

YIĞMA VE BETONARME KUBBELİ TARİHİ CAMİLERİN DENEYSEL DİNAMİK DAVRANIŞLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

*The Comparison of Experimental Dynamic Behavior of Historical Mosques with
Masonry and Reinforced Concrete Domes*

İsmet Çalık | İnş. Yük. Müh., Vakıflar Trabzon Bölge Müdürlüğü
Prof. Dr. Alemdar Bayraktar | KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Yrd. Doç. Dr. Temel Türker | KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü,



Bu çalışmada, yığma taş duvarlar üzerine oturtulmuş tuğla ve betonarme kubbeli iki tarihi cami dinamik karakteristikleri Çevresel Titreşim Testi yöntemiyle belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. İnceleme amacıyla yığma taş duvarlar üzerine inşa edilen betonarme geçiş elemanı üzerine yığma tuğladan yapılmış kubbeye sahip Trabzon Merkez Hacı Kasım Muhittin Camisi ve yığma taş duvarlar üzerine tamamen betonarme olarak teşkil edilmiş kubbeye sahip Akçaabat Dürbinar Mahallesi Camisi seçilmiştir. Camilerin mevcut durumlarına ait dinamik yapısal davranışı, çevresel titreşim testi yöntemiyle sismik ivmeölçerler kullanılarak takip edilmiş ve toplanan sinyallerden camilerin doğal frekansları, modal sönüm oranları ve mod şekilleri belirlenmiştir. Camilerin dinamik ölçüm sonuçları karşılaştırılmış ve bu iki tip kubbenin camilerin dinamik davranışlarını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Betonarme kubbeli Dürbinar Camisinin yığma kubbeli Hacı Kasım Muhittin Camisine oranla doğal frekanslarının daha yüksek olduğu, mod şekillerinin ise benzeştiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çevresel Titreşim Testi, Dinamik Karakteristikler, Kubbeler, Camiler.

In this study, the dynamic characteristics of two historical masonry mosques with masonry brick dome and reinforced concrete dome are determined by Ambient Vibration Test and the results are compared with each other. Hacı Kasım Muhittin Mosque at Trabzon and Dürbinar Mosque at Akçaabat are selected for investigation. The dome of Hacı Kasım Muhittin Mosque has been constructed with masonry brick on its stone walls. The Dürbinar Mosque has a dome fully made of reinforced concrete. The dynamic behavior of these mosques taking into account their current situation are monitored by using seismic accelerometers and the dynamic characteristics, namely the natural frequencies, modal damping ratios and mode shapes, were determined by Ambient Vibration Test. The results of the dynamic test of these mosques are compared with each other and the effects of these domes on the seismic behaviors of two types of mosques are investigated. It is observed from the study that the natural frequencies of Dürbinar Mosque are bigger than the Hacı Kasım Muhittin Mosque and the mode shapes are analogous for the both mosques.

Keywords: Ambient Vibration Test, Dynamic characteristics, Domes, Mosques.

1. GENEL BİLGİLER

Tarihi yapıların statik ve dinamik davranışlarının belirlenmesi oldukça zordur. Birçoğu taşınmaz kültür varlıkları olan bu yapıların, gelecek nesillere aktarım sorumluluğu tüm insanlığın omuzlarındadır. Tarihi yapıların özellikle deprem gibi dinamik etkiler altındaki davranışlarının ve güvenilirliklerinin tespiti gereklidir. Yapıda oluşmuş ve oluşabilecek hasarların belirlenmesi ve gerekli koruyucu ya da onarıcı müdahalelerin yapılması, yapı sağlığının kontrol altında tutulması için önemlidir.

Tarihi eserlerin yapısal davranışlarının belirlenmesi ile ilgili birçok araştırmacı çeşitli yöntemlerle incelemeler yapmışlardır. Bu konuda yapılan çalışmalarda analitik ve deneysel yöntemler kullanılmaktadır. Akan (2010) tarafından Anadolu'daki tarihi ahşap sütunlu camilerin önemli örneklerinden biri olan Ankara Ahi Elvan Camisi'nin yapısal analizi yapılmıştır. Doğangün vd. (2011) tarafından İzmir Bergama Kızılavlu Bazilikasının ana girişinin sismik performansı analitik olarak incelenmiştir. Atamturktur vd. (2011) doğrusal olmayan sonlu eleman modelleri ile yığma tuğla kubbelerin sismik performans değerlendirmesi yapmışlardır. Can ve Ünay (2012) tarafından tarihi yapıların deprem davranışlarını belirlemek için sayısal yöntemlerle ilgili bir çalışma yapılmıştır. Cowan vd. (1977), Aoki vd. (2011), Chiorino vd. (2011), Milani vd. (2012), Rovero vd. (2012), Baretta (2013), Reyhan vd. (2013) ve Uğurlu Sağın vd. (2013) yaptıkları inceleme ve araştırmalarla tarihi yığma kubbeler hakkında sayısal çalışmalar yapmışlardır. Yapılan çoğu çalışmada, tarihi yapıların yapısal davranışlarının analitik olarak belirlenmesindeki zorluklardan bahsedilmektedir. Ayrıca, restorasyon uygulamalarının tasarlanması ve bu uygulamaların yapısal davranış etkilerinin değerlendirilmesindeki güçlükler ortaya konulmaktadır. Deneysel yöntemler kullanılarak Turek vd. (2002), Durukal vd. (2003), Gentile ve Saisi (2007), Beyen (2007), Bayraktar vd. (2011), ve Lourenço ve Ramos (2011) tarafından çalışmalar yapıl-

mıştır. Bu çalışmalarda incelenen yapıların dinamik karakteristikleri, deneysel yöntemlerle titreşim testleri yapılarak belirlenmekte ve yapısal davranışa ilişkin değerlendirmeler yapılmaktadır. Bayraktar vd. (2013) tarihi yığma cami üzerinde yaptığı çalışmalarında ahşap çatılı yığma caminin ilk frekansının 4Hz civarında olduğunu belirlemişlerdir. Wang vd. (2011) operasyonel modal analiz yöntemi ile kafes tipi kubbeler ile ilgili deneysel çalışma yapmışlardır. Atamturktur vd. (2012) deneysel ölçümlerle de doğrulamak suretiyle ölçeklendirilmiş bir kubbenin yük taşıma kapasitesini belirlemişlerdir. Palmisiano (2013) kargir kemer ve kubbele- rin davranışlarının basit modeller yardımı ile irdelenmesi üzerine çalışmıştır. Moeeni vd. (2013) tarihi yapılardaki kubbelerin güçlendirilmesi ile ilgili inceleme yapmışlardır. Çalık vd. (2013) tarihi yığma yapıların dinamik karakteristiklerine restorasyon etkisinin çevresel titreşim yöntemiyle belirlenmesi kapsamında Rize Merkez Büyük Gülbahar Camisinde deneysel çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada geleneksel çatı sistemine sahip camilerin ilk frekans değerinin 4Hz değerinin altında olduğu ve restorasyon etkisi altında frekans değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Çalık vd. (2014) hasarlı ve güçlendirilmiş tonozun dinamik karakteristiklerinin çevresel titreşim yöntemi ile deneysel olarak belirlenmesi ve karşılaştırılması üzerine çalışmışlardır.

Bu çalışmada, biri yığma diğeri betonarme kubbeli iki tarihi yığma caminin deneysel dinamik karakteristikleri Çevresel Titreşim Testi yöntemiyle belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, bu yapılara sonradan ilave edilen farklı tipteki kubbelerin davranışa etkisi incelenmiş, gelecek dönemlerde camilerin yapısal sağlık izlemesi ve güvenliklerinin değerlendirilmesine esas teşkil edecek veriler elde edilmiştir. Farklı malzemedeki yapılmış kubbelerle sahip tarihi yığma camilerin dinamik davranışının deneysel olarak belirlenmesi ve karşılaştırılması bu çalışmanın özgün yönünü oluşturmaktadır.

2. HACI KASIM MUHİTTİN CAMİSİ

Hacı Kasım Muhittin Camii, Trabzon Merkez Cumhuriyet Mahallesi 200 ada 45 parselde yer almaktadır. Caminin kuzeyinde Yavuz Selim Bulvarı (Tanjant Yolu), güneyinde konut, doğusunda boş arsa ve batısında yol bulunmaktadır. Caminin batısında bulunan yolun karşısında eski eser tescilli Fatih Hamamı olup, bulunduğu konum itibari ile Trabzon kentinin önemli arterlerinden birinde yer almaktadır. (Caminin bulunduğu bölgenin uydu görüntüsü Şekil 1’de verilmiştir).

Eser, Mazbut Hacı Kasım Muhittin Camii Vakfına ait olup, idaresi ve temsili Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından yürütülmektedir. Cami ilk olarak Yavuz Sultan Selim’in defterdarı Hacı Kasım tarafından H. 938 (M. 1531) yılında ahşap bir mescit olarak yaptırılmıştır (Eroğlu 2007). Ahşap mescidin yanması üzerine Hazine-darzade Osman Paşa tarafından cami bugünkü şekli ile yeniden inşa ettirilmiştir. Mihrap üzerindeki tek satırlık ayet kitabesine göre inşa tarihi R.11 Haziran 1236 (M. 23 Haziran 1821)’dir (Özen vd. 2009). Caminin orijinal çatısı kırma ahşap olup, daha sonraki dönemlerde kubbe eklenmek suretiyle günümüzdeki haline çevrilmiştir.

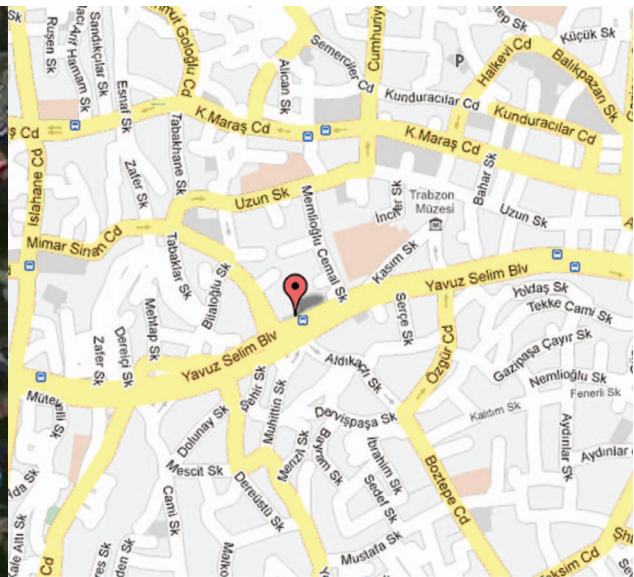
Yeniden inşası Sultan II. Mahmut’un padişahlığı döneminde yapılan eserin o döneme damgasını vuran barok, rokoko ve ampir üslubun izlerini taşıyan öğeleri bulunmaktadır. Eser Trabzon Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu envanterine 425 numara ile kayıtlıdır (Özen vd 2009). (Caminin çevresi ile birlikte görünüşü Fotoğraf 1’de verilmektedir).

Hacı Kasım Muhittin Camisi 2013 yılı içerisinde Trabzon Vakıflar Bölge Müdürlüğü tarafından restore edilmiştir. Yayın kapsamında yapıda restorasyon öncesi durum için deneysel çalışmalar yapıldığından restorasyon aşamaları ve sonraki haline ait bilgi ve fotoğraflar

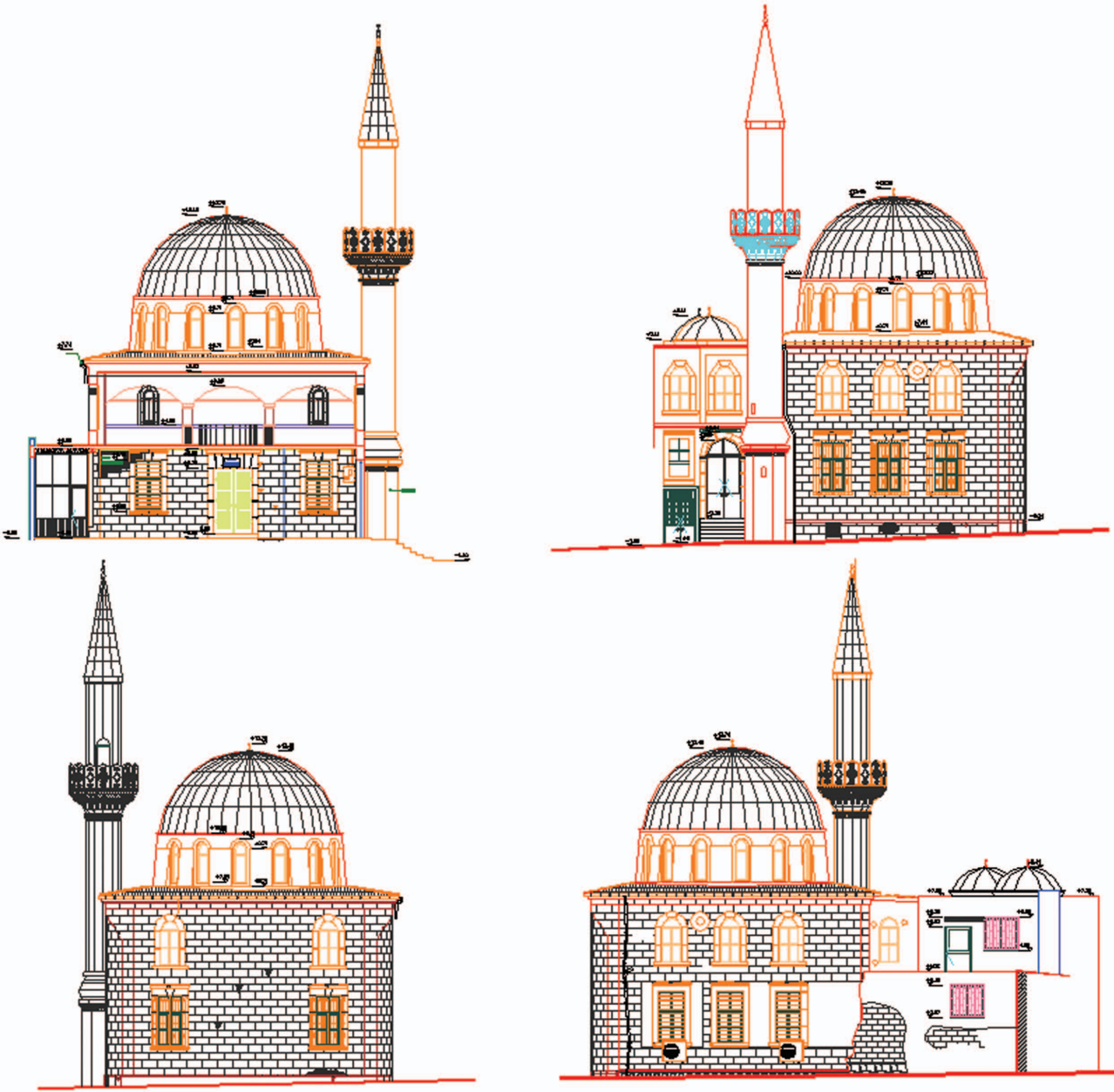
kullanılmamıştır. (Eserin rölöve projesinden farklı cephelere ait görüntüler ve kesitler Şekil 2’de sunulmuştur). Camii, ana ibadet mekanı dıştan dışa 12.25m x 11.81m boyutlarında ve ortalama 70cm yığma duvar kalınlığı olan bir yapıdır. Duvarların yaklaşık 25cm kalınlığında dış kısmı düzgün kesme taş, cami içine bakan kısmı yaklaşık 20 cm kalınlığında moloz taş ve bu iki kısmın ortasında kalan bölge ise moloz taş dolgu yöntemiyle yapılmıştır. Caminin güney, batı ve doğu cephe duvarları çatı seviyesine kadar örülü olup, kuzey cephesinde son cemaate geçişi sağlamak adına geniş boşluklar açılmıştır. Bunun yanında doğu ve batı cephelerde üstte ve altta üçer, güney cephede üstte ve altta ikişer ve kuzey cephede altta iki pencere ve bir adette kapı boşluğu bulunmaktadır. Eserin kasnak ve kubbe kısmının yükü bu duvarlara taşınmaktadır. Caminin kuzeybatı köşesinde yapıya bitişik olan doğal taştan yığma minaresi bulunmaktadır. Yapının tuğla yığma kubbesinin yarıçapı 3.90m olup, kubbe kalınlığı 18cm civarındadır. Kubbenin yerden yüksekliği 13.25m olup, kasnak kısmından itibaren yüksekliği ise 3.25m’dir.



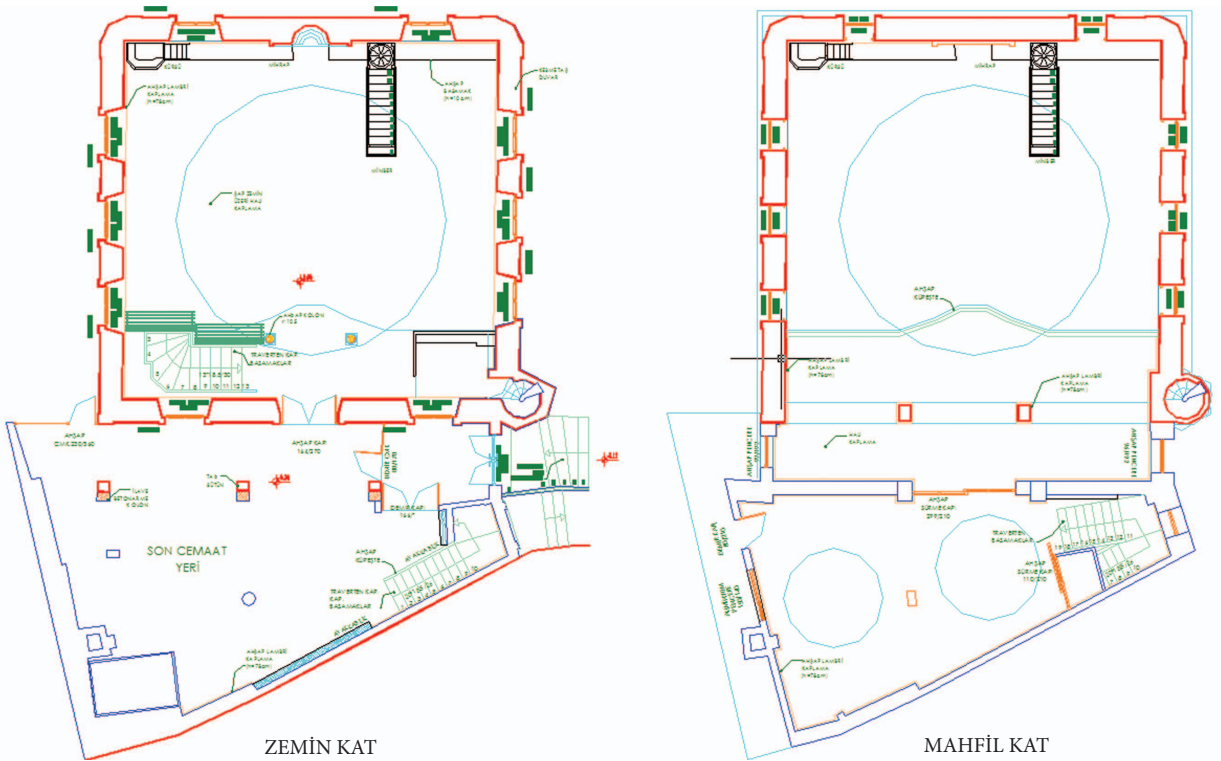
Fotoğraf 1. Hacı Kasım Camii ve çevresi



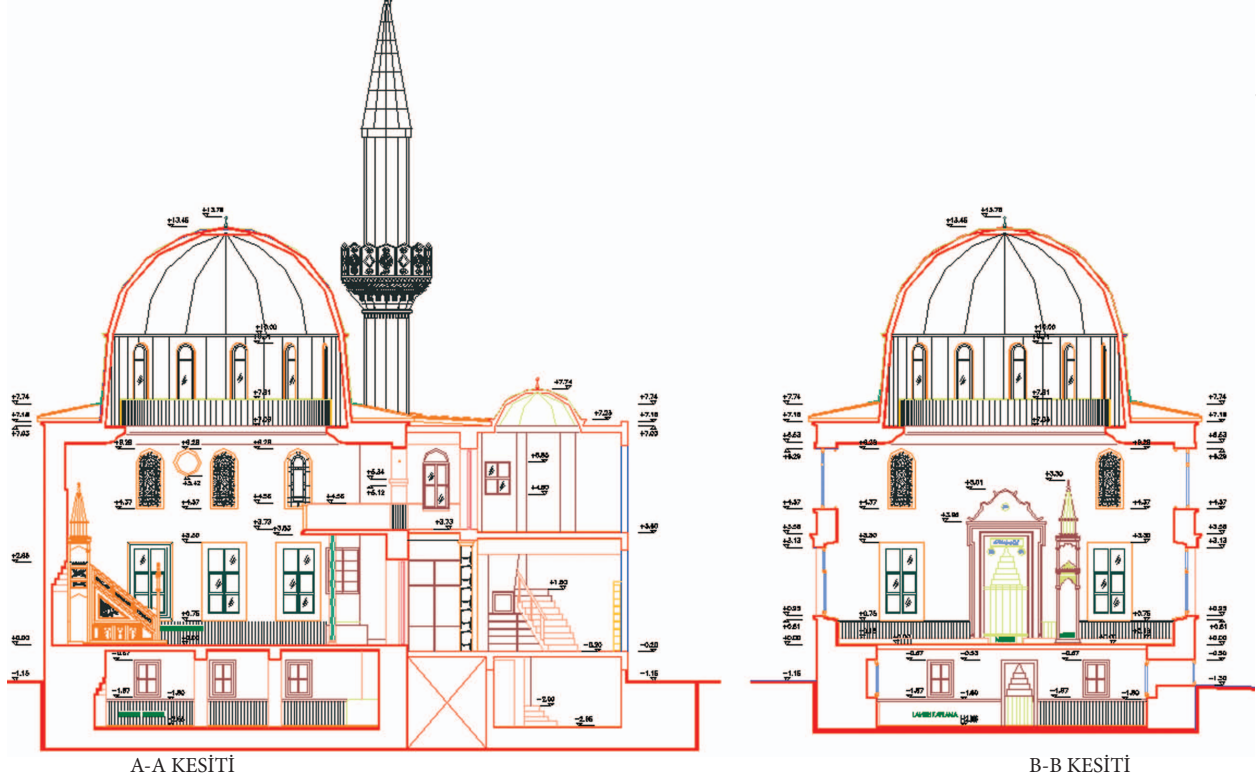
Şekil 1. Hacı Kasım Muhittin Camii Yerleşim Haritası (Google Earth, 2014).



Şekil 2.a. Görünüşler (Hacı Kasım Muhittin Camii, Rölöve Projesi, 2008).



Şekil 2.b. Planlar (Hacı Kasım Muhittin Camii, Rölöve Projesi, 2008).



Şekil 2.c. Kesitler (Hacı Kasım Muhittin Camii, Rölöve Projesi, 2008).

3. AKÇAABAT DÜRBİNAR MAHALLESİ CAMİİ

Trabzon ili Akçaabat ilçesi Dürbinar mahallesinde tapununun 160 ada ve 14 parselinde kayıtlı mülkiyeti Vakıflar Genel Müdürlüğüne ait Dürbinar Mahallesi Camii, Kültür Varlıklarını Koruma Kurulu tarafından 26.04.1988 tarih ve 19 nolu karar ile taşınmaz kültür varlığı olarak tescillenmiştir. (Caminin bulunduğu bölgenin uydu görüntüsü Şekil 3'te, görünüşü de Fotoğraf 2'de verilmektedir).

Kim tarafından yaptırıldığı bilinmeyen ancak 19.yy da yaptırıldığı tahmin edilen cami harim, kadınlar mahfili ve son cemaat mahallinden oluşmaktadır. Caminin minaresi, kadınlar mahfili, son cemaat mekânı ve kubbesi 1970'li yıllarda betonarme olarak yapıya eklenmiştir. Caminin çimento sıvalı beden duvarları moloz ve kesme taştan yapılmıştır. Son cemaat mekânı kapalı olan caminin ana giriş kapısı taş söveli olup, her iki yanında taş söveli pencereler yer almaktadır. Caminin çatısı, kasnak kısmında 14 adet penceresi bulunan betonarme kubbe ile örtülmüştür. Caminin mihrap cephesinde altı adet, batı cephesinde altı adet penceresi bulunmakta olup, son cemaat mahallinin kemer araları cemekeş pencereler ile kapatılmıştır.

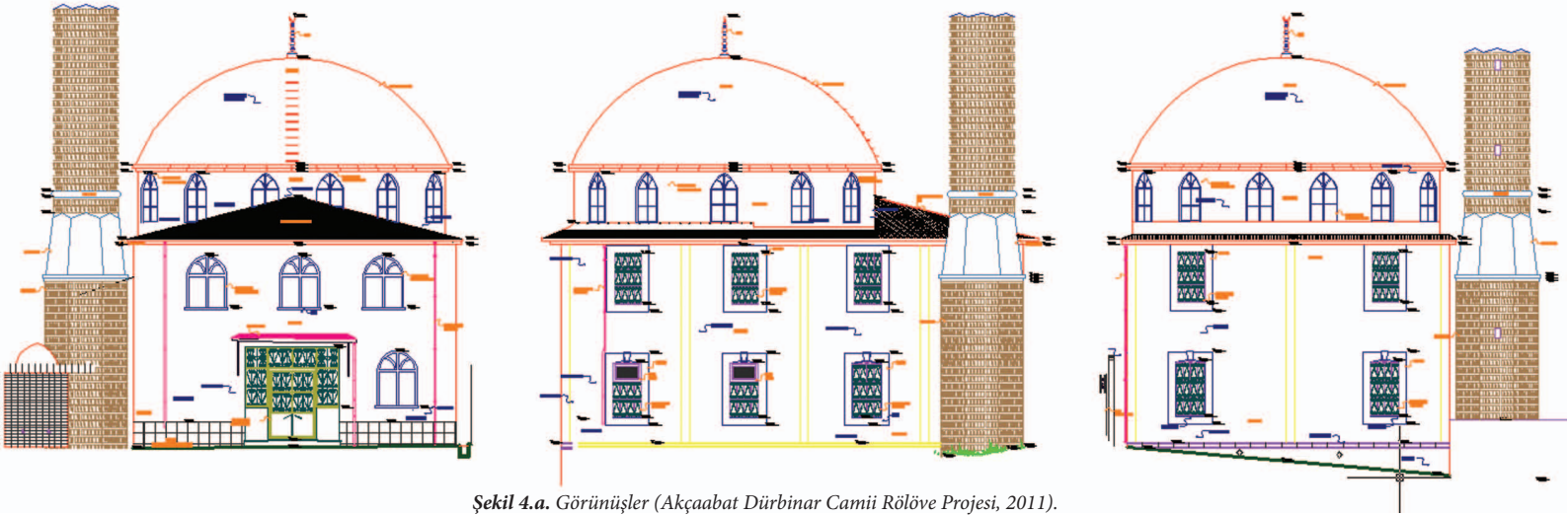
Akçaabat Dürbinar Mahallesi Camii Trabzon Vakıflar Bölge Müdürlüğü tarafından 2014 yılı içerisinde restore edilmiştir. Yayın kapsamında yapıda restorasyon öncesi durum için deneysel çalışmalar yapıldığından restorasyon aşamaları ve sonraki haline ait bilgi ve fotoğraflar kullanılmamıştır. Dürbinar Camii'nin rölöve projesi Şekil 6'da sunulmuştur. Camii, ana ibadet mekânı dıştan dışa 10.50m x 12.00m boyutlarında ve ortalama 70cm yığma duvar kalınlığı olan bir yapıdır. Güney ve batı duvarlarında, yaklaşık 25 cm kalınlığında dış kısmı düzgün kesme taş, cami içine bakan kısmı yaklaşık 20 cm kalınlığında moloz taş ve bu iki kısmın ortasında kalan bölge ise moloz taş dolgu yöntemiyle yapılmıştır. Kuzey ve doğu duvarları ise tamamen moloz taş ve dolgu yöntemiyle inşaa edilmiştir. Caminin güney, batı ve doğu cephe duvarları çatı seviyesine, kuzey cephesi kapı üst seviyesine kadar örülmüştür. Yapının betonarme kubbesinin yarıçapı 4.34m olup, kubbe kalınlığı 34cm'dir. Kubbenin yerden yüksekliği 11.34m olup, kasnak kısmından itibaren yüksekliği ise 3.06m'dir.



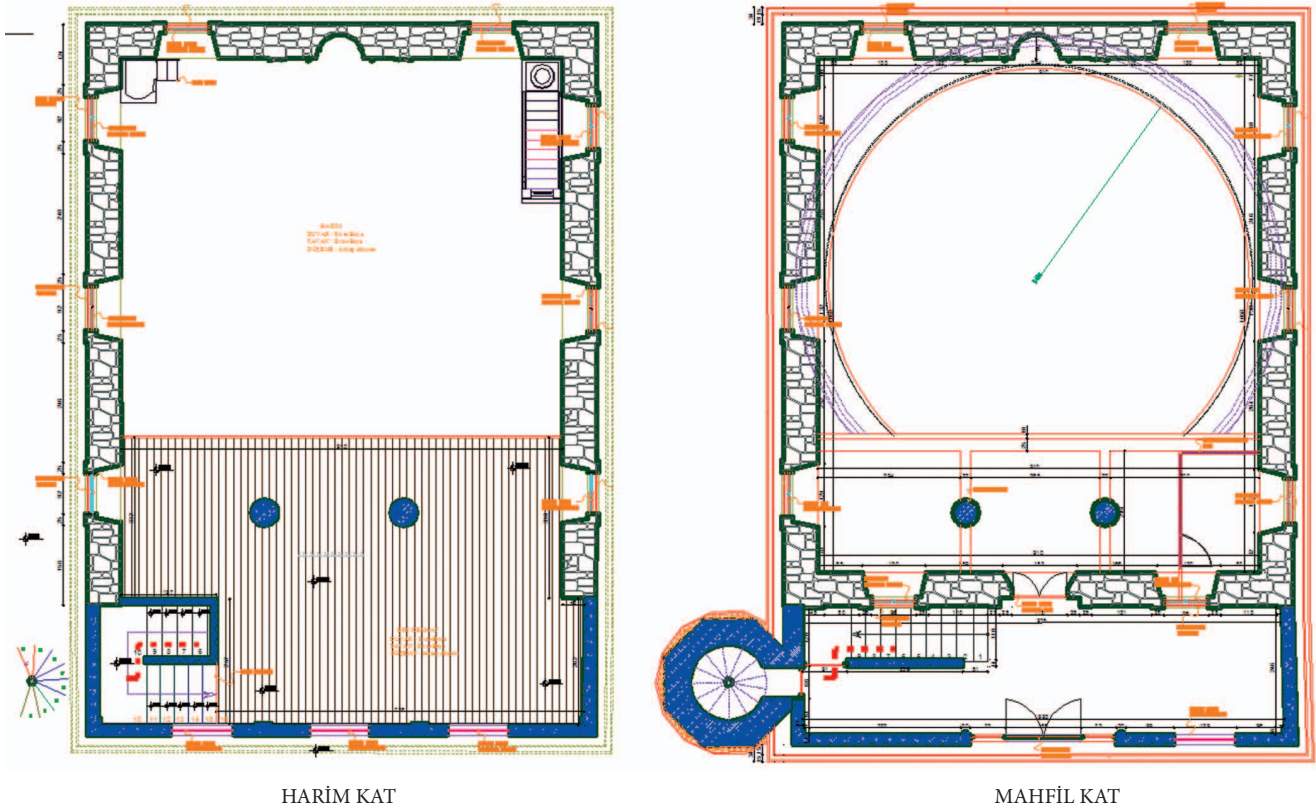
Şekil 3. Akçaabat Dürbinar Camii yerleşim haritası ve uydu görüntüsü (Google Earth, 2014).



Fotoğraf 2. Akçaabat Dürbinar Camii görünüşü.



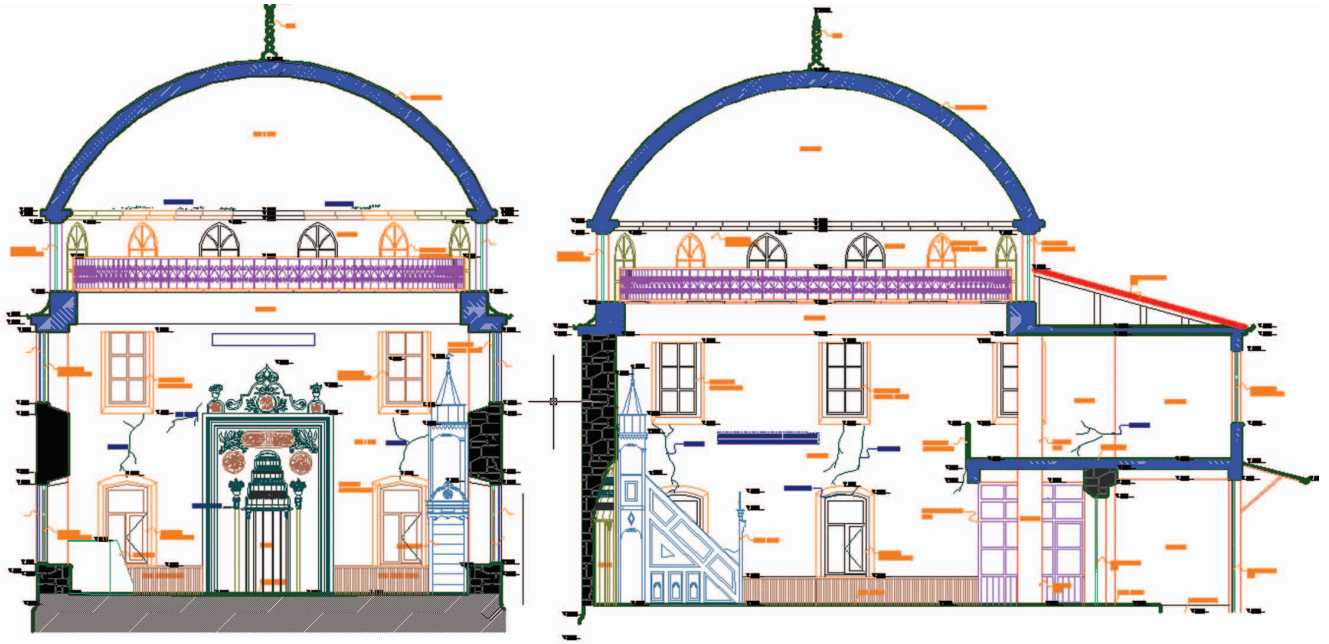
Şekil 4.a. Görünüşler (Akçaabat Dürbinar Camii Rölöve Projesi, 2011).



HARİM KAT

MAHFİL KAT

Şekil 4.b. Planlar (Akçaabat Dürbinar Camii Rölöve Projesi, 2011).



Şekil 4.c. Kesitler (Akçaabat Dürbinar Camii Rölöve Projesi, 2011).

4. ÇEVRESEL TİTREŞİM TESTLERİ

Çevresel Titreşim Testi yöntemi, mevcut yapıların dinamik davranışlarını yansıtan ve doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı olarak adlandırılan dinamik karakteristiklerinin deneysel ölçümler kullanılarak belirlenmesinde etkili yöntemdir. Bu yöntemle yapılan ölçümlerde yapıda herhangi bir hasar oluşturulmadığından, özellikle de tarihi yapılar için oldukça kullanışlı ve tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde, yapı taşıyıcı yükü, rüzgar veya yaya hareketi gibi çevresel etkilerle uyarılmakta ve yapının bu etkilere verdiği tepkiler ölçülmektedir.

Model	B&K8340
Hassasiyet	10V/g
Frekans Aralığı	0.1-1500Hz
Maksimum İvme	± 0.5g
Çalışma Sıcaklığı	-51 ile +74°C arası
Boyutlar	50.3*50.3*91.9mm
Toplam Kütle	775gr

Tablo 1. B&K8340 tipi tek eksenli ivmeölçerlere ait bazı teknik özellikler.



Fotoğraf 3. Ölçüm sistemi.

Ölçümlerde titreşim verilerini toplayabilmek amacıyla sismik ivmeölçerler, ivmeölçerlerden alınan sinyalleri ulaştırılan kablolar, bu sinyalleri biriktirmek amacıyla veri toplama ünitesi ve sinyalleri işlemek amacıyla sinyal işleme programları kullanılmıştır. İvmeölçerler olarak B&K8340 tipinde kablolu sismik ivmeölçerler, veri toplama ünitesi olarak 17 kanallı Brüel&Kjaer3560 veri toplama ünitesi kullanılmıştır. (Ölçüm sisteminde kullanılan ivmeölçerlerin teknik özellikleri Tablo 1'de; ölçüm sistemine ait fotoğraf, Fotoğraf 3'te sunulmaktadır). Toplanan veriler PULSE (2006) yazılımı aracılığıyla bilgisayara aktarılmış ve OMA (2006) yazılımıyla yapının dinamik karakteristikleri elde edilmiştir.

Deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi (GFTAA) kullanılmıştır. Bu yöntemde modlar, davranışın spektral yoğunluk fonksiyonundan hesaplanan tekil değer ayırıştırma grafiklerindeki piklerin seçilmesiyle elde edilir (Jacobsen vd., 2006).

GFTAA yönteminde etki ve tepki arasındaki bağıntı,

$$[G_{yy}(j\omega)] = [H(j\omega)] * [G_{xx}(j\omega)] [H(j\omega)]^T \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir (Brincker vd., 2000). Burada; $G_{xx}(j\omega)$ etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk (GSY) fonksiyonunu, $G_{yy}(j\omega)$ tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu ve $H(j\omega)$ frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. Bağıntı (1)'deki * ve T sırasıyla ifadelerin kompleks eşleniğini ve transpozisini göstermektedir. Denklem (1)'in çözümü literatürde detaylı bir şekilde bulunmaktadır (Brincker vd., 2000). Ölçüm sistemi ve yazılımlar ile alakalı detaylı bilgilere Türker (2011)'den ulaşılabilir.

4.1. Hacı Kasım Camii Çevresel Titreşim Testi Ölçümleri

Hacı Kasım Camii kubbesi ile birlikte iki aşamada üç kademeli olarak kablolu ivmeölçerler ile ölçülmüştür. İlk aşamada kubbenin tepesine düşey ekseninde bir adet, güney-kuzey-doğu ve batı istikametinde kubbe yüksekliğinin ortasına gelecek şekilde düşey ve yatay (x ve y eksen) yönde 8 adet ivmeölçer yerleştirilmiştir. Bu esnada bir adet referans ivmeölçer de cami beden duvarının kuzeybatı köşesine düşey ekseninde yerleştirilmiştir (Fotoğraf 4). Bu şekilde yerleştirilen ivmeölçerlerden 40 dakikalık ölçümler alınmış ve veriler değerlendirilmiştir.

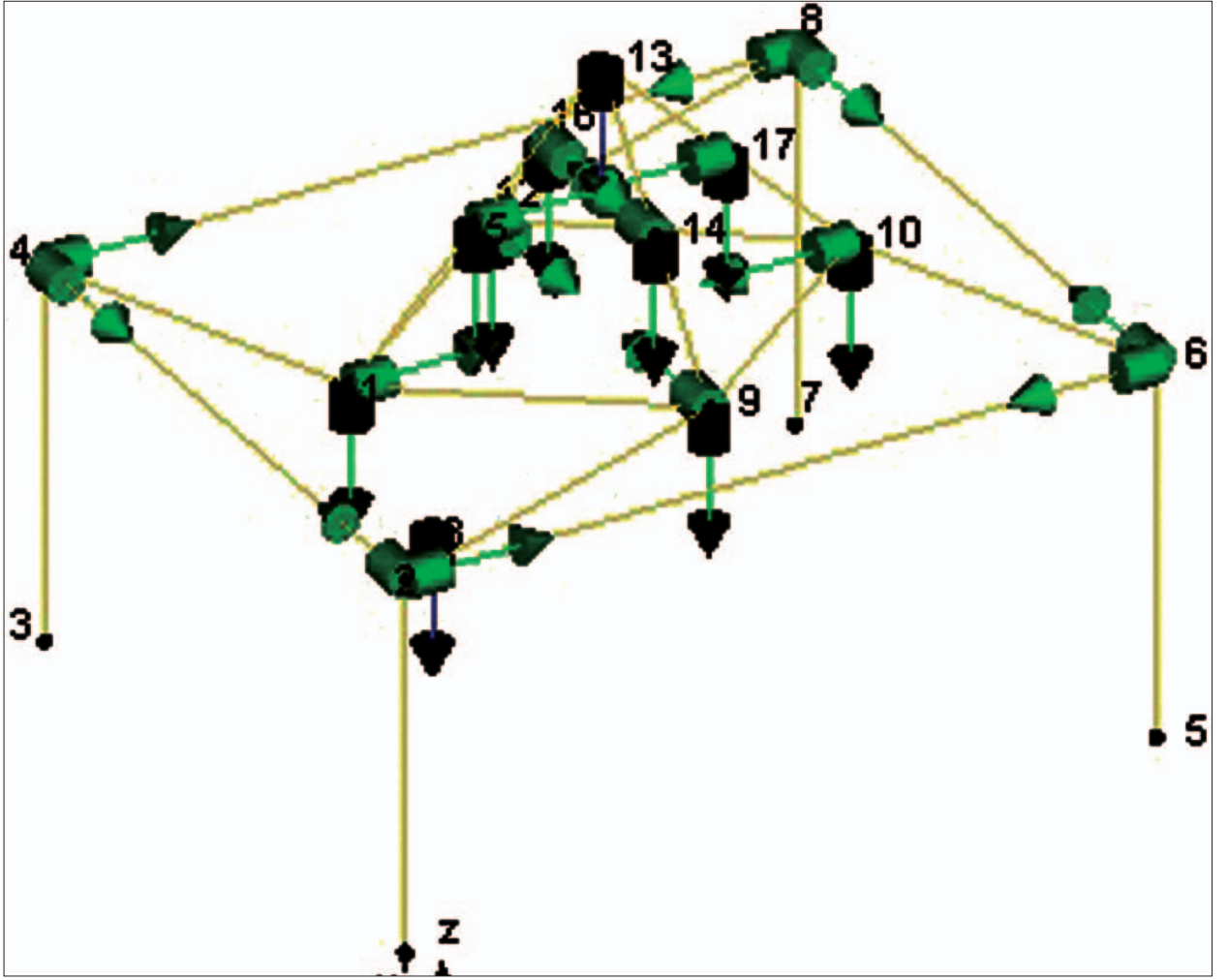
İkinci aşamada ise ilk aşamada yerleştirilen referans ivmeölçer ve tepe noktadaki ivmeölçer aynen bırakılmış; diğer sekiz ivmeölçer buldukları eksenlerde olacak şekilde kubbe ortalarından kasnak hizasına taşınmıştır (Fotoğraf 4). Bu şekilde ivmeölçer düzeni ile ölçüm 40 dakika süreyle tekrarlanmış ve veriler değerlendirilmiştir.

Cami beden duvarlarında yapılan ölçüm de ise cami köşelerinde kuzey-doğu-batı-güney kısımlarında yere paralel şekilde ivmeölçerler yerleştirilmiş ve ilk ölçümlerdeki referans ivmeölçer sabit alınarak beden duvarlarından 40 dakikalık ölçüm alınmıştır. (Tüm ivmeölçer yerleşimlerinin şematik gösterimi Şekil 5'de sunulmuştur).

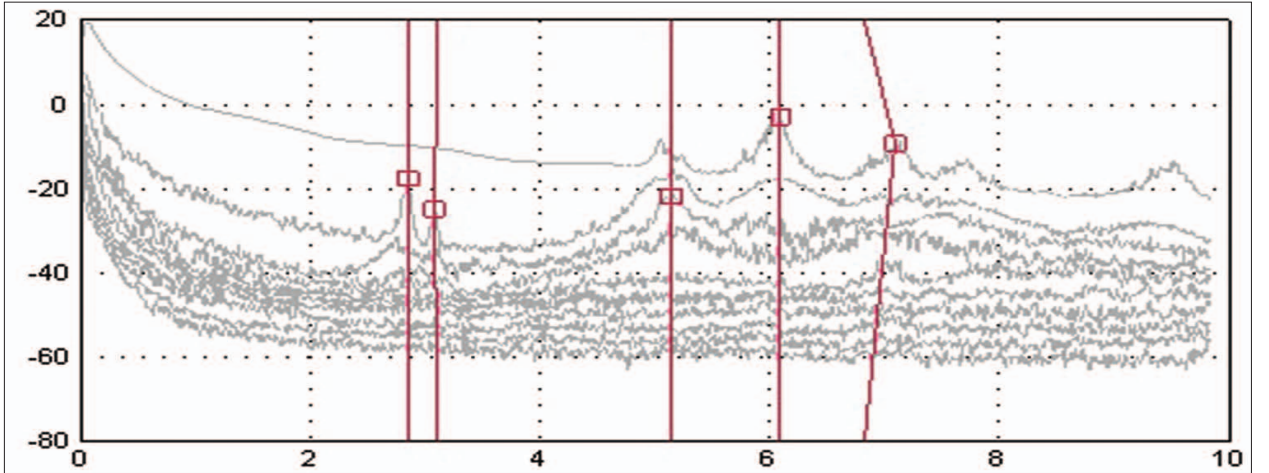
Analiz edilen sinyallerden Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) yöntemi kullanılarak yapının doğal titreşim frekansları, mod şekilleri ve modal sönüm oranları Şekil 6'da verilen spektrum yardımıyla elde edilmiştir. (Tablo 2'de caminin ilk beş doğal titreşim frekansı ve modal sönüm oranları verilmektedir. Camide yapılan ölçümünden elde edilen ilk beş mod şekli ise Şekil 7'de verilmektedir).



Fotoğraf 4. Hacı Kasım Muhittin Camii ölçüm işlemlerine ait görüntüler.



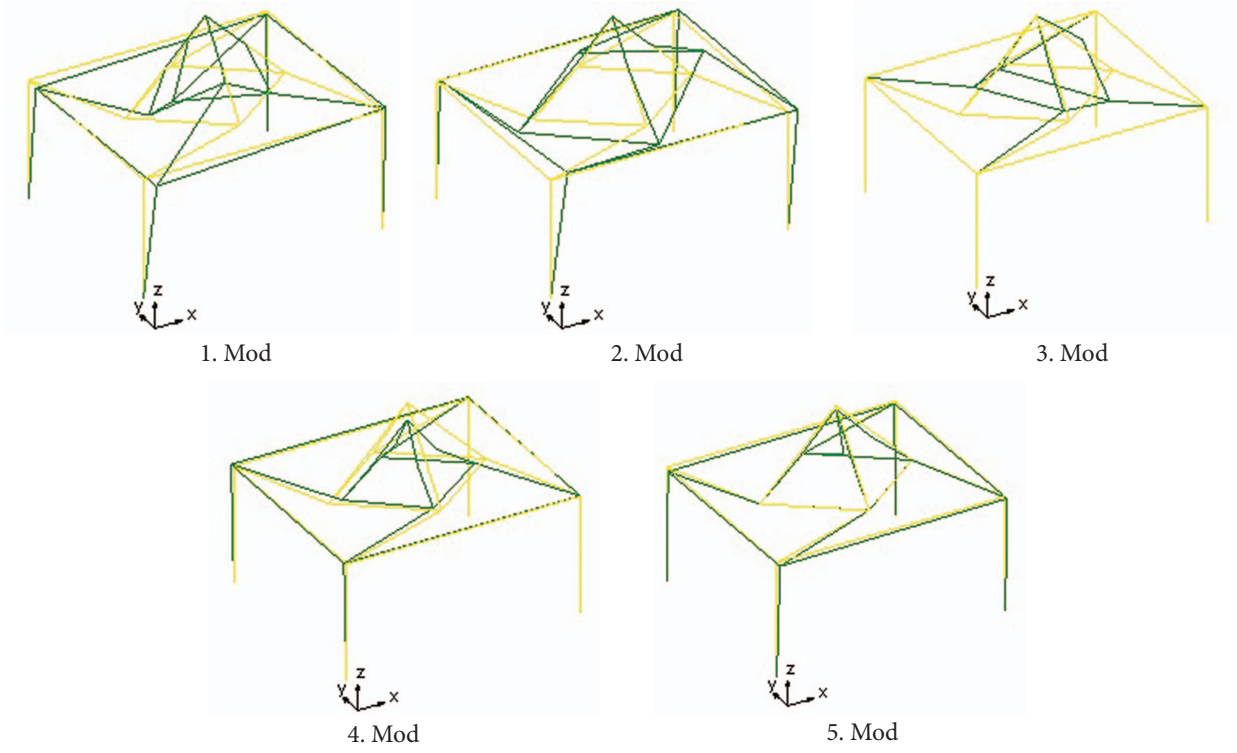
Şekil 5. Hacı Kasım Muhittin Camisine yerleştirilen ivmeölçerlerin yerleşim planları.



Şekil 6. Hacı Kasım Muhittin Camisinde yapılan ölçümlerde piklerin seçilmesi yöntemiyle elde edilen tekil değerler.

Mod Numarası	GFTAA Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	2.850	0.615
2	3.112	0.735
3	5.157	0.282
4	6.084	1.113
5	6.827	0.530

Tablo 2. Hacı Kasım Muhittin Camisinde ölçülen ilk beş doğal frekans ve sönüm oranları.



Şekil 7. Hacı Kasım Muhittin Camisinin ilk beş deneysel mod şekli.

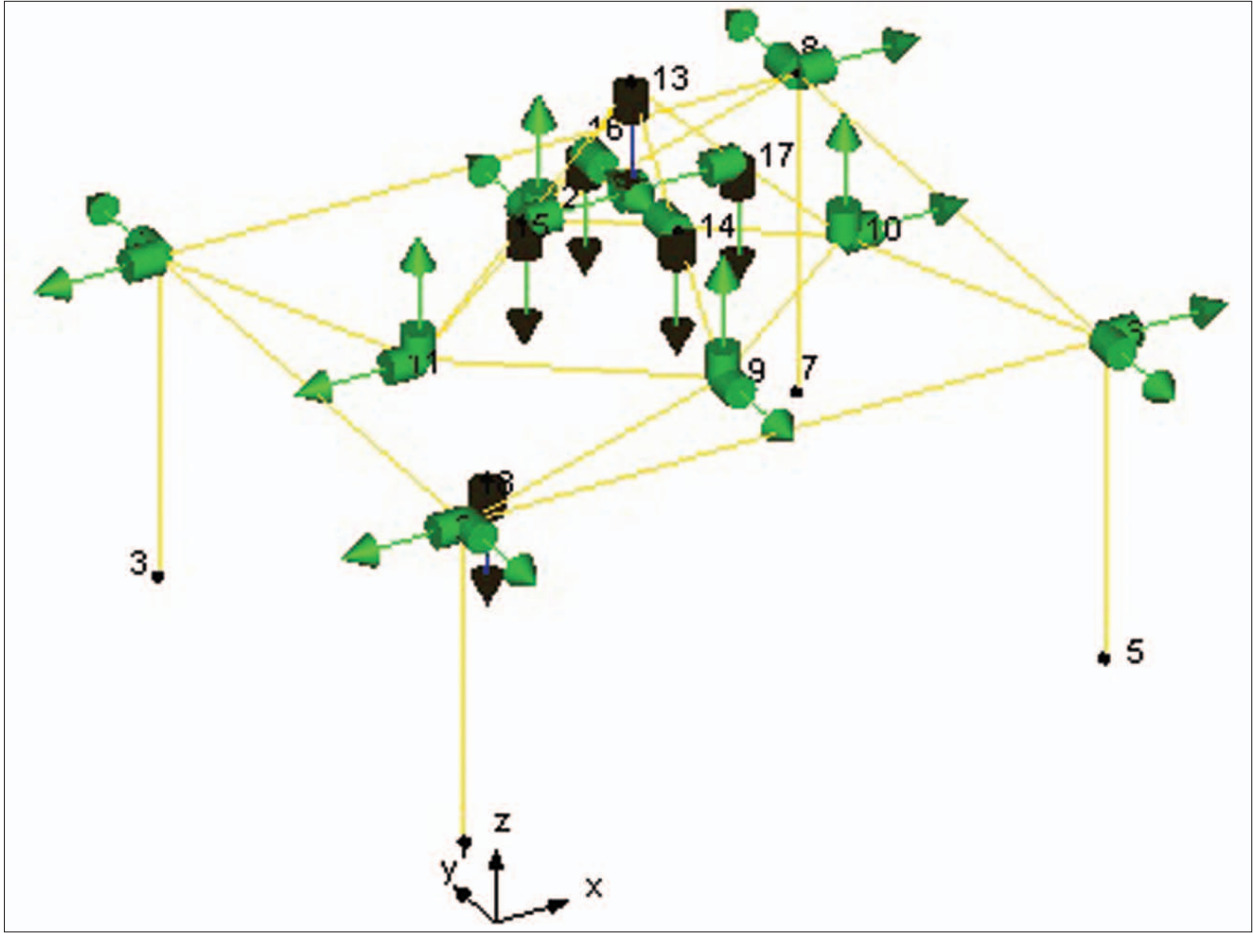


4.2. Akçaabat Dürbinar Mahallesi Camii Çevresel Titreşim Testi Ölçümleri

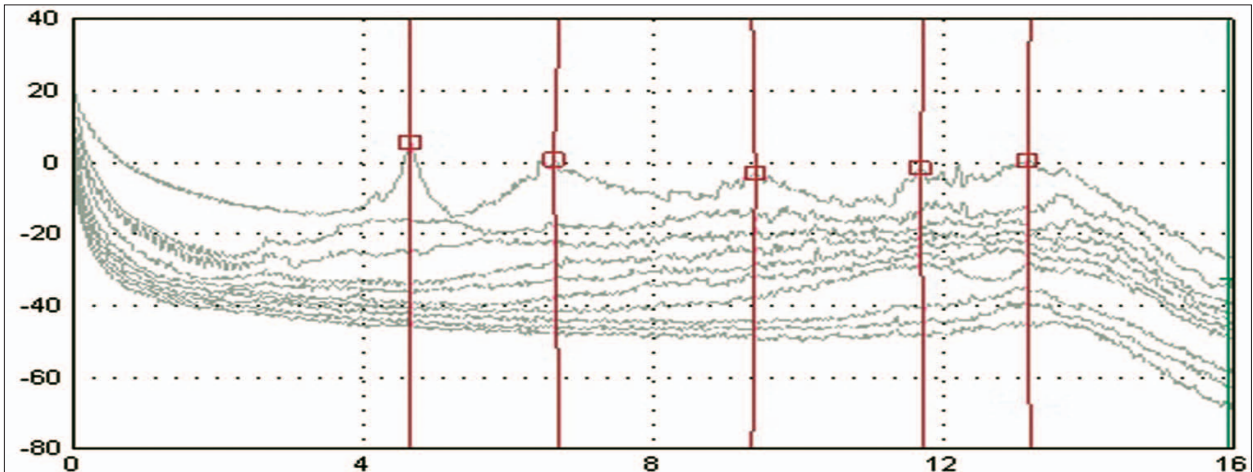
Dürbinar Camisi kubbesi ile birlikte iki aşamada üç kademeli olarak Hacı Kasım Muhittin Camiine benzer şekilde ölçülmüştür. İlk aşamada kubbenin tepesine düşey ekseninde bir adet, güney-kuzey-doğu ve batı istikametinde kubbe yüksekliğinin ortasına gelecek şekilde düşey ve yatay (x ve y eksenini) yönde 8 adet ivmeölçer yerleştirilmiştir. Bu esnada bir adet referans ivmeölçer de cami beden duvarının kuzeyine yatay ekseninde yerleştirilmiştir (Fotoğraf 5). Bu şekilde yerleştirilen ivmeölçerlerden 30 dakikalık ölçümler alınmış ve veriler değerlendirilmiştir.

İkinci aşamada ise ilk aşamada yerleştirilen referans ivmeölçer ve tepe noktadaki ivmeölçer aynen bırakılmış; diğer sekiz ivmeölçer buldukları eksenlerde olacak şekilde kubbe ortalarından kasnak hizasına taşınmıştır (Fotoğraf 5). Bu şekilde ölçüm 30 dakika süre ile tekrarlanmış ve veriler değerlendirilmiştir.

Cami beden duvarlarında yapılan ölçüm de ise cami köşelerinde kuzey-doğu-batı-güney kısımlarında yere paralel şekilde ivmeölçerler yerleştirilmiş ve ilk ölçümlerdeki referans ivmeölçer sabit alınarak beden duvarlarından 30 dakikalık ölçüm alınmıştır. (Tüm ivmeölçer yerleşimlerinin sematik gösterimi Şekil 8'de sunulmuştur).



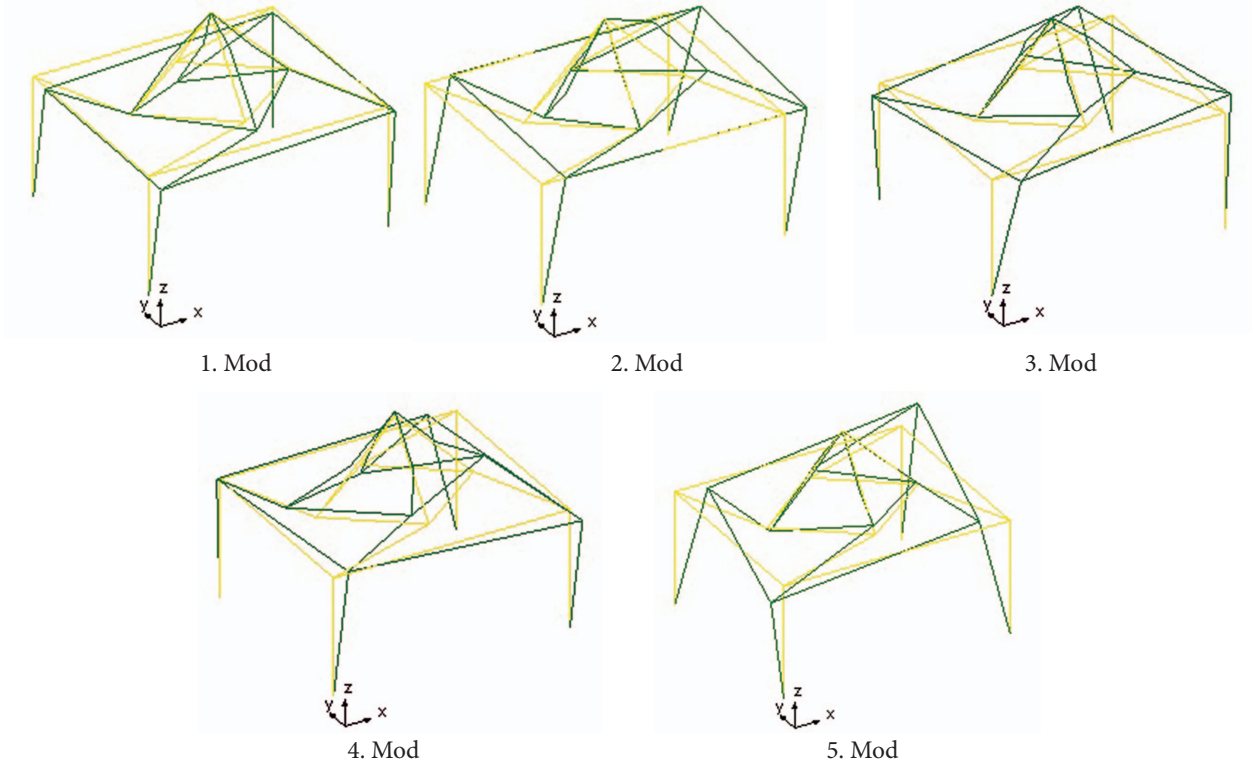
Şekil 8. Dürbinar Camisi beden duvarlarına ve kubbesine yerleştirilen ivmeölçerlerin yerleşim planları.



Şekil 9. Dürbinar Camisinde yapılan ölçümlerde piklerin seçilmesi yöntemiyle elde edilen tekil değerler.

Mod Numarası	GFTAA Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	4.663	1.250
2	6.718	6.056
3	9.378	1.721
4	11.740	0.135
5	13.210	1.909

Tablo 3. Dürbinar Camisinde ölçülen ilk beş doğal frekans ve sönüm oranı.



Şekil 10. Dürbinar Camisinin ilk beş deneysel mod şekli.

Analiz edilen sinyallerden Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemi kullanılarak yapının doğal titreşim frekansları, mod şekilleri ve modal sönüm oranları Şekil 9'da verilen spektrum yardımıyla elde edilmiştir. (Tablo 3'de caminin ilk beş doğal titreşim frekansı ve modal sönüm oranları verilmektedir. Camide yapılan ölçümünden elde edilen ilk beş mod şekli ise Şekil 10'da verilmektedir).

5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, yığma taş duvarlar üzerine yığma tuğladan yapılmış kubbeye sahip Trabzon Merkez Hacı Kasım Muhittin Camii ile yığma taş beden duvarları üzerine tamamen betonarme olarak teşkil edilmiş kubbeye sahip Akçaabat Dürbinar Mahallesi Camiinin dinamik karakteristikleri hasarsız deney yöntemlerinden Çevresel Titreşim Testi Yöntemi ile yapılan çalışmalar neticesinde belirlenmiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler aşağıda sıralanmaktadır:

•Hacı Kasım Camisinin ilk beş moduna ait doğal frekanslar 2.850 ile 6.827Hz, modal sönüm oranları ise % 0.282 ile 1.113 arasında değişmekte olduğu,

•Dürbinar Camisinin ilk beş moduna ait doğal frekanslar 4.663 ile 13.210Hz, modal sönüm oranları ise % 0.135 ile 6.056 arasında değişmekte olduğu,

•Betonarme kubbeli yapının doğal frekanslarının yığma tuğla kubbeli yapıya oranla daha yüksek olduğu,

•Eserlerin yapım teknikleri ve fiziksel özelliklerinin benzeşik olmasına rağmen, frekans değerleri arasında oluşan farkın betonarme kubbenin yığma tuğlaya nazaran yapıyı daha fazla oranda rijitleştirmesinden oluşmuş olabileceği,

•Yapıların doğal frekanslarındaki değişime benzer bir ilişki, sönüm oranları için tespit edilemediği belirlenmiştir.

İncelenen eserlerin restorasyon işlemlerinin sonuçlandırılmasının ardından ölçümlerin tekrarlanması ve yapılan restorasyonların esere yaptığı etkinin irdelenmesi uygun olacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 106M038 numaralı TÜBİTAK ve KTÜ BAP projeleri imkânları ile kurulan laboratuvar altyapısı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında verdikleri izinler ve destekler dolayısı ile Trabzon Vakıflar Bölge Müdürlüğüne ve değerli personeline teşekkür ederiz.

Trabzon Hacı Kasım Muhittin Camii Restorasyon İşinin Yüklenicisi Dr. Mimar Mukaddes Ataman'a ve Trabzon Akçaabat Dürbinar Mahallesi Camii Restorasyon İşinin Yüklenicisi Mimar Kemal Bektaş'a işbirliği ve katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Akan, A.E., 2010 Tarihi Ahşap Sütunlu Camilerin Sonlu Elemanlar Analizi ile Taşıyıcı Sistem Performansının Belirlenmesi, *SDU International Technologic Science*, 2, 1, 41-54.
- Aoki, T., Yuasa, N., Hamasaki, H., Nakano, Y., Takahashi, N., Tanigawa, Y., Komiyama, T., Ina, T. , Sabia, D. , Demarie, G.V., 2011 Safety assessment of the Sanctuary of Vicoforte, Italy, *International Journal of Materials and Structural Integrity*, Volume 5, Issue 2-3, 215-240.
- Atamturktur, S., Bornn, L., Hemez, F., 2011 Vibratioan characteristics of vaulted masonry monuments undergoing differential support settlement, *Engineering Structures* 33, 2472-2484.
- Atamturktur, S., Li, T., Ramage, M.H., Farajpour, I. , 2012 Load carrying capacity assessment of a scaled masonry dome: Simulations validated with non-destructive and destructive measurements, *Construction and Building Materials*, Volume 34, 418-429.
- Baratta, A., 2013 On the structural assessment of masonry vaults and domes, *International Journal of Mechanics*, Volume 7, Issue 3, Pages 201-209.
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., Sevim, B., 2011 Structural System Identification of Cultural Heritage Structures By Ambient Vibration Testing, *WCCE-ECCE-TCCE Joint Conference 2, Seismic Protection of Cultural Heritage*, Canference Proceedings, 163-173
- Bayraktar, A., Çalık, İ., Türker, T., 2013 Restorasyon Sonrası Tarihi Sundura Camisi ve Minaresinin Çevresel Titreşim Testi Yöntemiyle Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi, *Vakıf Restorasyon Yıllığı*, VGM İstanbul I. Bölge Yayını, 6, 53-62
- Beyen, K., 2007, 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depreminde Hasar Alan Fatih Camiinin Dinamik Karakteristiklerinin Tanımlanması, *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 16-20 Ekim 2007, İstanbul.
- Chiorino, M.A., Ceravolo, R. , 2011 Spadafor, A., Zanotti Fragonara, L., Abbiati, G. , Dynamic characterization of complex masonry structures: The sanctuary of vicoforte, *International Journal of Architectural Heritage*, Volume 5, Issue 3, 296-314.
- Cowan, H.J., 1977 A history of masonry and concrete domes in building construction, *Building and Environment*, 12 (1), pp. 1-24.
- Çalık, İ., Bayraktar, A., Türker, T., 2013 Tarihi Yığma Yapıların Dinamik Karakteristiklerine Restorasyon Etkisinin Çevresel Titreşim Yöntemiyle Belirlenmesi: Rize Merkez Büyük Gülbahar Camisi Örneği, *2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, 25-28. 09.2013, MKÜ Hatay, TDMSK085.
- Çalık, İ., Bayraktar, A., Türker, T., Karadeniz, H., 2014 Structural Dynamic Identification of a Damaged and Restored Masonry Vault using Ambient Vibrations, Measurment, (Accepted. MEAS-D-14-00368R1)
- Doğangün, A., Ural A., Meraki, Ş., 2011 Seismic Performance of the Main Entrance of Basilica (Kızılavlu) at Bergama (İzmir), *WCCE-ECCE-TCCE Joint Conference 2, Seismic Protection of Cultural Heritage*, Canference Proceedings, 333-344.

- Durukal, E., Cimilli, S., Erdik, M., 2003
Dynamic response of two historical monuments in İstanbul deduced from the recordings of Kocaeli and Duzce earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, 2, 694-712.
- Eroğlu, E., 2007
Hacı Kasım Camii Sanat Tarihi Raporu, Trabzon. Google Earth, 2014.
- Gentile, C., Saisi, A., 2007
Ambient Vibration Testing of Historic Masonry Towers for Structural Identification and Damage Assessment, *Construction and Building Materials*, 21, 1311-1321.
- Lourenço, P. B., Ramos, L., F., 2011
Dynamic Identification and Monitoring of Cultural Heritage Buildings, *WCCE-ECCE-TCCE Joint Conference 2, Seismic Protection of Cultural Heritage*, Keynote Papers, 55-78
- Milani, G., Tralli, A., 2012
A simple meso-macro model based on SQP for the non-linear analysis of masonry double curvature structures, *International Journal of Solids and Structures* 49, 808-834.
- Moeeni, M., Ghasem Sahab, M., 2013
Studying effect of expansive material in retrofitting of masonry domes in historical buildings, *World Applied Sciences Journal*, Volume 26, Issue 4, 548-552.
- OMA, 2006
Operational Modal Analysis, Release 4.0, Structural Vibration Solution A/S, Denmark.
- Özen, H., Tuluk, Ö.İ., Engin H.E., Düzenli, H.İ., Sümerkan, M.R., Tutkun, M., Demirkaya F.Ü., Keleş, S., 2009
Trabzon Kent İçi Kültür Varlıkları Envanteri, Trabzon, T. C. Trabzon Valiliği İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü Yayınları.
- Palmisano, F., 2013
Interpretation of the behaviour of masonry arches and domes by simple models, *WIT Transactions on the Built Environment*, Volume 131, 233-244.
- PULSE, 2006
Analyzers and Solutions, Release 11.2. Bruel and Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S, Denmark.
- Reyhan, K., Ipekoglu, B., Boke, H., 2013
Construction techniques of domes in some Ottoman baths, *Journal of Cultural Heritage* 14S, e35-e40.
- Rovero, L., Tonietti, U., 2012
Structural behaviour of earthen corbelled domes in the Aleppo's region, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Volume 45, Issue 1-2, 171-184.
- Rölöve Projesi, 2008
Trabzon Merkez Hacı Kasım Muhittin Camii, Vakıflar Bölge Müdürlüğü Arşivi, Trabzon, Türkiye.
- Rölöve Projesi, 2011
Trabzon Akçaabat Dürbinar Mahallesi Camii, Vakıflar Bölge Müdürlüğü Arşivi, Trabzon, Türkiye.
- Turek, M., Ventura, C.E., Placencia, P., 2002
Dynamic characteristic of a 17th century church in Quito, Internat Soc. Opt. Eng. 2002, *IMAC-XX, Conference & Exposition on Structural Dynamics*, 4753, 2, 1259-1264.
- Türker, T., 2011
Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti ve Değerlendirilmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Uğurlu Sağın, E., Böke, H., 2013
Characteristics of bricks used in the domes of some historic bath buildings, *Journal of Cultural Heritage* 14S, e73-e76.
- Wang, Z., Yan, W., Ye, L., 2011
Experimental study of the operational modal analysis of latticed domes, *Qinghua Daxue Xuebao/ Journal of Tsinghua University*, Volume 51, Issue 6, 755-759.