



Changes of natural frequencies of masonry stone minarets due to temperature and humidity

Abdullah Aymelek¹, Yusuf Yanık^{1*}, Ömer Yıldırım², Temel Türker¹

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

²Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Gümüşhane University, 29100, Gümüşhane, Türkiye

Highlights:

- Vibration testing of historical masonry minarets
- Investigation environmental effects
- Assessment natural frequencies depending on temperature and humidity

Keywords:

- Environmental effects
- Historical masonry minarets
- Experimental modal analysis
- Natural frequencies
- Humidity, temperature

Article Info:

Research Article

Received: 21.12.2022

Accepted: 01.09.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1222524

Acknowledgement:

This work was supported by Office of Scientific Research Projects of Karadeniz Technical University. Project number: FYL-2022-10134. The authors also thank to Dr. İsmet ÇALIK who is Director of Trabzon Foundation Regional Directorate.

Correspondence:

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

Graphical/Tabular Abstract

From past to present, many structures have been built for various purposes such as shelter, health, worship, transportation and energy. In many of these structures, damage such as cracking, settling, material deterioration occurred over time due to the environmental and dynamic effects exposed for a long time, and only some of them have survived to the present day. For these reasons, it is very important to detect the damages and take the necessary measures to protect the structures. Nowadays, structural monitoring based on the determination of the change of natural frequencies in the detection of damages gives effective results (Figure A). Figure A shows view from a ambient vibration test, temperature-humidity measurement, and power density graph. In this study, the changes in the dynamic properties of the selected masonry minarets in Trabzon under environmental conditions such as temperature and humidity were investigated.

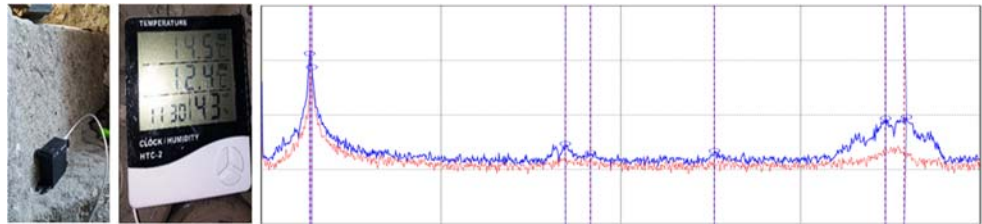


Figure A. View from vibration test, temperature-humidity measurement, and power density graph

Purpose: In this study, the minarets of İskenderpaşa, Hacı Kasım and Tavanlı Mosques were monitored by AVT, the relationship between natural frequencies and temperature with humidity was tried to be determined. For this purpose, the natural frequencies of the minarets were measured at certain intervals under different temperature and humidity conditions over a period of approximately six months. Also, the temperature with humidity values were measured simultaneously with a digital measuring device.

Theory and Methods: Vibrations tests were carried out Civil Engineering Vibration System developed by our research team. The received data were processed in ARTEMIS. Temperature and humidity values were determined by using a digital measuring device. From the data obtained from the measurements, the variation intervals of the frequencies, the percentages of change and their relations with temperature and humidity were revealed. This relationship was determined using linear and nonlinear simple and multiple regression analyses.

Results: From the study, it was determined that natural frequencies change under environmental effects such as temperature and humidity, and this rate of change was approximately 7%. There was a weak correlation between natural frequencies and temperature with humidity in İskenderpaşa Minaret, a moderate correlation in Tavanlı Minaret, and a strong correlation in Hacı Kasım Minaret. At the same time, there was a strong functional relationship between natural frequencies and temperature with humidity in Hacı Kasım Minaret, while there was a weak functional relationship in other minarets.

Conclusion: In this study, detection rates of the frequencies were close to 100% for all minarets except for a few modes. The variation between the min and max values of the frequencies is between 3.87% and 11.72%. There was a weak correlation between experimental natural frequencies and temperature with humidity in İskenderpaşa Minaret, moderate correlation in Tavanlı Minaret, and strong correlation in Hacı Kasım Minaret. At the same time, there was a strong functional relationship between frequencies and temperature with humidity in Hacı Kasım Minaret, while there was a weak functional relationship in other minarets.



Yığma taş minarelerin doğal frekanslarının sıcaklık ve neme bağlı değişimleri

Abdullah Aymelek¹, Yusuf Yanık^{1*}, Ömer Yıldırım², Temel Türker¹

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

²Gümüşhane 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 minarelerin titreşim testleri
- Çevresel etkilerin incelenmesi
- Doğal frekansların sıcaklık ve neme bağlı olarak değerlendirilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 21.12.2022

Kabul: 01.09.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1222524

Anahtar Kelimeler:

Çevresel etkiler,
tarihi yığma minareler,
deneysel modal analiz,
doğal frekanslar,
nem, sıcaklık

ÖZ

Yapılarda olası bir hasar durumunda frekanslarda meydana gelecek değişimin, sıcaklık ve nem gibi ortam koşullarına bağlı değişimden ayırt edilebilmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada, yığma taş minarelerin dinamik özelliklerinin sıcaklık ve nem gibi çevresel etkiler altındaki değişimleri incelenmiştir. Trabzon'da yer alan İskenderpaşa, Hacı Kasım ve Tavanlı Camilerinin Minareleri çevresel titreşim testi yöntemiyle takip edilerek doğal frekanslarla sıcaklık ve nem arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla minarelerin yaklaşık olarak altı aylık süre içerisinde farklı sıcaklık ve nem koşullarında doğal frekansları belirli aralıklarla ölçülmüştür. Ölçümlerde araştırma ekibimiz tarafından geliştirilen titreşim ölçüm sistemi kullanılmıştır. Ölçümlerden elde edilen verilerden doğal frekansların değişim aralıkları (en küçük ve en yüksek değerler), değişim yüzdeleri ile sıcaklık ve nemle ilişkileri ortaya konulmuştur. Bu ilişki doğrusal ve doğrusal olmayan basit ve çoklu regresyon analizleri kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmadan, doğal frekansların sıcaklık ve nem gibi çevresel etkiler altında değişim gösterdiği ve bu değişim oranının yaklaşık olarak %7 düzeyinde olduğu belirlenmiştir.

Changes of natural frequencies of masonry stone minarets due to temperature and humidity

H I G H L I G H T S

- Vibration testing of historical masonry minarets
- Investigation environmental effects
- Assessment natural frequencies depending on temperature and humidity

Article Info

Research Article

Received: 21.12.2022

Accepted: 01.09.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1222524

Keywords:

Environmental effects,
historical masonry minarets,
experimental modal analysis,
natural frequencies,
humidity, temperature

ABSTRACT

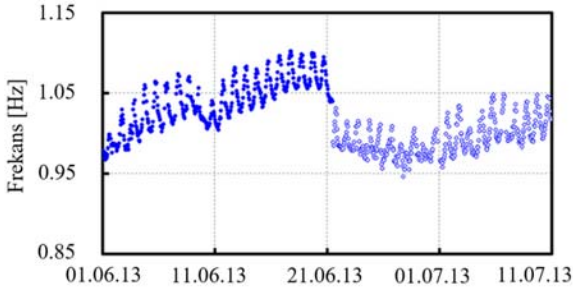
It is very important to distinguish the reason of change in natural frequencies of structures either caused by a possible damage or environmental conditions as temperature and humidity. In this study, the changes in the dynamic properties of masonry minarets under environmental effects such as temperature and humidity were investigated. The Minarets of İskenderpaşa, Hacı Kasım and Tavanlı Mosques in Trabzon were monitored by ambient vibration test method, the relationship between natural frequencies and temperature and humidity was tried to be determined. For this purpose, the natural frequencies of these minarets were measured at certain intervals under different temperature and humidity conditions over a period of approximately six months. The vibration measurement system which was developed by our research team was used in the measurements. From the data collected by these measurements, the variation intervals of the natural frequencies (the smallest and the highest values), the percentages of change and their relations with temperature and humidity were revealed. This relationship was determined by using linear-nonlinear simple and multiple regression analyses. From the study, it was found that the natural frequencies change under environmental effects such as temperature and humidity, and this rate of change was approximately 7%.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : abduallah.aymelek@hotmail.com, *yusufyanik@ktu.edu.tr, yildirim.omer23@gmail.com, temelturker@ktu.edu.tr / Tel: +90 537 810 0761

1. Giriş (Introduction)

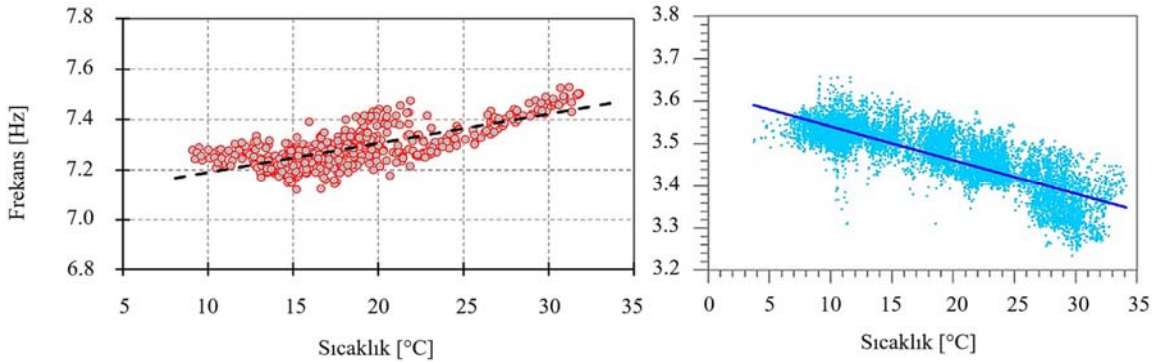
Geçmişten günümüze barınma, sağlık, ibadet, ulaşım ve enerji gibi çeşitli kullanım amaçlarına yönelik birçok yapı inşa edilmiştir. Ancak bu yapıların birçoğunda uzun süre maruz kalınan çevresel etkilerden dolayı zamanla çatlama, oturma, malzeme bozulması gibi hasarlar meydana gelmiş ve bunların sadece bir kısmı günümüze kadar ayakta kalabilmiştir. Oluşan hasarlar yapıların güvenliğini olumsuz etkilemekte, deprem gibi olası bir doğal afet karşısında yıkılmasına veya çok ağır hasar almasına neden olmakta ve büyük maddi-manevi kayıplara yol açmaktadır. Tarihi yapılar da hem bu afetlerden hem de ortam koşulları ve bakımsızlıktan dolayı oldukça etkilenmekte ve kültürel mirasımızda önemli kayıplar meydana gelmektedir. Bu sebeplerden ötürü oluşan hasarların tespit edilip yapıları korumaya yönelik gerekli tedbirlerin alınması oldukça önemlidir. Hasarların tespit edilmesinde doğal frekansların değişiminin belirlenmesine bağlı yapısal takip günümüzde etkin sonuç vermektedir. Bu yaklaşımda yapılarda hasara bağlı olarak doğal frekanslarda meydana gelen değişimin, sıcaklık ve nem gibi ortam koşullarına bağlı değişimden ayırt edilebilmesi oldukça önemlidir.

Yapılar kullanım ömürleri boyunca deprem gibi ani etkilerin yanında çevresel etkilere de maruz kalmaktadır. Doğal frekanslar deprem gibi etkilerden oluşan hasarlara bağlı olarak değişebildiği gibi sıcaklık ve nem gibi çevresel etkilere bağlı olarak da değişebilmektedir [1, 2]. Gentile vd. uzun süreli ve sürekli yapısal takiplerle, doğal frekanslarda deprem öncesinde ve sonrasında genel bir dalgalanma olduğunu, depremden oluşan hasar etkilerinden dolayı ise doğal frekanslarda ani ve kalıcı bir düşüş olduğunu belirlemiştir (Şekil 1) [1].



Şekil 1. Deprem sonrası frekanslarda kayma meydana gelmesi [1]
(Post-earthquake frequency shearing and the relationship between temperature and natural frequencies)

Benzer sonuçlar Saisi vd. ve Cavalagli vd. tarafından yapılan çalışmalarda da gözlemlenmiştir [3, 4]. Bu ani ve kalıcı düşüş yapıda



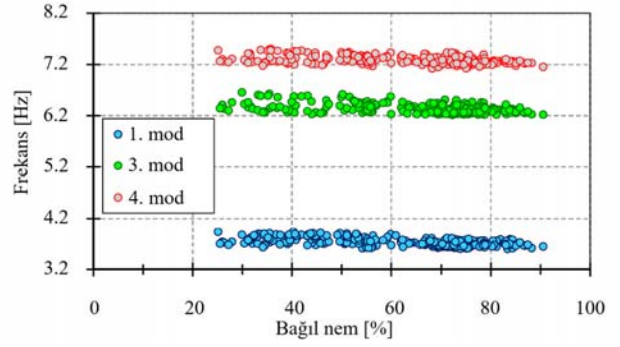
Şekil 2. Doğal frekansla sıcaklık arasındaki pozitif ve negatif ilişki [2, 8]
(Positive and negative relationship between natural frequency and temperature)

gözle görülebilecek türden hasarların oluşmasının yanında mevcut çatlakların genişlemesi ve gözle görülmeyen çatlakların oluşması şeklinde de olabilmektedir. Deprem sonrasında doğal frekanslarda kaymanın meydana gelmesinin yanı sıra doğal frekanslar ve sıcaklık arasındaki korelasyonun deprem öncesi duruma göre değişmesine de yol açmaktadır. Sıcaklık ve nemin dinamik karakteristikleri etkilediği birçok çalışmada gösterilmiştir [5-9]. Özellikle sıcaklığın doğal frekanslar üzerinde önemli bir etkisinin olduğu bilinmektedir. Xia vd. sıcaklığın yapıların mod şekilleri üzerindeki etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğunu, doğal frekansların ise genellikle sıcaklığın artmasıyla düştüğünü belirtmiştir [10]. Gentile vd. mod şekillerinin çevresel değişikliklerden ziyade yapısal değişikliklerden daha çok etkilendiğini ifade etmiştir [7]. Minare, kule, çekirdek ve perde gibi yapısal sistemlerin malzemesinde çatlak ve tabanda gelişecek plastik hasara bağlı olarak periyodundaki değişimi hesaplamak üzere Kazaz tarafından analitik bir yöntem de önerilmiştir [11]. Yığma yapılarda doğal frekanslar için tam tersi bir durum söz konusudur. Ortam sıcaklığı ve yapının doğal frekansları arasında çoğunlukla pozitif doğrusal bir ilişki bulunmuştur. Ancak bazı durumlarda ilişki negatiftir [7]. Gentile vd. İtalya'da yer alan Santa Maria del Carrobiolo Kilisesi'nin Çan Kulesi kurulan yapı sağlığı sistemiyle 2 yıl boyunca alınan verilerden elde edilen doğal frekanslar ve mod şekilleri gibi dinamik karakteristikleri değerlendirmiştir. Sıcaklık ve doğal frekanslar arasında bu yapıda güçlü bir ilişkinin olduğu ve sıcaklık artışıyla doğal frekanslarda artış olduğu ortaya konulmuştur [6]. Masciotta vd. ise doğal frekanslar ve sıcaklık arasındaki bu pozitif korelasyonun yığma yapılarda sıklıkla görüldüğünü belirtmiş, bunu sıcaklığın artmasıyla yığma yapı malzemesindeki ısı genleşme meydana gelmesi ve duvarın nem içeriğinin azalması sonucu malzemede meydana gelen rijitlik artışıyla açıklamıştır [2]. Ubertini vd. sıcaklığın yükselmesine bağlı eğilme modlarının frekanslarındaki artışı ısı genleşmeyle harç tabakalarında oluşan mikro çatlakların kapanmasına bağlarlarken burulma modundaki sıcaklığın yükselmesine bağlı azalmayı daha önce yapılan bir güçlendirme çalışmasında kullanılan bağlantı elemanlarının ve fiber takviyelerin ısıyla genleşmesi sonucu yapının burulma rijitliğinde azalma meydana gelmesiyle açıklamaktadır [5]. Kita vd. doğal frekanslar ve sıcaklık arasındaki negatif korelasyonu metal bağlantı çubuklarının sıcaklık artışıyla gevşemesi sonucu yapının rijitliğinin azalmasıyla ve yapıda bulunan orta düzeydeki yapısal hasarla ilişkilendirmektedir [8]. Gentile vd. Milan Katedrali'ne ait dinamik karakteristiklerin sıcaklık ve nem gibi çevresel koşullara bağlı değişimini incelemiştir. Yapı yaklaşık olarak 4 ay boyunca yapıya kurulan sistem aracılığıyla takip edilip yapıya ait doğal frekanslar ve mod şekilleri elde edilmiştir. Çalışmadan, sıcaklığın doğal frekanslar üzerindeki etkisi tüm modlarda, nemin etkisinin ise sadece ilk modda görüldüğü belirlenmiştir. Sıcaklık ve frekans arasında, literatürdeki çalışmaların nerdeyse tamamının aksine,

negatif bir lineer ilişki ortaya konulmuştur. Yani başka bir deyişle tüm doğal frekansların sıcaklığın artmasıyla neredeyse doğrusal olarak azaldıklarını göstermiştir. Bunun sebebinin de bu yapıda bulunan metal bağlantı çubukların sıcaklıkla etkileşiminden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Doğal frekans-sıcaklık değişiminin pozitif ve negatif durumuna ait örnekler Şekil 2’de görülmektedir [7].

Yığma yapılarda genel olarak sıcaklık artışıyla doğal frekanslarda artış beklenirken donma durumunda doğal frekanslarda bir artış olduğu da ortaya konulmuştur [8]. Kita vd. sıcaklığın 0°C’nin altına düşmesi durumunda tüm doğal frekansların hızlı bir şekilde arttığını belirlemiştir. Bunun sebebinin de mikro gözeneklerde ve çatlaklarda buz kristallerinin oluşması ve boşlukların kapanması sonucu yapı rijitliğinin artmasıyla ilişkilendirmiştir (Şekil 3) [8].

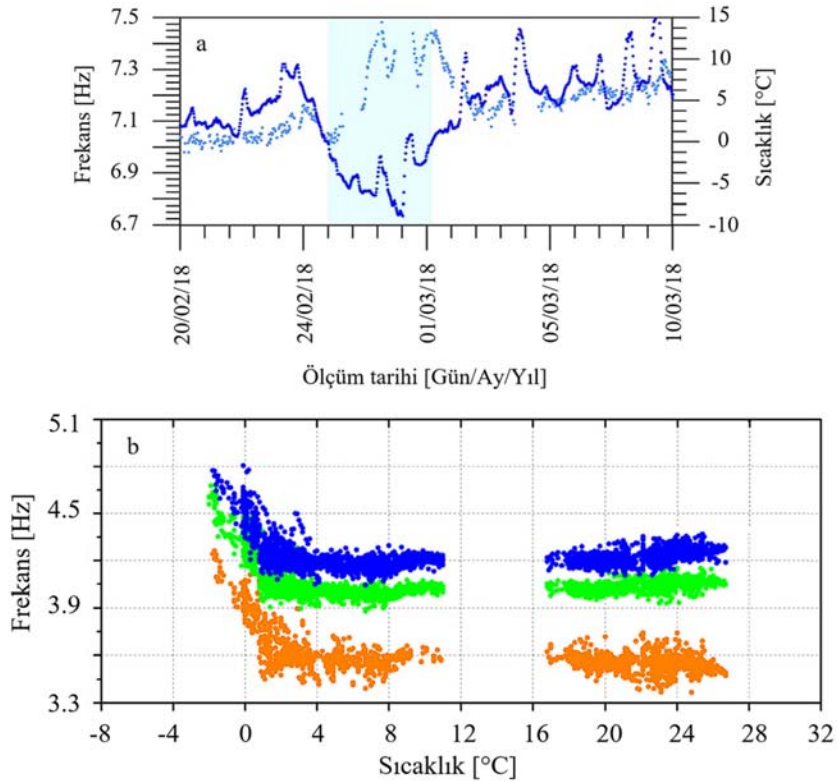
Cabboi vd. sıcaklığın doğal frekanslarla değişiminin modlara göre farklılık gösterdiğini ve burulma modunun eğilme modlarına nazaran sıcaklıktan daha az etkilendiğini belirlemiştir [9]. Kita vd. ile Ubertini vd. bu farklılığı yapısal elemanların sıcaklığa farklı ölçülerde maruz kalması ile ilişkilendirmiştir. Yığma yapıların doğal frekansları sıcaklığın yanında nemden de etkilenmektedir. Ancak doğal frekanslarla nem arasında, sıcaklıkta olduğu kadar güçlü bir ilişki genelde bulunamamaktadır [8, 5]. Saisi vd. nem artışının doğal frekanslarda azalmaya neden olduğunu belirtmiş ve bunu yapı malzemesinin su emmesine bağlamıştır [3]. Masciotta vd. ile Ubertini vd. doğal frekanslar ve nem arasındaki negatif bir korelasyon bulmuş ve aynı şekilde bunu duvardaki nemin artması sonucu yapı kütlelerinin artmasıyla ilişkilendirmiştir. Tüm bunlarla birlikte hava nemiyile doğal frekanslar arasında dikkate değer bir ilişki bulunamamıştır (Şekil 4) [2, 5]. Saisi vd. doğal frekansların sıcaklık ve nem gibi çevresel etkilerle olan korelasyonlarının belirlenmesinin, yapısal durumdaki anormalliklerin erkenden tespit edilmesini sağlayacağını ifade etmektedir [3].



Şekil 4. Doğal frekanslar ve bağıl nem arasındaki ilişki [2] (Relationship between natural frequencies and relative humidity)

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında Gentile vd. [7]; Kita vd. [8] ve Xia vd. [10] doğal frekanslarla sıcaklık arasındaki negatif bir korelasyon elde etmişken Masciotta vd. [2] ve Gentile vd. [6] çoğunlukla pozitif doğrusal bir ilişki bulmuş ve sıcaklık artışıyla doğal frekanslarda bir artış elde etmiştir. Doğal frekanslarla nem arasında Masciotta vd. [2]; Saisi vd. [3]; Ubertini vd. [5] arasında negatif bir korelasyon bulunmuştur.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, uzun açıklıklı köprüler, yığma ve kerpiç gibi çeşitli yapılarda çevresel koşulların yapısal davranışa etkisi üzerine birçok inceleme ve değerlendirmenin yapıldığı görülmektedir. Yığma yapılar bu değişikliklerden daha fazla etkilenme potansiyeline sahiptir. Dinamik karakteristiklerin çevresel koşullar gibi uzun süreli etkiler altındaki değişiminin bilinmesi durumunda deprem gibi ani etkilerin oluşturacakları yapısal değişiklikler daha kolay bir şekilde tespit edilebilmektedir. Bu çalışmada doğal frekanslardaki zamana bağlı değişimin hasardan mı



Şekil 3. Zamana bağlı frekansların sıcaklığa bağlı değişimi [8] ve donma durumunda frekans-sıcaklık ilişkisi [9] (Time-dependent variation of frequencies with temperature [8] and frequency-temperature relationship in case of freezing [9])

yoksa çevresel etkilerden mi kaynaklandığının araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla Trabzon şehrinden seçilen yığma minarelerin sıcaklık ve nem gibi çevresel etkilere bağlı olarak yapısal davranışlarındaki değişikliklerin belirlenmesi ve normal kullanım durumlarındaki frekans değişim aralıkları dikkate alınarak olası hasar durumlarının değerlendirilmesine imkan sağlaması hedeflenmiştir.

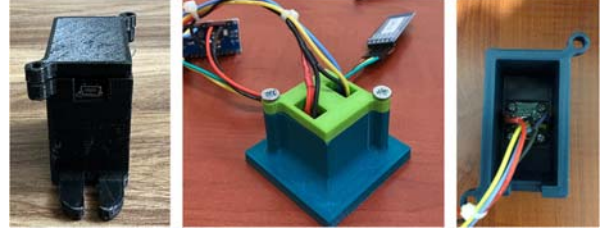
2. Yapısal Takip (Structural Monitoring)

Yapıların statik ve dinamik davranışlarının takip edilmesi işlemine genel olarak yapı sağlığı izleme adı verilmektedir. İnşa edilen yapıların kullanımlarındaki devamlılığının sağlanabilmesi için ömürleri boyunca düzenli olarak yapısal takipleri gerçekleştirilerek bakım ve onarım işlemleri yürütülmeli, gerekli görüldüğü durumlarda güçlendirme yapılarak yapı güvenliği sağlanmalıdır. Bu işlemlerin yapılabilmesi için yapının mevcut durumunun iyi bilinmesi gerekmektedir [12]. Son yıllarda birçok yapıda tahribatsız inceleme yöntemleriyle yapısal takipler gerçekleştirilmekte ve özellikle de kültürel miras olan tarihi yapılar üzerinde yapısal takibin ehemmiyeti daha net bir şekilde anlaşılmaktadır. Bu yapılarda yapının davranışının en doğru şekilde hesaplanması oldukça önemlidir [13]. Tarihi yapılar genellikle yığma yapı olarak inşa edilmiş olup bu yapılar düşük süneklikleri sebebiyle birçok etkiye maruz kalabilmektedir. Yüzerce yıllık olan bu yapıların bir kısmı günümüze kadar ayakta kalabilmiş bir kısmı da yıkılmıştır [14].

Yapısal takip, yapılara yerleştirilen sensörler yardımıyla farklı zaman ve koşullarda gerçekleştirilen ölçümlerin kıyaslanarak yapı davranışındaki değişikliklerin belirlenmesi yaklaşımını esas almaktadır. Bu amaçla titreşim verilerinin ölçülmesine dayalı deneysel modal analiz yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Deneysel modal analiz yöntemiyle doğal frekanslar, mod şekilleri ve modal sönüm oranları gibi dinamik karakteristikler elde edilerek yapının dinamik davranışı belirlenmektedir.

Yapıların dinamik karakteristikleri deprem, aşırı yüklemeye ve patlama gibi etkiler altında oluşan hasarlar ile sıcak ve nem gibi çevresel etkilere bağlı olarak değişim gösterebilmektedir. Olası bir hasar durumunda meydana gelecek değişimin, sıcaklık ve nem gibi ortam koşullarına bağlı değişimden ayırt edilebilmesi gerekmektedir. Bunun için de yapının hasarsız durumundaki doğal frekansların sıcaklık ve neme bağlı değişim aralığının belirlenmesi oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, araştırma ekibimiz tarafından geliştirilen titreşim ölçüm sistemi (Civil Engineering Vibration System-CEVS) kullanılarak deneysel modal analiz yöntemlerinden biri olan çevresel titreşim testi (ÇTT) yöntemiyle seçilen yapıların titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. CEVS sisteminde Şekil 5'te verilen ivmeölçer, veri toplama sistemi (arduino) ve iletim kablosu bileşenleri bulunmaktadır.



Şekil 5. CEVS sistemine ait görüntüler (Images from the CEVS systems)

Sistemde kullanılan 20bitlik ADC'ye sahip yüksek hassasiyetli ivmeölçer sensörü, x-y-z eksenlerinde aynı anda senkron okumaları saniyede 250/500/1000Hz ile örnekleme yapabilmektedir [15]. CEVS'teki diğer donanım olan arduino, veri toplama ve gönderme ünitesi olarak görev yapmakta ve ivmeölçer ile bilgisayar arasında bağlantı oluşturmaktadır [16].

3. Uygulamalar (Applications)

Bu çalışmada, üç farklı tarihi yığma minarenin doğal frekansları yaklaşık altı ay boyunca belirli aralıklarla incelenmiş ve çevresel etkiler sonucu doğal frekanslardaki değişim miktarının ne düzeyde olduğu belirlenmiştir. Böylelikle herhangi bir zamanda gerçekleştirilen ÇTT sonucu elde edilen doğal frekanslarda çevresel etkilere bağlı geçici bir değişim mi yoksa yapıyı kalıcı olarak etkileyen bir değişim mi meydana geldiği değerlendirilebilmiştir. Çalışma kapsamında Trabzon Ortahisar'da yer alan İskenderpaşa, Hacı Kasım Muhittin ve Tavanlı Camilerinin Minareleri seçilmiştir (Şekil 6).

İskenderpaşa Camisi, 1529 yılında kesme taş kullanılarak inşa edilmiştir. Caminin tek şerefeli bir minaresi bulunmaktadır. Cami, Trabzon ilinin Ortahisar ilçesinin şehir merkezinde İskenderpaşa Mahallesi'nde yer almaktadır. Caminin kuzeyinde ve batısında avlusu, güneyinde ve doğusunda ise taşıt yolu bulunmaktadır. Cami ve minaresi, yoğun trafik ve insan kaynaklı titreşimlere maruz kalmakta, aynı zamanda doğusunda yapılan kırma ve patlatmalı kazı çalışmalarından da oldukça etkilenmektedir. Yapıda yer alan kitabeler, yapının farklı dönemlerde onarım geçirdiğini göstermektedir [17]. İskenderpaşa Cami son olarak 2010 yılında Trabzon Vakıflar Bölge Müdürlüğü tarafından restore edilmiştir. Minarenin zeminden külah tepesine kadar toplam boyu 21,41m'dir. Minarenin yaklaşık olarak 4,8m'lik kısmı caminin batı duvarına bitişik durumdadır (Şekil 7).

Hacı Kasım Camisi, ilk olarak 1531 yılında ahşap bir mescit şeklinde inşa edilmiştir [18]. Ancak ahşap mescit yanmış 1821 yılında bugünkü şekli ile yığma taş olarak tekrardan inşa edilmiştir [19]. Caminin tek



Şekil 6. İskenderpaşa, Hacı Kasım ve Tavanlı Camileri ve minareleri (İskenderpaşa, Hacı Kasım ve Tavanlı Mosques and their minarets)

şerefeli bir minaresi bulunmaktadır. Cami, Trabzon ilinin Ortahisar ilçesinin Cumhuriyet Mahallesi'nde yer almaktadır. Caminin güneyinde Yavuz Selim Bulvarı, batısında taşıt yolu, kuzeyinde cami müştemilatının yer aldığı betonarme bir eklenti ve doğusunda ise fırın binası bulunmaktadır. Cami ve minaresi, taşıt trafiği ve insan kaynaklı titreşimlere yoğun olarak maruz kalmaktadır. Hacı Kasım Cami ve Minaresi 2013 yılında Trabzon Vakıflar Bölge Müdürlüğü tarafından restore edilmiştir. Minarenin zeminden külah tepesine kadar toplam boyu 22,63m'dir. Minarenin yaklaşık olarak 8,5m'lik kısmı caminin batı cephesine bitişik durumdadır (Şekil 7).

Tavanlı Camisi 1874 yılında inşa edilmiştir [20]. Caminin tek şerefeli bir minaresi bulunmaktadır. Cami, Trabzon ilinin Ortahisar ilçesinin Gazipaşa Mahallesi'nde yer almaktadır. Caminin güneyinde ve batısında mezarlık, doğusunda ve kuzeyinde ise taşıt yolu bulunmaktadır. Cami ve minaresi, bölgede yoğun bir trafik olmadığından dolayı taşıt ve insan kaynaklı titreşimlere çok fazla maruz kalmamaktadır. Eserin 1890 yılında bir onarım geçirdiği üzerinde yer alan kitabeden anlaşılmaktadır. Yapı 2010 yılında Trabzon Vakıflar Bölge Müdürlüğü tarafından restore edilerek eklentilerinden ayrılmış ve orijinal haline döndürülmüştür. Minarenin zeminden külah tepesine kadar toplam boyu 24,58m'dir. Minarenin yaklaşık olarak 2,35m'lik kısmı caminin batısında bulunan mezarlığın duvarına bitişiktir (Şekil 7).

Minarelerin yapısal takibi amacıyla doğal frekansları ÇTT yöntemiyle, sıcaklık ile nem değerleri ise dijital ölçüm cihazıyla eş zamanlı olarak belirlenmiştir. İskenderpaşa Minaresi'nde trafik, insan hareketi, rüzgâr, kazı çalışmaları gibi çevresel etkiler ve gerekli durumlarda kauçuk tokmakla oluşturulan rastgele titreşimler altında 10/06/2021-09/06/2022 tarihleri arasında toplamda 20 ölçüm

gerçekleştirilmiştir. Hacı Kasım Minaresi'nde 27/05/2021-09/06/2022 tarihleri arasında toplamda 18 ölçüm ve Tavanlı Minaresi'nde 12/11/2021-09/06/2022 tarihleri arasında toplamda 14 ölçüm gerçekleştirilmiştir. Minarenin doğal frekanslarının ortam sıcaklık ve nemine bağlı olarak değişimleri incelenmek istendiğinden ölçüm sırasında minarenin iç ve dış sıcaklıkları ile nem değerleri dijital ölçüm cihazıyla kaydedilmiştir. Titreşim testlerine ve ölçüm cihazına ait görüntüler Şekil 8'de verilmiştir. Minarelerde gerçekleştirilen titreşim ölçümlerinin tarihleri, süreleri; ölçüm sırasındaki sıcaklık ve nem değerleri ile hava durumları Tablo 1-Tablo 3'te verilmiştir. Ölçümlerde bazen 1, bazen de 2 CEVS sistemi kullanılmıştır (Şekil 9). Titreşim ölçümleri saniyede 250 örnek alacak şekilde 9-15dk arasında değişen sürelerle gerçekleştirilmiştir. Örnekleme frekansının 250Hertz (Hz) olmasından dolayı elde edilen veriler maksimum 0-125Hz frekans aralığında analiz edilebilmektedir. Benzer minareler üzerinde yapılan literatür taraması, seçilen örnekleme frekansının yeterli olduğunu göstermektedir. Sensörlerin üç eksenli olması sayesinde her iki durumda da birbirine dik eksenlerde yataydaki titreşim hareketleri belirlenmiştir. Tek ivmeölçer kullanıldığı durumlarda ivmeölçer ya çekirdeğin üzerine ya da son basamaklardan birine yatay olarak yerleştirilmiştir. İki ivmeölçer kullanıldığı durumlarda ise ivmeölçerler çeper duvarının iç yüzüne veya çekirdeğin yan yüzüne dikey olarak sabitlenmiştir. Minareden alınan titreşim sinyalleri ".txt" uzantılı dosyalara kaydedilmiştir. Elde edilen ivme değerleri eksen takımları dikkate alınarak, araştırma ekibimiz tarafından MATLAB arayüzünde geliştirilen Civil Engineering Vibration Analysis (CEVA) yazılımında işlenmeye hazır hale getirilmiştir (Şekil 10) [24]. Bu yazılımda, alınan sinyal örnekleri x, y ve z eksenleri için ayrı ayrı görüntülenebilmekte ve bu sinyallerin frekans ortamında işlenmesi sonucunda elde edilen grafikler de incelenebilmektedir.



Şekil 7. Camilerin ve minarelerin uydu görüntüleri [21-23] (Satellite images of the mosques and the minarets)



Şekil 8. Minarelerde yapılan ölçümlere ait bazı görüntüler (Some images from the measurements made on the minarets)

Tablo 1. İskenderpaşa Minaresi'nde ölçümlere ait bilgiler (Information of the measurements on İskenderpaşa Minaret)

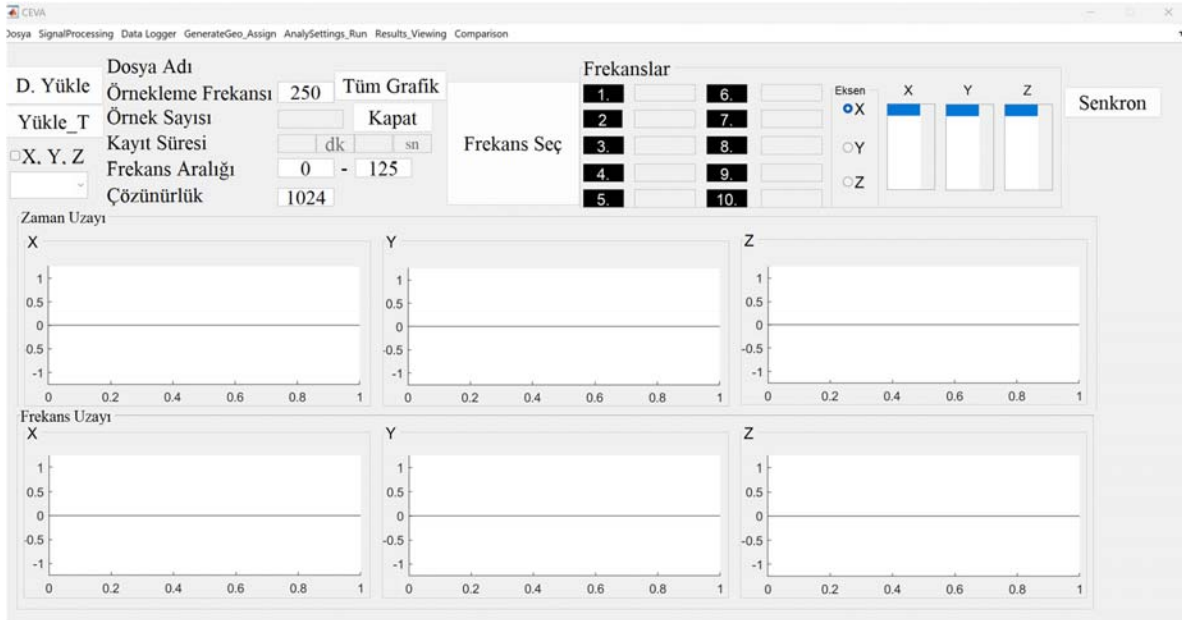
Ölçüm No	Tarih [Gün/Ay/Yıl]	Süre [dk]	Sıcaklık [°C]	Nem [%]	Hava Durumu
1		14,59			
2	10/06/2021	15,08	18,0	76	Parçalı Bulutlu
3		15,09			
4	01/07/2021	13,88	21,0	68	Açık
5		9,08			
6	22/10/2021	15,11	17,0	67	Parçalı Bulutlu
7	12/11/2021	15,09	12,1	47	Açık
8	26/11/2021	15,08	12,3	61	Açık
9	10/12/2021	12,99	12,5	55	Açık
10	27/12/2021	15,09	12,4	43	Açık
11	13/01/2022	14,33	9,0	71	Çok Bulutlu
12	24/01/2022	15,08	5,6	66	Çok Bulutlu
13	08/02/2022	15,10	15,2	41	Çok Bulutlu
14	22/02/2022	15,08	11,7	59	Açık
15	08/03/2022	15,07	9,3	57	Çok Bulutlu
16	22/03/2022	15,07	7,1	64	Açık
17	19/04/2022	15,08	12,5	64	Çok Bulutlu
18	07/05/2022	13,37	12,8	71	Çok Bulutlu
19	19/05/2022	15,09	14,3	64	Çok Bulutlu
20	09/06/2022	15,15	23,0	79	Az Bulutlu
Ortalama		14,48	14,1	63	
Minimum		9,08	5,6	41	
Maksimum		15,15	23,0	79	

**Şekil 9.** Tek ve iki ivmeölçerin yerleşim düzenleri (Layouts of single and two accelerometers)**Tablo 2.** Hacı Kasım Minaresi'nde ölçümlere ait bilgiler (Information of the measurements on Hacı Kasım Minaret)

Ölçüm No	Tarih [Gün/Ay/Yıl]	Süre [dk]	Sıcaklık [°C]	Nem [%]	Hava Durumu
1		15,12			
2		15,08			
3	27/05/2021	15,09	18,8	72	Açık
4		15,08			
5	12/11/2021	15,08	13,3	53	Açık
6	26/11/2021	15,08	14,1	62	Açık
7	10/12/2021	13,84	15,9	55	Açık
8	27/12/2021	15,05	14,1	49	Açık
9	13/01/2022	15,04	9,6	63	Yağmurlu
10	24/01/2022	14,12	8,6	64	Çok Bulutlu
11	08/02/2022	15,09	14,1	44	Çok Bulutlu
12	22/02/2022	15,09	12,5	53	Açık
13	08/03/2022	15,07	9,7	52	Çok Bulutlu
14	22/03/2022	15,08	5,5	57	Çok Bulutlu
15	19/04/2022	15,08	15,8	55	Çok Bulutlu
16	07/05/2022	13,32	12,9	79	Çok Bulutlu
17	19/05/2022	15,08	16,7	63	Çok Bulutlu
18	09/06/2022	15,10	24,0	82	Çok Bulutlu
Ortalama		14,86	14,6	62	
Minimum		13,32	5,5	44	
Maksimum		15,12	24,0	82	

Tablo 3. Tavanlı Minaresi'nde ölçümlere ait bilgiler (Information of the measurements on Tavanlı Minaret)

Ölçüm No	Tarih [Gün/Ay/Yıl]	Süre [dk]	Sıcaklık [°C]	Nem [%]	Hava Durumu
1	12/11/2021	15,08	13,4	48	Açık
2	26/11/2021	15,08	13,7	60	Açık
3	10/12/2021	15,01	14,7	58	Açık
4	27/12/2021	15,04	15,1	49	Açık
5	13/01/2022	15,05	5,0	58	Yağmurlu
6	24/01/2022	14,59	5,0	60	Çok Bulutlu
7	08/02/2022	15,10	15,6	44	Çok Bulutlu
8	22/02/2022	15,09	13,0	54	Açık
9	08/03/2022	15,09	9,0	54	Çok Bulutlu
10	22/03/2022	15,08	5,7	59	Az Bulutlu
11	19/04/2022	15,08	12,9	58	Çok Bulutlu
12	07/05/2022	15,09	12,5	61	Çok Bulutlu
13	19/05/2022	15,09	13,1	66	Çok Bulutlu
14	09/06/2022	13,95	21,3	77	Az Bulutlu
Ortalama		14,96	12,1	58	
Minimum		13,95	5,0	44	
Maksimum		15,10	21,3	77	

**Şekil 10.** CEVA yazılımının arayüzü (Interface of CEVA software)

Titreşim ölçümleriyle elde edilen titreşim sinyallerine Fourier dönüşümleri uygulanarak spektrumlar belirlenmiştir. Sinyaller ARTEMIS yazılımı kullanılarak geliştirilmiş frekans tanım alanında ayrıştırma (GFTAA) yöntemiyle 0-25Hz frekans aralığında incelenmiş ve minarelin deneysel doğal frekansları belirlenmiştir [25-31]. Sinyallerin işlenmesi sonucunda spektral yoğunluk fonksiyonları ile tekil değerler elde edilmiş ve her bir minare için birer örnek Şekil 11'de verilmiştir.

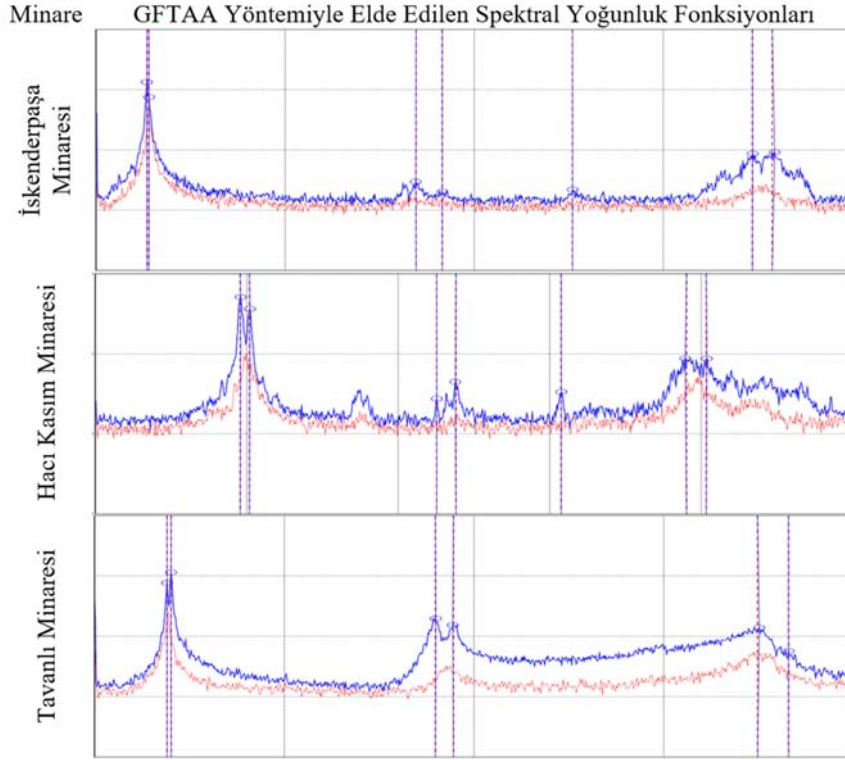
4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

İskenderpaşa, Hacı Kasım ve Tavanlı Minareleri'nin deneysel doğal frekansları sırasıyla Tablo 4-Tablo 6'da verilmiştir. Tabloların alt kısımlarında doğal frekansların ortalama, minimum, maksimum ve standart sapma değerlerinin yanı sıra minimum ve maksimum arasındaki değişim yüzdeleri ile doğal frekansların tespit edilme oranları bulunmaktadır. Verilerin işlenmesi sonucu İskenderpaşa Minaresi'nin 5. moddaki frekans değerleri %95 oranında ve diğer altı moduna ait frekanslar %100 oranında tespit edilmiştir. Böylece

spektral yoğunluk fonksiyonlarındaki pikler kolaylıkla seçilmiş ve frekansların minimum ve maksimum değerleri arasındaki değişimin ortalaması %6,33 olarak bulunmuştur.

Verilerin işlenmesi sonucu Hacı Kasım Minaresi'nin ilk yedi moduna ait deneysel doğal frekansları 4. ve 5. modlar dışında %100 olarak tespit edilmiştir. Doğal frekansların minimum ile maksimum değerleri arasındaki değişimin ortalaması %7,16 ve bu değer İskenderpaşa Minaresi'ninkinden yüksek olmakla beraber benzer düzeyde elde edilmiştir.

Verilerin işlenmesi sonucu Tavanlı Minaresi'nin ilk 8 moduna ait deneysel doğal frekansları 5., 6. ve 7. modlar dışında %100 olarak tespit edilmiştir. Özellikle 5. modda tespit edilme oranının düşük olması, ilk ölçümlerde 5. moda ait piklerin belirgin olmaması ve seçilememesinden kaynaklanmaktadır. Doğal frekansların minimum ve maksimum değerleri arasındaki değişimin ortalaması %7,96'dır. İncelenen minarelerde deneysel doğal frekansların minimum ile maksimum değerleri arasındaki değişim %6,33 ile %7,96



Şekil 11. Verilerin analizi sonucu elde edilen bazı spektral yoğunluk fonksiyonları
(Some spectral density functions obtained as a result of the analysis of the data)

Tablo 4. İskenderpaşa Minaresi'nin deneysel doğal frekansları (Experimental natural frequencies of İskenderpaşa Minaret)

Ölçüm No	Tarih [Gün/Ay/Yıl]	Doğal Frekanslar [Hz]						
		1, Mod	2, Mod	3, Mod	4, Mod	5, Mod	6, Mod	7. Mod
1	10/06/2021	1,081	1,119	6,771	7,324	10,080	13,886	14,303
2		1,077	1,125	6,706	7,433	10,076	13,871	14,368
3	01/07/2021	1,081	1,099	6,751	7,262	10,132	13,587	13,977
4		1,076	1,104	6,798	7,219		13,621	13,988
5	22/10/2021	1,054	1,095	6,543	6,972	10,011	13,344	13,764
6		1,053	1,094	6,535	7,060	9,995	13,382	13,868
7	12/11/2021	1,065	1,099	6,641	7,035	10,137	13,582	13,853
8	26/11/2021	1,099	1,115	6,866	7,287	10,363	14,281	14,888
9	10/12/2021	1,094	1,119	6,804	7,243	10,245	14,172	14,754
10	27/12/2021	1,081	1,125	6,797	7,356	10,340	14,110	14,507
11	13/01/2022	1,075	1,119	6,776	7,341	10,209	14,138	14,943
12	24/01/2022	1,076	1,111	6,768	7,303	10,717	14,149	14,455
13	08/02/2022	1,057	1,099	6,777	7,197	10,737	14,000	14,323
14	22/02/2022	1,106	1,128	6,871	7,346	10,357	14,062	14,340
15	08/03/2022	1,075	1,123	6,763	7,293	10,699	14,076	14,367
16	22/03/2022	1,094	1,143	6,851	7,412	10,396	14,272	14,528
17	19/04/2022	1,099	1,123	6,757	7,238	10,111	13,712	14,108
18	07/05/2022	1,074	1,111	6,763	7,299	10,711	14,261	14,466
19	19/05/2022	1,058	1,094	6,682	7,176	10,672	13,616	13,892
20	09/06/2022	1,098	1,135	6,868	7,324	10,155	14,141	14,333
Ortalama		1,079	1,114	6,754	7,256	10,323	13,913	14,301
Minimum		1,053	1,094	6,535	6,972	9,995	13,344	13,764
Maksimum		1,106	1,143	6,871	7,433	10,737	14,281	14,943
Min-Maks Değişimi (%)		5,033	4,479	5,142	6,612	7,424	7,022	8,566
Standart Sapma		0,016	0,014	0,094	0,121	0,262	0,303	0,340
Tespit Edilme Oranı (%)		100,0	100,0	100,0	100,0	95,0	100,0	100,0

aralığındadır. Bu durumun bölgenin ılıman havasının sıcaklık değişimini azaltmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Daha karasal bir bölgede doğal frekanslardaki farkların daha yüksek

düzeyde olması beklenmektedir. İskenderpaşa, Hacı Kasım ve Tavanlı Minareleri'nin deneysel doğal frekanslarının zaman göre değişimi sırasıyla Şekil 12-Şekil 14'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Hacı Kasım Minaresi'nin deneysel doğal frekansları (Experimental natural frequencies of Hacı Kasım Minaret)

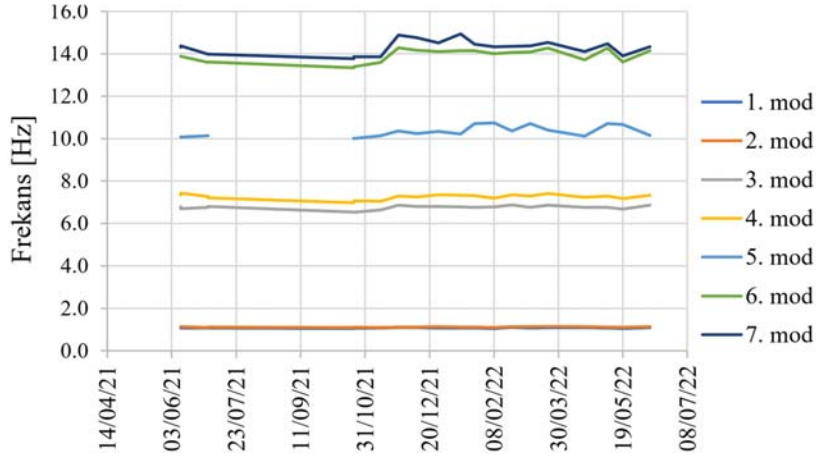
Ölçüm No	Ölçüm Tarihi [Gün/Ay/Yıl]	Doğal Frekanslar [Hz]						
		1, Mod	2, Mod	3, Mod	4, Mod	5, Mod	6, Mod	7. Mod
1		2,870	3,052	6,761	7,145	9,226	11,710	12,100
2	27/05/2021	2,905	3,079	6,798	7,118	9,246	11,699	12,162
3		2,906	3,109	6,798	7,132	9,259	11,696	12,110
4		2,900	3,107	6,807	7,141	9,257	11,665	12,131
5	12/11/2021	2,808	3,148	6,825	7,239	9,147	11,834	12,219
6	26/11/2021	2,820	3,162	6,810	7,294		11,976	12,276
7	10/12/2021	2,770	3,181	6,735			11,884	12,226
8	27/12/2021	2,772	3,180	6,817	7,247		12,003	12,340
9	13/01/2022	2,613	3,200	6,477	7,215	9,203	11,937	12,151
10	24/01/2022	2,568	3,172	6,476	7,207	9,134	12,006	12,307
11	08/02/2022	2,553	3,155	6,599	7,175	9,144	11,646	12,041
12	22/02/2022	2,685	3,152	7,041	7,666	9,161	12,034	12,158
13	08/03/2022	2,689	3,129	6,658	7,291	9,121	11,961	12,147
14	22/03/2022	2,670	3,104	6,594	7,308	9,090	12,008	12,310
15	19/04/2022	2,679	3,140	6,590	7,173	9,169	11,638	11,873
16	07/05/2022	2,829	3,084	6,681	7,369	9,160	11,957	12,474
17	19/05/2022	2,804	3,043	6,555	7,116	9,216	11,844	12,537
18	09/06/2022	2,975	3,077	7,044	7,721		12,071	12,312
Ortalama		2,768	3,126	6,726	7,268	9,181	11,865	12,215
Minimum		2,553	3,043	6,476	7,116	9,090	11,638	11,873
Maksimum		2,975	3,200	7,044	7,721	9,259	12,071	12,537
Min-Maks Değişimi (%)		16,530	5,159	8,771	8,502	1,859	3,721	5,593
Standart Sapma		0,123	0,047	0,164	0,176	0,054	0,151	0,155
Tespit Edilme Oranı (%)		100,0	100,0	100,0	94,4	77,8	100,0	100,0

Tablo 6. Tavanlı Minaresi'nin deneysel doğal frekansları (Experimental natural frequencies of Tavanlı Minaret)

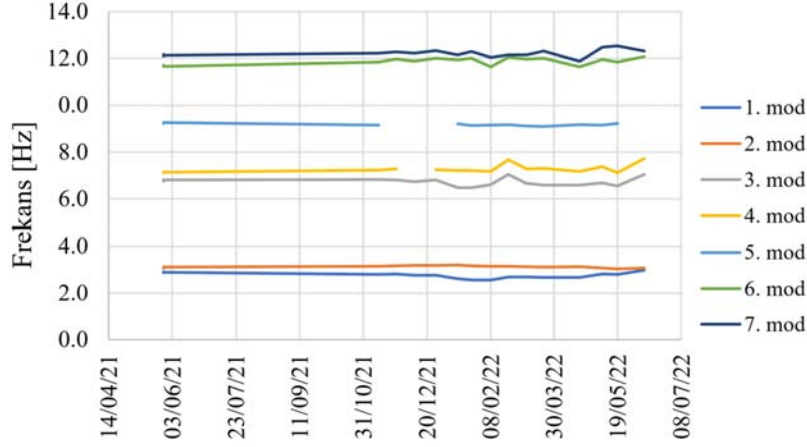
Ölçüm No	Ölçüm Tarihi [Gün/Ay/Yıl]	Doğal Frekanslar [Hz]							
		1, Mod	2, Mod	3, Mod	4, Mod	5, Mod	6, Mod	7, Mod	8. Mod
1	12/11/2021	1,147	1,211	5,389	5,675			10,483	10,974
2	26/11/2021	1,153	1,219	5,475	5,730		9,082		10,837
3	10/12/2021	1,130	1,194	5,414	5,655		9,749	10,646	11,057
4	27/12/2021	1,120	1,213	5,311	5,744		9,147	10,450	10,843
5	13/01/2022	1,113	1,221	5,309	5,706		8,929	10,523	10,928
6	24/01/2022	1,090	1,212	5,291	5,667		8,971	10,530	10,773
7	08/02/2022	1,068	1,172	5,072	5,438	7,675		10,195	10,550
8	22/02/2022	1,094	1,215	5,230	5,720	8,135	9,213	10,174	10,956
9	08/03/2022	1,110	1,206	5,317	5,640	8,130	9,070	10,415	10,817
10	22/03/2022	1,126	1,207	5,362	5,667	8,371	9,335	10,521	10,977
11	19/04/2022	1,108	1,215	5,266	5,675	7,905	9,523	10,364	11,023
12	07/05/2022	1,126	1,195	5,486	5,669	8,642	9,903	10,526	11,290
13	19/05/2022	1,092	1,170	5,216	5,526	7,754	9,589	10,272	10,989
14	09/06/2022	1,159	1,196	5,486	5,747	8,532	9,828	10,772	11,352
Ortalama		1,117	1,203	5,330	5,661	8,143	9,362	10,452	10,955
Minimum		1,068	1,170	5,072	5,438	7,675	8,929	10,174	10,550
Maksimum		1,159	1,221	5,486	5,747	8,642	9,903	10,772	11,352
Min-Maks Değişimi (%)		8,521	4,359	8,162	5,682	12,599	10,908	5,878	7,602
Standart Sapma		0,026	0,016	0,117	0,085	0,354	0,345	0,170	0,202
Tespit Edilme Oranı (%)		100,0	100,0	100,0	100,0	57,1	85,7	92,9	100,0

Ölçüm alınan 6 aylık süre içinde, yağma malzeme kullanılarak inşa edilen minarelerde doğal frekans değerleri için belirgin bir yöne doğru kayma hareketi gözlenmemiştir. Doğal frekansların zamana göre değişimi grafiklerinin tümü incelendiğinde bu değişimlerin belli bir yönde artış veya azalış şeklinde olmadığı, dalgalanma şeklinde olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar bu minarelerin yapısal davranışlarında kalıcı bir değişikliğin meydana gelmediği şeklinde değerlendirilmektedir. Bu dalgalanmaların, sıcaklık ve bağıl nem gibi çevresel etkilerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Minarelerin

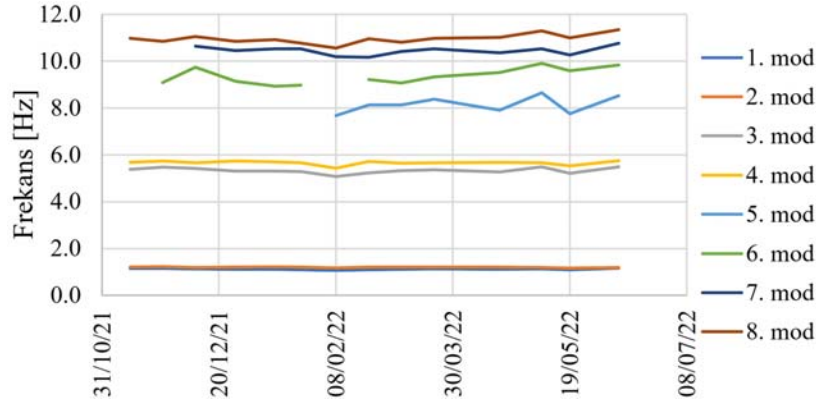
çevresinde minarelere yapısal olarak zarar verecek bir durum olması halinde (patlatma, çarpma, deprem vb.) doğal frekansların değişeceği açıktır. Olası bir hasar durumunda yapının frekanslarındaki değişim, mevsimsel koşullara bağlı değişim baz alınarak değerlendirilmeli ve yapıda hasar oluşup oluşmadığına karar verilmelidir. İskenderpaşa, Hacı Kasım ve Tavanlı Minareleri'nin deneysel doğal frekanslarının sıcaklıkla değişimi Şekil 15-Şekil 17'de verilmektedir. Bu grafiklerde korelasyon ve determinasyon katsayıları da yer almaktadır. İskenderpaşa Minaresi'nin doğal frekansları ile sıcaklık arasında ilk



Şekil 12. İskenderpaşa Minaresi'nin deneysel doğal frekanslarının zamana bağlı değişimleri (Time-dependent variations of experimental natural frequencies of İskenderpaşa Minaret)



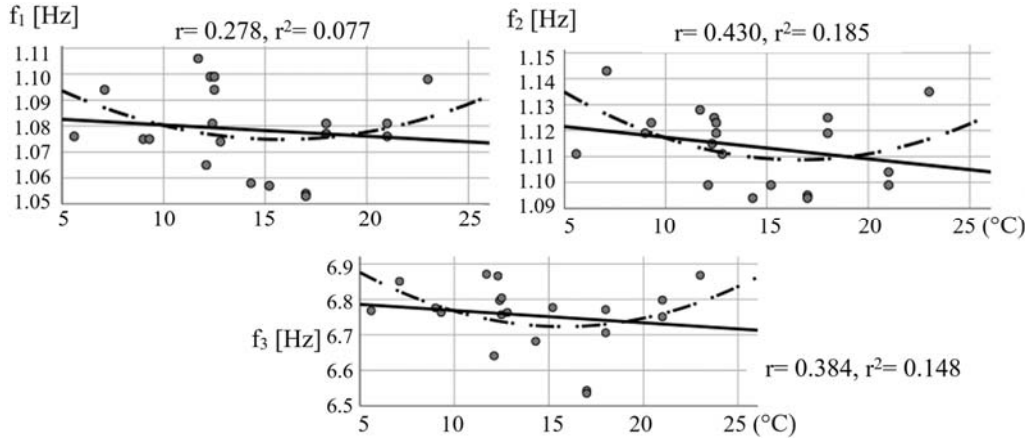
Şekil 13. Hacı Kasım Minaresi'nin deneysel doğal frekanslarının zamana bağlı değişimleri (Time-dependent variations of experimental natural frequencies of Hacı Kasım Minaret)



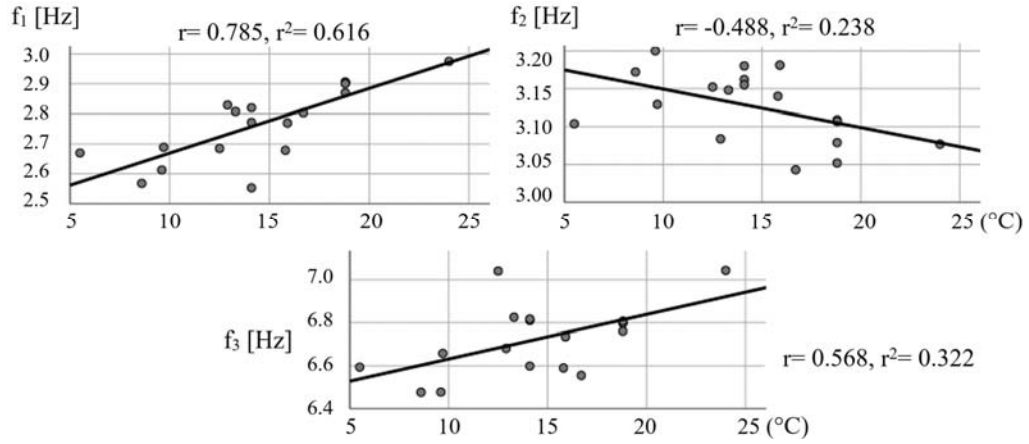
Şekil 14. Tavanlı Minaresi'nin deneysel doğal frekanslarının zamana bağlı değişimleri (Time-dependent variations of experimental natural frequencies of Tavanlı Minaret)

dört mod için eğrisel, son üç mod için ise doğrusal bir ilişki tespit edilmiştir. İlk modda zayıf korelasyon, diğer tüm modlarda ise orta düzeyde korelasyon belirlenmiştir. Sıcaklıkla tüm doğal modlar arasında zayıf fonksiyonel ilişki bulunmaktadır. 1. ve 3. modlarda sıcaklık artışına bağlı olarak bir artış eğilimi görülmekte iken 2. modda bir azalış eğilimi görülmektedir.

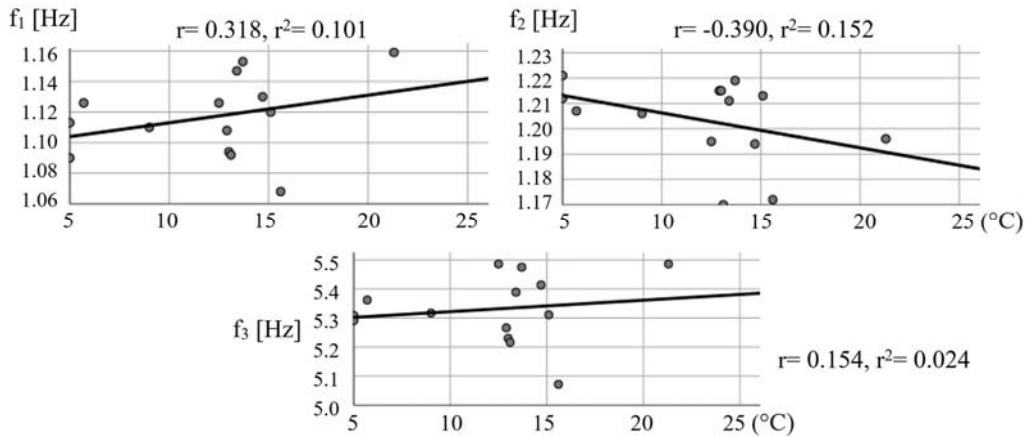
Hacı Kasım Minaresi'nin doğal frekansları ile sıcaklık arasında 4. ve 6. modlar için eğrisel, diğer tüm modlar için ise doğrusal bir ilişki tespit edilmiştir. 1. ve 5. modlarda güçlü korelasyon; 2., 3., 4. ve 6. modlarda orta düzeyde korelasyon; 7. modda ise zayıf korelasyon belirlenmiştir. Sıcaklıkla 1. ve 5. modlar arasında güçlü fonksiyonel ilişki, diğer tüm modlar arasında ise zayıf fonksiyonel ilişki



Şekil 15. İskenderpaşa Minaresi'nin doğal frekanslarının sıcaklıkla ilişkisi
(The relationship of natural frequencies of İskenderpaşa Minaret with temperature)



Şekil 16. Hacı Kasım Minaresi'nin doğal frekanslarının sıcaklıkla ilişkisi
(The relationship of natural frequencies of Hacı Kasım Minaret with temperature)



Şekil 17. Tavanlı Minaresi'nin doğal frekanslarının sıcaklıkla ilişkisi
(The relationship of natural frequencies of Tavanlı Minaret with temperature)

bulunmaktadır. Dört modda sıcaklık artışına bağlı olarak artış eğilimi, diğer üç modda ise azalış eğilimi görülmektedir.

Tavanlı Minaresi'nin doğal frekansları ile sıcaklık arasında 4., 5. ve 7. modlar için eğrisel, diğer tüm modlar için ise doğrusal bir ilişki tespit edilmiştir. 3. ve 4. modlarda zayıf korelasyon, diğer tüm modlarda ise orta düzeyde korelasyon belirlenmiştir. Sıcaklıkla tüm

modlar arasında zayıf fonksiyonel ilişki bulunmaktadır. 2. ve 4. modlar dışındaki tüm modlarda sıcaklık artışına bağlı olarak artış eğilimi görülmektedir.

Toplamda 41 modun 8'i ile sıcaklık arasında zayıf korelasyon, 29'u ile orta düzeyde korelasyon ve 4'ü ile de güçlü korelasyon belirlenmiştir. 4 mod ile sıcaklık arasında güçlü fonksiyonel ilişki

bulunurken diğer 37 mod ile zayıf fonksiyonel ilişki bulunmuştur. 30 modda doğrusal, 11 modda ise eğrisel bir ilişki tespit edilmiştir. Korelasyonların çoğunun orta düzeyde olması sıcaklıkla doğal frekanslar arasında bir ilişki bulunduğunu göstermektedir ancak bu ilişki özellikle veri sayısının azlığından dolayı net bir şekilde ortaya konulamamıştır.

İskenderpaşa Minaresi'nde sıcaklık artışına bağlı olarak doğal frekansların tümünde beklenenin aksine bir azalma eğilimi belirlenmiştir. Yığma bir minare olan İskenderpaşa Minaresi'nde sıcaklık artmasıyla frekanslardaki azalmanın sebebinin, bazı yapı elemanlarının metal kenetlerle birbirine bağlanmış olduğu düşünülmektedir. Ayrıca İskenderpaşa Minaresi'nin gövde duvarlarının bir kısmı kesme taş bir kısmı ise tuğla elemanlardan oluşmasında bu sonucun ortaya çıkmasında etkili olduğu değerlendirilmektedir. Hacı Kasım ve Tavanlı Minarelerinin 1. ve 3. modlarına ait frekanslarda yığma yapılar için beklendiği gibi sıcaklıkla doğal frekanslar arasında pozitif bir ilişki görülmektedir. Ancak 2. modlara ait frekanslarda negatif bir ilişki söz konusudur. Bununla birlikte bu iki minarenin frekanslarındaki sıcaklığa bağlı eğilim oldukça benzerlik göstermektedir.

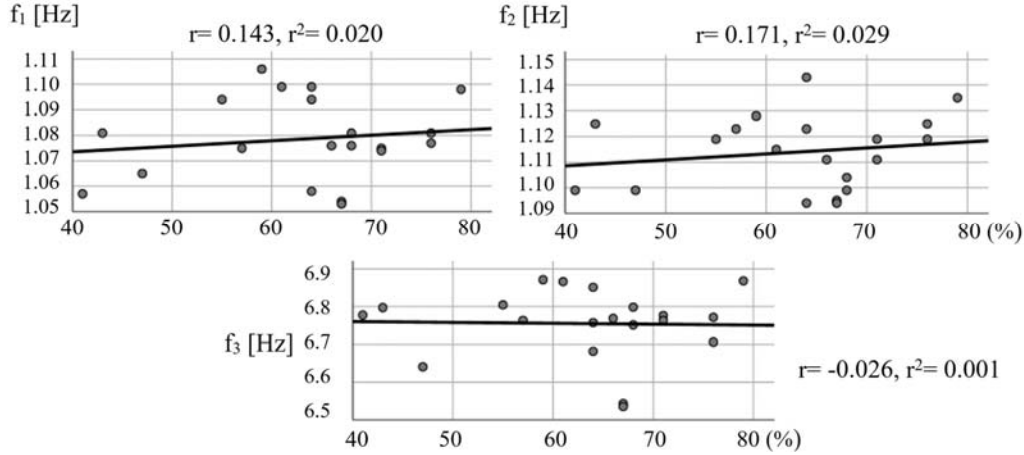
İskenderpaşa, Hacı Kasım ve Tavanlı Minareleri'nin deneysel doğal frekanslarının bağlı nemle ilişkileri tüm modlar için korelasyon ve determinasyon katsayılarıyla birlikte dağılım grafiklerinde verilmektedir (Şekil 18-Şekil 20).

İskenderpaşa Minaresi'nin doğal frekansları ile bağlı nem arasında tüm modlar için doğrusal bir ilişki tespit edilmiştir. 5. modda orta düzeyde korelasyon, diğer tüm modlarda ise zayıf korelasyon belirlenmiştir. Bağlı nemle tüm modlar arasında zayıf fonksiyonel ilişki bulunmaktadır. Üç modda bağlı nem artışına bağlı olarak artış eğilimi, diğer dört modda ise azalış eğilimi görülmektedir.

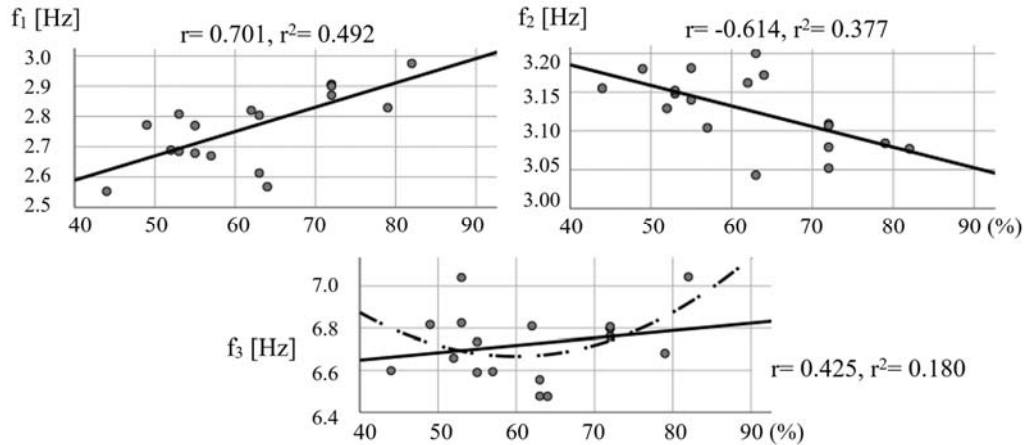
Hacı Kasım Minaresi'nin doğal frekansları ile bağlı nem arasında 3. ve 4. modlar için eğrisel, diğer tüm modlar için ise doğrusal bir ilişki tespit edilmiştir. 1. modda güçlü korelasyon, 6. ve 7. modlarda zayıf korelasyon, diğer tüm modlarda ise orta düzeyde korelasyon belirlenmiştir. Bağlı nemle tüm modlar arasında zayıf fonksiyonel ilişki bulunmaktadır. 2. ve 6. modlarda bağlı nem artışına bağlı olarak azalış eğilimi, diğer tüm modlarda ise artış eğilimi görülmektedir.

Tavanlı Minaresi'nin doğal frekansları ile bağlı nem arasında 2. mod için eğrisel, diğer tüm modlar için ise doğrusal bir ilişki tespit edilmiştir. 8. modda güçlü korelasyon, diğer tüm modlarda ise orta düzeyde korelasyon belirlenmiştir. Bağlı nemle 8. mod arasında güçlü fonksiyonel ilişki, diğer tüm modlar arasında ise zayıf fonksiyonel ilişki bulunmaktadır. 2. mod dışındaki tüm modlarda bağlı nem artışına bağlı olarak artış eğilimi görülmektedir.

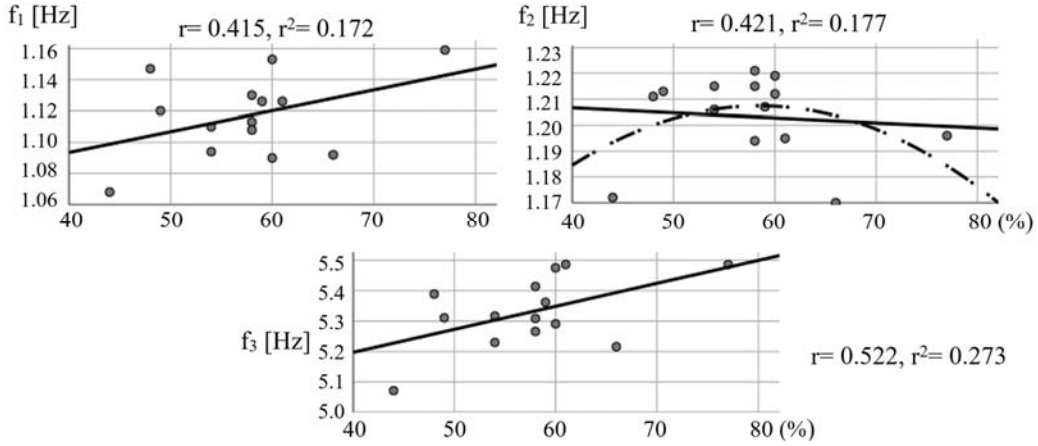
Toplamda 41 modun 19'u ile bağlı nem arasında zayıf korelasyon, 20'si ile orta düzeyde korelasyon ve 2'si ile güçlü korelasyon belirlenmiştir. Sadece bir mod ile bağlı nem arasında güçlü



Şekil 18. İskenderpaşa Minaresi'nin doğal frekanslarının bağlı nemle ilişkisi
(The relationship of natural frequencies of İskenderpaşa Minaret with relative humidity)



Şekil 19. Hacı Kasım Minaresi'nin doğal frekanslarının bağlı nemle ilişkisi
(The relationship of natural frequencies of Hacı Kasım Minaret with relative humidity)



Şekil 20. Tavanlı Minaresi'nin doğal frekanslarının bağıl nemle ilişkisi
(The relationship of natural frequencies of Tavanlı Minaret with relative humidity)

Tablo 7. Minarelerin birinci modlarına ait doğal frekanslarının sıcaklık ve bağıl nem ile ilişkileri
(The relations of the natural frequencies of the minarets belonging to the first mode with temperature and relative humidity)

Minare	Korelasyon katsayısı (R)	Determinasyon katsayısı (R ²)	Denklemler*
İskenderpaşa	0,241	0,058	$f_1=1,067348-0,000715 T+0,000338 BN$
Hacı Kasım	0,854	0,729	$f_1=2,255102+0,015772 T+0,004550 BN$
Tavanlı	0,483	0,233	$f_1=1,031312+0,001427 T+0,001185 BN$

*Denklemlerdeki T sıcaklığı, BN ise bağıl nemi ifade etmektedir.

fonksiyonel ilişki bulunurken diğer 40 mod ile zayıf fonksiyonel ilişki bulunmuştur. 29 modda doğrusal, 12 modda ise eğrisel bir ilişki tespit edilmiştir. Korelasyonların çoğunun zayıf olması bağıl nemle doğal frekanslar arasında istenilen düzeyde bir ilişkinin bulunmadığını göstermektedir ancak bu ilişki hakkında daha net bir şeyler söylenmesi için veri sayısının artırılması ve ölçüm zaman aralığının genişletilmesi gerekmektedir.

İskenderpaşa Minaresi dışındaki minarelerde bağıl nem artışına bağlı olarak doğal frekanslarda çoğunlukla bir artış eğilimi belirlenmiştir. Özellikle Tavanlı Minaresi'nin bir modu dışında tümünde artış görülmüştür. Literatürdeki çalışmalarda bunun tam tersi olarak nem artışının doğal frekanslarda azalmaya neden olduğu belirlenmiş, bu da yapı malzemesinin su emmesi sonucu yapı kütlelerinin artmasıyla ilişkilendirilmiştir. Ancak bahsedilen nem yapı malzemesinin nemidir. Hava nemiyle doğal frekanslar arasında dikkate değer bir ilişki bulunamadığından burada bulunan ilişkiler hakkında da net bir şey söylemek mümkün değildir. Çünkü bu çalışmada havanın bağıl nemi ölçülmüştür.

İskenderpaşa, Hacı Kasım ve Tavanlı Minareleri'nin 1. moduna ait frekanslarının sıcaklık ve bağıl nemle ilişkileri çoklu değişkenli regresyon analizi (ÇDRA) ile elde edilmiştir [32]. Bu ilişkilerde korelasyon ve determinasyon katsayılarının yanı sıra 1. moda ait frekansların sıcaklık ve bağıl nem değişkenlerine bağlı denklemler aracılığıyla verilmektedir (Tablo 7).

Doğal frekanslarla sıcaklık ve nem arasında İskenderpaşa Minaresi'nde zayıf korelasyon, Tavanlı Minaresi'nde orta düzeyde korelasyon, Hacı Kasım Minaresi'nde ise güçlü korelasyon bulunmaktadır. Aynı zamanda doğal frekanslarla sıcaklık ve nem arasında, Hacı Kasım Minaresi'nde güçlü fonksiyonel ilişki bulunurken diğer minarelerde zayıf fonksiyonel ilişki bulunmaktadır.

5. Sonuçlar (Conclusions)

Yapıların kullanım ömürleri boyunca yapısal takiplerin gerçekleştirilmesi, bakım ve onarımların yapılması ve gerekli görülen

durumlarda güçlendirilmesi oldukça önemlidir. Yapısal takiple yapılarda oluşan değişimlerinin olası bir hasardan mı yoksa çevresel etkilerden mi kaynaklandığı belirlemek de mümkün olmaktadır. Bu çalışmada, Trabzon'da yer alan üç adet yığma minarenin yapısal takibi ÇTT ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Tüm ölçümler Aralık 2021-Haziran 2022 tarihleri arasında minimum 3,3°C ve maksimum 26,1°C aralığında gerçekleştirilmiştir.
- Deneysel doğal frekansların tespit edilme oranları tüm minareler için birkaç mod dışında %100'e yakındır. Deneysel doğal frekansların minimum ile maksimum değerleri arasındaki değişim %3,87 ile %11,72 aralığındadır.
- İskenderpaşa Minaresi'nde sıcaklık artışına bağlı olarak doğal frekansların tümünde bir azalma eğilimi belirlenmiştir. Hacı Kasım ve Tavanlı Minareleri'nin modlarının çoğunda yığma yapılar için beklendiği üzere sıcaklıkla doğal frekanslar arasında pozitif bir ilişki görülmektedir.
- İskenderpaşa Minaresi dışındaki minarelerde bağıl nem artışına bağlı olarak doğal frekanslarda çoğunlukla bir artış eğilimi belirlenmiştir. Özellikle Tavanlı Minaresi'nin 1 modu dışında tümünde artış görülmüştür.
- Deneysel doğal frekanslarla sıcaklık ve nem arasında İskenderpaşa Minaresi'nde zayıf korelasyon, Tavanlı Minaresi'nde orta düzeyde korelasyon, Hacı Kasım Minaresi'nde ise güçlü korelasyon bulunmaktadır. Aynı zamanda doğal frekanslarla sıcaklık ve nem arasında, Hacı Kasım Minaresi'nde güçlü fonksiyonel ilişki bulunurken diğer minarelerde zayıf fonksiyonel ilişki bulunmaktadır.

Bu çalışmadan, deneysel doğal frekansların zamana bağlı olarak dalgalandığı, belli bir yöne artış veya azalış göstermediği belirlenmiştir. Bu nedenle minarelerin yapısal davranışlarında kalıcı bir değişikliğin meydana gelmediği, bu dalgalanmaların çevresel etkilerin mevsimsel olarak değişmesinden kaynaklandığı düşünülmüştür.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2022-10134 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca saha çalışmalarındaki katkılarından dolayı Trabzon Vakıflar Bölge Müdürü Dr. İsmet Çalık'a teşekkür ederiz.

Kaynaklar (References)

- Gentile C., Guidobaldi M., Saisi A., One-year dynamic monitoring of a historic tower: Damage detection under changing environment, *Meccanica*, 51 (11), 2873-2889, 2016.
- Masciotta M.G., Roque J.C.A., Ramos L.F., Lourenço P.B., A multidisciplinary approach to assess the health state of heritage structures: The case study of the church of monastery of Jerónimos in Lisbon, *Construction and Building Materials*, 116, 169-187, 2016.
- Saisi A., Guidobaldi M., Gentile C., On site investigation and health monitoring of a historic tower in Mantua, Italy, *Applied Sciences*, 6 (173), 1-18, 2016.
- Cavalagli N., Comanducci G., Gentile C., Guidobaldi M., Saisi A., Ubertini F., Detecting earthquake-induced damage in historic masonry towers using continuously monitored dynamic response-only data, *Procedia Engineering*, 199, 3416-3421, 2017.
- Ubertini F., Comanducci G., Cavalagli N., Laura Pisello A., Luigi Materazzi A., Cotana F., Environmental effects on natural frequencies of the San Pietro Bell Tower in Perugia, Italy, and their removal for structural performance assessment, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 82, 307-322, 2017.
- Gentile C., Ruccolo A., Saisi A., Continuous dynamic monitoring to enhance the knowledge of a historic bell-tower, *International Journal of Architectural Heritage*, 13 (7), 992-1004, 2019.
- Gentile C., Ruccolo A., Canali F., Continuous monitoring of the Milan Cathedral: Dynamic characteristics and vibration-based SHM, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 9 (5), 671-688, 2019.
- Kita A., Cavalagli N., Ubertini F., Temperature effects on static and dynamic behavior of Consoli Palace in Gubbio, Italy, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120, 180-202, 2019.
- Cabboi A., Gentile C., Saisi A., From continuous vibration monitoring to fem-based damage assessment: Application on a stone-masonry tower, *Construction and Building Materials*, 156, 252-265, 2017.
- Xia Y., Chen B., Weng S., Ni Y.Q., Xu Y.L., Temperature effect on vibration properties of civil structures: A literature review and case studies, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2 (1), 29-46, 2012.
- Kazaz İ., An analytical method to visualize higher mode effects on yielding cantilever walls, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 30 (3), e1827, 2021.
- Yanik Y., Türker T., Çalik I., Yildirim O., Investigation of environmental and time depended effects on historical masonry minarets by vibration test, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (2), 799-813, 2022.
- Kocaman İ., Kazaz İ., Examination of the damage limits of a historical mosque, Konya Sultan Selim Mosque example, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (1), 51-64, 2024.
- Yetkin M., Calayır Y., Alyamaç K.E., The effect of mortar and bond type on mechanical parameters of masonry walls, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (1), 621-634, 2024.
- Analog Devices. Documentation. https://www.analog.com/en/products/adxl355.html?doc=ADXL_355.pdf. Erişim tarihi Ocak 20, 2019.
- Direnc.net. Arduino. <https://www.direnc.net/klon-arduino-nano-328-ft232rl>. Erişim tarihi Mart 07, 2019.
- Tuluk Ö.İ., Trabzon İskender Paşa Camii: Fiziksel gelişim süreci üzerine tarihsel bir değerlendirme, *Uluslararası Karadeniz İncelemeleri Dergisi*, 3 (3), 9-24, 2007.
- Çalık İ., Tarihi cami ve minarelerin deneysel dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve restorasyon etkilerinin değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2017.
- 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 Valiliği İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü Yayınları, Trabzon, 2010.
- Çalık İ., Bayraktar A., Türker T., Tarihi ahşap çatılı yığma taş camilerin deneysel dinamik karakteristikleri, *Vakıflar Dergisi*, 45, 189-207, 2016.
- https://yandex.com.tr/harita/org/iskenderpasa_cami/3630627614/?l=sat&ll=39.732419%2C41.004976&z=18. Erişim tarihi Aralık 26, 2021.
- https://yandex.com.tr/harita/org/hacikasim_cami/23114156376/?l=sat&ll=39.724360%2C41.003805&z=18. Erişim tarihi Aralık 26, 2021.
- https://yandex.com.tr/harita/org/tavanli_cami/32475624331/?l=sat&ll=39.727768%2C41.001326&z=18. Erişim tarihi Aralık 26, 2021.
- Matlab, Mathworks Inc, MATLAB User Guide, Natick, MA, 1999.
- ARTEMIS V-5.3, Ambient Response Testing and Modal Identification Software, Structural Vibration Solutions A/S, Denmark, www.svibs.com.
- Peeters B., Roeck G.D., Reference based stochastic subspace identification in civil engineering, *Inverse Problems in Civil Engineering*, 8 (1), 47-74, 2000.
- Peeters B., System identification and damage detection in civil engineering, Doktora Tezi, K.U, Leuven, Belgium, 2000.
- Yao Y., Li X., Yang Z., Li L., Geng D., Huang P., Song Z., Vibration characteristics of corn combine harvester with the time-varying mass system under non-stationary random vibration, *Agriculture*, 12 (11), 1963, 2022.
- Liu B., Shi Y., Liu K., Li T., Wang S., Dynamic characterization of a reinforcement rammed wall for the earthen ruins, *Shock and Vibration*, 2022.
- 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.
- 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.
- IBM Corp. Released. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 26.0. Armonk, NY: IBM Corp, 2019.

