



Investigation of environmental and time depended effects on historical masonry minarets by vibration test

Yusuf Yanık^{1*}, Temel Türker¹, İsmet Çalık², Ömer Yıldırım³

¹Department of Civil Engineering, Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Trabzon, 61080, Turkey

²Trabzon General Directorate, Directorate General of Foundations, Trabzon, 61030, Turkey

³Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Gümüşhane University, Gümüşhane, 29100, Turkey

Highlights:

- To perform vibration tests on historical masonry minarets
- To process the data received with the vibration measurement system
- To evaluate the environmental and time depended on effects of received data before and after restoration of minarets

Keywords:

- Environmental effects
- Dynamic characteristics
- Restoration
- Historical masonry minarets
- Vibration test

Article Info:

Research Article
Received: 03.03.2021
Accepted: 20.08.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.890555

Acknowledgement:

The authors thank the Trabzon General Directorate of Foundations

Correspondence:

Author: Yusuf Yanık
e-mail:
yusufyanik@ktu.edu.tr
phone: +90 537 810 0761

Graphical/Tabular Abstract

Historical masonry minarets are exposed to environmental and time-dependent effects. For this purpose, current structural behavior of these structures should be determined. Methods based on the dynamic characteristics are very effective in the evaluation of structural behavior. In this study, dynamic characteristics of Tabakhane and Hacı Kasım Muhittin Mosque Minarets in Trabzon province with different environmental effects and different time intervals were experimentally obtained and compared.

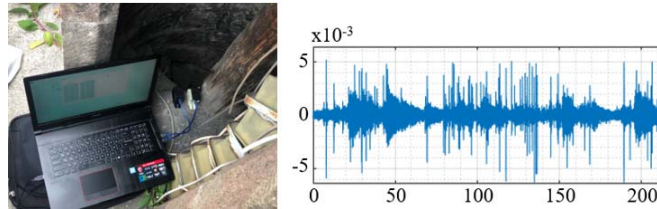


Figure A. View from Ambient Vibration Test

Purpose: In this study, AVT measurements of two minarets were carried out with the developed measurement system. The measurement results obtained before or after the restoration were evaluated using the CEVS measurement system. The obtained measurement data were analyzed in CEVA and ARTEMIS programs. The aim is to prove the accuracy of CEVA program outputs. In addition, the dynamic characteristic values obtained as a result of the analysis were compared with the previous study and the reasons for the differences that occurred were examined depending on the environmental effects and time.

Theory and Methods:

AVT measurements of these minarets were taken with the developed measuring system (CEVS). The received measurement data were processed in analysis program (CEVA) developed software. In addition, the analysis results were compared with the results obtained from ARTEMIS program. Also, the obtained dynamic characteristic values were compared with previous study and reasons for the differences that occurred were examined depending on environmental effects and time.

Results:

For Tabakhane Minaret, when the pre-restoration measurement values were compared with the previous study data, it was determined that the 1st and 2nd frequency values decreased, and the 3rd frequency value increased. It is thought that the tunnels and infrastructure works made in this area after 2014 were effective in this change. Before the restoration, the natural frequency values of Measurement 2 were 1.511, 1.587 and 4.959Hz, respectively, while the values of the last measurement (Measurement 4) after the restoration were obtained as 1.579, 1.640 and 4.982Hz. As expected, it was occurred an increase in natural frequencies after the restoration.

Conclusion:

In this study, the dynamic parameters obtained from CEVA and ARTEMIS programs were compared. It was clearly seen that the values were very close to each other. In measurements carried out in minarets, it was determined that first and second frequencies in minarets were very close to each other and they are in 1-4Hz frequency rage. The third frequency is approximately bigger than 3 times of first frequency. An increase in frequencies was occurred as a result of restorations. It was determined that there is a general decrease in the first two natural frequencies due to environmental effects.



Tarihi yığma minarelerde çevresel ve zamana bağlı etkilerin titreşim testi yardımıyla incelenmesi

Yusuf Yanık^{1*}, Temel Türker¹, İsmet Çalık², Ömer Yıldırım³

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, Türkiye

²Vakıflar Genel Müdürlüğü, Trabzon Genel Müdürlüğü, 61030, Trabzon, Türkiye

³Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Tarihi yığma minarelerde titreşim testlerini gerçekleştirmek
- Titreşim ölçüm sistemi ile alınan verileri işlemek
- Minarelerin restorasyon öncesi ve sonrası alınan verilerin çevresel ve zamana bağlı olarak etkilerin değerlendirilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 03.03.2021

Kabul: 20.08.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.890555

Anahtar Kelimeler:

Çevresel etkiler,
dinamik karakteristikler,
restorasyon,
tarihi yığma minareler,
titreşim testi

ÖZ

Tarihi yapılar geçmişte günümüze bağlayan önemli eserlerdir. Çeşitli sebeplerle hasar gören tarihi yapılar restore edilmeli, onarılmalı veya güçlendirilmelidir. Bu işlemler sonrasında tarihi yapıların çevresel ve zamana bağlı değişiklikler etkisindeki davranışları takip edilmelidir. Bu amaçla tarihi yapıların güncel yapısal davranışlarının belirlenmesi gerekmektedir. Yapısal davranışın değerlendirilmesinde yapının dinamik karakteristiklerine dayalı yöntemler oldukça etkin olmaktadır. Bu çalışmada, Trabzon ilinde bulunan Tabakhane ve Hacı Kasım Muhittin Cami Minarelerinin dinamik karakteristikleri farklı çevresel etkiler ve farklı zaman aralıklarıyla deneysel olarak elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu minarelerinin deneysel ölçümleri çevresel titreşimler altında araştırma ekibimiz tarafından geliştirilen kablolu ve kablolu veri alabilen Civil Engineering Vibration System (CEVS) ile gerçekleştirilmiştir. Tabakhane Cami Minaresinde restorasyon öncesinde farklı zamanlarda alınan iki ölçüm ve restorasyon sonrasında farklı zamanlarda alınan iki ölçüm sonuçları değerlendirilmiştir. Hacı Kasım Muhittin Cami Minaresinin restorasyondan önceki ve sonraki ölçüm sonuçlarıyla restorasyondan uzun süre sonra farklı zamanlarda alınan iki ölçüm sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ölçüm verileri araştırma ekibimiz tarafından geliştirilen Civil Engineering Vibration Analysis (CEVA) programında ve ARTEMIS programında ayrı ayrı analiz edilmiştir. Ayrıca her iki minare için sinyal işleme sonucu elde edilen dinamik karakteristikler daha önce yapılmış çalışmalarla kıyaslanmıştır. Bu değerler arasında oluşan farklılıkların sebepleri çevresel etkilere ve zamana bağlı olarak irdelenmiştir.

Investigation of environmental and time depended effects on historical masonry minarets by vibration test

H I G H L I G H T S

- To perform vibration tests on historical masonry minarets
- To process the data received with the vibration measurement system
- To evaluate the environmental and time depended on effects of received data before and after restoration of minarets

Article Info

Research Article

Received: 03.03.2021

Accepted: 20.08.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.890555

Keywords:

Environmental effects,
dynamic characteristics,
restoration,
historical masonry minarets,
vibration test

ABSTRACT

Historical structures are important pieces that connect past to present. Historical structures damaged for various reasons should be restored, repaired and strengthened. After these processes, the behavior of historical structures affected by environmental and time-dependent effects should be followed. For this purpose, current structural behavior of historical structures should be determined. Methods based on the dynamic characteristics of structure are very effective in the evaluation of structural behavior. In this study, dynamic characteristics of Tabakhane and Hacı Kasım Muhittin Mosque Minarets in Trabzon province with different environmental conditions and different time intervals were experimentally obtained and compared. Experimental measurements of these minarets were carried out under environmental vibrations with Civil Engineering Vibration System (CEVS), which was developed by our research team, which can receive wired and wireless data. In Tabakhane Mosque Minaret, two measurements taken at different times before restoration and two measurements taken at different times after restoration were evaluated and compared each other. Measurement results of Hacı Kasım Muhittin Cami Minaret before and after restoration and two measurements results taken at different times long after restoration were evaluated. The measurement data were analyzed separately in Civil Engineering Vibration Analysis (CEVA) program developed by our research team and in ARTEMIS program. In addition, dynamic characteristics obtained as a result of signal processing for both minarets were compared with previous studies. The reasons for differences in these values were examined depending on environmental condition and time.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *yusufyanik@ktu.edu.tr, temelturker@ktu.edu.tr, ismetcalik@yahoo.com.tr, omeryildirim@gumushane.edu.tr / Tel: +90 537 810 0761

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son dönemlerde tarihi yapılar oldukça fazla ilgi görmeye başlamıştır. Tarihi yapıların uzun süreli hizmet verebilmesi ve bu yapıların gelecek nesillere ulaştırılabilmesi önemli bir durum olmuştur. Bu amaçla tarihi yapıların dinamik davranışlarının iyi bilinmesi, bakım, onarım ve güçlendirilmelerinin doğru bir biçimde yapılması gerekmektedir. Deprem ve sel gibi çeşitli doğal afetlerden ya da patlama ve çarpma gibi insan kaynaklı hasarlardan kaynaklanan birçok nedenden dolayı bu yapıların kullanımı zorlaşabilmektedir. Bu durumlar ise hem can kayıplarına hem de büyük maddi zararlara neden olabilmektedir.

Tarihi yapıların dinamik davranışlarının belirlenebilmesi için günümüzde analitik ve deneysel yöntemler kullanılmaktadır. Şinik Köprüsü üzerinde sonlu eleman (SE) model iyileştirmesinin deprem davranışına etkisini araştırmak amacıyla ANSYS programıyla üç boyutlu modal analiz sonucunda doğal frekans ve mod şekilleri belirlenmiştir. Operasyonel modal analiz (OMA) yöntemiyle köprünün dinamik karakteristikleri belirlenmiş ve köprünün mevcut durumunu yansıtan SE modeli hazırlanmıştır [1]. Taş kemer köprülerin dinamik karakteristiklerini deneysel ve teorik olarak belirlenmiş ve OMA yardımıyla Şenyuva ve Osmanlı köprülerinin SE modelleri iyileştirilmiştir [2]. Çevresel titreşimler altında deneysel olarak ölçülen temel mühendislik yapılarını temsil eden laboratuvar modelleri üzerinde bu yapıların hasar durumlarının tespiti ve değerlendirilmesi için bir yaklaşım üzerinde çalışılmıştır [3]. Bursa'da yer alan yedi adet tarihi minarenin dinamik karakteristikleri çevresel titreşim testleriyle (ÇTT) değerlendirilmiştir. Minarelerin SE modelleri oluşturulduktan sonra malzeme özelliklerinde ve mesnetlenme koşullarında güncelleme yapılarak SE analizlerinden alınan sonuçlarla deneysel ölçüm sonuçları kıyaslanmıştır [4]. Şiddetli bir rüzgârda hasar gören üç minarede yapısal incelemeler yapılmış ve hasarın nedeni ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Kendi ağırlığı ve rüzgâr yüklerine göre minarenin doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme davranışı altında gerçekleştirilmiştir [5]. Tarihi duvar minarelerinin doğrusal ve doğrusal olmayan deprem davranışları araştırılmıştır [6]. Geometrik özelliklerin etkisini Bursa'daki yedi adet tarihi yığma minarenin dinamik davranışı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre geometrik özelliklerin minarelerin dinamik davranışları üzerindeki etkisi irdelenmiştir [7]. Sayısal ve deneysel analizler yapılarak bir yığma tipi tarihi minarenin modal parametreleri araştırılmıştır. Deneysel çalışma verilerine göre minarenin SE modelinde yapının modal parametrelerinde kalibrasyon yapılmıştır [8]. Molla Siyah Caminin dinamik özellikleri restorasyon öncesinde ve sonrasında değerlendirilmiştir [9]. Ahşap çatılı tarihi yığma camilerin ahşap çatısının yerine betonarme kubbe yapılmasının tarihi taş duvarlı camilerin dinamik özelliklerini üzerindeki etkileri araştırılmıştır [10]. Deneysel ve sayısal yöntemleri kullanarak tarihi bir minarenin sismik davranışı ve rehabilitasyonu incelenmiştir [11]. Van Ulu

Cami Minaresinin Van depreminden sonra önemli derecede hasar görmesinin nedenini öğrenmek amacıyla minarenin SE modeli oluşturulup deprem davranışlarını incelenmiş ve operasyonel modal analiz yöntemiyle de minarenin dinamik karakteristikleri değerlendirilmiştir [12]. Restore edilen üç tarihi taş minarenin dinamik özellikleri ÇTT verileri kullanılarak incelenmiştir [13]. İspanya'da bulunan tarihi E. Torroja köprüsünün deneysel olarak dinamik karakteristikleri belirlenmeye çalışılmış ve köprünün üç boyutlu SE modeli deneysel sonuçlar ışığında iyileştirilmiştir [14]. İtalya'da bulunan Carmine çan kulesinin analitik modeli SE yardımıyla oluşturulmuş, kulenin nümerik analizleri ve ÇTT verilerine bağlı olarak deneysel analizleri gerçekleştirilmiştir [15]. Dinamik analiz ve dinamik mukavemet değerlendirmesi için hassas bir dinamik yapısal sonlu eleman modeli oluşturulmuş, mod şekillerini ve doğal frekansları kullanarak bir yapının SE modelinin belirsiz parametrelerini düzeltmek için dinamik SE modelinde güncelleme yapılmıştır [16]. Tarihi Lala Paşa Caminin sonlu eleman modeli üzerinde Erzincan depremi yer hareketi kayıtları altında analizi gerçekleştirilmiş, caminin yük taşıma kapasitesini hesaplamak amacıyla mevcut yöntemler değerlendirilmiş ve düzlem dışı duvar kapasitesini elde etmek için modeller önerilmiştir [17]. Lala Mustafa Paşa Caminin taşıyıcı eleman malzeme özelliklerini belirlemek için literatürde mevcut yığma malzeme modelleri incelenerek teorik bir yaklaşım ortaya koyulmuş ve yapının SE modeli de oluşturularak teorik modal analizi gerçekleştirilmiştir. OMA yöntemiyle de deneysel modal parametreler irdelenerek yapının malzeme özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca yapının göçme mekanizması araştırılmıştır [18]. Yığma duvarların deprem dayanımları eşdeğer statik analiz yöntemiyle incelenmiştir. Payandalı referans duvarın ve Süleymaniye Caminin kible duvarının deprem katsayısına karşı yatay yer değiştirme eğrileri bulunmuştur. Referans duvar üzerindeki hesaplar sonlu eleman programıyla elde edilmiştir [19]. Erzincan Değirmenliköy Kilisesi hakkında bilgiler toplanmış ve makro modelleme tekniği kullanılarak yapısal model oluşturulmuştur. Yapısal model OMA verilerine göre kalibre edilmiş ve yıkık olan apsis kısmını kurgulayarak modele eklenmiştir. Model üzerinde deprem ivme kayıtları kullanılarak dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir [20]. Dört yüzlü elemanlar ve sinir ağı tabanlı güncelleme yöntemleri kullanılarak çeşitli modellerde küçük değişiklikler tespit edilmeye çalışılmış ve sinir ağları ile sayısal eleman modeller için güncelleme yönteminin doğruluğu deneysel örneklerle doğrulanmıştır [21]. İlyasbey Cami ve Minaresinin üç boyutlu SE modelleri oluşturulmuş, çevresel titreşim ölçümleri ve model kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Kalibre edilen SE modeli üzerinde statik ve dinamik yükler etkisinde doğrusal analizler gerçekleştirilmiştir [22]. Çelik yapı elemanının elastisite modülü ÇTT verilerinden elde edilen dinamik karakteristikler kullanılarak model kalibrasyon yöntemiyle belirlenmiştir [23]. Tarihi yapıların sismik performanslarının değerlendirilmesi için basitleştirilmiş bir performans

değerlendirme yöntemi üzerinde çalışılmıştır. Bu değerlendirme yöntemi 2011 Van depreminde hasar gören Kaya Çelebi Caminin deprem performansının incelenmesinde kullanılmıştır [24].

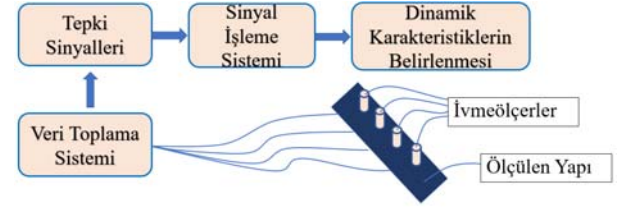
Bu çalışmada, Trabzon ilinin Ortahisar ilçesine bağlı Tabakhane Cami Minaresinin ve Hacı Kasım Muhittin Cami Minaresinin ÇTT ölçümleri geliştirilen ölçüm sistemiyle gerçekleştirilmiştir. Tabakhane Cami Minaresinde şerife seviyesinde minare çekirdeğine yerleştirilen CEVS ölçüm sistemiyle restorasyon öncesinde farklı zamanlarda alınan iki ölçüm ve restorasyon sonrasında farklı zamanlarda alınan iki ölçüm sonuçları değerlendirilmiştir. Hacı Kasım Muhittin Cami Minaresinin restorasyondan önce alınan ölçüm sonuçları, restorasyondan hemen sonra ve restorasyondan uzun süre sonra alınan iki ölçüm sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Elde edilen ölçüm verileri CEVA ve ARTEMİS programlarında analiz edilmiştir. Buradaki amaç CEVA program çıktılarının doğruluğunun kanıtlanmasıdır. Ayrıca analiz sonucu elde edilen dinamik karakteristik değerleri daha önce yapılmış çalışmayla kıyaslanmış ve oluşan farklılıkların sebepleri çevresel etkilere ve zamana bağlı olarak irdelenmiştir.

2. OPERASYONEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİ (OPERATIONAL MODAL ANALYSIS METHOD)

OMA yönteminde yapı çevresel etkilerle titreştirilmekte ve bu etkiler altında yapının tepkileri ölçülmektedir (Şekil 1) [25-27]. Bu amaçla geliştirilmiş kablolu ve kablosuz ölçüm sistemleri bulunmaktadır. Bu çalışmada gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri için Civil Engineering Vibration System (CEVS) geliştirilmiştir. Sistemin donanım kısmında ivmeölçer, arduino ve kablolar bulunmaktadır. Alınan verilerin analizi için MATLAB ortamında CEVA analiz programı geliştirilmiştir (Şekil 2) [28].

İvmeölçerler $\pm 2g$, $\pm 4g$ ve $\pm 8g$ hassasiyete sahip olabilmektedir. Titreşim testini rijit cisimlerde

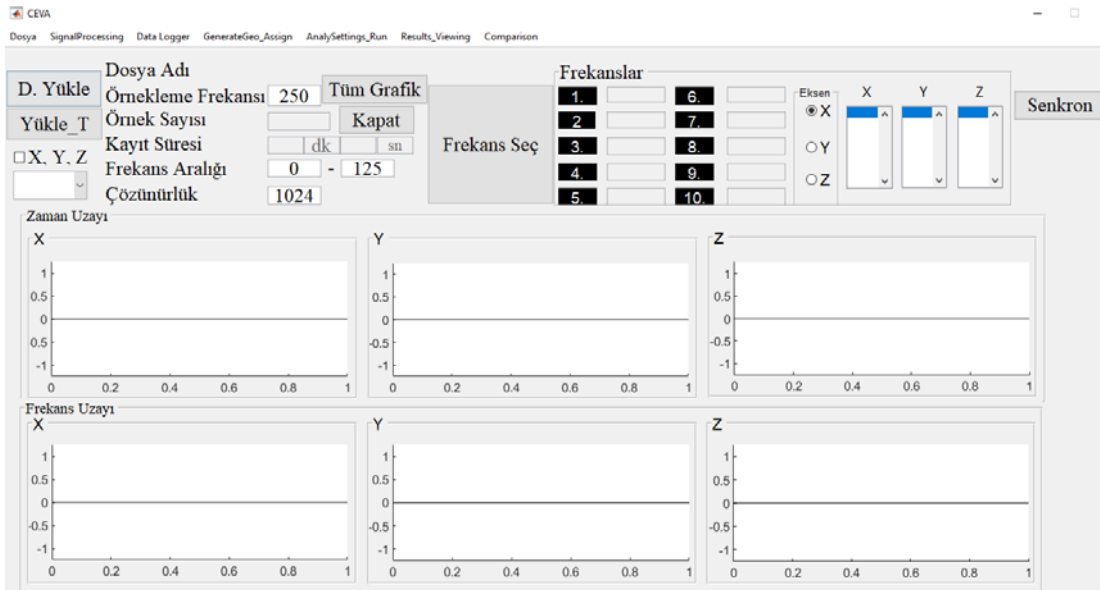
gerçekleştirirken $\pm 2g$ 'de, daha sünek cisimleri ise daha yüksek g 'lerde analiz etmek daha doğru sonuçlar verecektir. Bunun sebebi ölçümü gerçekleştirirken malzemenin titreşimin genliklerinin doyuma ulaşmadan alınabilmesidir. Çevresel titreşim testi yöntemiyle gerçekleştirilen deneylerde kullanılan 20 bitlik ADC'ye sahip ADXL355z dijital ivmeölçer Şekil 3'te verilmektedir. ADXL355z dijital ivmeölçerlerin özellikleri ilgili veri dokümanlarına bakılarak incelenebilmektedir [29].



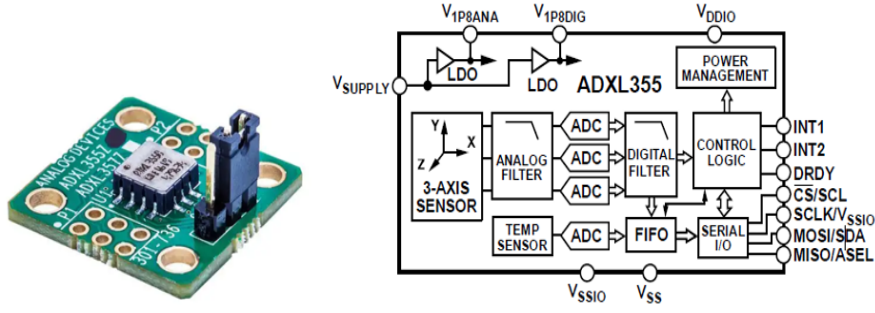
Şekil 1. Çevresel titreşim testi (ÇTT) genel şematığı (Ambient vibration test (AVT) general schematic)

İvmeölçerden gelen verileri bilgisayar ortamına aktarabilmek için arduino adında işlemciler kullanılmıştır. Arduinoların değişik çeşitleri mevcut olup özellikleri ilgili veri dokümanlarına bakılarak incelenebilmektedir. Gelen verileri bilgisayar ortamına aktarabilmek için ivmeölçer ve arduino arasında gömülü yazılım sistemi adıyla bilinen yazılım sistemi kullanılarak bağlantı sağlanmaktadır. Arduino yazılım sistemi (IDE) gelişmiş kütüphanelere sahiptir. Ayrıca açık kaynak kodlu elektronik bir platformdur. Bu çalışmada Arduino Nano 328-FT232RL USB arabirimine sahip arduino modülü kullanılmıştır (Şekil 4) [30].

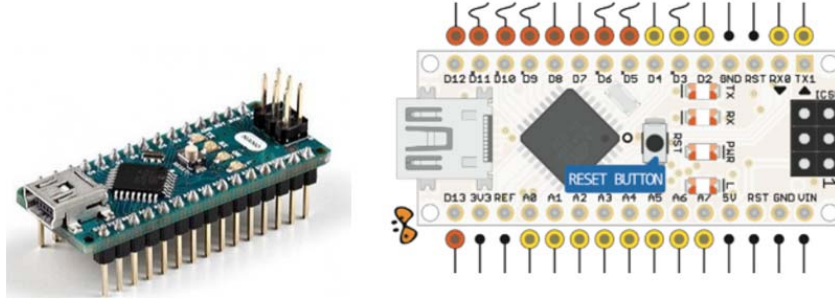
Bu şekilde oluşturulan Civil Engineering Vibration System (CEVS) ile titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yapının dinamik karakteristikleri frekans ve zaman tanım alanında algoritmalara sahip yöntemlerle elde edilmektedir. Bu



Şekil 2. MATLAB ortamında geliştirilen CEVA analiz programı (CEVA analysis program developed in MATLAB environment)



Şekil 3. ADXL355z dijital ivmeölçer çipi (URL-1) (ADXL355z digital accelerometer chip)



Şekil 4. Arduino Nano modülü (Arduino Nano module)

yöntemlerin matematik tabanları aynıdır. Farklı kısımları ise veri işleme ve denklem çözme teknikleriyle matris dizilişleridir. Frekans tanım alanındaki yöntem her bir noktada ölçülen sinyalin analizine ve bu sinyaller arası korelasyona bağlıdır. Bu yöntemde birbirine yakın frekans değerleri daha kolay bir şekilde fark edilebilmektedir. Zaman tanım alanındaki yöntem ise her bir noktada sinyalin zaman geçmişine ve korelasyon fonksiyonlarıyla model oluşturmaya bağlıdır [31]. Frekans tanım alanında ayrıştırma (FTAA) yöntemi hızlı fourier dönüşümünden (FFT) tek bir frekans hattının kullanımına dayalı olduğundan, belirlenen doğal frekansın kesinliği FFT'nin çözünürlüğüne dayanmaktadır. FTAA yönteminde yapının sönüm oranları belirlenememesine rağmen geliştirilmiş FTAA yönteminde, belirlenen doğal frekansların ve mod şekillerinin kesinliği artırılmakta, sönüm oranları da ayrıca belirlenebilmektedir [32]. GFTAA yönteminde, bir titreşim pikinin etrafında tanımlanan tek serbestlik dereceli güç spektral yoğunluk fonksiyonu (GSY), ters ayırık fourier dönüşümü kullanılarak zaman tanım alanına geri dönüştürülebilmektedir. Doğal frekans zamana bağlı sıfır geçiş sayısının belirlenmesiyle, sönüm ise tek serbestlik dereceli normalize edilmiş oto korelasyon fonksiyonunun logaritmik azalışıyla belirlenebilmektedir [32-34]. Stokastik altalan belirleme (SAB) yöntemi korelasyon veya spektruma ihtiyaç duymadan doğrudan zaman verileriyle çalışan, zaman tanım alanına dayalı bir yöntemdir. Bu yöntem dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için elverişlidir [35, 36].

3. YAPILAN ÇALIŞMALAR (APPLICATIONS)

Tabakhane Cami Minaresi ve Hacı Kasım Muhittin Cami Minaresinin dinamik ölçümleri taşıt yükü, rüzgâr yükü ve

diğer çevresel titreşimler altında ÇTT yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Minareler üzerindeki ölçümlerde geliştirilen iki adet üç eksenli sismik dijital ivmeölçer kullanılmıştır. Çalışmada, mod şekillerinden daha ziyade frekansların değişimine odaklanıldığı için her iki minare için ivmeölçer yerleşim düzenleri, restorasyon öncesinde ve sonrasında aynı olacak şekilde minarenin şerefe seviyesinde çekirdeğe yerleştirilmiştir. İvmeölçerlerden alınan veriler kablolu bir şekilde arduino yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bu veriler geliştirilen CEVA arayüz programında ve ARTEMİS programlarında frekans alanında ayrıştırma yöntemiyle (FTAA-GFTAA) analiz edilerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca ARTEMİS programında SSI-UPCX zaman alanında ayrıştırma yöntemiyle mod tespiti için analizler gerçekleştirilmiştir.

3.1. Tabakhane Cami Minaresi (Tabakhane Mosque Minaret)

Trabzon'un Ortahisar ilçesi Cumhuriyet Mahallesiinde bulunan Tabakhane Cami 1650 yılında inşaat edilmiştir. 1888 yılında onarıma girmiş olan Tabakhane Cami 1979 yılında yıkılarak 1987 yılında şimdiki haliyle yeniden yapılmıştır. Yıkım sırasında tarihi önem taşıyan caminin minaresi yıkılmamıştır. Geleneksel yapım teknikleri ile yapılmış minare, yakın zamanda herhangi bir restorasyon geçirmemiştir. Minarenin yüksekliği yaklaşık 25m'dir. Şekil 5'te Tabakhane Cami Minaresinin genel görünüşü verilmektedir.

CEVS ile Tabakhane Cami Minaresinden restorasyon öncesinde 21.10.2019 tarihinde yaklaşık 19°C sıcaklıkta saat 15.00'te (Ölçüm 1) ve 25.07.2020 (Ölçüm 2) tarihinde yaklaşık 26°C sıcaklıkta saat 17.30'da iki ölçüm alınmıştır.

Bu minarede gerçekleştirilen restorasyon öncesi ölçüme ait görüntü ve ivmeölçer yerleşim düzeni Şekil 6'da verilmektedir.

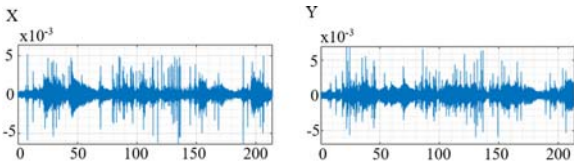


Şekil 5. Tabakhane Cami ve Minaresi
(Tabakhane Mosque and Minaret)

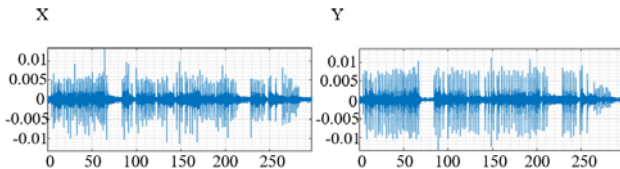


Şekil 6. Minarenin restorasyon öncesine ait ÇTT ve ivmeölçer yerleşim düzeni
(AVT of the minaret before restoration and accelerometer layout)

Ölçüm 1'de yaklaşık 3 dakika 30 saniyelik ve Ölçüm 2'de yaklaşık 5 dakikalık veriler alınmıştır. İvmeölçer-arduino arası haberleşme hızı 500000 ve örnekleme frekansı 250Hz'dir. Ölçümler rastgele sürelerde alınmıştır. Ölçümler sonucu alınan sinyallere ait grafikler Şekil 7 ve Şekil 8'de ayrı ayrı gösterilmiştir. Minarelerde düşey hareketin oldukça düşük olması sebebiyle ölçümler için yatay (x ve y) eksenlerine ait sinyallerin grafikleri gösterilmiştir.



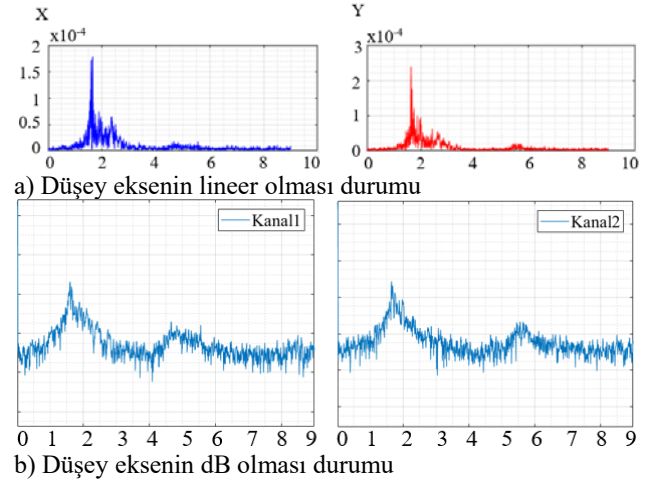
Şekil 7. Ölçüm 1 için x ve y eksenlerindeki zaman alanındaki grafikler
(Time domain graphics on the x and y axes for measurement 1)



Şekil 8. Ölçüm 2 için x ve y eksenlerindeki zaman alanındaki grafikler
(Time domain graphics on the x and y axes for measurement 2)

Tabakhane Cami Minaresi restorasyon öncesi CEVS sisteminden elde edilen titreşim ölçüm verileri CEVA

programında ve ARTEMİS programında analiz edilmiştir [37]. Sinyaller 250 örnekleme frekansında alındığından maksimum frekans 125Hz olabilmektedir. Alınan sinyal verileri CEVA programında FFT analizleri yapılarak grafikleri elde edilmiştir. Ölçüm 1'den elde edilen sinyallerin 1024 çözünürlükte FFT grafikleri x ve y eksenleri için Şekil 9'da ayrı ayrı ve Şekil 10'da birleşik olarak verilmektedir. Yatay eksenler 0-9Hz frekanslar arası gösterirken düşey eksenler hem lineer hem de dB cinsinden gösterilmiştir. Birçok sinyal işleme programında düşey eksen dB olarak kullanıldığından Ölçüm 1'den sonra gösterilen şekillerde düşey eksen sadece dB cinsinden sunulmuştur.



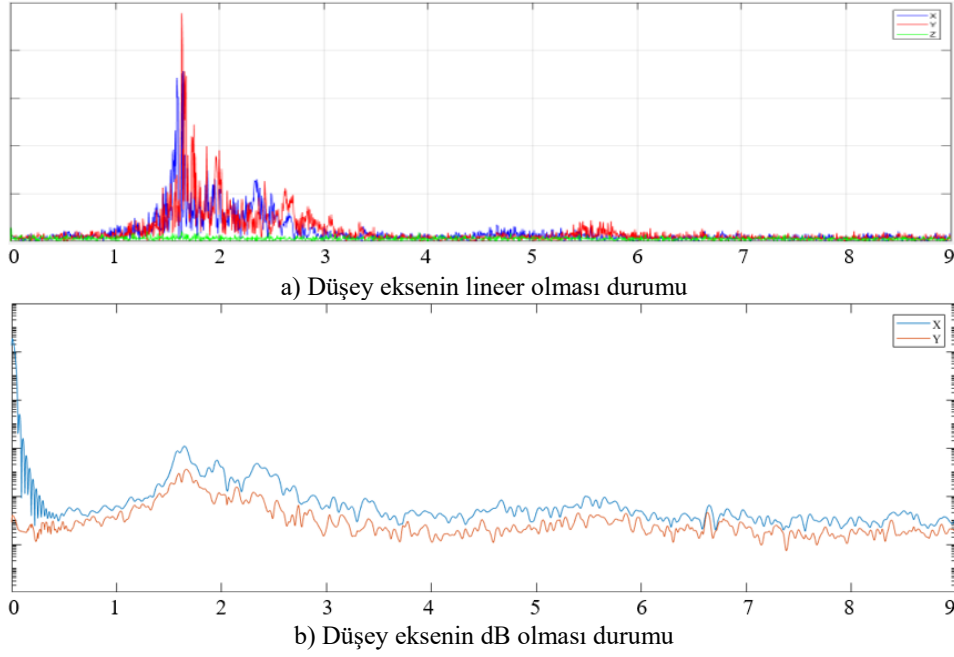
Şekil 9. Ölçüm 1 için x ve y eksenlerine ait FFT grafikleri (CEVA)
(FFT graphics of the x and y axes for measurement 1 (CEVA))

Ölçüm 2'den elde edilen sinyallerin 1024 çözünürlükte FFT grafikleri ise her bir eksen için Şekil 11'de, x ve y eksenleri için Şekil 12'de aynı grafik üzerinde verilmektedir.

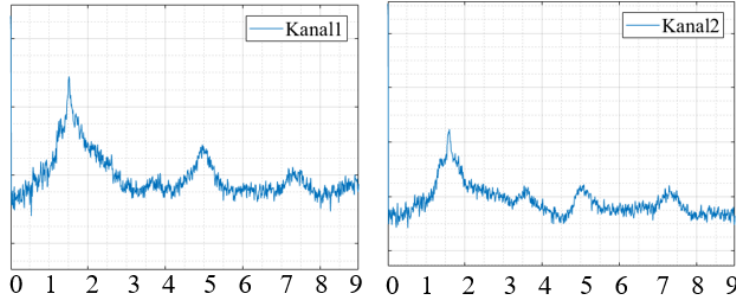
Tabakhane Cami Minaresinde restorasyon öncesi gerçekleştirilen deneysel ölçümler neticesinde elde edilen veriler ARTEMİS programında GFTAA yöntemiyle de incelenmiştir. Ölçüm 1 ve Ölçüm 2'ye ait sinyaller ARTEMİS programında işlendiğinde elde edilen FFT grafikleri Şekil 13'te verilmiştir.

CEVS programı ile Tabakhane Cami Minaresinden restorasyon sonrasında 08.01.2021 tarihinde yaklaşık 17°C sıcaklıkta saat 13.20'de (Ölçüm 3) ve 01.02.2021 (Ölçüm 4) tarihinde yaklaşık 19°C sıcaklıkta saat 13.40'ta iki ölçüm alınmıştır. Tabakhane Cami Minaresinde gerçekleştirilen restorasyon sonrası Ölçüm 3 ve Ölçüm 4'e ait görüntüler ve minare üzerindeki ölçümde kullanılan ivmeölçer yerleşim düzeni Şekil 14'te verilmektedir.

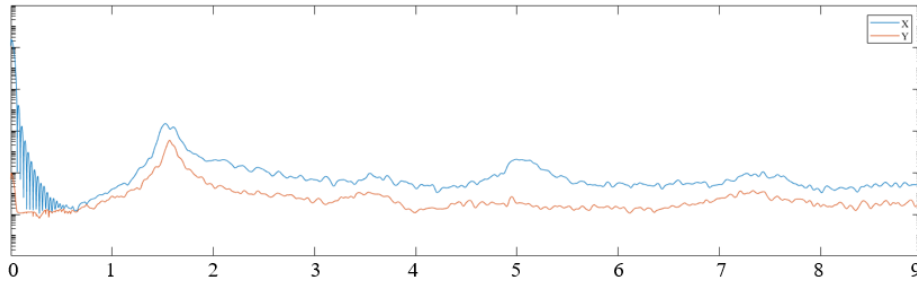
Ölçüm 3'te yaklaşık 7 dakika 20 saniyelik ve Ölçüm 4'te yaklaşık 4 dakikalık 30 saniyelik veriler alınmıştır. Ölçümler sonucu alınan sinyal verileri '.txt' dosyasında kaydedilmiş ve bu verilerin grafikleri Şekil 15 ve Şekil 16'da ayrı ayrı gösterilmiştir.



Şekil 10. Ölçüm 1 için FFT grafiği (eksenler aynı grafikte) (CEVA)
(FFT graphic for measurement 1 (axes in the same graphic) (CEVA))



Şekil 11. Ölçüm 2 için x ve y eksenlerine ait FFT grafikleri (CEVA) (FFT graphics of the x and y axes for measurement 2 (CEVA))

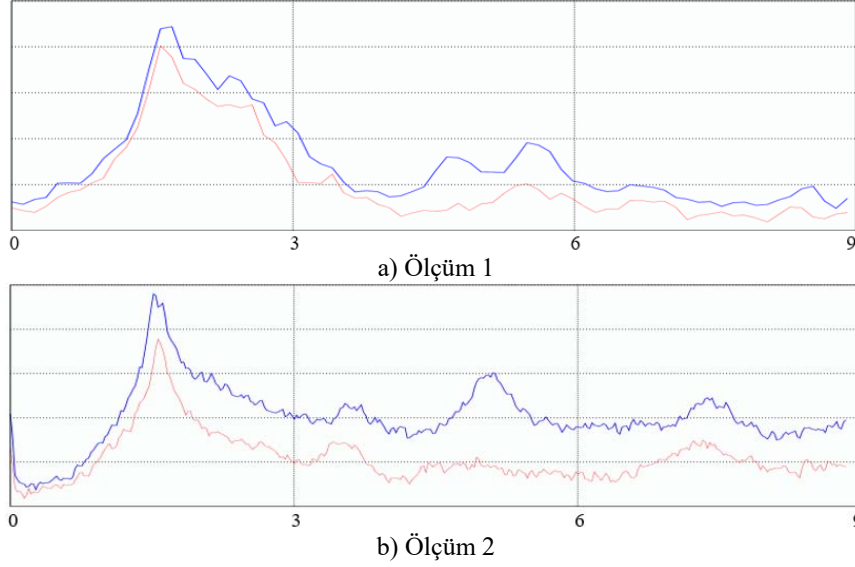


Şekil 12. Ölçüm 2 için FFT grafiği (eksenler aynı grafikte) (CEVA)
(FFT graphic for measurement 2 (axes in the same graphic) (CEVA))

Alınan sinyal verileri CEVA programında FFT analizleri yapılarak grafikleri elde edilmiştir. Ölçüm 3'ten elde edilen sinyallerin 1024 çözünürlükte FFT grafikleri eksenler ayrı ayrı olarak Şekil 17'de, eksenler birleşik olarak ise Şekil 18'de verilmektedir.

Ölçüm 4'ten elde edilen sinyallerin 1024 çözünürlükte FFT grafikleri her bir eksen için ayrı ayrı olarak Şekil 19'da, x ve y eksenlerinin birleşik olduğu Şekil 20'de verilmektedir.

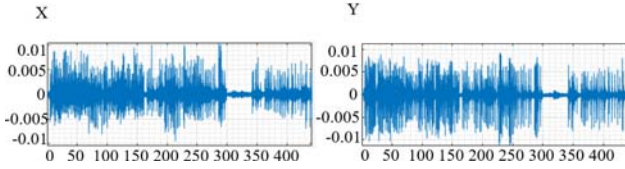
Tabakhane Cami Minaresinde restorasyon sonrası gerçekleştirilen deneysel ölçüm verilerinin ARTEMİS programında GFTAA yöntemiyle incelenmesinden elde edilen FFT grafikleri Şekil 21'de gösterilmiştir. Grafiklerden modların tespiti, ilgili frekans bölgesinin daha detaylı olarak (daha düşük frekans aralığında) incelenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Minare geometrisinden dolayı birinci ve ikinci modlara ait frekanslar birbirine oldukça yakın olsa da grafiklerde ayrı tepeler şeklinde ortaya çıkmıştır.



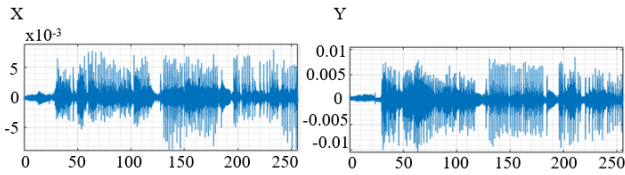
Şekil 13. Tabakhane Cami Minaresinde restorasyon öncesi verilerin analizi (ARTEMİS)
(Analysis of data before restoration in Tabakhane Mosque Minaret (ARTEMİS))



Şekil 14. Minarenin restorasyon sonrasında ait ÇTT ve ivmeölçer yerleşim düzeni
(AVT of the minaret after restoration and accelerometer layout)



Şekil 15. Ölçüm 3 için x ve y eksenlerindeki zaman alanındaki grafikler
(Time domain graphics on the x and y axes for measurement 3)

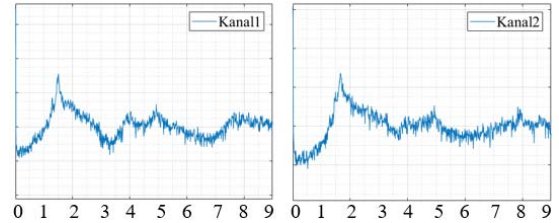


Şekil 16. Ölçüm 4 için x ve y eksenlerindeki zaman alanındaki grafikler
(Time domain graphics on the x and y axes for measurement 4)

3.2. Hacı Kasım Muhittin Cami Minaresi (Hacı Kasım Muhittin Mosque Minaret)

Hacı Kasım Muhittin Cami ve Minaresi Trabzon'un önemli eserlerinden biridir. Eser ilk olarak Yavuz Sultan Selim'in defterdarı Hacı Kasım tarafından 1531 yılında ahşap bir mescit olarak inşa ettirilmiştir [38]. Ahşap mescidin yanması üzerine Hazine Darzade Osman Paşa tarafından yeniden

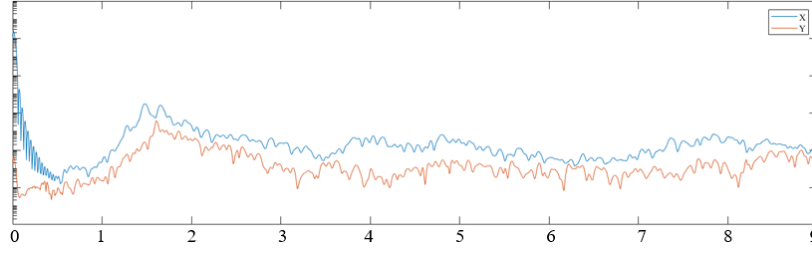
yaptırılmıştır. Mihrap üzerinde bulunan tek satırlık ayet kitabesine göre Rumi takvime göre 11 Haziran 1236'de (Miladi takvimde 23 Haziran 1821) inşa edilmiştir [39]. Yeniden inşası Sultan II. Mahmut'un padişahlığı döneminde yapılan eserin dönemin etkili üslupları olan barok, rokoko ve ampir izlerini taşıyan öğeleri bulunmaktadır [38].



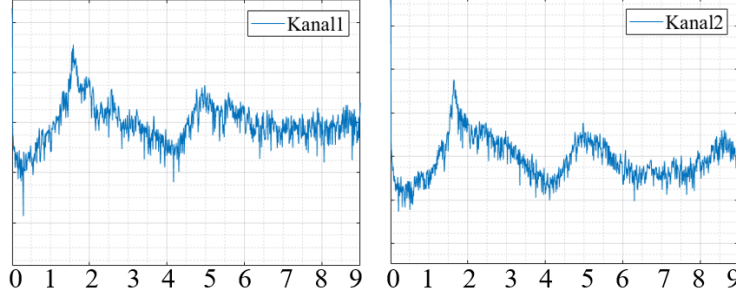
Şekil 17. Ölçüm 3 için x ve y eksenlerine ait FFT grafikleri (CEVA)
(FFT graphics of the x and y axes for measurement 3 (CEVA))

Cami, ana ibadet mekanı dıştan dışa 12,25m x 11,81m boyutlarındadır. Yığma duvar kalınlığı ortalama 70cm'dir. Yapının tuğla yığma kubbesinin yarıçapı 3,90m ve kubbe kalınlığı 18cm civarındadır. Kubbenin alt yüzünün yerden yüksekliği 13,25m ve kasnak kısmından itibaren yüksekliği 3,25m'dir. Yapının kuzeybatısında bulunan kesme taş minarenin yüksekliği 22,60m ve kaide genişliği 1,80m'dir [40]. Şekil 22'de Hacı Kasım Muhittin Cami ve Minaresinin görüntüleri verilmektedir.

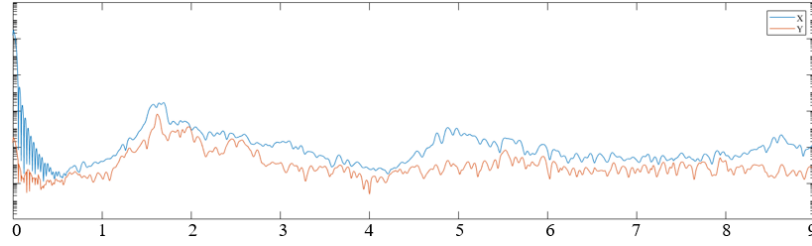
CEVS ile Hacı Kasım Muhittin Cami Minaresinde restorasyon sonrasında 04.12.2020 tarihinde yaklaşık 16°C sıcaklıkta saat 15.55'te (Ölçüm 1) ve 05.01.2021 tarihinde yaklaşık 17°C sıcaklıkta saat 15.40'ta (Ölçüm 2) iki ölçüm gerçekleştirilmiştir. Hacı Kasım Muhittin Cami Minaresinde gerçekleştirilen restorasyon sonrası Ölçüm 1 ve Ölçüm 2'ye ait görüntüler ve ivmeölçerlerin yerleşim düzeni ve yönleri Şekil 23'te verilmektedir.



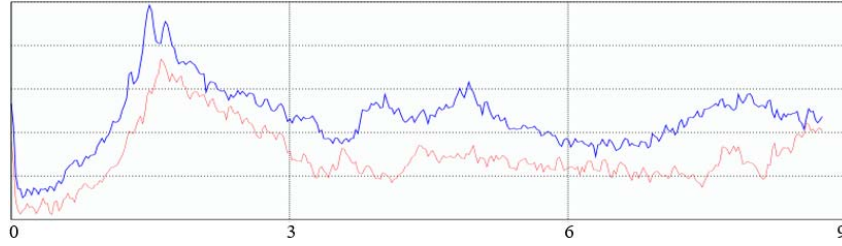
Şekil 18. Ölçüm 3 için FFT grafiği (eksenler aynı grafikte) (CEVA) (FFT graphic for measurement 3 (axes in the same graphic) (CEVA))



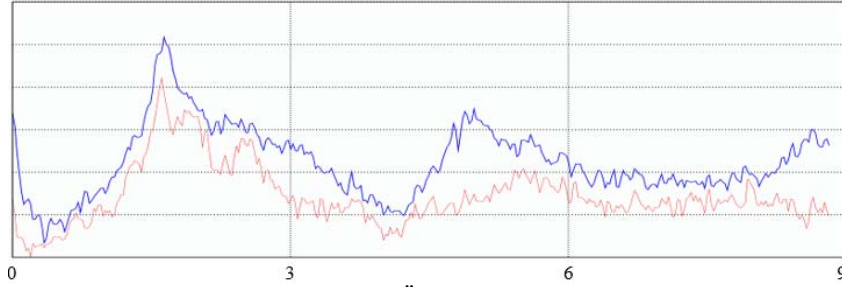
Şekil 19. Ölçüm 4 için x ve y eksenlerine ait FFT grafikleri (CEVA) (FFT graphics of the x and y axes for measurement 4 (CEVA))



Şekil 20. Ölçüm 4 için FFT grafiği (eksenler aynı grafikte) (CEVA) (FFT graphic for measurement 4 (axes in the same graphic) (CEVA))



a) Ölçüm 3



b) Ölçüm 4

Şekil 21. Tabakhane Cami Minaresinde restorasyon sonrası verilerin analizi (ARTEMİS) (Analysis of data after restoration in Tabakhane Mosque Minaret (ARTEMİS))

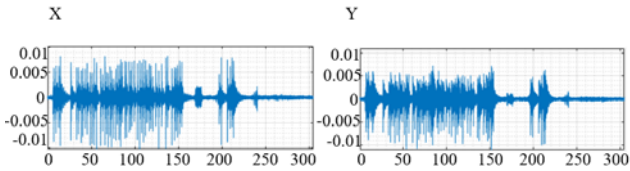


Şekil 22. Hacı Kasım Muhittin Cami ve Minaresi
(Hacı Kasım Muhittin Mosque and Minaret)



Şekil 23. Hacı Kasım Muhittin Cami Minaresinin restorasyon sonrasına ait ÇTT
(AVT of the Hacı Kasım Muhittin Mosque Minaret after restoration)

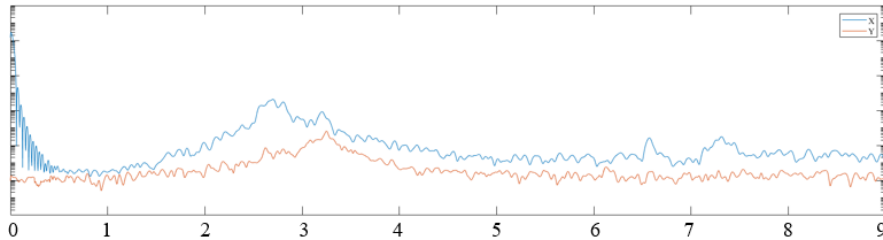
Ölçüm 1’de yaklaşık 5 dakikalık veriler, Ölçüm 2’de ise yaklaşık 2 dakika 30 saniyelik veriler alınmıştır. Bu verilerin grafikleri Şekil 24 ve Şekil 25’te gösterilmiştir.



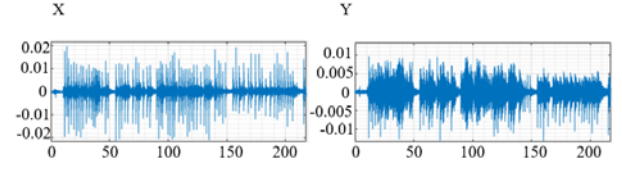
Şekil 24. Ölçüm 1 için x ve y eksenlerindeki zaman alanındaki grafikler
(Time domain graphics on the x and y axes for measurement 1)

Restorasyon sonrasında 04.12.2020 ölçümü için FFT grafikleri Şekil 26’da her bir eksene göre, Şekil 27’de ise aynı grafik üzerinde gösterilmiştir.

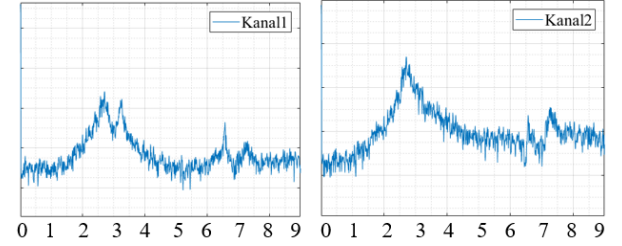
Ölçüm 2’den elde edilen sinyallerin 1024 çözünürlükte FFT grafikleri ise her bir eksen için Şekil 28’de, x ve y eksenlere ait grafik ise Şekil 29’de verilmektedir.



Şekil 27. Ölçüm 1 için FFT grafiği (eksenler aynı grafikte) (CEVA)
(FFT graphic for measurement 1 (axes in the same graphic) (CEVA))



Şekil 25. Ölçüm 2 için x ve y eksenlerindeki zaman alanındaki grafikler
(Time domain graphics on the x and y axes for measurement 2)



Şekil 26. Ölçüm 1 için x ve y eksenlerine ait FFT grafikleri (CEVA)
(FFT graphics of the x and y axes for measurement 1 (CEVA))

Hacı Kasım Muhittin Cami Minaresinde restorasyon sonrası gerçekleştirilen deneysel ölçümlerde elde edilen veriler (Ölçüm 1 ve Ölçüm 2) ARTEMİS programında da analiz edilmiştir (Şekil 30).

Grafiklerden modların tespiti, ilgili frekans bölgesinin daha detaylı olarak (daha düşük frekans aralığında) incelenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Minare geometrisinden dolayı birinci ve ikinci modlara ait frekanslar birbirine oldukça yakın olsa da grafiklerde ayrı tepeler şeklinde ortaya çıkmıştır.

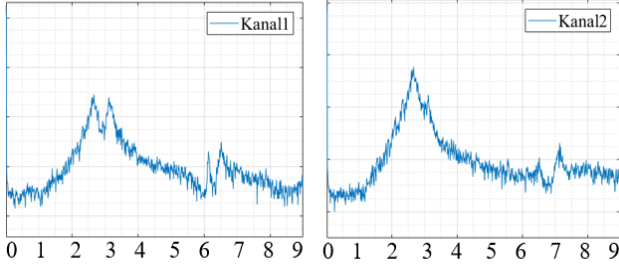
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Tabakhane Cami Minaresi ve Hacı Kasım Cami Minaresinden elde edilen veriler 0-125Hz frekans aralığında 1024 çözünürlükte analiz edilmiştir. Elde edilen değerler arasında oluşan farklılıkların sebepleri çevresel etkilere ve zamana bağlı olarak irdelenmiştir.

4.1. Tabakhane Cami Minaresinin Analiz Sonuçları ve Değerlendirmeleri (Analysis Results and Evaluations of Tabakhane Mosque Minaret)

Tabakhane Cami Minaresinde restorasyon öncesi gerçekleştirilen deneysel ölçümler (Ölçüm 1 ve Ölçüm 2) neticesinde toplanan veriler CEVA ve ARTEMİS

programlarında işlenmiş ve elde edilen ilk üç frekansa ait sonuçlar karşılaştırılmıştır (Tablo 1). Farklar rölatif hata yöntemiyle hesaplanmıştır.



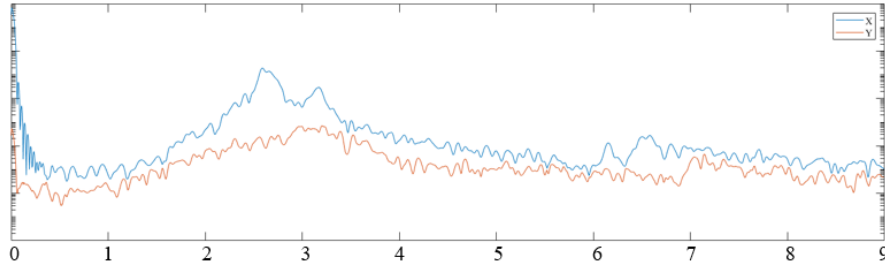
Şekil 28. Ölçüm 2 için x ve y eksenlerine ait FFT grafikleri (CEVA)
(FFT graphics of the x and y axes for measurement 2 (CEVA))

Elde edilen bulgular ışığında, Ölçüm 1'in ve Ölçüm 2'nin ilk 3 moduna ait CEVA ve ARTEMİS program çıktıları arasındaki ortalama farkın sırasıyla 0,00243 ve 0,01215 olduğu görülmüştür. CEVA programındaki sonuçların ARTEMİS programına yakın çıkması, geliştirilen programın doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir. Minarenin 1. ve 2. modlarına ait doğal frekans değerlerinin birbirine yakın

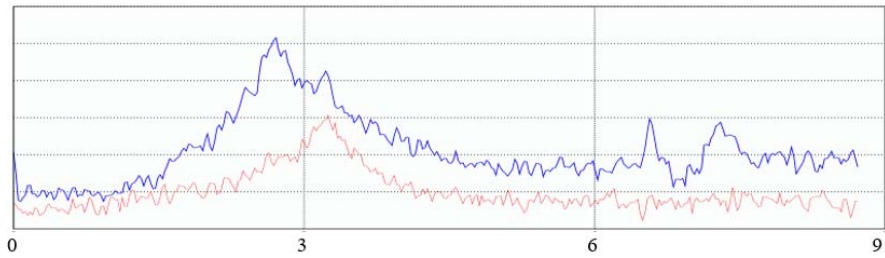
çıkması görülmüştür. Minarenin 1. ve 2. modlarına ait doğal frekans değerleri Ölçüm 1'de Ölçüm 2'ye göre daha büyük çıkmıştır. Tabakhane Minaresinin 1. ve 2. frekans değerleri zaman içerisinde azaldığı gözlenmiştir.

Minarenin restorasyon öncesi için elde edilen dinamik karakteristikleri, 2014 yılında yapılan ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristiklerle kıyaslanarak Tablo 2'de verilmiştir [40].

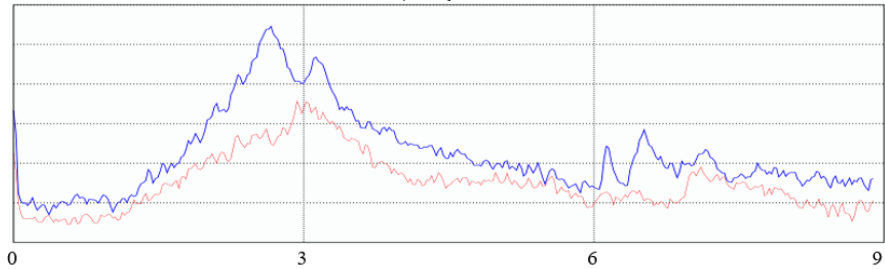
Yapılan karşılaştırmadan, Ölçüm 1 ve Ölçüm 2'de 1. ve 2. frekans değerlerinin azaldığı, 3. frekans değerinin ise arttığı belirlenmiştir. 2014 yılından sonra Tabakhane Cami Minaresinin bulunduğu bölge yapılan tüneller ve alt yapı çalışmalarının, minareni mesnet bağıllığını dolayısıyla rijitliğini etkilemek suretiyle bu değişiminde en etkili unsur olduğu düşünülmektedir (Şekil 31). Ayrıca ölçümün alındığı hava sıcaklığı, nem ve zaman bağlı oluşan yıpranmalar da bu değişime etki eden diğer faktörler arasındadır. Tüm bunlara ek olarak trafiğin bölgede yoğunlaşmasının da sebepler arasında olabileceği düşünülmektedir. Fakat bu faktörlerin etkilerini gözlemleyebilmek için istatistiki yaklaşımla çok fazla ölçüm yaparak değerlendirme yapılması gerekmektedir.



Şekil 29. Ölçüm 2 için FFT grafiği (eksenler aynı grafikte) (CEVA)
(FFT graphic for measurement 2 (axes in the same graphic) (CEVA))



a) Ölçüm 1



b) Ölçüm 2

Şekil 30. Hacı Kasım Muhittin Cami Minaresinin restorasyon sonrası verilerinin analizi (ARTEMİS)
(Analysis of data after restoration of Hacı Kasım Muhittin Mosque Minaret (ARTEMİS))

Tabakhane Cami Minaresinde restorasyon sonrası gerçekleştirilen Ölçüm 3 ve Ölçüm 4 neticesinde elde edilen veriler CEVA programında ve ARTEMİS programında işlenerek sonuçlar elde edilmiştir (Tablo 3).

Elde edilen bulgular ışığında, Ölçüm 3'ün ve Ölçüm 4'ün ilk 3 moduna ait CEVA ve ARTEMİS program çıktıları arasındaki ortalama fark sırasıyla 0,00483 ve -0,00319 civarındadır. CEVA ve ARTEMİS sonuçlarının oldukça yakın olduğu görülmüştür. Analiz sonuçlarına göre 1. ve 2. moda ait doğal frekans değerlerinin birbirine yakın çıktığı ve 3. moda ait doğal frekans değerleri ise 2. moda ait değerlerin yaklaşık 3 katıdır.

Restorasyon öncesinde Ölçüm 2'ye ait doğal frekans değerleri sırasıyla 1,511, 1,587 ve 4,959Hz iken restorasyon sonrası en son gerçekleştirilen ölçüme (Ölçüm 4) ait değerler 1,579, 1,640 ve 4,982Hz olarak elde edilmiştir. Restorasyon sonrasında beklendiği şekilde doğal frekanslarda bir artış söz konusu olmuştur.

4.2. Hacı Kasım Muhittin Cami Minaresinin Analiz Sonuçları ve Değerlendirmeleri

(Analysis Results and Evaluations of Hacı Kasım Muhittin Mosque Minaret)

Hacı Kasım Muhittin Cami Minaresi restorasyon sonrası CEVS sistemiyle gerçekleştirilen deneysel ölçümler neticesinde elde edilen titreşim ölçüm verileri CEVA ve ARTEMİS programında analiz edilmiştir. Analizlerde hakim yön olarak kabul edilen x ve y eksenlere ait ölçüm verileri dikkate alınmıştır. Elde edilen verilerin karşılaştırılması Tablo 4'te verilmiştir.

Elde edilen bulgular ışığında, CEVA programındaki sonuçların ARTEMİS program sonuçlarına yakın çıkmıştır. Minarenin 1. ve 2. moda ait doğal frekans değerlerinin birbirine yakın çıktığı görülmüştür. Minarenin 1. ve 2. mod numarasına ait Ölçüm 1 analiz sonuçları Ölçüm 2'den daha büyük çıkmıştır. Hacı Kasım Muhittin Cami Minaresi restorasyon sonrası gerçekleştirilen Ölçüm 1 ve Ölçüm 2

Tablo 1. Tabakhane Minaresinde Ölçüm 1 ve Ölçüm 2 için elde edilen frekanslar ve fark değerleri
(The frequencies and their differences obtained from the Measurement 1 and Measurement 2 in the Tabakhane Minaret)

Mod Numarası	Ölçüm 1 (19°C)			Ölçüm 2 (26°C)			Ölçüm 1-2 Farkları (CEVA)
	CEVA	ARTEMİS	Fark	CEVA	ARTEMİS	Fark	
1	1,595	1,587	0,00502	1,511	1,514	-0,00199	-0,05559
2	1,640	1,636	0,00244	1,587	1,563	0,01512	-0,03339
3	4,662	4,663	-0,00021	4,959	4,964	-0,00101	0,05989

Tablo 2. Tabakhane Minaresi'nin restorasyon öncesine ait frekansların zamana ve sıcaklığa bağlı değişimi
(The variation of the frequencies before restoration of the Tabakhane Minaret depending on time and temperature)

Mod Numarası	Ölçüm Zamanı (Yıl) ve Ölçümün Yapıldığı Andaki Sıcaklık			
	2014, 24°C [40]	2019, 19°C (Ölçüm 1)	2020, 26°C (Ölçüm 2)	2014-2020 Farkları
1	1,758	1,595	1,511	-0,16347
2	2,052	1,640	1,587	-0,29301
3	4,540	4,662	4,959	0,08449



Şekil 31. Tabakhane Cami Minaresinin çevresine ait görüntüler
(Images of the surrounding of the Tabakhane Mosque Minaret)

Tablo 3. Tabakhane Minaresinde Ölçüm 3 ve Ölçüm 4 için elde edilen frekanslar ve fark değerleri
(The frequencies and their differences obtained from the Measurement 3 and Measurement 4 in the Tabakhane Minaret)

Mod Numarası	Ölçüm 3 (17°C)			Ölçüm 4 (19°C)			Ölçüm 3-4 Farkları (CEVA)
	CEVA	ARTEMİS	Fark	CEVA	ARTEMİS	Fark	
1	1,503	1,501	0,00133	1,579	1,587	-0,00507	0,04813
2	1,671	1,648	0,01376	1,640	1,649	-0,00549	-0,01890
3	4,929	4,932	-0,00061	4,982	4,977	0,00100	0,01064

Tablo 4. Hacı Kasım Minaresinde Ölçüm 1 ve Ölçüm 2 için elde edilen frekanslar ve fark değerleri
(The frequencies and their differences obtained from the Measurement 1 and Measurement 2 in the Hacı Kasım Minaret)

Mod Numarası	Ölçüm 1 (16°C)			Ölçüm 2 (17°C)			Ölçüm 1-2 Farkları (CEVA)
	CEVA	ARTEMİS	Fark	CEVA	ARTEMİS	Fark	
1	2,701	2,710	-0,00333	2,663	2,661	0,00075	-0,01427
2	3,258	3,223	0,01074	3,151	3,174	-0,00730	-0,03396
3	6,577	6,567	0,00152	6,516	6,519	-0,00046	-0,00936

Tablo 5. Hacı Kasım Minaresi'nde farklı zamanlarda elde edilen frekansların zamana ve sıcaklığa bağlı değişimi
(Variation of the frequencies taken at different times depending on time and temperature in the Hacı Kasım Minaret)

Mod Numarası	Ölçüm Zamanı (Yıl) ve Ölçümün Yapıldığı Andaki Sıcaklık			
	Restorasyon Öncesi 2012, 20°C [40]	Restorasyon Sonrası 2014, 21°C [40]	2021, 17°C (Ölçüm 2)	2014-2021 Farkları
1	3,045	3,321	2,663	-0,24709
2	3,142	3,388	3,151	-0,07521
3	5,320	6,282	6,516	0,03591

CEVA değerlerinin birbirine yakın olduğu ama zamanla değerlerde azalma olduğu görülmüştür. Ölçüm 1'in ve Ölçüm 2'nin ilk 3 moduna ait CEVA ve ARTEMİS sonuçları arasındaki ortalama fark 0,00298 ve -0,00234 civarında olduğu görülmüştür. Minarenin restorasyondan çok sonrasında gerçekleştirilen ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristiklerle restorasyon öncesinde ve restorasyon sonrasında elde edilen dinamik karakteristikler Tablo 5'te kıyaslanmıştır [40].

Restorasyon sonrası durum ile en son ölçüm sonuçları kıyaslandığında, 1. ve 2. frekans değerlerinin azaldığı, buna karşın 3. frekans değerinin bir miktar arttığı belirlenmiştir. Hacı Kasım Muhittin Cami Minaresi çevresinde ve tanjant yolu üzerinde yapılan alt yapı ve kazı çalışmalarının ve bölgede yoğun taşıt trafiğinin olmasının frekans değerlerinin değişmesinde etkili olduğu düşünülmektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Çalışma kapsamında iki tarihi minarenin dinamik karakteristikleri farklı çevresel etkiler ve farklı zaman aralıklarıyla deneysel olarak elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Uygulama olarak, Trabzon ilinde bulunan Tabakhane Cami Minaresi ve Hacı Kasım Muhittin Cami Minaresi seçilmiştir. Yapıların elde edilen dinamik karakteristik değerleri daha önce yapılmış çalışmalarla kıyaslanmıştır. Bu değerler arasında oluşan farklılıkların sebepleri çevresel etkilere ve zamana bağlı olarak irdelenmiştir.

- Her iki yapının deneysel ölçümleri çevresel titreşimler altında araştırma ekibimiz tarafından yerli olarak geliştirilen kablolu ve kablosuz veri alma özellikleri bulunan 3 eksenli veri alabilen CEVA ölçüm sistemi ve CEVA analiz programıyla gerçekleştirilmiştir. Alınan ölçüm verilerinin CEVA ve ARTEMİS programında analiz edilmesi sonucunda değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.
- Tabakhane Cami Minaresinin daha narin olmasından dolayı frekanslarının Hacı Kasım Cami Minaresine göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.

- Her iki minarede gerçekleştirilen ölçümlerde minarelerin geometrisine bağlı olarak ilk iki frekansın birbirine oldukça yakın olduğu ve 1-4Hz frekans aralığında olduğu belirlenmiştir. 3. frekansın ise ilk frekansın yaklaşık olarak 3 katı olduğu belirlenmiştir.
- Tabakhane Cami Minaresinin ikinci moda ait frekansı ilk frekansın yaklaşık 1,04 katı iken Hacı Kasım Cami Minaresinde bu oran 1,18 olmuştur. Bunun sebebi Hacı Kasım Cami Minaresinin camiye temas etmesinden kaynaklanan rijitlik artışı olduğu düşünülmektedir.
- Her iki minarede gerçekleştirilen restorasyon çalışmaları sonucunda frekanslarda bir miktar artış meydana geldiği belirlenmiştir. Restorasyon sonrasında ise çevresel etkilere (kazı ve tünel çalışmaları, yoğun trafik vb.) bağlı olarak minareni mesnet bağıllığının dolayısıyla rijitliğinin değişmesi suretiyle özellikle de ilk iki doğal frekansta genel bir azalma olduğu tespit edilmiştir.
- Çalışmanın yapıldığı dönemlerdeki sıcaklık ve nem değişimine bağlı olarak, sıcaklık arttıkça ve nem azaldıkça frekanslarda bir miktar artış olduğu belirlenmiştir. Fakat diğer çevresel etmenlerden dolayı bu değişim tam olarak ortaya konulamamıştır.

Bu tür yapıların dinamik özelliklerinin çevresel faktörlere bağlı olarak değişim göstermesinde etkili olan diğer parametrelerin de belirlenebilmesi amacıyla belirli periyotlarla yapısal takiplerinin yapılmasının gerekli olduğu düşünülmektedir. Çevresel faktörlerin etkilerinin istatistiki yaklaşımlarla değerlendirilmesinde oldukça fazla veri alınmasının sonuçların doğruluğunu arttıracak açıktır. Bu amaca yönelik olarak geliştirilen ölçüm sistemi ve yazılımın yapıların dinamik davranışlarının takibinde güvenle kullanılabileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmada seçilen tarihi yapılarda gerçekleştirilen ölçüm çalışmalarına katkılarından dolayı Vakıflar Bölge Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Bayraktar A., Altunışık A.C., Türker T., Sevim B., Tarihi Köprülerin Deprem Davranışına Sonlu Eleman

- Model İyileştirmesinin Etkisi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul-Türkiye, 29-30, Ekim, 2007.
2. Birinci F., Taş kemer köprülerin sonlu eleman modellerinin operasyonel modal analiz yöntemiyle iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2010.
 3. Türker T., Çevresel titreşim verileri kullanılarak yapıların hasar durumlarının tespiti ve değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye, 2011.
 4. Baştürk M.H., Bursa tarihi yığma minarelerinin dinamik davranışlarının modal analiz yöntemi ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye, 2013.
 5. Ural A., Fırat F.K., Belirsizlik altında kuvvetli bir rüzgârla çöken duvar minarelerinin değerlendirilmesi, Nat Hazards, 76 (2), 999-1018, 2015.
 6. Kocatürk T., Erdoğan Y.S., Tarihi Sultan Ahmed Cami M1 minaresinin deprem davranışı, Structural Engineering and Mechanics, 59 (3), 539-558, 2016.
 7. Livaoglu R., Baştürk M.H., Doğangün A., Serhatoğlu C., Geometrik özelliklerin tarihi yığma minarenin dinamik davranışına etkisi, KSCE Journal of Civil Engineering, 20 (6), 2392-2402, 2016.
 8. Hacıfendioğlu K., Maraş E.E., Tarihi duvar minarelerinin belgelerinde ve ortam titreşim testinde fotogrametri, Experimental Techniques, 40 (6), 1527-1537, 2016.
 9. Çalık İ., Bayraktar A., Türker T., Ayan A.O., Tarihi Molla Siyah Cami'nin Deneysel Dinamik Davranışı Üzerine Restorasyon Etkileri, İnşaat Mühendisliği Sorunları 3. Uluslararası Balkan Konferansı, 362-372, 19-21 Mayıs, 2016.
 10. Çalık İ., Bayraktar A., Türker T., Determination of the effect on the dynamic behaviour of historical masonry mosques reinforced concrete domes by ambient vibration testing, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (3), 621-630, 2016.
 11. Mirtaheri M., Abbasi A., Salari N., Deneysel ve sayısal yöntemlerle tarihi yığma minarenin deprem davranışı ve rehabilitasyonu, Asian Journal of Civil Engineering, 18 (5), 807-822, 2017.
 12. Erdil B., Tapan M., Akkaya I., Korkut F., Yapısal parametrelerin tarihi yığma minarenin sismik davranışına etkisi, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 62 (1), 148-161, 2018.
 13. Bayraktar A., Çalık İ., Türker T., Ashour A., Restoration effects on experimental dynamic characteristics of masonry stone minarets, Materials and Structures, 51, 141, 2018.
 14. Pachon P., Castro R., Garcia-Macias E., Compan V., Puertas E, E. Torroja's bridge: Tailored experimental setup for SHM of a historical bridge with a reduced number of sensors, Engineering Structures, 162, 11-21, 2018.
 15. De Silva F., Pitolakis D., Ceroni F., Sica S., Silvestri F., Experimental and numerical dynamic identification of a historic masonry bell tower accounting for different types of interaction, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 109, 235-250, 2018.
 16. Guo N., Yang Z., Wang L., Ouyang Y., Zhang X., Dynamic model updating based on strain mode shape and natural frequency using hybrid pattern search technique, Journal of Sound and Vibration, 422, 112-130, 2018.
 17. Kazaz İ., Kocaman İ., Seismic load capacity evaluation of stone masonry mosques, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (2), 557-573, 2018.
 18. Kocaman İ., Okuyucu D., Kazaz İ., Tarihi yapı malzeme özelliklerinin belirlenmesinde yeni bir yöntem önerisi: Lala Paşa Cami Örneği, Teknik Dergi, 9125-9146, 2019.
 19. İzol R., Gürel M., Pekgökgöz R.K., Avcil F., Out-of-plane seismic resistance of high masonry walls having rectangular buttresses, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (2), 1007-1024, 2019.
 20. Aslay S.E., Okuyucu D., Technical evaluation of abscissa damage of Erzincan Değirmenliköy Church, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (1), 387-402, 2020.
 21. Sung H., Chang S., Cgo M., Reduction method based structural model updating method via neural networks, AIAA Scitech 2020 Forum, 1445, 2020.
 22. Türker T., Yanık Y., İlyasbey Camisi'nin yapısal davranışının çevresel titreşim testi ve sonlu eleman yöntemleriyle incelenmesi, Düzce University Journal of Science and Technology, 8 (2), 1431-1453, 2020.
 23. Yanık Y., Türker T., Yıldırım Ö., Dede, T., Identification material properties by modal calibration method based on ambient vibration tests, Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering, 25 (1), 573-590, 2020.
 24. Çakır F., A simplified method for determining the seismic performance of historical structures: a case of Kaya Çelebi Mosque, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36 (3), 1643-1656, 2021.
 25. Zhang L., Brincker R., Andersen P., An overview of operational modal analysis: Major development and issues, B&K Technical Paper, 152-161, 2002.
 26. Brincker R., Ventura C.E., Andersen P., Why output-only modal testing is a desirable tool for a wide range of practical applications, Proceeding of the 21st International Modal Analysis Conference (IMAC XXI), Kissimmee, Florida, 2003.
 27. OMA, Operational Modal Analysis, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S, Denmark, 2006.
 28. Matlab, Mathworks Inc, MATLAB User Guide, Natick, MA, 1999.
 29. Analog Devices. Documentation. https://www.analog.com/en/products/adxl355.html?doc=ADXL_355.pdf. Erişim tarihi Ocak 20, 2019.
 30. Direnc.net. Arduino. <https://www.direnc.net/klon-arduino-nano-328-ft232rl>. Erişim tarihi Mart 07, 2019.
 31. Ramos J.L.F.S., Damage identification on masonry structures based on vibration signatures, Doktora Tezi, University of Minho, Minho, Portugal, 2007.

32. Jacobsen N.J., Andersen P., Brincker R., Using enhanced frequency domain decomposition as a robust technique to harmonic excitation in operational modal analysis, Proceedings of ISMA2006: International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven-Belgium, 3129-3141, 2006.
33. Brincker R., Zhang L., Andersen P., Frekans alanı ayrışımı kullanarak çevre tepkilerinden model belirleme, 18. Uluslararası Modal Analiz Konferansı, San Antonio-USA, 625-630, 2000.
34. Bendat J.S., Piersol A.G., Rasgele veri: Analiz ve ölçüm prosedürleri, 3. Baskı, John Wiley and Sons, USA, 2004.
35. Peeters B., Roeck G.D., Reference based stochastic subspace identification in civil engineering, Inverse Problems in Civil Engineering, 8 (1), 47-74, 2000.
36. Peeters B., System identification and damage detection in civil engineering, Doktora Tezi, K.U, Leuven, Belgium, 2000.
37. ARTEMIS V-5.3, Ambient Response Testing and Modal Identification Software, Structural Vibration Solutions A/S, Denmark, www.svibs.com.
38. Eroğlu E., Hacı Kasım Cami sanat tarihi raporu, Trabzon, 2007.
39. Özen H., Tuluk Ö.İ., Engin H.E., Düzenli H.İ., Sümerkan, M.R., Tutkun, M., Demirkaya, F.Ü., Keleş, S., Trabzon kent içi kültür varlıkları envanteri, Trabzon: T. C. Trabzon Valiliği İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü Yayınları, 2010.
40. Çalık İ., Tarihi cami ve minarelerin deneysel dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve restorasyon etkilerinin değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye, 2017.

