması

Eksen-Rezonans No	EMA Ortalama Frekans (Hz)	EMA Sapma Yüzdesi	VMT Ortalama Frekans (Hz)	VMT Sapma Yüzdesi	EMA-VMT Farkı
Z-1	84,99	0,09%	84,96	0,32%	-0,04%
Z-2	250,22	0,05%	250,15	0,01%	-0,03%
Z-3	488,33	0,02%	488,43	0,05%	0,02%
Z-4	769,19	0,04%	768,92	0,06%	-0,04%
Z-5	1087,30	0,05%	1087,72	0,01%	0,04%
Z-6	1430,32	0,04%	1432,70	0,26%	0,17%

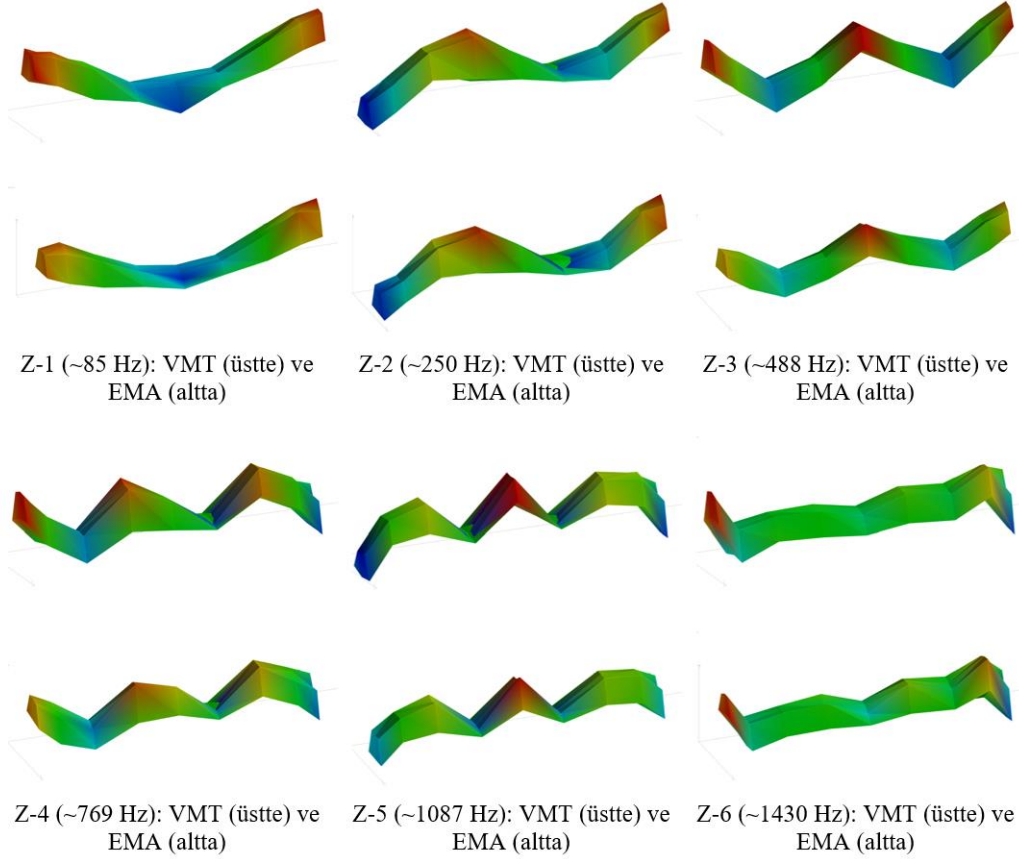
Modal test ve analizler sonucunda elde edilmesi istenilen ikinci parametre modal sönümlenme oranlarıdır. Modal teste tabi tutulan nesnenin FRF grafiğinin, rezonans frekanslarında, zirve çıkma ve inme hızı (yarım-güç metodu için) veya FRF’in kalite faktörünün faz (derece) değerleri ile ilişkisi (modal daire metodu için), yani teste tabi tutulan nesnenin o frekanstaki modal sönümlenme performansı, en önemli modal parametrelerden biridir [3]. Teste tabi tutulan nesnenin sönümlenme davranışında, moleküler bağ kuvvetlerinin, yoğunluğunun, içsel sürtünme ve aderans sağlayıcılarının, elastisite modülünün, hava boşluğu/su/nem içeriğinin ve çatlak muhtevasının

etkileri söz konusudur [3, 21]. Dolayısıyla bu parametrelerin değişmediği eşdeğer test koşullarında, uygulanan modal test metodu değişse de, tespit edilen modal sönümlenme oranları değişmemelidir. Ayrıca, sunulan bilgilerden anlaşıldığı üzere, rezonans frekansının ve sönümlenme oranının birbirleriyle bazı ortak etkileri ve sonuçları olduğu gibi, ayrıştırdıkları birçok parametre de söz konusudur. Bu yüzden, birinin artması, azalması veya sabit kalması, her zaman, diğeri ile ilişkilendirilebilir doğru veya zıt bir davranış sergileyeceği anlamına gelmemektedir. Dolayısıyla, sönümlenme oranlarının da doğru bir şekilde tespit edilebilirliği, modal analiz yöntemleri için önemli bir üstünlüktür. Bu çalışmada yapılan EMA ve VMT testleri sonucunda, Tablo 2'deki rezonanslara ait olmak üzere, "modal-daire" yöntemiyle [3] hesaplanan modal sönümlenme oranı değerleri Tablo 3'te sunulmuştur. Görüldüğü üzere, ilk 3 rezonans frekansında VMT metodu kendi içinde daha tutarlı sonuçlar sağlamakta, VMT ile EMA sonuçları birbiriyle en fazla %1,17'lik farklılık göstermektedir. Ancak dördüncü ve beşinci rezonans (750-1100 Hz) gerek EMA, gerekse VMT sonuçlarının kendi içlerindeki tutarsızlıklarının arttığı ve aralarındaki fark yüzdesinin yaklaşık %21'lere ulaştığı görülmektedir. Altıncı rezonans itibariyle ise VMT sonuçları tamamen tutarsız hale gelmiştir. Sonuç olarak, hazırlanan VMT test düzeneğinin, 75-750 Hz frekans bandında, modal sönümlenme oranlarını tespit etme bakımından, EMA testi kadar, hatta daha hassas sonuçlar sağladığı söylenebilir. Ancak frekans değerleri arttıkça hassasiyeti düşmekte ve 1100 Hz dolaylarından sonra, bu parametre tespiti bakımından, tamamen kullanılamaz hâle gelmektedir. Rezonans frekansı tespiti bakımından düşük yüzdesel değerlere sahip olan bu sapma artışları, sönümlenme oranı tespitlerinde çok daha yüksek hâle gelmektedir. Bu durum, literatürdeki önceki VMT-EMA karşılaştırma çalışmasında [14] görülen %1'e varan rezonans frekansı farklılıkları ve %700'e varan sönümlenme oranı farklılıklarının da ana nedeni olabilir. Ayrıca, Tablo 3'te geçen, ilk üç rezonansa ait "güvenilir" sönümlenme oranları incelendiğinde, kimi rezonansta VMT sonuçlarının, kimi rezonansta ise EMA sonuçlarının daha yüksek çıktığı, dolayısıyla literatürdeki önceki çalışmada [14] değinilen "hava moleküllerinin VMT metoduna ait sönümlenme oranlarını artırması" çıkarımının, en azından, bu çalışma için hazırlanan VMT test düzeneğinde söz konusu olmadığı görülmüştür.

Tablo 3. EMA ve VMT metotlarıyla belirlenen sönümlenme oranlarının karşılaştırılması

Eksen-Rezonans No	EMA Ortalama Sönümlenme (Ç)	EMA Sapma Yüzdesi	VMT Ortalama Sönümlenme (Ç)	VMT Sapma Yüzdesi	EMA-VMT Farkı
Z-1	0,008151	3,62%	0,008098	1,42%	-0,65%
Z-2	0,007883	3,76%	0,007933	1,15%	0,63%
Z-3	0,005985	1,47%	0,005915	1,98%	-1,17%
Z-4	0,006651	10,22%	0,005257	8,62%	-20,96%
Z-5	0,005623	2,36%	0,005154	4,70%	-8,34%
Z-6	0,006955	3,49%	0,011720	100,07%	68,52%

Modal test ve analizler sonucunda elde edilmesi istenilen üçüncü parametre, mod şekilleridir (modal salınım şablonları, mode shapes). Mod şekillerini etkileyen unsurlar genellikle teste tabi tutulan nesnenin geometrisiyle ve mesnetleme biçimi ile ilgili olup [3, 4, 20], bu parametrelerin değişmediği test koşullarında, uygulanan modal test metodu değişse de tespit edilen mod şekilleri birbiriyle örtüşmelidir. Bu şablonlar, uygun sonlu eleman analizleriyle kolay ve hassas bir şekilde belirlenebilse de sonlu eleman modellerinin yeterli doğrulukta hazırlanması her zaman mümkün olmamakta ve/veya mesnet rijitliği, yoğunluk, Poisson oranı, rezonans frekansları ve sönümlenme oranları da dahil birçok modelleme parametresine ihtiyaç duyulmaktadır [20]. Bu yüzden, mod şekillerinin de doğru bir şekilde tespit edilebilirliği, modal analiz yöntemleri için önemli bir üstünlüktür. Şekil 4'te bu çalışma kapsamında hazırlanan VMT ve EMA test düzeneleri ile elde edilen ve Tablo 2'de geçen rezonanslara ait mod şekilleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Görüldüğü üzere, mod şekillerinin belirlenmesinde, kullanılan VMT test düzeneği, tüm frekans değerlerinde, EMA ile oldukça benzer sonuçlar sağlamaktadır.



Şekil 4. VMT (üstte) ve EMA (altta) metotlarıyla elde edilen mod şekillerinin karşılaştırılması

4. Sonuçlar ve Öneriler

Çalışma içerisinde sunulan detaylı literatür taraması ve yürütülen karşılaştırmalı analizler ile ulaşılan sonuçlar, maddeler halinde, aşağıda sunulmuştur:

- Günümüzde dünya genelinde en yaygın uygulanan ve kabul gören deneysel modal analiz metodu, titreşim esaslı modal analizlerdir (EMA). Ancak bu metot, “temaslı” ölçüm gerektirmektedir. Ayrıca yüksek frekansların (>1 kHz) doğru ve tutarlı bir şekilde okunabilmesi için, ivmeölçerlerin test elemanına bağlanması esnasında özel dikkat gerekmektedir, ihtiyaç duyulan yöntemler, özellikle saha çalışmalarına elverişli olmayabilmektedir.
- EMA metodunda kullanılan ivmeölçerler “lokal” ölçüm almaktadır ve test elemanlarının üzerindeki bir noktaya yapıştırılan ivmeölçerlerin, bazı rezonansları görememesi, yani bu rezonanslara ait modal düğüm noktalarına denk gelmesi riski vardır.
- Sayılan bu ve benzeri faktörler nedeniyle EMA metoduyla saha analizleri yapılması çeşitli dezavantajlar içermektedir. Bu dezavantajlar, birçok test elemanı için geçerli olup, demiryolu taşıt bileşenlerinin veya yapı elemanlarının analizleri de buna örnek teşkil etmektedir.
- Bu çalışmada, literatürde ender incelenmiş bir metot olan, vibro-akustik modal analizlerin (VMT), bu bağlamda, EMA için uygun bir alternatif olup olmayacağı araştırılmıştır. Literatürdeki önceki çalışmalarda, bu alternatif metodun, rezonans frekansı tespitlerinde, EMA ile benzer, yüksek doğruluk ve tutarlılıkta sonuçlar sağladığı, ancak sönümlenme oranlarında %700'e varan hatalara sebebiyet verebildiği belirtilmiştir.
- Bu çalışmada kapsamında, yeni bir VMT test düzeneği hazırlanmış ve aynı demiryolu traversi üzerinde senkronize bir şekilde VMT ve EMA testleri yürütülmüştür. Analizler sonucunda, VMT metoduyla, rezonans frekanslarının, sönümlenme oranlarının ve mod şekillerinin, uygun

bir frekans bandında, EMA testleri kadar hassas ve tutarlı bir şekilde belirlenebildiği tespit edilmiştir.

Hazırlanan VMT test düzeneği ile gelecekte saha ölçümleri yürütülmesi planlanmaktadır. Öte taraftan bu metodun, çeşitli test düzeneği değişiklikleri denenerek (örneğin farklı mikrofon türleri ve ses dalgası yönlendirici siperlikler ile) ve farklı demiryolu veya demiryolu taşıtı elemanlarıyla veya uygun görülebilecek başka herhangi bir test elemanı ile denenmesi de mümkün olup, çalışmaların bu yönde sürdürülmesi önerilir.

Teşekkür

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Daire Başkanlığı (ERÜ/BAP) tarafından desteklenmiş (Proje No: FCD-2021-11483) olup, araştırmacılar, destekleri için ERÜ/BAP yetkililerine teşekkürlerini sunar.

Kaynakça

- [1] H. E. D. Bree, "The Microflow Ebook, Chapter-2: Sound & Vibration," 2009. [Online]. Available: https://www.microflow.com/assets/uploads/Publications/ebook_2_sound_and_vibration.pdf [Accessed: 02.03.2023]
- [2] F. Çeçen, B. Aktaş, "B70 Tipi Demiryolu Traverslerinde Polipropilen Fiber Kullanımının Deneysel İncelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 15, pp. 158-169, Ocak 2022, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.990316>
- [3] F. Çeçen, A. Özbayrak, B. Aktaş, "Experimental modal analysis of fly ash-based geopolymer concrete specimens via modal circles, mode indication functions, and mode shape animations," *Cement and Concrete Composites*, vol. 137, ID: 104951, Mart 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104951>
- [4] B. Aktaş, F. Çeçen, H. Öztürk, M. B. Navdar, İ. Ş. Öztürk, "Comparison of prestressed concrete railway sleepers and new LCR concrete sleepers with experimental modal analysis," *Engineering Failure Analysis*, vol. 131, ID: 105821, Ocak 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105821>
- [5] Siemens, "What is the acoustic quantity called Q?," 2019, [Online]. Available: <https://community.sw.siemens.com/s/article/what-is-the-acoustic-quantity-called-q> [Accessed: 03.03.2023]
- [6] G. M. S. Gidrao, P. A. Krahl, R. Carrazedo, "Characterization of concrete internal damping," in *3º Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto Armado São Carlos*, São Paulo, Brasil, 2018
- [7] W. L. Guesser, L. P. R. Martins, "Stiffness and vibration damping capacity of high strength cast irons," in *25th SAE BRASIL International Congress and Display*, Brazil, 2016
- [8] F. Çeçen, B. Aktaş, "Yeni LCR Tipi Traverslerin Demiryolu Hat Rijitliğine Etkisinin Araştırılması," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 16, pp. 36-50, Temmuz 2022, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.1105999>
- [9] F. Çeçen, B. Aktaş, "Yeni Yeşil-Travers Modelinin B70 Tipi Öngerilmeli Traverslerle Karşılaştırmalı İncelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 17, pp. 1-13, Ocak 2023, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.1107683>
- [10] F. Çeçen, B. Aktaş, H. Öztürk, M. B. Navdar, İ. Ş. Öztürk, "Behaviour of new LCR and ordinary prestressed concrete railway sleepers under repeated impact loads," *Construction and Building Materials*, vol. 319, ID: 126151, Şubat 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126151>
- [11] *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*, ASTM C215-19, USA, 30.01.2020
- [12] K. Matsuoka, T. Watanabe, "Application of a Frequency-Based Detection Method for Evaluating Damaged Concrete Sleepers," *Advances in Structural Health Monitoring*, 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.82711>
- [13] A. Bekele, N. Ryden, A. Gurmarsson, B. Birgisson, "Automated Non-contact Resonance Excitation Method to Assess Low Temperature Dynamic Modulus of Asphalt Concrete," *Journal of Nondestructive Evaluation*, pp. 38-43, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s10921-019-0584-7>

- [14] W. D. Zhu, J. M. Liu, Y. F. Xu, H. Q. Ying, "A modal test method using sound pressure transducers based on vibro-acoustic reciprocity," *Journal of Sound and Vibration*, Vol: 333, pp. 2728-2742, Haziran 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.02.004>
- [15] G. P. Guimaraes, R. Pirk, C. D. Souto, L. C. S. Goes, "Acoustic Modal Analysis of Cylindrical-Type Cavities," in *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2011*, Leuven, Belgium, Temmuz 2011, pp. 3160-3167
- [16] G. Accardo, B. Peeters, F. Bianciardi, K. Janssens, "Experimental Acoustic Modal Analysis of an Automotive Cabin," *Sound & Vibration*, Vo. 49, pp. 10-18, Mayıs 2015, doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-15236-3_4
- [17] S. L. Gjelstrup, "What is Modal Analysis: The Ultimate Guide," 2021. [Online]. Available: <https://dewesoft.com/daq/what-is-modal-analysis#sdf-fitting> [Accessed: 03.03.2023]
- [18] "Condenser (kapasitif) mikrofon nedir?," 2022. [Online]. Available: <https://www.elektrikrehberiniz.com/elektronik/condenser-mikrofon-nedir-127452/> [Accessed: 03.03.2023]
- [19] G. M. Simith, "Sound and Noise Measurement with Microphone Transducers," 2022. [Online]. Available: <https://dewesoft.com/daq/sound-measurement-with-microphone-sensors> [Accessed: 03.03.2023]
- [20] F. Çeçen, B. Aktaş, "Modal and harmonic response analysis of new CFRP laminate reinforced concrete railway sleepers," *Engineering Failure Analysis*, vol. 127, ID: 105471, Eylül 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105471>
- [21] F. Çeçen, B. Aktaş, H. Öztürk, İ. Ş. Öztürk, M. B. Navdar, "Comparative modal analysis of B70 and LCR-6 type railway sleepers after repeated impact loads," *Construction and Building Materials*, vol. 336, ID: 127563, Haziran 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127563>

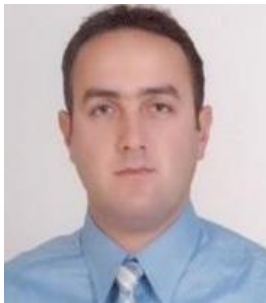
Özgeçmiş



Ferhat ÇEÇEN

TCDD'nin çeşitli birimlerinde 16 yıldan fazla hizmet veren yazar, doktora eğitimini Erciyes Üniversitesi Ulaştırma Bilim Dalında tamamlamıştır. İlgilinin, milli demiryolu traversleri geliştirilmesi amaçlı ar-ge ve patent çalışmaları devam etmektedir.

E-Posta: ferhatcecen@tcdd.gov.tr



Bekir AKTAŞ

Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim dalında öğretim üyesidir. Karayolu ve Demiryolu mühendisliği alanında çalışmaları devam etmekte olup yerli ve yabancı dergilerde yayımlanan birçok makalesi bulunmaktadır.

E-Posta: baktas@erciyes.edu.tr



Ahmet ÖZBAYRAK

1979 tarihinde doğmuştur. Lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimini Erciyes Üniversitesinde tamamlamıştır. Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesidir Yapı mekaniği konusunda, betonarme yapılar, çelik yapılar, metalik pasif çelik sönümleyiciler ve geopolimer beton konularında araştırma ve projeler yürütmektedir.

E-Posta: ozbayrak@erciyes.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Ferhat ÇEÇEN: Kaynaklar, Görselleřtirme, Metodoloji, Yazılım, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Bekir AKTAŞ: Metodoloji, Yazılım, İnceleme, Kontrol, Dođrulama, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme. Ahmet ÖZBAYRAK: Kavramsallaştırma, Yazılım, İnceleme, Kontrol, Dođrulama, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.