

Atf İçin: Yetkin M, Erkek H, Calayır Y, 2021. Operasyonel Modal Analiz Yönteminde Referanslı ve Referanssız Ölçümlerin Karşılaştırılması: Bir Minare Örneği. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(3): 2069-2078.

To Cite: Yetkin M, Erkek H, Calayır Y, 2021. Comparison of Measurements with and without Reference in Operational Modal Analysis Method: A Minaret Example. Journal of the Institute of Science and Technology, 11(3): 2069-2078.

Operasyonel Modal Analiz Yönteminde Referanslı ve Referanssız Ölçümlerin Karşılaştırılması: Bir Minare Örneği

Musa YETKİN^{1*}, Hakan ERKEK², Yusuf CALAYIR¹

ÖZET: Bu çalışmada betonarme bir minarenin dinamik karakteristikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Ölçümlerde operasyonel modal analiz (OMA) yöntemi kullanılmıştır. Ölçümler üç farklı biçimde gerçekleştirilmiştir. Referanssız olan birinci ölçümde, minarenin yüksekliği boyunca aynı düşey eksen üzerinde bulunan 4 farklı seviyede ölçüm yapılmıştır. Her bir seviyeye 2 ivmeölçer olmak üzere toplamda 8 ivmeölçer kullanılmıştır. Referanslı olan ikinci ölçümde, en üst ölçüm seviyesinde 2 ivmeölçer sabit tutulmuş ve farklı 2 ivmeölçer ise diğer 3 ölçüm seviyesinde kaydırılarak 3 aşamada ölçüm gerçekleştirilmiştir. Her ölçüm aşamasında toplam 4 ivmeölçer kullanılmıştır. Referanssız bir diğer ölçüm olan üçüncü ölçümde ise minarenin en üst ölçüm seviyesine yalnızca 2 ivmeölçer yerleştirilerek ölçüm tamamlanmıştır. Bütün ölçümlerde her bir seviyede yatay yönde kullanılan 2 ivmeölçerden biri x, diğeri y yönünde yerleştirilmiştir. Ölçümler sonucunda, minarenin frekans ve modları elde edilmiştir. Her bir ölçümden elde edilen ilk 6 frekans değerlerinin birbirine eşit veya birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. Ölçüm 3'te yalnızca en üst seviyede tek bir noktadan ölçüm alındığı için iki yatay doğrultu ile ilgili 1. eğilme modları, diğer bir deyişle 1. ötelenme modları sadece biçimsel olarak elde edilmiş, diğer modlar ise elde edilememiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak, minare gibi yapıların dinamik parametrelerinin özellikle modlarının güvenli bir şekilde elde edilebilmesi için yapının yüksekliği boyunca en üst ölçüm seviyesine ilave olarak, farklı seviyelerdeki uygun noktalardan da ölçümlerin alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Operasyonel modal analiz yöntemi, betonarme minare, dinamik karakteristikler

Comparison of Measurements with and without Reference in Operational Modal Analysis Method: A Minaret Example

ABSTRACT: In this study, dynamic characteristics of a reinforced concrete minaret were determined experimentally. Operational Modal Analysis (OMA) method was used in the measurements. The measurements were carried out in three different ways. In the first measurement without reference, the measurements were made at 4 different levels on the same vertical axis along the height of the minaret. A total of 8 accelerometers were used by placing 2 accelerometers at each level. In the second measurement with reference, 2 accelerometers were kept constant at the top measurement level and another 2 accelerometers were used by shifting at the other 3 measurement levels. The measurement was carried out in 3 stages and a total of 4 accelerometers were used in each measurement stage. In the third measurement, which is another measurement without reference, measurements was made by placing only 2 accelerometers at the top measurement level of the minaret. In all measurements, one of the 2 accelerometers used horizontally at each level was placed in the x direction and the other in the y direction. As a result of the measurements, the frequency and modes of the minaret were obtained. It was determined that the first 6 frequency values obtained from each measurement are equal or very close to each other. Since measurement is taken only from a single point at the top level in measurement 3, the 1st bending modes related to the two horizontal directions, in other words the 1st translational modes, were obtained only formally, and the other modes were not obtained. As a result, in order to safely obtain the dynamic parameters of structures such as minarets, especially their modes, it becomes necessary to measure from appropriate points at different levels along the height of the building as well as the top measurement level.

Keywords: Operational modal analysis method, reinforced concrete minaret, dynamic characteristics

¹Musa YETKİN ([Orcid ID: 0000-0002-6259-4137](https://orcid.org/0000-0002-6259-4137)), Yusuf CALAYIR ([Orcid ID: 0000-0002-6387-5360](https://orcid.org/0000-0002-6387-5360)), Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

²Hakan ERKEK ([Orcid ID: 0000-0001-6008-9586](https://orcid.org/0000-0001-6008-9586)), Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Osmaniye, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Musa YETKİN, e-mail: musayetkin@firat.edu.tr

GİRİŞ

Yapıların uzun süreli hizmet verebilmesi, dinamik davranışlarının iyi bilinmesine, gerektiğinde bakım, onarım ve güçlendirilmelerinin yapılmasına bağlıdır. Deprem, sel, patlama, çarpma, kullanılan malzemenin dayanım ömrünü tamamlaması gibi birçok nedenlerden dolayı bu yapıların kullanımı zorlaşabilir veya kullanım dışı kalması gibi durumlar ortaya çıkabilir. Bu durumlar ise hem can kayıplarına hem de büyük maddi zararlara neden olabilmektedir (Türker, 2011). Bu gibi sebeplerden ötürü, yapıların izlenmesi ve yapısal davranışlarındaki olası değişikliklerin ve bu değişiklikleri meydana getiren sebeplerin ortaya konulması gerektiği düşünülmektedir.

Mevcut yapıların dinamik etkiler altındaki davranışı belirlenirken birçok belirsizlik ile karşılaşmaktadır. Bunun yanı sıra dinamik davranışı etkileyen parametrelerde de belirsizliklerin olması yapının gerçek dinamik davranışının belirlenmesini daha da zor hale getirmektedir. Yapıların dinamik karakteristikleri/modal parametreleri, dinamik davranışlarını belirlemede/tahmin etmede önemli araçlardır. Günümüzde teorik ve deneysel yöntemler kullanılarak yapıların bu karakteristikleri belirlenebilmektedir.

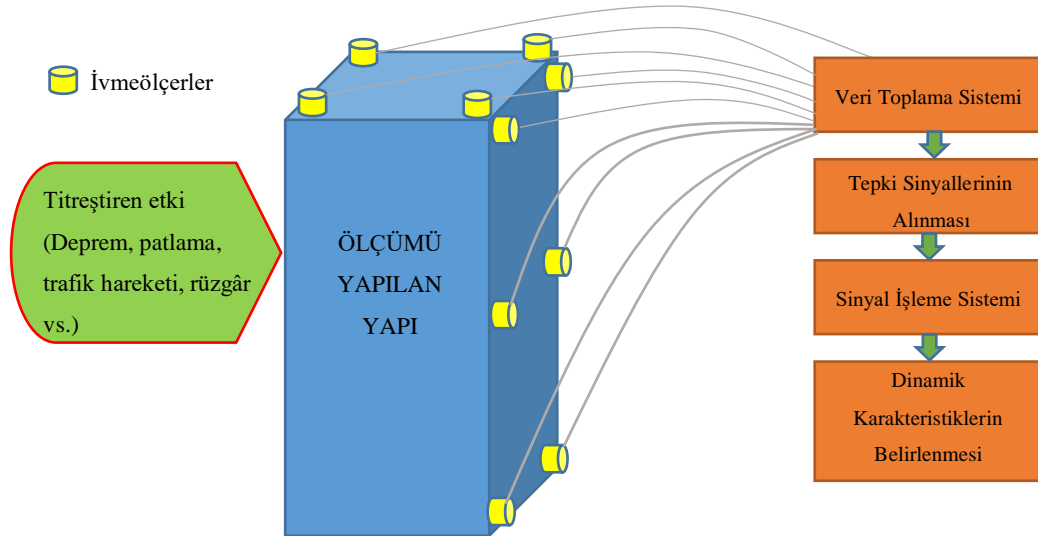
Yapıların dinamik karakteristiklerinin deneysel ölçümlere dayanarak belirlenmesi konusunda birçok çalışma mevcuttur. Wojcicki ve ark., (2016) yapmış oldukları çalışmada Polonya'nın Odra nehri üzerinde inşa edilmiş olan betonarme bir su tutma yapısının operasyonel modal analiz yöntemiyle deneysel analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Yetkin ve ark., (2016) betonarme bir binanın dinamik karakteristiklerini çevresel titreşim verilerini kullanarak belirlemiş ve bu karakteristiklere bağlı olarak sonlu eleman modeli güncelleştirmesini yapmışlardır. Sevim ve ark., (2016) tarihi Osmanlı (Timisvat) kemer köprüsünün dinamik karakteristiklerini çevresel titreşim verilerine bağlı olarak belirlemişlerdir. Elde ettikleri dinamik karakteristiklere bağlı olarak köprünün sonlu elemanlar modelini güncellemişlerdir. Daha sonra güncellenmiş model için yakın ve uzak fay hareketlerinin köprü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Lorenzoni ve ark., (2017) yapmış oldukları çalışmada 4 su kulesinin hem nümerik analizini hem de çevresel titreşim verilerine dayalı deneysel analizini gerçekleştirmişlerdir. Torres ve ark., (2017) yapmış oldukları çalışmada Santiago Şili Metropolitan Katedrali'nin deneysel ve analitik model analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra analitik model için malzeme özelliklerini güncelleştirmişlerdir. Altunişik ve ark., (2018) laboratuvar ortamında iki açıklıklı iki katlı olarak bir betonarme çerçeve inşa etmişlerdir. Bu çerçevenin hasarsız, hasar görmüş, hasarı onarılmış ve CFRP (Carbon Fiber Reinforcement Polymer) ile güçlendirilmiş durumları için çevresel titreşim verileri altında dinamik karakteristiklerini belirlemişlerdir. Pachon ve ark., (2018) tarihi E. Torroja (Spain-1957) köprüsünün deneysel olarak dinamik karakteristiklerini optimum sayıda ivmeölçer kullanarak belirlemeye çalışmışlardır. Daha sonra köprünün üç boyutlu sonlu eleman modelini deneysel sonuçlar ışığında güncellemişlerdir. De Silva ve ark., (2018) İtalya'da bulunan Carmine çan kulesinin analitik modelini sonlu eleman programı yardımıyla oluşturarak nümerik analizlerini yapmışlardır. Daha sonra çan kulesinin çevresel titreşim verilerine bağlı olarak deneysel analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Her iki analiz sonucunun birbiri ile uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır. Yetkin ve ark., (2018) betonarme bir minarenin operasyonel modal analiz yöntemi yardımıyla dinamik karakteristiklerini belirlemişlerdir ve elde ettikleri sonuçlara bağlı olarak minarenin sonlu eleman modelini güncelleştirmişlerdir. Brownjohn ve ark., (2018) yapmış oldukları çalışmada 6 adet deniz fenerinin serbest ve zorlanmış titreşim deneylerini gerçekleştirmişlerdir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Deneysel Modal Analiz Yöntemi

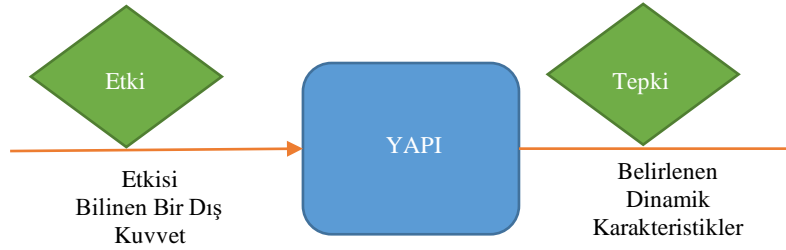
Teknolojik gelişmeler pek çok alanda canlı varlıkların gözlenmesini sağladığı gibi, yapıların da gözlenmesi imkânını sağlamıştır (Türker, 2005; Rainieri ve Fabbrocino, 2011). Yapıların gözlenmesi işlemi sismik düzeydeki titreşimleri ölçme yeteneğine sahip olan ivmeölçerler yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Yapıya ait ivme sinyallerinin analiz edilmesi ve elde edilen sonuçların farklı durumlar için karşılaştırılması ile yapının davranışında herhangi bir değişiklik olup olmadığı belirlenebilmektedir. Bu amaçla yaygın olarak kullanılan yöntem Deneysel Modal Analiz yöntemidir (Türker, 2011).

Küçük makine parçalarının titreşim analizlerinden büyük mühendislik yapılarındaki titreşimlerin analizine kadar çok geniş bir uygulama alanı olan deneysel modal analiz çalışmalarının başlangıcı 1940'lı yıllara dayanmaktadır. O yıllarda, dinamik kuvvetleri ölçmek için çoğunlukla pratik olmayan ve zaman alan analog yaklaşımlar kullanılırken, 1960'lı yıllarda sayısal bilgisayarların ve Hızlı Fourier Dönüşümlerinin geliştirilmesi ile birlikte, deneysel modal analizin modern çağı başlamıştır (Şahin, 2009; Yetkin, 2016). Kullanılan yöntemin esası, yapıya bir titreşim verilerek, yapıda bu titreşime karşı oluşan tepkiyi ölçmeye dayanmaktadır (Şekil 1). Genel olarak bu yöntem; yapıların proje aşamasında yapılan kabullerin uygulamada sağlanıp sağlanmadığının belirlenmesinde, teorik analiz sonuçları ile karşılaştırılarak sonlu eleman modellerinin güncelleştirilmesinde, teorik analizlerin yapılamadığı veya zorlanıldığı yerlerde dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde, hasar görmüş yapıların durumlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Yapıyı titreştiren etkinin bilinip bilinmemesine bağlı olarak deneysel modal analiz; Geleneksel Modal Analiz ve Operasyonel Modal Analiz olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.



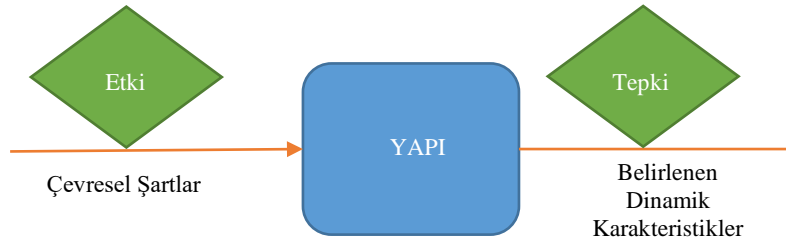
Şekil 1. Deneysel Modal Analiz Yöntemi

Geleneksel Modal Analiz yönteminde; yapıya uygulanan etkinin değerinin bilinmesi gerekmektedir. Zorlanmış Titreşim Testi olarak da bilinen bu yöntemde yapının dinamik davranışı, tepki değerlerine ait spektral fonksiyonların etki değerine ait spektral fonksiyona oranlanmasıyla bulunmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Geleneksel Modal Analiz Yöntemi

Operasyonel Modal Analiz yönteminde; yapıya uygulanan etkinin bilinmesine gerek yoktur. Yapının rüzgâr, taşıt yükü, insan hareketi gibi rastgele çevresel etkiler altında titreştirildiği varsayılmaktadır. Yapıya ait dinamik karakteristikler, tepki sinyallerinin spektral yoğunluk fonksiyonlarının gerek zaman gerekse frekans tanım alanında değerlendirilmesiyle belirlenebilmektedir. Rastgele çevresel titreşimlerden yararlanıldığı için Çevresel Titreşim Testi olarak da adlandırılmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi

Deneyisel Modal Analizin hangi yöntem ile (zorlanmış ve çevresel titreşim testi) gerçekleştirileceği, ölçümü yapılacak yapının hacimsel büyüklüğü, çevresel koşulların durumu gibi sebeplere bağlı olarak belirlenmektedir. Küçük veya orta hacimli yapıların dinamik karakteristikleri belirlenirken darbe çekici kullanılarak zorlanmış titreşim yapılabilmektedir. Çekiç testinde yapıya büyüklüğü bilinen bir kuvvet uygulandığı için yapıdaki titreşim sinyalleri ile ortamdaki titreşim sinyalleri rahatlıkla ayırt edilebilmektedir. Dolayısıyla, ölçüm sonuçları sağlıklı bir şekilde belirlenebilmektedir. Eğer düşünülen yapı hacimsel olarak büyük (köprü, baraj vb.) ise yapıda titreşim oluşturmak ciddi zorlukları ve maliyeti beraberinde getirecek ve belki yapıyı bir bütün olarak titreştirmek imkânsız olacaktır (Chauhan, 2008). Bu durumda yapının dinamik karakteristiklerini belirleyebilmek için çevresel koşullardan yararlanmak zorunlu hale gelecektir. Çünkü çevresel etkiler yapıyı bir bütün olarak etkilemekte ve yapı genel olarak titreşmektedir. Bu durumlar göz önüne alınarak, gerçek yapıyı en iyi temsil edecek dinamik karakteristikleri belirlemek için en uygun deneysel yöntem seçilmelidir (Ramos, 2007).

Sait Koç Camisi Minaresinin Deneyisel Analizleri

Çalışma kapsamında; Elazığ ilinde 2013 yılında betonarme olarak inşa edilmiş Sait Koç camisi minaresinin operasyonel modal analiz (OMA) yöntemi yardımıyla titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Minare, pabuç, geçiş bölümü, gövde, çift şerefe, petek, külah ve âlemden oluşmaktadır. Camiden bağımsız olarak inşa edilen minare çift şerefeli olup, toplam yüksekliği 39.1 m'dir. Minarenin içinde, helezonik olarak yükselen betonarme bir merdiven bulunmaktadır. Her bir basamağı yaklaşık 20 cm olan bu merdiven, 37.0 m'ye kadar yükselmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Sait Koç Camisi

DeneySEL ölçümlerde, OROS-OR36 Çok Kanallı Gürültü ve Titreşim Analizörü kullanılmıştır (Şekil 5). Bu cihazın veri toplama ünitesi 16 kanallı ivmeölçer giriş devresine, ayrıca zorlanmış titreşim testlerinde darbe çekicinden gelen etki sinyallerini belirlemek için kuvvet sensörü girişine sahiptir. OROS-OR36 Çok Kanallı Gürültü ve Titreşim Analizörüne ait teknik özellikler Çizelge 1’de verilmiştir.



Şekil 5. OROS-OR36 Çok Kanallı Gürültü ve Titreşim Analizörü

Çizelge 1. OROS-OR36 Çok Kanallı Gürültü ve Titreşim Ölçerin Özellikleri (URL-1, 2020)

Giriş Sayısı	16
DC Kanallar	4 Blok
Filtreleme	Mevcut
Çıkış	DC 40 kHz \pm 10V aralığı
Harici hard disk	60 Gb
Ağırlık	5.2 kg
Boyutlar (w,h,d)	114 x 280 x 350 mm

Çevresel titreşim ivme sinyallerinin alınmasında KB12VD tipi tek eksenli ivmeölçerler kullanılmış olup, bu ivmeölçerlerin dış görünüşü Şekil 6’da ve teknik özellikleri ise Çizelge 2’de verilmektedir.



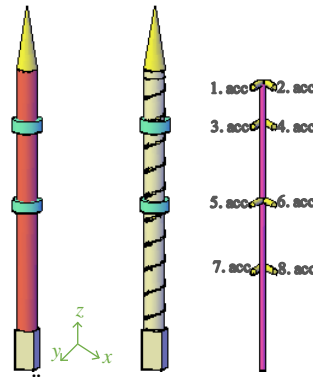
Şekil 6. KB12VD tipi tek eksenli ivmeölçerler

Çizelge 2. KB12VD tipi tek eksenli ivmeölçerlerin özellikleri (URL-2, 2020)

Frekans Aralığı (Hz)	0.08-260
Hassasiyet ($mV \cdot g^{-1}$)	10000
Maksimum İvme (g)	± 0.6
Çalışma Sıcaklığı ($^{\circ}C$)	-20 ile +80 arası
Ağırlık (gram)	150
Yükseklik (mm)	37
Çap (mm)	48

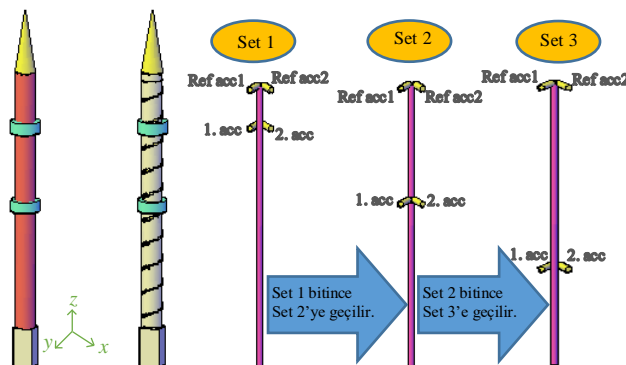
Ölçümler üç farklı şekilde gerçekleştirilmiştir:

• **Ölçüm 1:** Minarenin aynı düşey eksenli üzerinde bulunan 4 farklı ölçüm seviyesindeki noktalara ivmeölçerler yerleştirilerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Her bir ölçüm seviyesinde yatay yönde 2 ivmeölçer (x ve y yönünde) yerleştirilmiştir. Referanssız ölçüm tekniğinin kullanıldığı bu ölçümde toplam 8 ivmeölçer kullanılmıştır (Şekil 7). Ölçüm 0-10 Hz frekans aralığında ve toplamda 320 s'de gerçekleştirilmiştir. Yeterli sayıda ivmeölçere sahip olduğunda çoğunlukla bu ölçüm düzeni tercih edilmektedir.



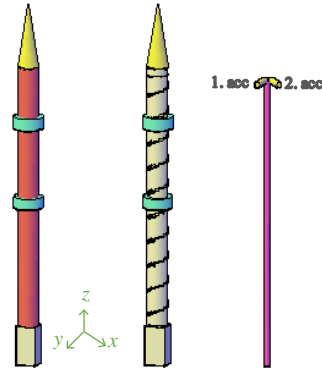
Şekil 7. Ölçüm 1 için ivmeölçer düzeni

• **Ölçüm 2:** Referanslı olan bu ölçümde, minarenin en üst ölçüm seviyesindeki noktaya 2 ivmeölçer yerleştirilmiş ve bu ivmeölçerler referans ivmeölçerler olarak ölçüm süresince sabit tutulmuştur. Referans ivmeölçerlerin dışında kullanılan 2 ivmeölçer ise, her defasında farklı bir ölçüm noktasında bulunmak üzere, diğer 3 ölçüm seviyesinde kaydırılarak kullanılmıştır. 3 aşamalı olarak gerçekleştirilen ölçümde toplam 4 ivmeölçer kullanılmıştır (Şekil 8). Ölçümler 0-10 Hz frekans aralığında alınmış olup her bir aşama için 320 s ölçüm alınmış ve ölçümler toplam 960 s'de gerçekleştirilmiştir. Yeterli sayıda ivmeölçere sahip olunmadığı durumlarda referanslı ölçümler yapılması tavsiye edilmektedir. Bu sayede istenilen tüm noktalardan ölçüm alınabilmektedir. Ancak ölçüm süresini artırdığı unutulmamalıdır.



Şekil 8. Ölçüm 2 için ivmeölçer düzeni

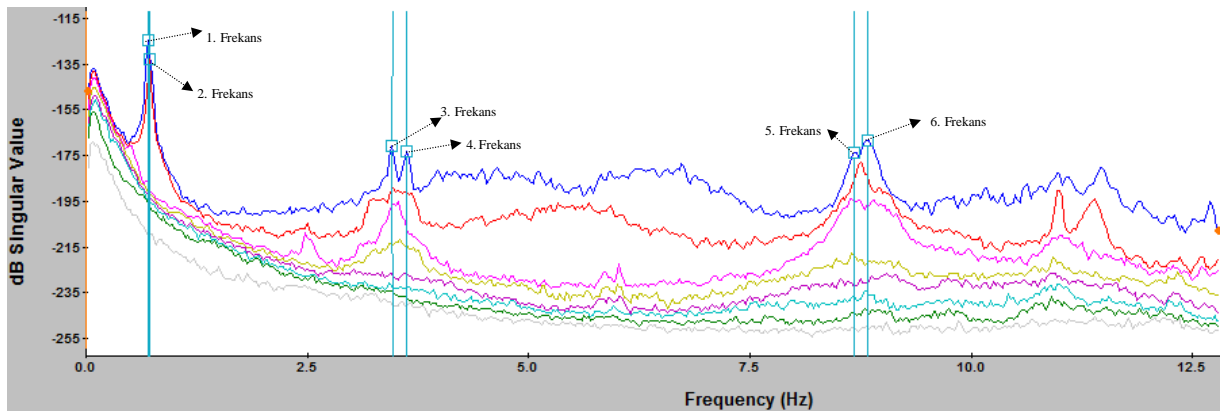
• **Ölçüm 3:** Minarenin yalnızca en üst ölçüm seviyesindeki noktaya 2 ivmeölçer yerleştirilerek ölçümler referanssız olarak 0-10 Hz frekans aralığında 320 s'de gerçekleştirilmiştir (Şekil 9).



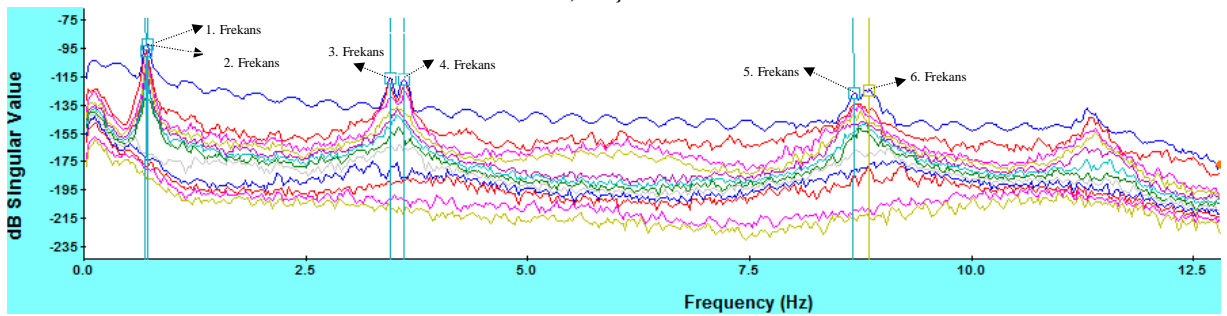
Şekil 9. Ölçüm 3 için ivmeölçer düzeni

BULGULAR VE TARTIŞMA

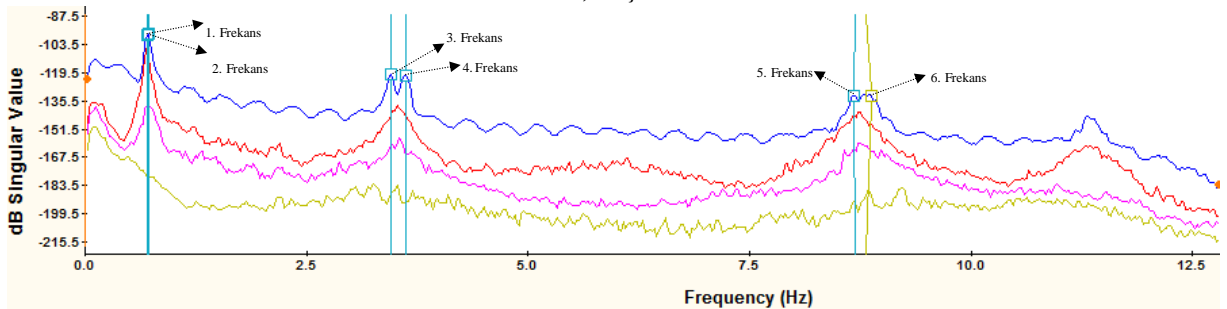
Minarenin deneysel ölçümleri, herhangi bir dış tahrik verilmeden yalnızca çevresel etkiler altında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler neticesinde elde edilen ham veriler işlenerek her ölçüme ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonları elde edilmiştir (Şekil 10).



a) Ölçüm 1



b) Ölçüm 2



c) Ölçüm 3

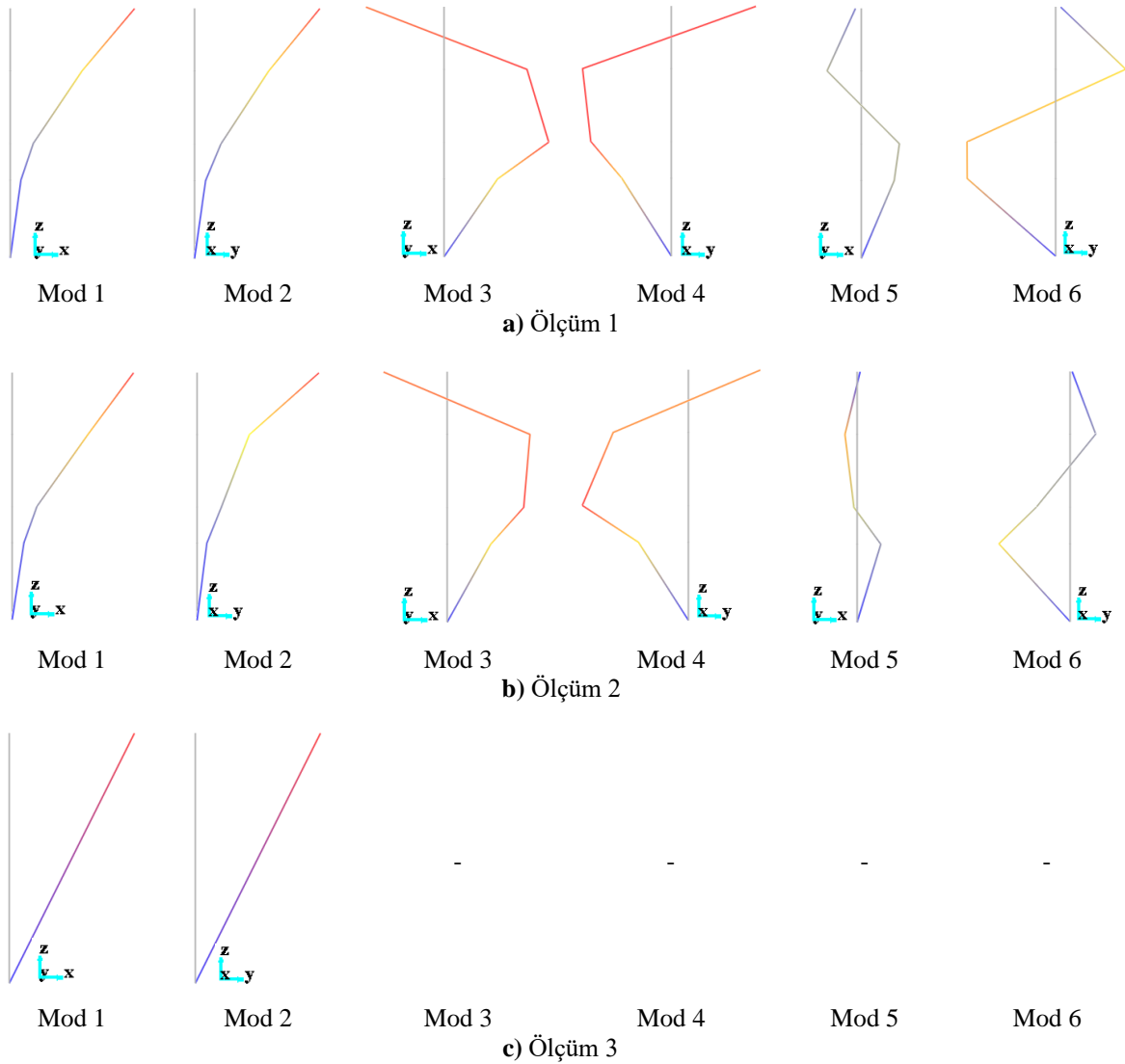
Şekil 10. Spektral Yoğunluk Fonksiyonları

Spektral Yoğunluk Fonksiyonları yardımıyla minareye ait frekanslar belirlenmiştir. Elde edilen frekanslar Çizelge 3’de verilmiştir.

Çizelge 3. Deneysel ölçümlerden elde edilen frekanslar

Mod Numarası	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3
	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)
1	0.70	0.70	0.70
2	0.72	0.72	0.72
3	3.46	3.46	3.46
4	3.62	3.62	3.61
5	8.67	8.69	8.67
6	8.83	8.82	8.85

Çizelge 3 incelendiğinde; ilk 3 frekans değerinin tüm ölçümlerde aynı olduğu ve diğer frekans değerlerinin ise ya birbirine eşit ya da birbirine oldukça yakın olduğu görülecektir. Doğal frekansı etkileyen parametreler kütle ve rijitliktir. Minarenin kütlesi ve rijitliği ölçüm sistemi ile değişen bir parametre olmadığı için frekans değerlerinin birbirine oldukça yakın olmasının beklenen bir durum olduğu düşünülmektedir. Bu frekanslara ait mod şekilleri Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11. Mod Şekilleri

1, 3 ve 5 numaralı frekanslara ait modlar y ekseninde eğilme; 2, 4 ve 6 numaralı frekansların modları ise x ekseninde eğilme davranışı göstermektedir. 1 ve 2 modları tek bölgeli iken, diğer modlar birden fazla bölgelidir. Ölçüm 3 için yalnızca ilk 2 mod (iki yatay doğrultu ile ilgili 1. eğilme modları, diğer bir deyişle 1. ötelenme modları) biçimsel olarak elde edilebilmiştir. Bu durum ölçümün sadece bir noktadan (en üst ölçüm seviyesinde) alınmış olmasından kaynaklanmaktadır. Ölçüm 1 ve Ölçüm 2'ye ait mod şekilleri karşılıklı olarak benzerlik göstermektedir.

Bu sonuçlara bağlı olarak, minare gibi yapıların dinamik parametrelerinin özellikle modlarının güvenli bir şekilde elde edilebilmesi için yapının yüksekliği boyunca en üst ölçüm seviyesine ilave olarak, farklı seviyelerdeki uygun noktalardan da ölçümlerin alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

SONUÇ

Çalışma kapsamında betonarme bir minarenin deneysel ölçümleri operasyonel modal analiz (OMA) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Uygulama olarak, Elazığ ilinde 2013 yılında inşa edilen Sait Koç camisinin minaresi seçilmiştir.

Deneysel ölçümler üç farklı biçimde gerçekleştirilmiştir. Referanssız olan birinci ölçümde, minarenin aynı düşey eksen üzerinde yer alan 4 farklı seviyedeki noktasının her birine 2 adet ivmeölçer (toplamda 8 ivmeölçer) yerleştirilmiştir. Referanslı olan ikinci ölçümde, toplam 4 ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçerden 2 tanesi minarenin en üst ölçüm seviyesinde sabit tutulmuş ve diğer 2 tanesi ise aynı düşey eksen üzerinde yer alan diğer 3 farklı seviyedeki noktalara kaydırılarak 3 aşamada ölçüm tamamlanmıştır. Üçüncü ölçüm referanssız bir ölçüm olup, minarenin en üst ölçüm seviyesine sadece 2 adet ivmeölçer yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Bütün ölçümlerde her bir ölçüm seviyesinde yatay doğrultuda kullanılan 2 ivmeölçerden biri x, diğeri y yönünde yerleştirilmiştir.

Ölçümler neticesinde minareye ait dinamik karakteristiklerden ilk 6 frekans ve bu frekanslara ait mod şekilleri belirlenmiştir. Frekans değerleri 0.7-8.85 Hz aralığında elde edilmiştir. Her bir ölçüm için elde edilen frekans değerlerinin birbirine eşit veya birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. Doğal frekansı etkileyen parametreler kütle ve rijitliktir. Minarenin kütlesi ve rijitliği ölçüm sistemi ile değişen bir parametre olmadığı için frekans değerlerinin birbirine oldukça yakın olmasının beklenen bir durum olduğu düşünülmektedir.

İlk 6 frekansa ait modlar eğilme modları olup; 1, 3 ve 5 numaralı modlar y ekseninde eğilme; 2, 4 ve 6 numaralı modları ise x ekseninde eğilme davranışı göstermektedir. 1 ve 2 modları tek bölgeli iken, diğer modlar birden fazla bölgelidir. Ölçüm 1 ve Ölçüm 2'ye ait mod şekilleri karşılıklı olarak uyum içerisindedir. Ölçüm 3 için yalnızca ilk 2 mod (iki yatay doğrultu ile ilgili 1. eğilme modları, diğer bir deyişle 1. ötelenme modları) biçimsel olarak elde edilebilmiştir. Bu durum ölçümün yalnızca bir noktadan alınmış olmasından kaynaklanmıştır.

Sonuç olarak, minare gibi narin yapıların dinamik parametrelerinin özellikle modlarının gerek referanslı gerek referanssız deneysel ölçümlerle güvenli bir şekilde elde edilebilmesi için yapının yüksekliği boyunca en üst ölçüm seviyesine ilave olarak, farklı seviyelerdeki uygun noktalardan da ölçümlerin alınması gerekmektedir.

TEŞEKKÜR

MF.19.13 numaralı proje ile çalışmamızı destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) Birimi'ne teşekkürü bir borç biliriz.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Altunışık AC, Karahasanoğlu OŞ, Genç AF, Okur FY, Günaydın M, Kalkan E, Adanur S, 2018. Modal parameter identification of RC frame under undamaged, damaged, repaired and strengthened conditions. *Measurement*, 124, 260-276.
- Brownjohn JMW, Raby A, Bassitt J, Antonini A, Hudson E, Dobson P, 2018. Experimental modal analysis of British rock lighthouses. *Marine Structures*, 62, 1-22.
- Chauhan S, 2008. Parameter Estimation and Signal Processing Techniques for Operational Modal Analysis, University of Cincinnati, Ohio, USA, PhD Dissertation.
- De Silva F, Ptilakis D, Ceroni F, Sica S, Silvestri F, 2018. 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.
- Lorenzoni F, Valluzzi MR, Salvalaggio M, Minello A, Modena C, 2017. Operational modal analysis for the characterization of ancient water towers in Pompeii. *Procedia engineering*, 199, 3374-3379.
- Pachon P, Castro R, Garcia-Macias E, Compan V, Puertas E, 2018. E. Torroja's bridge: Tailored experimental setup for SHM of a historical bridge with a reduced number of sensors. *Engineering Structures*, 162, 11-21.
- Rainieri C, Fabbrocino G, 2011. Operational modal analysis for the characterization of heritage structures. *Geofizika*, 28(1) 109-126.
- Ramos, JLF, 2007. Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, Minho University, Portugal, PhD Dissertation.
- Sevim B, Atamtürkür S, Altunışık AC, Bayraktar A, 2016. Ambient vibration testing and seismic behavior of historical arch bridges under near and far fault ground motions. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(1), 241-259.
- Şahin A, 2009. Yapıların Deneysel ve Operasyonel Modal Analizleri İçin Sayısal Sinyal İşleme, Dinamik Karakteristik Belirleme ve Sonlu Eleman Model İyileştirme Yazılımları: SignalCAD - ModalCAD – FemUP, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Doktora Tezi.
- Torres W, Almazan JL, Sandoval C, Boroschek R, 2017. Operational modal analysis and FE model updating of the Metropolitan Cathedral of Santiago, Chile. *Engineering Structures*, 143, 169-188.
- Türker T, 2005. Çelik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Yüksek Lisans Tezi.
- Türker T, 2011. Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti ve Değerlendirilmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Doktora Tezi.
- URL-1, 2020. Multichannel FFT analyzers - Noise and Vibration Tests and Measurements – Oros. (Online). Available: <http://www.oros.com/3889-multi-channel-analyzers.htm>. (Erişim Tarihi: 31-Ağustos-2020).
- URL-2, 2020. KB12VD type uniaxial accelerometers. (Online). Available: http://marmatek.com/urunler/mmf_kb12vd-sismik-ivme_sensoru/. (Erişim Tarihi: 31-Ağustos-2020).
- Wojcicki Z, Kostecki S, Grosel J, 2016. Operational Modal Analysis of weir on Odra river in Poland. *Procedia Engineering*, 153, 874-881.
- Yetkin M, 2016. Betonarme yapıların çevresel titreşim verileri kullanılarak dinamik davranışının incelenmesi/Investigation of dynamic behaviours of reinforced concrete structures by using environmental vibration data, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Yüksek Lisans Tezi.
- Yetkin M, Calayır Y, Erkek H, 2018. Determining Dynamic Characteristics Of Reinforced Concrete Minarets and Updating of Their Finite Element Models Using Environmental Vibration Data. *Fırat University Turkish Journal of Science & Technology*, 13(1), 93-98.
- Yetkin M, Calayır Y, Erkek H, 2016. Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi ve Sonlu Eleman Modellerinin Güncelleştirilmesi. *International Symposium on Natural Hazards and Hazard Management (Uluslararası Doğal Afetler ve Afet Yönetimi Sempozyumu)*, Karabük Üniversitesi, Karabük, s.133-138.