ESKİŞEHİR TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLİM VE TEKNOLOJİ DERGİSİ
B- TEORİK BİLİMLER

Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology B- Theoritical Sciences

2018, Cilt:6 - syf. 192 - 203, DOI: 10.20290/aubtdb.489407
4.Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı Özel Sayısı

KÜTAHYA YEŞİL MİNARENİN KAPALI VE AÇIK ŞEREFELİ DİNAMİK DAVRANIŞLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Mahmud Sami DÖVEN [1], Cavit SERHATOĞLU [2,*], Onur KAPLAN[3], Ramazan LİVAOĞLU [2]

[1] Computer Programming, V. S. of Technical Sciences, Bursa Uludağ University, Bursa, Turkey
[2] Civil Engineering Department, Enginnering Faculty, Bursa Uludağ University, Bursa, Turkey
[3] Earth and Space Sciences Institute, Eskişehir Technical University, Eskişehir, Turkey

ÖZET

Anadolu'da farklı mimari ve yapısal özelliğe sahip birçok Osmanlı minaresi yer almaktadır. Ancak kapalı şerefeli mimariye sahip minare örneklerine oldukça nadir rastlanmaktadır. Bu yüzden kapalı şerefeli minarelerin olası depremlere karşı korunması amacıyla sismik analizden önce yapım tekniğinin araştırılması, dinamik karakteristiğinin belirlenmesi gereklidir. Bu çalışma; Kütahya ilinde yer alan kapalı şerefeli Yeşil cami minaresinin mevcut durumu hakkındaki genel bilgileri ve minarenin şerefesi açık veya kapalı olması durumunda yapının dinamik davranışındaki değişimleri kapsamaktadır. Tarihi minareler izotropik olmayan malzeme özelliklerine, karmaşık rijitlik ve mesnet koşullarına sahiptir. Bu yüzden araştırmada, dinamik karakteristiklerin belirlenmesine dayalı deneysel modal analiz yöntemlerinden birisi olan çevresel titreşim deneyi uygulanmıştır. Deney, iki farklı tipte ivmeölçer kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Tarihi minarenin sayısal olarak dinamik davranışını değerlendirmek için ise yapının sonlu elemanlar modeli Abaqus programında oluşturulmuştur. Model, çevresel titreşim deneyi sonuçlarıyla güncellenerek mevcut minarenin malzeme özellikleri ve mesnet koşulları belirlenmiştir. Daha sonra aynı malzeme ve geometrik boyutlar kullanılarak minare açık şerefeli olarak modellenmiş ve modal analiz gerçekleştirilmiştir. Her iki modelden elde edilen mod şekilleri ve modal frekansları karşılaştırılarak kapalı ve açık şerefenin minarenin dinamik davranışına etkisi yorumlanmıştır. Ayrıca seçilen elastik ivme spektrumları dikkate alınarak, birinci ve ikinci mod için iki minare türünde oluşacak yatay yük değişim oranları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tarihi minare, Şerefe türü, Dinamik davranış, Çevresel titreşim deneyi, Modal analiz, Yatay yük değişimi

DYNAMIC BEHAVIOR CHANGE OF KÜTAHYA YEŞİL MINARET WITH COVERED AND OPEN BALCONY ARCHITECTURE

ABSTRACT

There are many Ottoman minarets with different architectural and structural features in Anatolia. But, examples of minarets with covered balcony are very rare. Therefore, in order to protect these minarets against possible earthquakes, it is necessary to investigate the structural properties and determine the dynamic characteristics before performing seismic analysis. In the scope of this paper, the dynamic characteristics of the covered balcony minaret of Green Mosque, which is located in Kütahya were examined. The study includes general information about the structural characteristics of the minaret and the dynamic behavior changes between the cases, which the minaret has open or covered balcony. The determination of the dynamic characteristics of historical minarets is troublesome. Because, the historical masonry minarets have complex stiffness, high heterogeneity and shadowy boundary conditions as observed. Thus, ambient vibration test was performed with aim of defining modal parameters of the minaret. The test was applied using two different types of accelerometers and the results were compared with each other. Since the dynamic behavior of the minaret were also represented with numerical model, solid model were implemented by using the finite element technique. Model updating was performed in order to match the natural frequencies arising from the experimental investigation with those from numerical results. Then, the minaret was modeled as open balcony with the same material properties and geometric dimensions and modal analysis was performed on this new model. The mode shapes and modal frequencies obtained from both models are compared with each other. Whereby, the effect of covered and open balcony to the dynamic behavior of the minaret was interpreted. Furthermore, considering elastic acceleration spectra, calculated horizontal load of the minarets were compared with each other according to the first and second modes.

Keywords: Historical minaret, Balcony type, Dynamic behavior, Ambient vibration test, Modal analysis, Horizontal force

*Sorumlu Yazar: cserhatoglu@uludag.edu.tr
Geliş: 26.03.2018 Kabul:29.06.2018

1. GİRİŞ

Tarih boyunca Anadolu, birçok medeniyete ev sahipliği yapmıştır. Bu bağlamda Anadolu'da farklı türde birçok tarihi yapıya rastlamak mümkündür. Ancak altı asırdan fazla hüküm sürmüş Osmanlı Devletinin inşa ettiği minare ve camiler kadar fazla sayıda ve faaliyetini halen sürdüren tarihi eser niteliğinde başka tür bir yapıdan bahsetmek pek mümkün değildir. Osmanlı Devleti hüküm sürdüğü toprakları sadece yönetmekle kalmamış aynı zamanda kendi mühendislik ve mimarlık tecrübesini o bölgelerdeki eserleri inceleyerek geliştirmiş ve hem hüküm sürdüğü bölgelerde hem de Anadolu'da yeni eserler inşa etmiştir. Bu bağlamda Anadolu'da farklı mimarilere sahip minarelere rastlamak mümkündür. Maalesef bu yapılar, Anadolu'nun sismik tehlikeye sahip bir bölge olmasından dolayı geçmişte çok kez depreme maruz kalarak zarar görmüş ve halen günümüzde de bu tehditle karşı karşıyadır. Bu yüzden Osmanlı tarihi minarelerinin yapısal ve dinamik özelliklerinin incelenmesi, yatay yüklere karşı yapısal davranışının değerlendirilmesi, gerekli ise güçlendirilmesi ve mümkünse yapısal sağlık takibine alınması gereklidir. Bu parametrelerin her biri oldukça önemli ve birbirini ilgilendiren araştırmalardır. Ancak yapı ve deprem mühendisliğinde bu konularla ilgili mesafe kat edebilmek için yapıda incelenmesi ve öncelik verilmesi gereken en önemli parametre yapının dinamik karakteristiğidir. Genel bir ifadeyle dinamik karakteristik; yapının modal periyotları, mod şekilleri ve sönüm oranı şeklinde açıklanabilir. Dinamik davranışı kontrol eden en temel yapı özellikleri ise yapının kütlesi ve rijitliğidir.

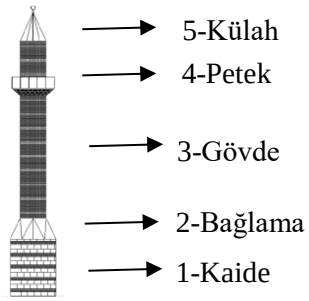
Tarihi yapıların dinamik karakteristiği ve yapısal davranışları sayısal olarak araştırılmadan önce malzeme ve modal deneylerin gerçekleştirilmesi oldukça önemlidir. Çünkü bu yapıların sayısal modeli oluşturulup modal analiz sayesinde yapının dinamik karakteristiği elde edilirken; malzeme özellikleri, sınır koşulları, eleman sayısının belirlenmesi ve güncellenmesi sonuçların doğruluğunu ve güvenirliğini etkileyen önemli parametrelerdir. Literatürde tarihi minare ve kule benzeri yapıların dinamik ve yapısal davranışları için çeşitli çalışmalara rastlamak mümkündür. Ertek ve Fahjan (2007) Osmanlı Döneminde yapılan minareleri kendi içinde sınıflara ayırmışlar ve bir minare üzerinde sonlu elemanlar programı kullanarak kabuk eleman, katı eleman ve merdivenli, merdivensiz olarak dört modelin deprem performansını incelemişlerdir [1]. Pena ve ark. (2010) ise çalışmalarında Hindistan'ın Delhi şehrinde yer alan Qutb Minaresini yapısal davranışını araştırmışlardır. İnceleme kapsamında öncellikle modal test gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra ise minareyi üç boyutlu katı, üç boyutlu kiriş ve iki boyutlu düzlem olarak sonlu elemanlar programında modelleyip itme ve dinamik analizler yapmışlardır. İki analiz sonuçlarını her modellemeye göre yorumlanmıştır [2]. Oliveira ve ark. (2012) İstanbul'da yer alan belirli minareler üzerinde çevresel titreşim deneyi gerçekleştirmiş ve seçtikleri üç minare için elastik malzeme modeli kullanarak tepki spektrum analizi ve zaman tanım alanında analizler gerçekleştirmişlerdir [3]. Livaoğlu ve ark. (2016) çalışmalarında tarihi yığma minarelerin geometrik özelliklerinin dinamik davranış üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yazarlar çalışmada minarelerin temel yapısal özelliklerini dikkate alarak birinci hakim periyotun belirlenmesi için ampirik bir formül önermişlerdir [4]. Marra ve ark. (2017) yığma kulelerin sismik değerlendirilmesi için artımsal dinamik analiz ve doğrusal olmayan statik analizler gerçekleştirerek her iki yöntemin sonuçlarını çalışmalarında karşılaştırmışlardır [5].

Bu çalışmada incelenen Kütahya Yeşil Camii minaresi 12 köşeli olarak Ahmet Minareci tarafından yapılmış olup şerefesinin üstü kapalı ve Arap stilindedir [6]. Geleneksel açık şerefe tipinin dışında kapalı olarak teşkil edilmiş olan şerefe, hesaplamalara göre minarenin kütlesine yaklaşık 12 tonluk bir ilave kütle getirmektedir. Bu yüzden, minarenin rijitliği ile ilgili sadece şerefe ve petek birleşiminde etkileşimi olan kapalı şerefenin açık olması halinde minareden eksilecek olan kütle, dinamik davranışı etkileyecek ve minarenin modal periyot değerlerini düşürecektir. Çalışma kapsamında minarenin rölevesi yerinde oluşturulmuş ve çevresel titreşim deneyi (ÇTD) uygulanmıştır. Sonlu elemanlar metoduyla oluşturulan matematiksel model kalibrasyonu, çevresel titreşim deneyi periyot değerleri ile modal analiz sonucu elde edilen değerler eşleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Gerçeğe yakın olarak geliştirilen modeldeki kapalı şerefe, açık şerefeye dönüştürülerek yapı modeli tekrar analiz edilmiş ve yapının bu hali dikkate alınarak dinamik özellikleri hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buna ek olarak seçilen bir elastik tepki

spektrumuna göre birinci ve ikinci mod için iki minare türünde oluşacak yatay yük değişim oranı yorumlanmıştır.

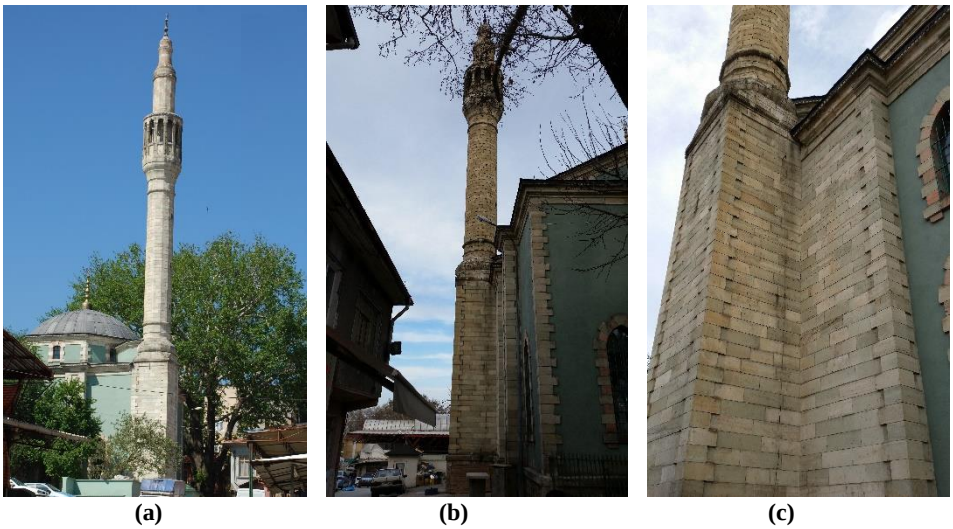
2. İNCELENEN MİNARENİN GENEL ÖZELLİKLERİ

İncelenen minarenin yapısal özellikleri hakkında literatürden ve ilgili kurumdan kayıtlı bir bilgi elde edilemediği için minarenin geometrik özellikleri ve kullanılan malzeme türleri yerinde yapılan ölçümler neticesinde belirlenmiştir. Belirlenen yükseklik ve iç/dış çaplar Şekil 1'de verilen minare bölümlerine göre Tablo 1'de sunulmaktadır.



Şekil 1. Osmanlı Minarelerinin Bölümleri

Osmanlı minarelerin kaidesi duvarının mesnetlenme durumu genellikle cami duvarına bitişik olup bazen de kaidenin beden duvarının üzerinde veya ayrık konumlandırıldığını görmek mümkündür. Şekil 2'de görüldüğü gibi incelenen minare cami beden duvarına bitişik ve bir kenarı birlikte inşa edilmiştir.



(a) **(b)** **(c)**

Şekil 2. (a)İnceleme yapılan Kütahya Yeşil Cami minaresi (b-c)Minare kaide duvarının mesnetlenme durumu

Osmanlı minarelerinde malzeme olarak genellikle tuğla, küfeki taşı ve horasan harcı kullanılmaktadır [4]. Ancak bu malzemeler yapıda birlikte kullanıldıklarında malzemenin mekanik özelliklerinin homojen ve izotropik bir dağılım göstermemektedir. Bu yüzden mekanik özelliklerin deneysel olarak belirlenmesi oldukça zor ve zahmetlidir. Ayrıca, bu minarelerin çoğu tescilli yapılar olduğu için restorasyon veya onarım durumları dışında tahribatlı deneyler uygulanması söz konusu değildir. Bu yüzden çalışmadaki minare için elastisite modülü ve birim hacim ağırlık değerleri, yazarların daha önce

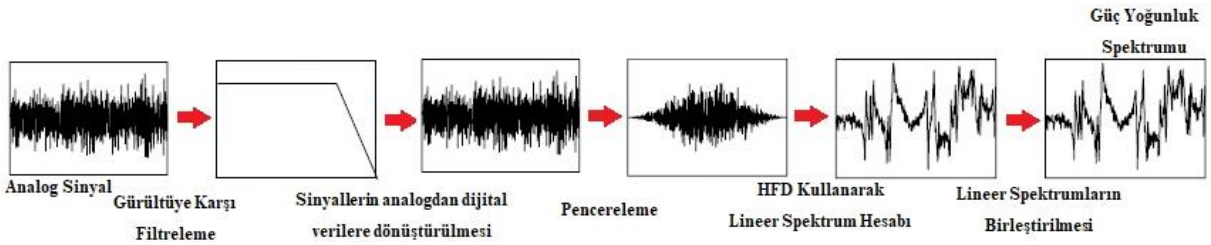
Bursa'da yer alan benzer minareler üzerindeki malzeme deneyleri göz önünde bulundurularak [7-8] homojen malzeme kabulüyle modal analiz sayesinde tespit edilmiştir.

Tablo 1. İncelenen Kütahya Yeşil minarenin genel geometrik özellikleri

Minare Bölümleri	Malzeme	Kaide	Bağlama	Gövde	Petek	Külah
Duvar Kalınlığı	Kireç Taşı	0.68 m	Değişken	0.34 m	0.25 m	Değişken
Dış Çap	Kireç Taşı	Kare l=2.70 m	Değişken	Onikigen l=0.54 m	Onikigen l=0.44 m	Değişken
Toplam Yükseklik			35.90 m			

3. DİNAMİK KARAKTERİSTİĞİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Çalışma kapsamında minarenin dinamik karakteristiğini belirlemek için çevresel titreşim deneyleri gerçekleştirmiştir. Çevresel titreşim deneyi yapılara etkiyen rüzgâr, tektonik hareketler ve trafik yükü etkilerine karşı sadece ivme tepkilerinin değerlendirmesine dayalı oldukça hızlı ve ekonomik bir testtir. Bu test deneysel modal analizden türetilmesine rağmen ikisi arasındaki ana fark etkinin temel formülasyonudur. Deneysel modal analizde girdiler (etki) belirlenebilir çerçevede olurken çevresel titreşim deneyi rastgele etkilere karşı stokastik bir yaklaşıma sahiptir. Çevresel titreşim deneyinde girdiler (etki) Gauss (Standart Normal Dağılımı sıfır olan) Beyaz Gürültü olarak varsayılır. Ölçülen yapısal tepkiler etki eden kuvvet geçmişi altında, test edilen yapının dinamik karakteristiğinin anlaşılmasına imkân verecek ivme-zaman veri setini içerir. Girdi kuvvetlerinin karakteri, yapıda uyarabildiği (tetiklediği) modların modal parametrelerinin tahmin edilmesini sağlar. Ayrıklaştırılmış (yığılı kütleyle modellenmiş) bir yapı sistemi zamanla değişmeyen dar bantlı tepkilere sahip iken zamanla değişen ve değişmeyen etkiyen kuvvet geçmişi geniş bant özelliği gösterebilir. Dolayısıyla yapısal modları etki kuvvetinin tetiklediği frekans bantlarında tanımlamak mümkün olacaktır. Girdiler (Gauss Beyaz Gürültü) frekans alanında düz bir spektrum kullanılarak karakterize edilir. Bu yüzden ilgili frekans aralığında bütün modlara eşit etki ettiği varsayılır. Bu varsayımdan dolayı test sonucundan modların kütle katılımları hesaplanamaz ve doğal frekansa yakın sahte harmonik bileşenlerden dolayı modal parametrelerin belirlenmesi zorlaşabilir. Girdilerin (etki) bu varsayımından dolayı oluşan diğer sonuçlar (sönüm gibi) hesaplama metotlarının sınıflandırılmasına göre değişmektedir [9-10]. En temel ifadeyle çevresel titreşim testinde sinyal işleme süreci Şekil 3'teki gibidir.



Şekil 3. Çevresel titreşim testinde sinyal işleme sürecinin şematik gösterimi

Yatay her iki doğrultu için iki farklı türde ivmeölçer kullanılarak çevresel titreşim deneyi gerçekleştirilmiştir. İvmeölçerin birincisinin türü piezoelektrik olup iki ivmeölçer ile tek yönlü olarak kayıt alınırken, kuvvet-dengeli olan diğer türü ile üç eksen için kayıt alınmıştır. Kullanılan ivmeölçerlerin teknik özellikleri Tablo 2'de sunulmaktadır. Kayıtlar, ivmenin ölçülebilecek genliklere ulaşabilmesi için ve yapının davranışında önemli bir kütle yoğunluğuna sahip olduğu için şerefe seviyesinden alınmıştır.



(a) (b) (c)

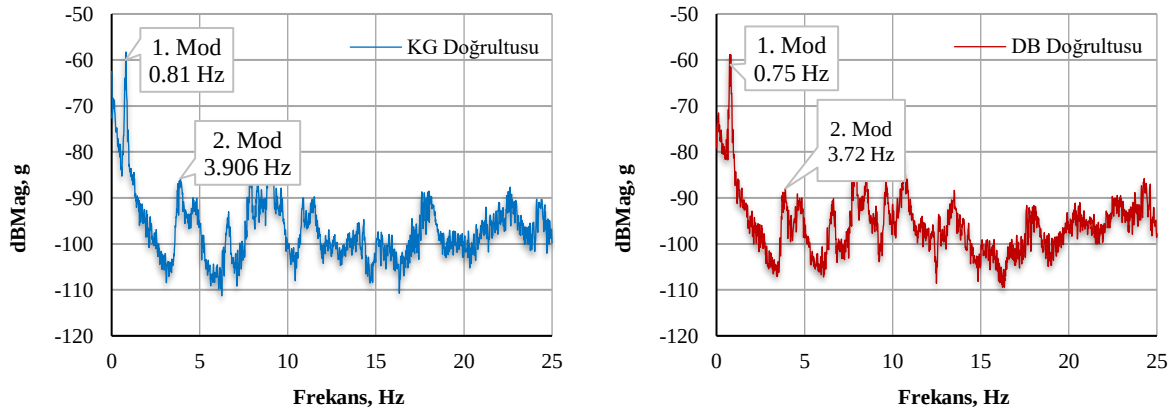
Şekil 4. (a) İvmeölçerlerin yerleştirildiği bölge (b) KB12VD-Piezoelektirk ivmeölçer (c) Güralp/5cm2e2 Kuvvet-Dengeli İvmeölçer

Tek eksenli piezoelektrik ivmeölçerlerden alınan veriler Hızlı Fourier Dönüşümü sayesinde geliştirilmiş frekans alanlı yöntem kullanılarak Signalcalc programında işlenmiş ve kapalı şerefeli minarenin güç yoğunluk spektrumları oluşturulmuştur. Tek eksenli ivmeölçerlerin kayıtlarından elde edilen güç yoğunlukları spektrumları Şekil 5'te verilmiştir. Minarenin dinamik karakteristiğini belirlerken çevresel titreşim deneyinden alınan yatay kayıtlar Kuzey-Güney (KG) ve Doğu-Batı (DB) doğrultularını ifade etmektedir.

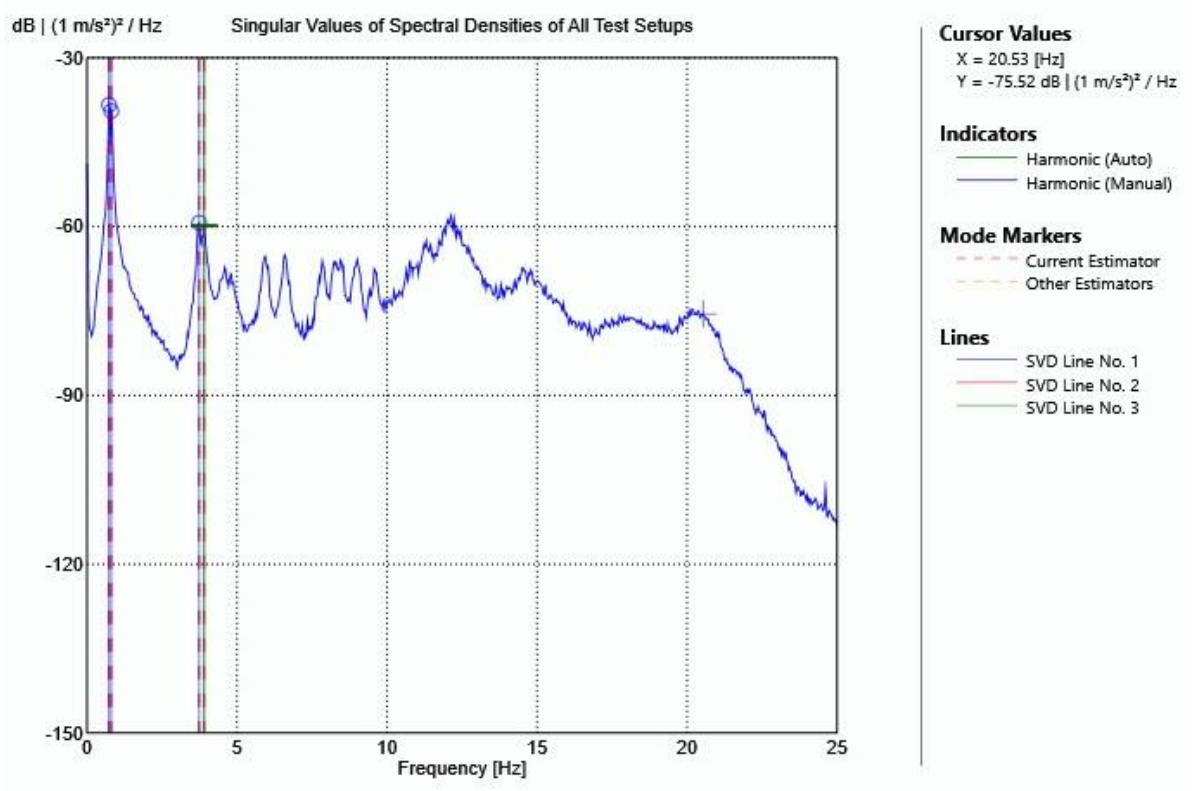
Üç eksenli kuvvet-dengeli ivmeölçerlerden alınan veriler ise hızlı Fourier dönüşümü sayesinde geliştirilmiş frekans alanlı yöntem kullanılarak Artemis Modal yazılımında paralel olarak işlenmiş ve kapalı şerefeli minarenin güç yoğunluk spektrumları oluşturulmuştur. Üç eksenli ivmeölçerlerin kayıtlarından elde edilen güç yoğunlukları spektrumları Şekil 6'da verilmiştir. Bu şekilde iki farklı ivmeölçer türü kullanılarak yapının mod frekansları elde edilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır (Tablo 3).

Tablo 2: Kullanılan ivmeölçerlerin teknik özellikleri

İvmeölçer:	Örnekleme oranı	Ölçüm Aralığı	Çalışma Sıcaklığı
KB12VD -Piezoelektirk İvmeölçer	0.08 – 260 Hz	± 0.6 g	-20 +80 ° C
Güralp/5cm2e2 Kuvvet-Dengeli İvmeölçer	100 Hz	± 4.0 g	-20 +75 ° C



Şekil 5. Tek eksenli piezoelektrik ivmeölçerlerin kayıtlarından elde edilen güç yoğunlukları spektrumları



Şekil 6. Üç eksenli kuvvet-dengeli ivmeölçerin kayıtlarından elde edilen güç yoğunluk spektrumu

Piezoelektrik ve kuvvet dengeli ivmeölçerden elde edilen veriler karşılaştırıldığında Tablo 3'de verilen mod frekans değerleri arasında neredeyse farkın olmadığı görülmektedir. Bu bağlamda 25 Hz'in üzerinde yapının dinamik davranışını etkileyecek önemli modlara sahip olmayan minare türü yapılar için her iki tipteki ivmeölçerin kullanılmasının uygun olduğu söylenebilir.

Tablo 3'teki her iki doğrultudan elde edilen modal frekanslar incelendiğinde her iki mod için birbirleri arasında %5-8 arasında değişen bir fark görülmektedir. Bu durumun dinamik açıdan en önemli nedeni simetrik görünümlü minarenin KG doğrultusundaki kaide duvarının cami beden duvarına bitişik olmasından dolayı aynı doğrultu için minare kaide duvarının yaklaşık yarı yüksekliğine kadar yanal mesnetli olarak davranmasıdır.

Tablo 3. İki farklı türdeki ivmeölçer kayıtlarından elde edilen ilk dört mod frekans sonuçlarının karşılaştırılması

İvme Kayıt Doğrultusu	Mod	Tek Eksenli Piezoelektrik İvmeölçer Frekans, Hz	Üç Eksenli Kuvvet-Dengeli İvmeölçer Frekans, Hz	Frekanslar Arasındaki Farklar,%
KG	1	0.810	0.806	0
	2	3.906	3.894	0
DB	1	0.750	0.742	1
	2	3.720	3.720	0

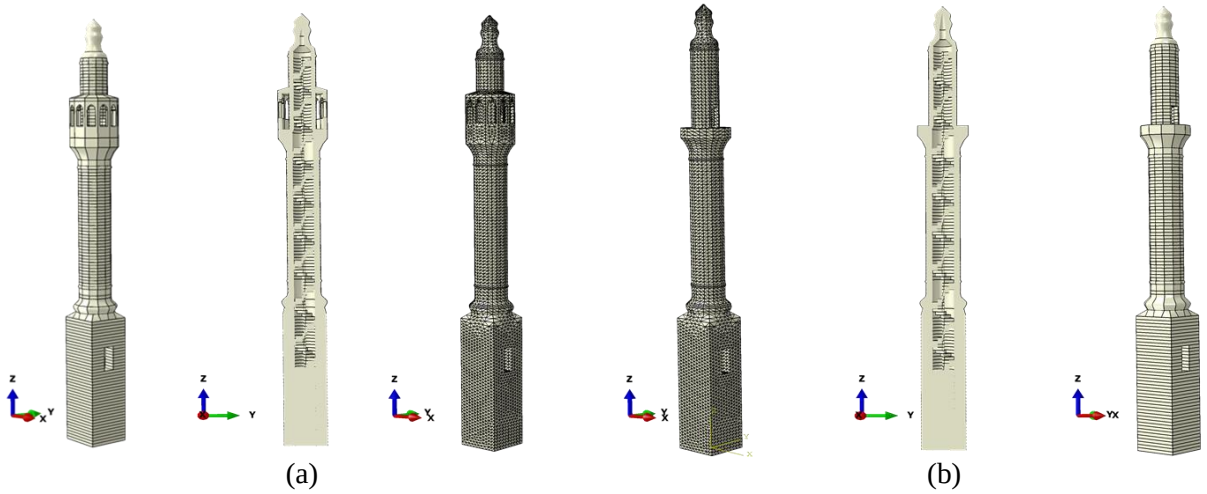
4. SONLU ELEMANLAR MODELİ VE MODAL ANALİZ

Tarihi yapıların geometrisi ve malzeme karmaşıklığı dikkate alındığında bu tür yapıların dinamik davranışı için analitik çözüm kullanılması pek mümkün değildir [4]. Bu yüzden tarihi yapıların bilgisayar ortamında sayısal yöntemlerle çözülmesi daha uygun olacaktır. Çalışma kapsamında sayısal analiz için literatürde yaygın olarak tercih edilen sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılmıştır. Sonlu

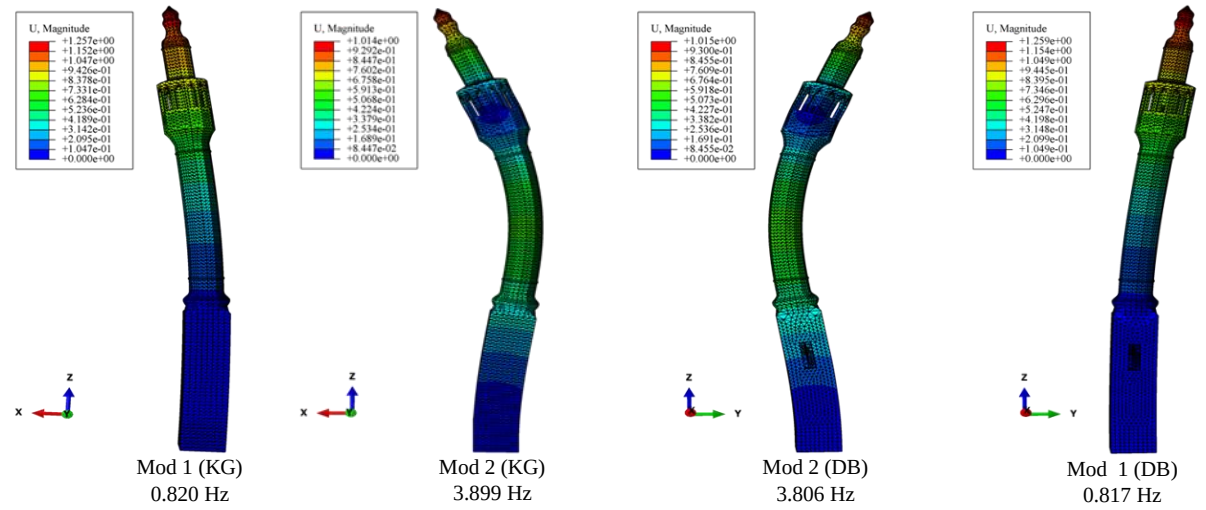
elemanlar modelinin çözülmesi için Abaqus Cae programından faydalanılmıştır. Arazide belirlenen geometrik özellikler yardımıyla üç boyutlu katı (Solid) eleman tipi seçilerek kapalı şerefeli minarenin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur (Şekil 7a). Daha sonra kapalı şerefeli minare modeli üzerinde modal analiz gerçekleştirilmiş ve çevresel titreşim deney (ÇTD) sonuçları sayesinde model güncellenmiştir. Bu sayede modelde kaidenin cami beden duvarına bitişik olan duvarı yaklaşık yarı yüksekliğine kadar KG doğrultusundaki yer değiştirmeleri sınırlandırılmış ve malzemenin elastisite modülü 6000 N/mm^2 ve birim hacim kütlesi 2200 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. ÇTD ve modal analiz sonuçları Tablo 4'te karşılaştırılmıştır.

Açık ve kapalı şerefeli minarenin dinamik davranışındaki farkları görmek için güncellenen sonlu elemanlar modeliyle aynı mesnet şartları, malzeme özellikleri ve eleman boyutlarına sahip açık şerefeli yeni bir model oluşturulmuş (Şekil 7b) ve model üzerinde modal analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan modal analiz sonuçlarına göre kapalı ve açık şerefeli modeller için her iki doğrultuda elde edilen ilk iki mod frekans değerleri ve mod şekilleri Şekil 8 ve 9'da verilmiştir. Sonlu elemanlar modellerinde gösterilen X doğrultusu mevcut yapıda KG'yi, Y doğrultusu DB'yi temsil etmektedir.

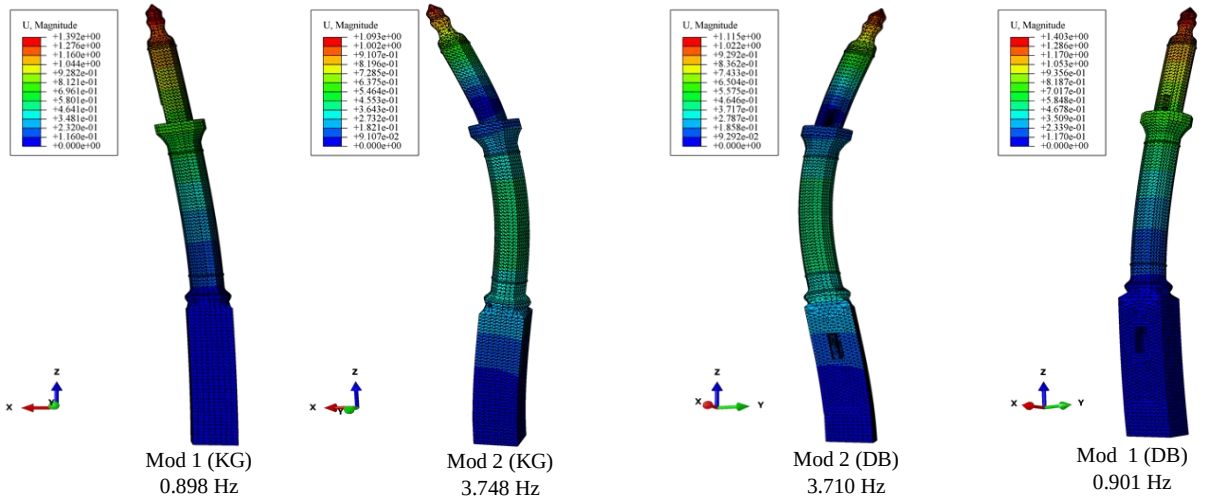
Güncellenen malzeme sonuçları ve geometrik özelliklere göre kapalı şerefeli modelin toplam kütlesi 283 ton belirlenmişken açık şerefeli modelin toplam kütlesi 271 ton olarak hesaplanmıştır. Modellerin toplam kütleleri arasındaki fark 12 ton olup bu değer şerefenin üstünü kapatan kısmın kütlesidir. Minarenin dinamik davranışını etkileyecek petek bölümündeki bu önemli kütle artışının olması ve olmaması durumunda mod frekans değerleri ve modların kütle katılım oranları arasındaki değişim Tablo 4'te gösterilmektedir.



Şekil 7. Minare modellerinin geometrik, düşey kesit ve sonlu elemanlara ayrılmış görüntüsü (a) Kapalı şerefeli Yeşil minare (b) Açık şerefeli Yeşil minare



Şekil 8. Kapalı şerefeli model için her iki doğrultuda ilk iki mod frekans değerleri ve mod şekilleri



Şekil 9. Açık şerefeli model için her iki doğrultuda ilk iki mod frekans değerleri ve mod şekilleri

5. ÇEVRESEL TİTREŞİM DENEYİ VE MODAL ANALİZ BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Kapalı şerefeli minare üzerinde yapılan çevresel titreşim deneyinin (ÇTD) modal frekans sonuçları ve minarenin sayısal modelleri üzerinde yapılan modal analiz sonuçları her iki yatay doğrultudaki ilk iki mod için Tablo 4'de verilmiştir. Buna göre, kapalı şerefeli minarenin modal analiz sonucunda hesaplanan iki doğrultudaki frekans değerleri çevresel titreşim deneyi sonuçlarıyla oldukça uyumludur. Kapalı şerefeli minarenin deneysel sonuçlarıyla (ÇTD), modal analiz (MA) sonuçları arasındaki maksimum hata yüzdesi % 9 olup tarihi yapılar için kabul edilebilir bir düzeydedir. İki modelin Tablo 4'deki kütle katılım sonuçları incelendiğinde modellerin mod şekilleri sadece X (KG) veya sadece Y (DB) doğrultusunda elde edilmemiştir. Bu yüzden modelin modlarında kütle katılım oranı fazla olan doğrultuyla deneyde seçilen doğrultu eşleştirilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneyde seçilen doğrultuyla model sonuçlarından elde edilen doğrultunun çakışmamasının sebebi geometriye göre seçilmiş olan eksen takımının; kaide geometrisi, mesnet şartları ve minare merdivenin helizon yapısından dolayı rijitliğin asal eksen takımıyla kesişmemesi olabilir.

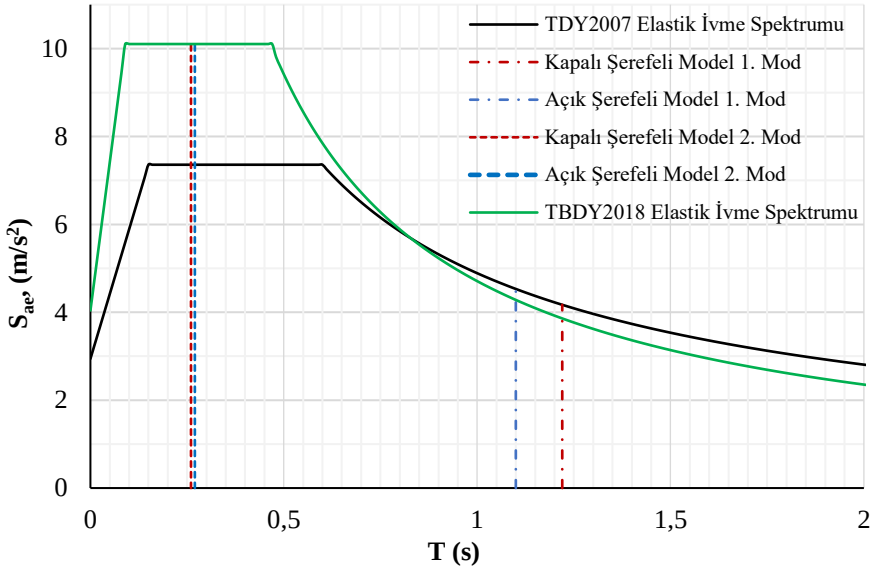
Tablo 4. Açık ve kapalı şerefeli minare modellerinin mod frekansları ve kütle katılım oranları karşılaştırılması

İvme Kayıt Doğrultusu	Mod	Modal Analiz (MA)						ÇTD	Frekans Fark Yüzdeleri, %	
		Kapalı Şerefeli Model (KŞMMA)			Açık Şerefeli Model (AŞMMA)			Kapalı Şerefeli Minare		
		Frekans (Hz)	Kütle Katılım Yüzdesi, %		Frekans (Hz)	Kütle Katılım Yüzdesi, %		Frekans (Hz)	ÇTD & KŞMMA	KŞMMA & AŞMMA
			X	Y		X	Y			
KG	1	0.820	25	15	0.898	19	18	0.810	-1	-10
	2	3.899	27	3	3.748	21	5	3.906	0	4
DB	1	0.817	15	25	0.901	18	19	0.750	-9	-10
	2	3.806	3	27	3.710	5	22	3.720	-2	3

6. ELASTİK DEPREM YÜKÜNÜN KARŞILAŞTIRILMASI

Çalışmada kapalı ve açık şerefeli minarelerin birinci ve ikinci mod periyotları dikkate alınarak elastik ivme spektrumuna göre minarelere gelecek deprem yükündeki değişim yorumlanmak istenmiştir. Elastik ivme spektumları, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (TDY2007) [11] ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY2018) [12] dikkate alınarak oluşturulmuştur (Şekil 10). Kütahya yeşil minarenin konumuna göre((Enlem: 39.41 Boylam: 29.98) TDY2007 için etkin yer ivme katsayısı A_0=0.3 ve Z3 yerel zemin sınıfına göre elastik spektrum oluşturulurken, TBDY2018 için harita spektral ivme katsayıları S_S=0.891-S_1=0.193 ve Z_D zemin sınıfı esas alınmıştır.

Şekil 8 ve 9'da verilen minarelerin mod şekilleri incelendiğinde her iki minare türünün mod şekillerinin birbirine yakın olduğu anlaşılmaktadır. Ancak, modlardaki kütle katılım oranları ve minarenin toplam kütle değeri dikkate alınarak, seçilen iki iki yönetmelik spektrum eğrisi için kapalı şerefeli minare açık şerefeli minareye göre birinci modlarda yaklaşık %5, ikinci modlarda ise yaklaşık %21 daha fazla yatay yüke maruz kalacaktır. Bu minare için birinci mod periyot değerleri spektrum eğrilerindeki T_B değerinden büyüktür (Şekil 10). Bu yüzden kapalı şerefeli minare için hesaplanan spektral ivme değeri açık şerefeli minare için hesaplanan değerden küçüktür. Ancak bu türde inşa edilmiş minarelerde birinci periyot değerinin T_B'den küçük değerlere sahip olduğunu görmek de mümkündür. Bu bağlamda minarelerin aynı spektral ivme değerine maruz kaldığı kabul edilirse, kapalı şerefeli minare açık şerefeli minareye göre her iki doğrultudaki birinci modda yaklaşık %13, ikinci modda ise yaklaşık %21 daha fazla yatay yüke maruz kalacaktır. Minarenin toplam kütle katılım oranın yaklaşık %70'ni temsil eden ve minarenin yatay yüklere maruz kaldığında gövde-bağlama bölgesinin hasar görmesine en çok neden olan eğilme davranışına sahip iki mod için hesaplanan bu yatay yük artışları, her iki durum için de dikkat çekici seviyelerde olduğu söylenebilir.



Şekil 10. Kapalı ve açık şerefeli minare için modlara göre elastik tepki spektrumları

7. SONUÇ ve TARTIŞMALAR

Bu çalışmada tarihi Osmanlı minarelerinin üstü kapalı ve açık olması durumunda dinamik davranışındaki değişim sayısal olarak araştırılmıştır. Araştırmanın ilk aşamasında mevcut kapalı şerefeli Yeşil minarenin dinamik karakteristiği çevresel titreşim deneyi sayesinde elde edilmiş daha sonra minarenin sayısal modeli oluşturularak modal analiz gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise güncellenen modeldeki özellikler kullanılarak minarenin açık şerefeli olması durumundaki modelde modal analiz gerçekleştirilmiş ve açık şerefeli minarenin dinamik karakteristiği belirlenmiştir. Ayrıca TDY2007 ve TBDY2018'den elde edilen elastik ivme spektrumu dikkate alınarak iki minare arasındaki yatay yük değişim oranı incelenmiştir. Her iki yönetmelik kullanılarak hesaplanan yatay yük değişim oranları yaklaşık aynı hesaplanmıştır. Ancak ikinci modlar için eski ve yeni yönetmelikten hesaplanan spektral ivme değerleri birbirinden oldukça farklıdır. Bu yüzden sonraki çalışmalarda performans davranışındaki değişimler incelenerek konuma göre spektral ivme katsayılarının seçiminin önem düzeyinin yorumlanmasında faydalı olacaktır.

Tarihi Osmanlı minareleri yatay yüklerden dolayı oluşan hasarlar incelendiğinde birinci ve ikinci mod şeklinin etkin olduğu ve hasarların çoğunlukla kesit değişiminin gerçekleştiği bağlama-gövde (Şekil 11a) veya şerefe-petek (Şekil 11b) bölgesinde meydana geldiği ve birinci mod şeklinin etkin olduğu görülmektedir. Ancak bağlama-gövde birleşiminde meydana gelen hasarlar daha yaygın görülmekte olup çoğunlukla minarenin yıkılmasına neden olurlar.



Şekil 11. Yaygın Minare Hasarları (a) Eğilme kaynaklı bağlama-gövde bölge/çökme hasarı (b) Şerefe-petek bölge hasarı [13-14-15-16]

Gözlemlenen bu yaygın hasarlar ve açık/kapalı şerefeli minarelerin bu çalışmadaki sonuçları dikkate alındığında kapalı şerefenin, şerefe-petek bölümündeki rijitliği artırarak bu bölgedeki hasarları azaltabileceğini söylemek mümkündür. Ancak minarenin dinamik davranışında etkin bir bölge olan balkon seviyesindeki kütlenin artmasından dolayı oluşacak yatay yük artışının, birinci ve ikinci moddaki eğilme davranışına göre bağlama-gövde birleşiminde yıkıcı ve önemli hasarların oluşmasını tetikleyebileceği söylenebilir. Yazarlar, sonraki çalışmalarında bu sonuçları desteklemek amacıyla itme ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerini sürdürmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından 2015-81 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca yerinde yapılacak ölçümlere müsaade ederek çalışmanın yürütülmesi sırasında her türlü kolaylığı sağlayan Vakıflar Kütahya Bölge Müdürlüğüne ve Bölge Müdürü Ahmet AYDIN'a saygılarımızı sunar teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

[1] Ertek E, Fahjan Y. Osmanlı Minarelerinin Yapısal Sistemleri:Sınıflandırma, Modelleme ve Analizi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim 2007, İstanbul.

[2] Peña F, Lourenço PB, Mendes N & Oliveira DV. (2010). Numerical models for the seismic assessment of an old masonry tower. Engineering Structures, 32(5), 1466-1478. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.01.027

[3] Oliveira CS, Çaktı E, Stengel D, Branco, M. Minaret behavior under earthquake loading: The case of historical Istanbul. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 2012, 41(1): 19-39. DOI: 10.1002/eqe.1115

[4] Livaoğlu R, Baştürk MH, Doğangün A & Serhatoğlu C. Effect of geometric properties on dynamic behavior of historic masonry minaret. KSCE Journal of Civil Engineering 2016; 20(6): 2392-2402. DOI: 10.1007/s12205-016-0622-2

[5] Marra AM, Salvatori L, Spinelli P & Bartoli G. Incremental dynamic and nonlinear static analyses for seismic assessment of medieval masonry towers. Journal of Performance of Constructed Facilities 2017, 31(4), 04017032. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.01.027

[6] Kalyon MM. Kütahya'da Selçuklu-Germiyan ve Osmanlı eserleri. Kütahya Belediyesi Kültür Yayınları, 2000.

[7] Serhatoğlu C, Livaoğlu R and Bağbancı B. Dynamic Identification of Moumental and Historical Minaret of Şehadet. 6th International Operational Modal Analysis (IOMAC'15) 2015, Gijon,Spain.

[8] Serhatoğlu C, Livaoğlu R, Bağbancı B. Comparison of Dynamics characters Historical Minarets of Muradiye Mosque and Earthquake Safety. 5th International Earthquake Sympasium, 10-12 June, 2015, Kocaeli-Turkey.

[9] Rainieri C. Operational Modal Analysis for seismic protection of structures Doctoral dissertation 2008, Università degli Studi di Napoli Federico II.

[10] Serhatoğlu C. Numerical and Emprical Investigation of Dynamic Performance of Historical Masonry Minarets in Bursa, MSc, Uludağ University, Bursa, Turkey.

[11] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (TDY2007). Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2007.

[12] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY2018), Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2018.

[13] (2010) [Online]. Available: http://www.iha.com.tr/haber-ruzgar-minareleri-yikti-109116/

[14] (2013) [Online]. Available: http://www.iha.com.tr/haber-firtina-minareleri-yikti-267638/

[15] (2013) [Online]. Available: http://www.iha.com.tr/haber-firtina-minareleri-yikti-267638/

[16] (2009) [Online]. Available: http://haberciniz.biz/vakiflar-bolge-mudurlugu-depremde-hasar-goren-minarelerin-restorasyonunu-unuttu-kuta-745989h.htm.