



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# Kule tipi yapıların dinamik davranışının belirlenmesi: Kırklareli Hızırbey Camii minaresi örneği

## *Determination of dynamic behaviour of tower type structures: the case of Kırklareli Hızırbey Mosque minaret*

*Yazar(lar) (Author(s)):* İsmail KILIÇ<sup>1</sup>, Kanat Burak BOZDOĞAN<sup>2</sup>, Süleyman AYDIN<sup>3</sup>, Saadet Gökçe GÖK<sup>4</sup>, Safiye GÜNDOĞAN<sup>5</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-5556-512X

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-7528-2418

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0003-2489-9906

ORCID<sup>4</sup>: 0000-0002-7879-1610

ORCID<sup>5</sup>: 0000-0001-6672-4667

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Kılıç İ., Bozdoğan K. B., Aydın S., Gök S. G. ve Gündoğan S., “Kule tipi yapıların dinamik davranışının belirlenmesi: Kırklareli Hızırbey Camii minaresi örneği”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 19-26, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.481857

# Kule Tipi Yapıların Dinamik Davranışının Belirlenmesi: Kırklareli Hızırbey Camii Minaresi Örneği

*Araştırma Makalesi / Research Article*

İsmail KILIÇ<sup>1\*</sup>, Kanat Burak BOZDOĞAN<sup>2</sup>, Süleyman AYDIN<sup>3</sup>, Saadet Gökçe GÖK<sup>4</sup>, Safiye GÜNDOĞAN<sup>5</sup>

<sup>1,4,5</sup>Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, İnşaat Teknolojisi Programı, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 08.11.2018 ; Kabul/Accepted : 08.02.2019)

## ÖZ

Yapıların deprem davranışları çeşitli dinamik parametreler kullanılarak belirlenmektedir. Bu parametreler yapının mevcut yapısal özelliklerine, malzeme özelliklerine, sınır şartlarına ve hasar durumuna bağlı olarak elde edilmektedir. Karmaşık yapısal dinamik problemleri çözmek için modal analiz inşaat mühendisliğinde kullanılan bir yöntemdir. Minare yapıları, uzun ve ince yığma yapılar olduğu için yanal yüklere karşı hassas yapılardır. Narinlik etkisi nedeniyle, şiddetli depremlerde bu yapılarda önemli hasarlar meydana gelmektedir. Sunulan çalışmada, Kırklareli ili Merkez ilçesinde yer alan ve 1383 yılında inşa edilmiş olan Hızırbey Camii minaresinin lineer dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Önceki dönemde restorasyon süreci geçiren Hızırbey Camii'nin, restorasyon raporundan yararlanılarak minare boyutları elde edilmiştir. Yapının duvarlarında kullanılan taş malzemeye yönelik çalışmalar kapsamında malzeme özellikleri belirlenmiştir. Söz konusu yapının tarihi değeri nedeniyle tahribatsız deney yöntemlerinde faydalanılarak malzeme elastisite modülü tayin edilmiştir. Minarenin dinamik analizi, mod birleştirme yöntemi ile 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerine (DBYBHY 2007 ve TBDY 2018) göre SAP2000 yazılımı kullanılarak yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Minare yapısı prizmatik çubuk elemanlarla ve kabuk elemanlarla modellenmiş olup modellemelerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Minarenin temel periyodunun analitik olarak bulunması için ise Rayleigh yöntemini esas alan bir yaklaşımda çalışma kapsamında önerilmiştir. Çalışmanın sonunda TBDY 2018 yönetmeliğine göre elde edilen kuvvet ve yer değiştirmelerin DBYBHY 2007 yönetmeliğine oranla daha büyük değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çubuk eleman kabulüyle yapılan modellemenin kabuk elemanla modellemeye yakın değerler verdiği gözlenmiştir. Çalışmada önerilen Rayleigh yöntemi ile bulunan minarenin hakim periyodu, sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuca çok yakın olarak elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hızırbey Camii minaresi, dinamik analiz, kule yapısı, küfeki taşı.

## Determination of Dynamic Characteristics of Tower Type Structures: The Case of Kırklareli Hızırbey Mosque Minaret

### ABSTRACT

Seismic behavior of the structures is determined by using various dynamic parameters. The parameters are obtained depending on the existing structural characteristics of the structures, material properties, boundary conditions and damage condition. Modal analysis is a method used in civil engineering to solve complex structural dynamic problems. Minaret structures, because they are long and thin masonry structures, are sensitive to seismic effects. Due to its slenderness effect, significant damage to the structures occurs in severe earthquakes. In this study, linear dynamic analysis of the minaret of Hızırbey Mosque, which was built in 1383 at Kırklareli, was performed. The mosque is a restored structure, by using structural restoration report of the mosque, the dimensions of the minaret were determined. Studies on the stone-based construction material used on the walls of the structure, were carried out and material properties were determined. Due to the historical value of the mosque, nondestructive testing methods were used and modulus of elasticity of the material was obtained. The dynamic analysis of the minaret was performed in SAP2000 software by using mode superposition method in Turkish Earthquake Codes (TEC 2007 and TEC 2018). Furthermore, the minaret was modelled with prismatic frame elements and obtained results were compared to the results of shell element modeling. Within the scope of this study, an approach based on the Rayleigh method was proposed for the analytical evaluation of the fundamental period of the minaret. At the end of the study, it is seen that the force and displacement obtained according to the TEC 2018 is greater than TEC 2007. In addition, it was observed that modeling with frame elements gave close values to modeling with shell element. The fundamental period of the minaret with the Rayleigh method proposed in the study was found very close to the result obtained by the finite element method.

**Keywords:** Hızırbey Mosque minaret, dynamic analysis, tower-type structure, kufeki limestone.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : ismail.kilic@klu.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mimari özellikleri ve statüyle çağımız mühendis ve mimarlarına yol gösteren tarihi yapıları korumak, kültürel mirasın gelecek nesillere aktarılması açısından önemlidir. Buna karşın deprem, savaş, yangın, ilgisizlik nedenlerine bağlı olarak birçok tarihi yapı yok olmakta veya yok olma seviyesine gelmiştir. Kültürel mirasın önemli örneklerinden olan tarihi yapıların mevcut yapısal güvenliklerinin belirlenerek elde edilen sonuçlara göre yapısal önlemlerin alınması gerekmektedir. Tarihi yapıların yapısal güvenliklerinin belirlenerek değerlendirilmesi ve koruma yöntemlerinin belirlenmesi disiplinlerarası bir çalışma gerektirir. Bu itibarla, tarihi yapıların kagir duvarlarında kullanılan taşların malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve analiz programlarında gerçek davranışı temsil edecek şekilde modellenmesi gerekmektedir.

Tarihi yapıların yapısal güvenliklerinin belirlenmesi ve koruma yöntemleri ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde; El-Attar vd. tarafından yapılan çalışmada, Mısır'da bulunan Memlükler döneminden kalma tarihi Manjaq Al-Yusufi minaresinin, sonlu elemanlar yöntemi ile kurulan modeli üzerinde dinamik analiz yapılarak sismik güçlendirme teknikleri önerilmiştir. Minarenin dinamik karakteristiklerini belirlemek için sismik ivmeölçerler kullanılarak çevresel titreşim testi yapılmış, sonrasında minarenin üç boyutlu sonlu elemanlar modelinin doğrulaması gerçekleştirilmiştir [1]. Mortezaei vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, İran'daki Jame Mescidi'nin yapısal davranışı incelenmiş olup analiz sonucunda minarenin hasar göreceği öngörülerek minarenin yeterli performans seviyesine ulaşabilmesi için kullanılabilecek güçlendirme teknikleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir [2]. Hejazi'nin çalışmasında, İran İsfahan'da bulunan ve klasik İran mimarisinde önemli yeri olan dokuz farklı tarihi yığma minare üzerinde analizler yapılarak yapısal özellikler belirlenmiş olup incelenen minarelerde deprem yüklemesi ve ısı etkisi altında hasar görebilecek kısımlar belirlenmiştir [3]. Abdel-Motaal minarelerin deprem davranışı üzerinde kazık temel etkilerini araştırdığı çalışmada kazık boyu ve özelliklerinin minarenin davranışını değiştirdiği belirtilmiştir [4]. Mirtaheri vd. İran Kaşan'da Selçuklu döneminde tamamen tuğladan inşa edilmiş olan tarihi Zeyned-din minaresinin dinamik karakteristiklerini sismik çevresel titreşim testi yöntemiyle belirlemiştir [5].

Yığma yapıların deprem güvenliklerinin belirlenmesi ve koruma yöntemleri ile ilgili çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Serhatoğlu vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Şehadet Camii minaresinin frekans, mod şekilleri ve sönüm oranı gibi dinamik parametreleri operasyonel modal analiz yöntemi ile incelenmiştir. Çalışmada kalibre edilmiş sonlu elemanlar modelinin, minarenin davranışını yakın doğrulukta yansıttığı ifade edilmiştir [6]. Livaoğlu vd. çalışmalarında, Bursa'daki yedi adet tarihi yığma minareyi incelemek suretiyle minarelerin geometrik özelliklerinin dinamik davranışa etkisi incelenmiş ve sonuç olarak minarenin kesit

özellikleri ve yüksekliğinin dinamik davranışa olan etkisi belirlenmiştir [7].

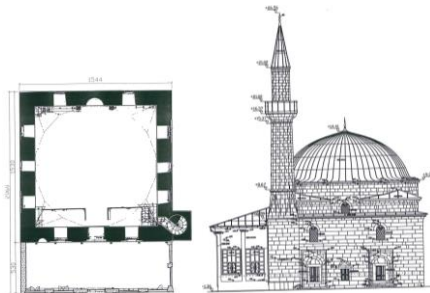
Tarihi yığma minarelerin sonlu eleman modeli oluşturularak teorik modal analizi, Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle de deneysel modal analizi gerçekleştirilerek mod şekilleri ve frekansları gibi modal parametreleri belirlenmektedir. Hacıfendioğlu vd. Samsun'da bulunan Büyük Camii'nin deneysel modal analizini gerçekleştirmiştir [8].

Ural ve Çelik, Aksaray il merkezinde bulunan yedi adet yığma minarenin sismik davranışını incelemiştir. Minarelerin geometrik ölçümleri fotogrametrik cihazlar kullanılarak yapılmış ve sonlu elemanlar metodu ile minareler modellenerek deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapısal analizler birbirleriyle karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır [9]. Hacıfendioğlu vd. zemin türlerinin betonarme minarenin dinamik davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için laboratuvar koşullarında inşa edilen betonarme minarenin modal testlerini gerçekleştirmiştir. [10]. Erdil vd. 2011 Van depreminde hasar gören Ulu Cami minaresinin hasar durumunu değerlendirmek, yapısal ve malzeme özelliklerini belirlemek amacıyla bir saha araştırması yapmışlardır. Modal parametreleri belirlemek için operasyonel modal analizi yapılmış ve sonlu eleman modeli oluşturulmuştur [11]. Akan ve Özen, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak Bursa Yeşil Türbe'nin deprem analizini yapmışlar ve sonuç olarak bu tür yapılarda çekme gerilmelerini azaltacak önlemlerin alınması gerektiğini vurgulamışlardır [12]. Ertek ve Fahjan, Osmanlı döneminde inşa edilen minarelerin analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kabuk ve katı modelleme sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmada sonuç olarak, katı elemanla yapılan modellemede elemanların moment aktarma özellikleri olmamasından dolayı diğer elemanlarla bağlantılarına dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır [13]. Beyen, çalışmasında 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde hasar gören, İstanbul'da bulunan Fatih Camisi'ni ele almış, titreşim verileri kullanarak caminin dinamik özellikleri ve mevcut yapısal durumunu incelemiş ve simetrik olarak teşkil edilmiş ve hiperstatiklik derecesi düşük olan bu tür yapıların çözümünde ana taşıyıcı yapı elemanların üzerinde oluşabilecek hasar için hâkim frekansın bir gösterge olabileceğini ifade etmiştir [14]. Dogangun vd. tarihi minarelerin dinamik davranışlarını incelemek üzere 20 m, 25 m ve 30 m yüksekliklerinde üç farklı minareyi modelleyerek minarelerin 1999 Kocaeli ve Düzce deprem kayıtları kullanarak dinamik analizlerini yapmışlar ve sonuç olarak özellikle eksenal ve eğilme gerilmelerinin üst geçiş bölgesinde en yüksek değerleri aldığı, kesme gerilmesi bakımından ise en yüksek değerlerin tabanda oluştuğunu vurgulamışlardır [15]. Celep vd. Muradiye Camii'nin yapısal ve deprem davranışının belirlenmesi amacıyla çalışma yapmışlardır. Çalışmanın sonunda yapılan analizlerden beklendiği gibi, düşey normal gerilmelerin duvarların tepesinden aşağıya doğru arttığı ve maksimum değerlerin duvarın tabanında oluştuğu görülmüştür. Çalışmada güçlendirme

yöntemi olarak mikro kazık yaklaşımı önerilmiştir [16]. Türk vd. İstanbul'da bulunan tarihi bir caminin yığma taş minaresinin dinamik analizini yaparak analiz sonucunda lifli polimer ile güçlendirme önermişlerdir [17]. Sezen ve Dogangun, tarihi yapıların yapım teknikleri ve malzemelerini anlatarak 1999 Kocaeli depreminde minarelerin geçiş bölgelerinde oluşan gerilmeler nedeniyle hasar gördüklerini belirlemişlerdir [18]. Dogangun ve Sezen, Bolu ve Düzce'deki 1999 Kocaeli depreminde hasar gören beş ayrı tarihi caminin sismik hasar değerlendirmesini yapmışlardır [19]. Turk, İstanbul'da bulunan tarihi bir camiye ait yığma taş minarenin dinamik analizi ile mevcut durumunu belirleyerek kritik kesitlerin lif takviyeli çimentolu matris malzeme ile güçlendirilmesini önermiştir [20].

## 2. KIRKLARELİ HIZIRBEY CAMİİ'NİN MİMARİ VE YAPISAL ÖZELLİKLERİ (ARCHITECTURAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF KIRKLARELİ HIZIRBEY MOSQUE)

Kırklareli merkezde konumlanan Hızır Bey Camii, 1383 (H.785) yılında Köse Mihalzade Hızır Bey tarafından yaptırılmış, kare planlı bir yapıdır. Duvarların dış yüzleri, kubbe kasağı ve minaresi düzgün yonu küfeki taşından imal edilmiştir. 1470 m<sup>2</sup> arsa üzerinde 15 m × 15 m ebatlarında temel üzerine oturmuş, 328 m<sup>2</sup>'lik iç alana sahip olarak aynı anda 1000 kişinin ibadet edebileceği kapasiteye sahiptir [21]. Deprem sonucu yıkılan ve cami inşasından daha sonra yapılmış olan dikdörtgen planlı son cemaat yeri, Aydoslu Hacı Yusuf Paşa tarafından 1824 yılında onarılmıştır. Tosunoğlu Ali Efendi tarafından 1887 yılında bir onarım daha geçirmiştir. Minaresi kesme taş ve tek şerefeli, kütük kare ve külâh kurşunludur. Balkan savaşında Bulgarlar tarafından yarıya kadar yıkılan minaresi tekrar yapılmıştır. Büyük Cami olarak da bilinen, ibadete açık olan yapı, 2007 yılında Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından restorasyon çalışması yapılmıştır. Zengin kalem işi süslemeleri ile erken Osmanlı dönemi yapısıdır. İç duvarlarını süsleyen büyük harfli yazılar Kastamonulu Hattat Tevfik tarafından yazılmıştır. Hızırbey Camii temel boyutlarıyla Kâbe-i Muazzama'ya benzemektedir [22]. Edirne Vakıflar Bölge Müdürlüğü arşivinden temin edilen Hızırbey Camii'nin planı ve sol yan (batı) görünüşü Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Caminin kat planı ve sol yan (batı) görünüşü (Story plan and Western facade of the mosque) [22]

## 3. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Çalışma kapsamında, Hızırbey Camii minaresinin deprem yükleri altında dinamik özellikleri belirlenmiştir. Hızırbey Camii, Kırklareli ili merkezinde bulunan kalker esaslı malzeme (küfeki taşı) kullanılarak inşa edilmiş yığma bir yapıdır. Kırklareli ili, coğrafi konum itibarıyla Marmara Bölgesi'nin Trakya kesiminde yer almaktadır. Istranca dağları ve Ergene nehri arasında kalan bu sınır ili, DBYBHY 2007'ye göre dördüncü derece deprem bölgesinde bulunmaktadır [23].

Yapısal analizin gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan malzeme özellikleri belirlenmiştir. Elastisite modülü değeri, tahribatlı deney yöntemleriyle doğrudan belirlenebilirken, caminin tarihi niteliği nedeniyle malzeme örneği alınarak bu deneylerin gerçekleştirilmesi mümkün olmamıştır. Bu nedenle, Pundit PL200 (Ultrasonik darbe hızı test cihazı) kullanılmıştır. Test cihazı malzemelerin homojenliğini değerlendirebilmekte, çatlakları algılayabilmekte, darbe hızını hesaplayabilmekte ve darbe hızı korelasyonu kullanılarak basınç dayanımını belirleyebilmektedir. Bunların yanında malzemenin elastisite modülünü tespit edebilmektedir. Elastisite modülü tespiti için önce 54 kHz duyargalar ile P-dalgası ölçümü daha sonra 250 kHz duyargalar ile S-dalgası ölçümü yapılmaktadır. P ve S dalgası ölçümleri yapıldıktan sonra cihaz elastisite modülü değerini vermektedir. Cami minaresinin taş duvarlarında bu yöntemle ölçümler yapılmış ve küfeki taşının elastisite modülü belirlenmiştir. Minare duvarlarının kesme küfeki taşı ile örülmesi ve derz kalınlıklarının az olmasından dolayı elastisite modülü tespitinde harç etkisi dikkate alınmamıştır.

Küfeki taşı, deniz kabuklarının çoğunlukla da istiridyeye kabuklarının oluşturduğu bir kalker türüdür. Bakırköy taşı, lümaşelli kalker ve maktrali kalker olarak da adlandırılmaktadır. İçeriğinde büyük miktarda fosil bulunmakta olup, boşluklu ve kalsit özellikli bir dokusu vardır. Açık bej-beyaz tonlarında, ince taneli ve kumlu görünümde, kompakt bir kayaç olup kolay işlenebilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Kimyasal bileşiminde asgari %90 oranında kalsiyum karbonat, mineralojik bileşiminde asgari %90 oranında kalsit minerali bulunduran kayaçlar, kalker ya da kireçtaşı olarak adlandırılmakta olup kireçtaşının birim hacim ağırlığı 2,5-2,7 g/cm<sup>3</sup> arasında değişmektedir [24]. Trabzon ili civarında yer alan kaya birimleri mühendislik jeolojisi açısından değerlendirildiğinde, bu bölgedeki kireçtaşının özgül ağırlığı ortalama 2,82 g/cm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir [25]. TS 11137'de kireçtaşı için verilen alt limit birim hacim ağırlık değeri 2,16 g/cm<sup>3</sup> olarak belirtilmiştir [26]. Literatürde, kalsiyum karbonatlı kayaçların standart özelliklerinin incelendiği bir çalışmada, kireçtaşı olarak sınıflandırılan kayaçlarda pas tehlikesi olduğu, açık hava etkilerine maruz kaldığında renk değişimi gözlemlendiği belirlenmiştir [27].

Küfeki taşı, hafifliği sayesinde nakliye kolaylığı sağlarken yüksek hızda üretim yapılabilmesine olanak

sağlamaktadır. Bununla birlikte kesme kolaylığı, istenen boyutlarda yapı taşı üretilebilmesini ve kullanım çeşitliliği sağlamaktadır. Kimyasal yapısında bulunan kalsiyum karbonat, ortamdaki karbondioksit ile tepkimeye girerek zamanla basınç dayanımında, elastisite modülünde ve çekme dayanımında artış sağlanarak beraber permeabilite, klor difüzyonu ve su geçirgenliğinde azalma oluşturmaktadır [28]. Erzurum Lala Paşa Camisi'nin incelendiği bir çalışmada, yapı elemanlarının mekanik özellikleri Çizelge 1'de gösterilmiştir [29]. Taş malzeme kullanılarak inşa edilen Coşandere (Kınalı) köprüsünün sonlu eleman yöntemiyle analizinde kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 2'de verilmektedir [30].

**Çizelge 1.** Erzurum Lala Paşa Camii'nin malzeme mekanik özellikleri (The mechanical properties of materials used in Erzurum Lala Pasha Mosque) [29]

Cami bölümü	Elastisite modülü (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)
Duvarlar	3,92	0,3
Fil ayakları ve kemerler	5,63	0,3
Kubbeler	3,00	0,3

**Çizelge 2.** Coşandere (Kınalı) köprüsü taş malzeme özellikleri (Material properties of the stone used in Cosandere-Kınalı Bridge) [30]

Malzeme	Elastisite modülü (GPa)	Poisson oranı
Yan duvar	2,5	0,20
Dolgu	1,5	0,05
Taş kemer	3,0	0,20

Hızırbey Camii minare duvarları incelenmiş ve duvarda kullanılan taş türünün küfeki taşı (fosilli kalker) olduğu tespit edilmiştir. Literatür çalışmalarından yararlanılarak küfeki taşının birim hacim ağırlık değeri  $2,55 \text{ g/cm}^3$  olarak belirlenmiştir. Pundit PL200 (Ultrasonik Darbe Hızı Test Cihazı) ile Hızırbey Camii minaresinin taş duvarlarında ölçümler yapılmış ve taş malzemenin elastisite modülünün 4-6 GPa aralığında değerler aldığı tespit edilmiştir. Cami minaresinde kullanılan küfeki taşının elastisite modülü değeri analizlerde 5 GPa olarak kullanılmıştır. Hızırbey Camii minaresine ait ölçüler, Edirne Vakıflar Bölge Müdürlüğü arşivinden temin edilen Kırklareli Hızırbey Camii Rölöve-Restitüsyon-Restorasyon raporundaki rölöve çizimlerinden alınmıştır. Çizimlerden belirlenemeyen ölçüler ise minare üzerinden ve içerisinden lazermetre yardımıyla yerinde tespit edilmiştir. Ölçme imkânı olmayan kısımlarda ise yaklaşık değer kabul edilmiştir. Elde edilen veriler

doğrultusunda SAP2000 [31] yazılımı kullanılarak Hızırbey Camii minaresinin dinamik analizi yapılmıştır.

#### 4. MİNARENİN DİNAMİK ANALİZİ (DYNAMIC ANALYSIS OF THE MINARET)

Hızırbey Camii minaresinin dinamik analizi, lineer analizde zaman tanım alanında analize yakın sonuç veren, geçerliliği kabul gören ve yaygın olarak kullanılan mod birleştirme yöntemine göre SAP2000 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Mod birleştirme yöntemine göre dinamik analiz gerek DBYBHY 2007 gerekse TBDY 2018 [32] yönetmeliklerine uygun olarak yapılmıştır. Analizlerde yapı geometrisi nedeniyle x ve y doğrultuları için elde edilen deplasman ve iç kuvvet değerleri aynı olarak elde edilmiş olup bu nedenle yalnızca x doğrultusu sonuçları verilmiştir.

Minarenin konumlandığı zemin sınıfının belirlenmesi için Nitelik Mühendislik İnşaat ve Gıda San. Tic. Ltd. Şirketinin katkıları ile yüzey Dalgası Analiz Yöntemi (MASW) kullanılmıştır. Yapılan geoteknik analizlerden üst 30 m'deki kayma dalgası hızı  $V_{s30}=592 \text{ m/s}$  olarak bulunmuştur. Elde edilen bu verilerden DBYBHY 2007 yönetmeliğine göre zemin sınıfı Z2 olarak belirlenirken TDY 2018 Yönetmeliğine göre zemin sınıfı ZC olarak tespit edilmiştir.

Minarenin DBYBHY 2007 Yönetmeliği esas alınarak gerçekleştirilen dinamik analizinde esas alınan parametreler Çizelge 3'te verilmiştir.

**Çizelge 3.** DBYBHY 2007 Yönetmeliğine göre spektral analiz parametreleri (Spectral analysis parameters based on TEC 2007)

Etkin ivme katsayısı ( $A_0$ )	0,1
Bina önem katsayısı (I)	1
Zemin sınıfı	Z2
Taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R)	2

TBDY 2018'e göre yapılan analizlerde Kırklareli merkezi için dikkate alınan parametreler Çizelge 4'te sunulmuştur. Minarenin analizinde çatlamış kesit rijitliği kullanılmış olup eğilme ve kayma rijitliği değerleri 0,5 ile azaltılarak hesaplarda dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında yalnızca yatay tepki spektrumu kullanılmış olup düşey tepki spektrumunun etkisinin ihmal edilebilecek mertebede olması nedeniyle analizlerde bu etki dikkate alınmamıştır.

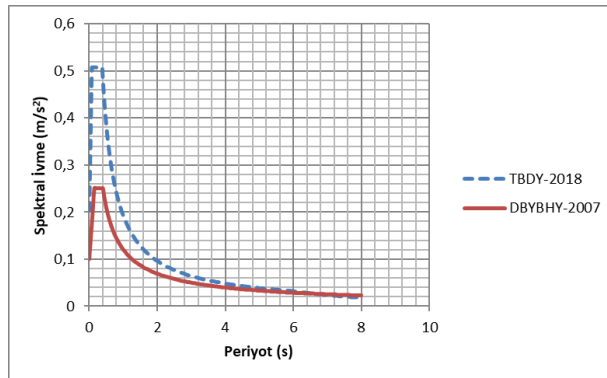
DBYBHY 2007 ve TBDY 2018 deprem yönetmeliklerine ait elastik tasarım spektrumları Şekil 2'de verilmiştir.

Minarenin analizinde elastisite modülü yerinde yapılan ölçümler baz alınarak 5 GPa olarak alınmıştır. Birim hacim ağırlığı ve Poisson oranı literatürdeki değerlere uygun olarak  $25,5 \text{ kN/m}^3$  ve 0,2 şeklinde dikkate alınmıştır [13]. Modellemede merdivenin etkisi de dikkate alınarak merdivenin ağırlığı yayılı kütle olarak

minareye etkilmiştir. Merdivenli ve merdivensiz olarak yapılan çözümlerden merdivenin dinamik analize etkisinin sınırlı seviyede olduğu değerlendirilmiştir. Minare modellenirken doğrusal analizde yeterli uygunlukta sonuçlar veren ve tüm yapının homojen anizotropik olarak kabul edildiği makro modelleme tekniği kullanılmıştır. Bu itibarla makro modelleme kullanılarak analiz süresi kısaltılmaktadır. Analizlerde malzemenin lineer olduğu ve geometrik nonlineer etkilerin ihmal edilebileceği kabulleri yapılmıştır. Analizlerde kabuk eleman modeli ile birlikte çubuk eleman modeli de kullanılarak çubuk elemanla modellemenin uygunluğu da araştırılmıştır. Ayrıca minarenin temel periyodu Rayleigh yöntemi ile analitik olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 4.** TBDY 2018'e göre spektral analiz parametreleri (Spectral analysis parameters based on TEC 2018)

Zemin sınıfı	ZC
Kısa periyot bölgesi için harita spektral ivme katsayısı ( $S_s$ )	0,388
1,0 saniye periyot bölgesi için harita spektral ivme katsayısı ( $S_1$ )	0,128
En büyük zemin ivmesi (PGA)	0,165
Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı ( $F_s$ )	1,3
1,0 saniye periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı ( $F_1$ )	1,5
Kısa periyot bölgesi için tasarım spektral ivme katsayısı ( $S_{DS}$ )	0,504
1,0 saniye periyot bölgesi için tasarım spektral ivme katsayısı ( $S_{D1}$ )	0,192
Taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R)	2



**Şekil 2.** TBDY 2018 ve DBYBHY 2007'ye göre elastik tasarım spektrumları (Elastic design spectra according to TEC 2018 and TEC 2007)

#### 4.1 Minarenin Kabuk Elemanlar Kullanılarak Dinamik Analizi (Dynamic Analysis of the Minaret by using Shell Elements)

Literatürde yapılan çalışmada minarelerin doğrusal analizinde, kabuk elemanla modelleme sonucu elde edilen değerlerin, katı eleman kullanılması durumunda

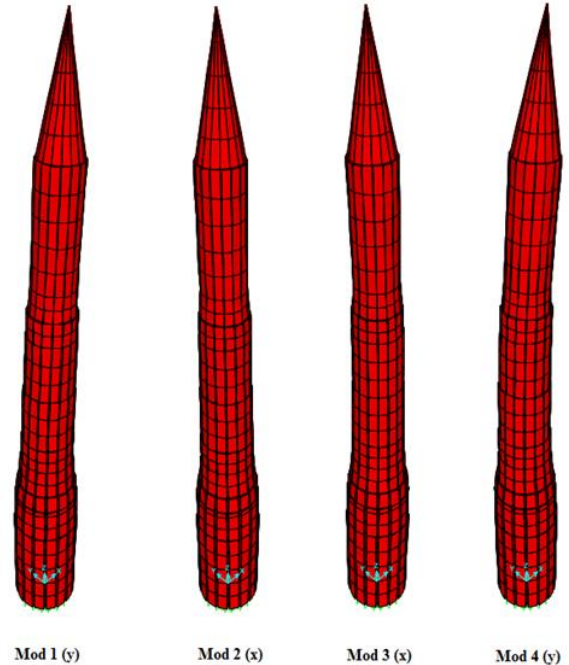
elde edilen değerlere yakın olduğu görülmüştür [13]. Bu çalışmada katı elemana oranla modellemesi daha kolay olan kabuk (shell) elemanlar kullanılmıştır. Modelleme sırasında yapı toplam 528 kabuk (shell) elemana bölünmüş olup minarenin toplam ağırlığı 1604,7 kN olarak hesaplanmıştır.

Minarenin periyotları çatlamamış ve çatlamış kesit dikkate alınarak SAP2000 yazılımı yardımıyla hesaplanarak Çizelge 5'te sunulmuştur.

**Çizelge 5.** Minarenin ilk dört periyodu (First four periods of the minaret)

Mod	Doğrultu	Periyot T(s) (Çatlamamış kesit kabulünde)	Periyot T(s) (Çatlamış kesit kabulünde)
1	y	0,39	0,56
2	x	0,39	0,56
3	y	0,13	0,18
4	x	0,13	0,18

Minarenin mod şekilleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Analizlerden elde edilen tepe noktası yer değiştirmesi ve taban kesme kuvveti değerleri Çizelge 6'da sunulmuştur. Analizlerde yapı geometrisi nedeniyle x, y doğrultusu için elde edilen deplasman ve iç kuvvet değerleri aynı olarak elde edilmiş olup bu nedenle yalnızca x doğrultusu sonuçları verilmiştir.



**Şekil 3.** Cami minaresinin mod şekilleri (Mode shapes of the mosque minaret)

Elde edilen gerilmeler ise Çizelge 7'de verilmiştir. Burada S11 ve S22 düşey gerilmeleri, S12, S13 ve S23 ise kayma gerilmelerini göstermektedir.



**Çizelge 6.** DBYBHY 2007 ve TBDY 2018 deprem yönetmeliklerine göre elde edilen tepe noktası deplasmanı ve taban kesme kuvvet değerleri (Peak point displacement and base shear force values obtained with TEC 2007 and TEC 2018)

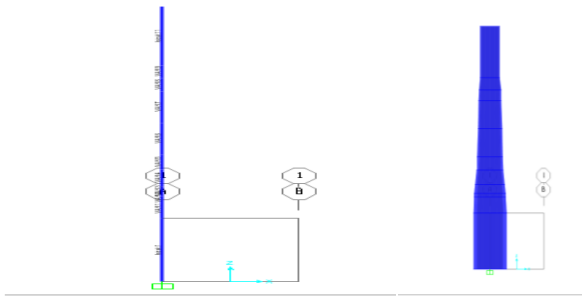
	X doğrultusu	
	DBYBHY (2007)	TBDY (2018)
Tepe noktası deplasmanı	14 mm	40 mm
Taban kesme kuvveti	86,8 kN	142,7 kN

**Çizelge 7.** 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre elde edilen maksimum gerilme değerleri (Maximum stress values obtained with TEC 2007 and TEC 2018)

	Gerilmeler (MPa)	
	DBYBHY 2007	TBDY 2018
S11	0,098	0,140
S22	0,490	0,700
S12	0,056	0,091
S13	0,004	0,007
S23	0,025	0,042

#### 4.2 Minarenin Çubuk Elemanlar Kullanılarak Dinamik Analizi (Dynamic Analysis of the Minaret by using Frame Elements)

Minare SAP2000’de prizmatik olmayan çubuk elemanlar (nonprismatic frame elements) kullanılarak modellenmiştir (Şekil 4).



**Şekil 4.** Prizmatik olmayan çubuk elemanlarla modelleme görüntüsü (Modelling using nonprismatic frame elements)

Çubuk elemanlarla modellemede minarenin periyotları çatlamamış ve çatlamış kesit dikkate alınarak hesaplanmış ve Çizelge 8’de sunulmuştur.

Prizmatik çubuk elemanlarla modellemeden elde edilen tepe noktası deplasmanı ve taban kesme kuvveti değerleri ise Çizelge 9’da verilmiştir.

**Çizelge 8.** Çubuk elemanla modellemede minarenin ilk dört periyodu [s] (First four periods of the minaret)

Mod	Doğrultu	Periyot, T(s) (Çatlamamış kesit kabulünde)	Periyot, T(s) (Çatlamış kesit kabulünde)
1	y	0,39	0,55
2	x	0,39	0,55
3	y	0,13	0,19
4	x	0,13	0,19

**Çizelge 9.** Prizmatik çubuk elemanlarla modellemede 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre elde edilen deplasman ve taban kesme kuvvet değerleri (Peak point displacement and base shear force values obtained by using prismatic frame elements model according to TEC 2007 and TEC 2018)

	X doğrultusu	
	DBYBHY (2007)	TBDY (2018)
Tepe noktası yer değiştirmesi	14,4 mm	42 mm
Taban kesme kuvveti	89,3 kN	151,6 kN

#### 4.3 Rayleigh Yöntemi Kullanılarak Minarenin Hâkim Periyodunun Hesaplanması (Determination of Fundamental Period of the Minaret by using Rayleigh Method)

Rayleigh yöntemi ile minarenin hâkim periyodu Dnk. 1 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada minare, literatüre uygun olarak eşdeğer bir Timoshenko kirişi olarak modellenmiş olup bu durumda Dnk. 2-11 yazılabilir [33]:

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega} \quad (1)$$

Burada  $\omega$ , açısal frekansı göstermekte olup Dnk. 2 ile bulunur.

$$\omega^2 = \frac{\omega_e^2 \omega_k^2}{\omega_e^2 + \omega_k^2} \quad (2)$$

Burada  $\omega_e$  salt eğilme deformasyonlarından hesaplanan açısal frekansı,  $\omega_k$  ise salt kayma deformasyonlarından hesaplanan açısal frekansı göstermekte olup (3) ve (4) bağıntıları ile hesaplanabilir:

$$\omega_e^2 = \frac{\int_0^1 EI(\epsilon) \left( \frac{d^2 y_e}{d\epsilon^2} \right)^2}{H^4 \int_0^1 \rho A(\epsilon) y_e^2} \quad (3)$$

$$\omega_k^2 = \frac{\int_0^1 kGA(\epsilon) \left( \frac{dy_k}{d\epsilon} \right)^2}{H^2 \int_0^1 \rho A(\epsilon) y_k^2} \quad (4)$$

Burada  $E$  elastisite modülünü,  $G$  kayma modülünü,  $I(\epsilon)$  atalet momenti fonksiyonunu,  $A(\epsilon)$  kesit alanını,  $k$  kayma şekil faktörünü göstermektedir. Sırasıyla  $y_e$  ve  $y_k$  salt eğilme ve salt kayma deformasyonlarından oluşan 1. mod

şeklini göstermekte olup yaklaşık olarak Dnk. 5 ve 6'daki gibi kabul edilebilir [37]:

$$y_e = 1 - \cos\left(\frac{\pi\varepsilon}{2}\right) \quad (5)$$

$$y_k = \sin\left(\frac{\pi\varepsilon}{2}\right) \quad (6)$$

Burada  $\varepsilon$ , Dnk. 7 ile tanımlanır:

$$\varepsilon = \frac{z}{H} \quad (7)$$

Burada  $z$ , minarenin yüksekliği boyunca değişimini ve  $H$  minarenin toplam yüksekliğini göstermektedir. Bu çalışmada atalet momenti ve kesit alanının yapı yüksekliği boyunca parabolik ve kübik olarak değişimi durumları dikkate alınmış olup Dnk. 8-11'de sunulmuştur:

$$I(\varepsilon) = I(0)\left[1 - \left(1 - \frac{I(H)}{I(0)}\right)\varepsilon^2\right] \quad (8)$$

$$A(\varepsilon) = A(0)\left[1 - \left(1 - \frac{A(H)}{A(0)}\right)\varepsilon^2\right] \quad (9)$$

$$I(\varepsilon) = I(0)\left[1 - \left(1 - \frac{I(H)}{I(0)}\right)\varepsilon^3\right] \quad (10)$$

$$A(\varepsilon) = A(0)\left[1 - \left(1 - \frac{A(H)}{A(0)}\right)\varepsilon^3\right] \quad (11)$$

Burada  $I(0)$  ve  $A(0)$  tabandaki atalet ve kesit alanını,  $I(H)$  ve  $A(H)$  ise tepe noktasındaki atalet momenti ve kesit alanını göstermektedir. Dnk. 1-11 bağımlıları kullanılarak parabolik ve kübik değişim kabulleri için temel periyot değerleri hesaplanmıştır. Rayleigh yöntemi ile atalet momenti ve kesit alanının parabolik ve kübik olarak değişmesi durumları için bulunan çatlama ve çatlama kesit temel periyot değerleri Çizelge 10'da verilmiştir.

**Çizelge 10.** Rayleigh yöntemi ile bulunan temel periyot [s]  
(Fundamental period obtained using Rayleigh method)

Değişim kabulü	Periyot, T(s) (Çatlama kesit kabulünde)	Periyot, T(s) (Çatlamış kesit kabulünde)
Parabolik	0,36	0,51
Kübik	0,38	0,54

## 5. BULGULAR (RESULTS)

Çalışmada incelenen minare önce kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiş, daha sonra ise prizmatik çubuk elemanlarla modellenmiştir. İki modelleme sonucu elde edilen sonuçların oldukça yakın olduğu görülmektedir. TBDY 2018'e göre tepe noktası deplasmanı kabuk elemanlarla modellemede 40 mm bulunurken çubuk elemanlarla modellemede 42 mm olarak elde edilmiştir. Taban kesme kuvvetleri karşılaştırıldığında ise kabuk elemanlarla modellemede 142,7 kN bulunurken, çubuk elemanlarla modellemede bu değer 151,6 kN olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar çubuk elemanlar kullanılarak yapılan modellemenin yapının dinamik analizinin belirlenmesinde ön bilgi verme amacıyla kullanılabilirliğini göstermektedir.

Çalışmada önerilen Rayleigh yöntemi ile ise minarenin hâkim periyodu doğruya yakın yaklaşıklıkla elde

edilmektedir. Bu tür yaklaşık yöntemlerin özellikle az bir parametre ile yapı davranışının anlaşılması açısından yararlı olduğu değerlendirilmiştir.

2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında 2018 deprem yönetmeliğinden elde edilen değerlerin daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Örneğin kabuk elemanla modelleme baz alınarak taban kesme kuvveti değerleri karşılaştırılırsa 2018 deprem yönetmeliğine göre elde edilen taban kesme kuvveti değerinin 2007 deprem yönetmeliğine göre elde edilen taban kesme kuvveti değerinin 1,64 katı olduğu görülmektedir. Tepe noktası deplasman sınırı olarak kabul edilen  $H/500$  oranı kabul edilirse toplam minare yüksekliği 25,88 m olduğundan sınır değer 52 mm olmaktadır. Çalışmada bulunan tepe noktası deplasmanı değerleri bu sınıram altında kalmaktadır.

Elde edilen çekme gerilmelerine bakıldığında, Çizelge 7'de sunulan çekme gerilmelerinin literatürde [9] minareler için çekme emniyet gerilmesi kabul edilen 0,4 MPa değerini aştığı görülmektedir.

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Sunulan çalışmada Kırklareli ilinde bulunan tarihi Hızırbey Camii minaresinin malzeme ve mekanik özellikleri yerinde yapılan ölçümlerle belirlenmiş ve bu veriler esas alınarak minarenin dinamik parametreleri SAP2000 yazılımı kullanılarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar çözümlemesinde iki farklı eleman türü kullanılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Minarenin dinamik analizi, spektral analiz yöntemi kullanılarak DBYBHY 2007 ve TBDY 2018'e göre yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda kabuk eleman kullanıldığı durum için tepe noktası deplasmanının, TBDY 2018'de DBYBHY (2007)'ye göre 2,86 kat fazla çıktığı görülmüştür. Ayrıca taban kesme kuvvetinin ise kabuk elemanla modelleme sonucunda TBDY 2018'de, DBYBHY 2007'ye göre 1,64 kat fazla elde edildiği belirlenmiştir. Yapılan analizlerden çubuk elemanla modelleme ile elde edilen sonuçların kabuk elemanla modelleme ile elde edilen sonuçlara çok yakın olduğu gözlenmiştir. Çalışma kapsamında temel periyodun Rayleigh yöntemi ile pratik bir şekilde bulunması için de bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşım ile elde edilen temel periyot değeri sonlu elemanlar ile analizle elde edilen temel periyoda çok yakın sonuç vermiştir. Sonuç itibarıyla, gerçekleştirilen bu çalışmada yapılan analizler doğrusal davranışı esas almaktadır. Minarenin olası bir büyük depremdaki davranışı için doğrusal olmayan analizlerin yapılması gerekmektedir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

KLÜBAP-110 numaralı "Kırklareli Hızırbey Camii'nin Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi" adlı proje çalışmamızı destekleyen Kırklareli Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkürlerimizi sunarız.



## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] El-Attar, A. G., Saleh, A. M., Zaghaw, A. H., "Conservation of a slender historical Mamluk-style minaret by passive control techniques", *Structural Control and Health Monitoring*, 12: 157–177, (2005).
- [2] Mortezaei, A., Kheyroddin, A., Ronagh, H.R., "Finite element analysis and seismic rehabilitation of a 1000-year-old heritage listed tall masonry mosque", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(5), 334–353, (2012).
- [3] Hejazi, M., Moayedian, S.M., Daei, M., "Structural Analysis of Persian Historical Brick Masonry Minarets", *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, 27(1), (2016).
- [4] Abdel-Motaal, M.A., "Effect of piles on the seismic response of mosques minarets", *Ain Shams Engineering Journal*, 5(1), 29–40, (2014).
- [5] Mirtaheri, M., Abbasi, A., Salari, N., "A seismic behavior and rehabilitation of the historic masonry minaret by experimental and numerical methods", *Asian Journal of Civil Engineering*, 18(5), 807–822, (2017).
- [6] Serhatoğlu, C., Livaoglu, R., Bağbancı, B., "Dynamic Identification of Monumental and Historical Minaret of the Sehadet", *6<sup>th</sup> International Operational Modal Analysis Conference*, Gijón - Spain, (2015).
- [7] Livaoglu, R., Baştürk, M. H., Doğangün, A., Serhatoğlu, C., "Effect of geometric properties on dynamic behavior of historic masonry minaret", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20: 2392–2402, (2016).
- [8] Hacıfendioğlu, K., Demir, G., Alpaslan, E., "Determination of Modal Parameters of Historical Masonry Minarets by using Operational Modal Analysis", *Proceedings of the World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'16)*, Prague, Czech Republic, (2016).
- [9] Ural, A., Celik, T., "Dynamic Analyses and Seismic Behavior of Masonry Minarets with single Balcony", *Aksaray University Journal of Science and Engineering*, 2(1), 13–27, (2018).
- [10] Hacıfendioğlu, K., Alpaslan, E., Demir, G., Dinç, B., Birinci, F., "Experimental modal investigation of scaled minaret embedded in different soil types", *Gradjevinar*, 70, (2018).
- [11] Erdil, B., Tapan, M., Akkaya, İ., Korkut, F., "Effects of structural parameters on seismic behaviour of historical masonry minaret", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62: 148–161, (2018).
- [12] Akan, A.E., Özen, Ö., "Bursa Yeşil Türbe'nin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Deprem Analizi", *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, 758–762, (2005).
- [13] Ertek, E., Fahjan, Y., "Osmanlı Minareleri Yapısal Sistemleri: Sınıflandırma, Modelleme ve Analizi", *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 16-20 Ekim, İstanbul, 49–60, (2007).
- [14] Beyen, K., "17 Ağustos 1999 Kocaeli Depreminde Hasar Alan Fatih Camii'nin Dinamik Karakteristiklerinin Tanımlanması", *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 16-20 Ekim, İstanbul, 49–60, (2007).
- [15] Dogangun, A., Acar, R., Sezen, H., Livaoglu, R., "Investigation of dynamic response of masonry minaret structures", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6:505–517, (2008).
- [16] Celep, Z., İncecik, M., Pakdamar, F., "Structural and earthquake response analysis of the Muradiye Mosque", *International Conference of Cuma Mosque Plovdiv*, Plovdiv, 7 June, (2008).
- [17] Turk, A.M., Cosgun, C., "Seismic Behaviour and Retrofit of Historic Masonry Minaret", *Gradevinar*, 64, 39–45, (2012).
- [18] Sezen, H., Dogangun, A., "Seismic Performance of Historical and Monumental Structures", *Earthquake Engineering*: 181–202, (2012).
- [19] Dogangun, A., Sezen, H., "Seismic vulnerability and preservation of historical masonry monumental structures", *Earthquake and Structures*, 3(1): 83–95, (2012).
- [20] Turk, A.M., "Seismic response analysis of masonry minaret and possible strengthening by fiber reinforced cementitious matrix (FRCM) materials", *Advances in Materials Science and Engineering*, (2013).
- [21] Kırklareli Kültür Varlıkları Envanteri, Erişim: 18.10.2018  
<http://www.kirklarelienvanteri.gov.tr/anitlar.php?id=311>
- [22] Edirne Vakıflar Bölge Müdürlüğü, "Kırklareli Hızırbey Cami Rölöve-Restitüsyon-Restorasyon Raporu", (2007).
- [23] DBYBHY, "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik", Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, (2007).
- [24] Limak Batı Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş., "200901721 Ruhsat Nolu Kalker Ocağı Proje Tanıtım Dosyası", (2013).
- [25] Koca, M.Y., Arslan, A.T., Tarhan, F., "Zigana Tüneli–Gürgenagaç (Trabzon) Arasında Yer Alan Kaya Birimlerinin Mühendislik Jeolojisi Açısından Değerlendirilmesi" *Dokuz Eylül Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(2): 57–73, (2005).
- [26] TS 11137, "Kireçtaşı (Kalker)-Yapı ve Kaplama Taşı olarak Kullanılan", TSE, Ankara, (1993).
- [27] Teymen, A., Kılıç, A., Türkmenoğlu, Z.F., "Kalsiyum Karbonatlı Kayaçların Standart Özelliklerinin İncelenmesi", *Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi*, 259–270, (2011).
- [28] Arıoğlu, N., Arıoğlu, E., "Mimar Sinan'ın Seçtiği Taş: Küfeki ve Çekme Dayanımı", *14. Türkiye İnşaat Mühendisliği Teknik Kongresi*, İzmir, 1021–1034, (1997).
- [29] Kocaman, İ., Okuyucu, D., Kazaz, İ., "Tarihi Yığma Yapıların Dinamik Davranışlarının Hesabında Gerekli Malzeme Özelliklerinin Tayini : Lala Paşa Cami Örneği", *Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu*, 113–122, (2017).
- [30] Ural, A., "Tarihi Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Metoduyla Analizi", *Deprem Sempozyumu*, 408–413, (2005).
- [31] SAP2000, "Structural Software for Analysis and Design, Evaluation Version", *Computers and Structures*, (2018).
- [32] TBDY 2018, "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği", AFAD, (2018).
- [33] Dym, C. L., Williams, H. E., "Analytical Estimates of Structural Behavior", *CRC press Boca Raton*, (2012).