

YIĞMA TAŞ MİNARELERİN ANALİTİK VE DENEYSEL YÖNTEMLERLE GÜVENLİĞİNİN BELİRLENMESİ: TRABZON MUHİTTİN CAMİİ MİNARESİ ÖRNEĞİ

İsmet ÇALIK* Betül DEMİRTAŞ**
Alemdar BAYRAKTAR*** Temel TÜRKER****



Özet

Bu çalışma kapsamında taşınmaz kültür varlığı olarak tescilli Trabzon Merkez Hacı Kasım Muhittin Camiinin Taş Minaresinin yapısal güvenliğinin belirlenmesi ve restorasyonu amacıyla statik ve dinamik davranışları analitik ve deneysel yöntemlerle araştırılmıştır. Öncelikle minarenin malzeme özellikleri belirlenmiş ve başlangıç sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Operasyonel Modal Analiz yöntemi ile yapılan deneysel ölçümlere göre başlangıç sonlu eleman modeli iyileştirilmiştir. İyileştirilmiş model, kendi ağırlığı ve deprem etkisi, kendi ağırlığı ve rüzgâr etkisi ile kendi ağırlığı ve sıcaklık değişimleri durumlarına göre analiz edilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler neticesinde restorasyon aşaması için çeşitli öneriler geliştirilmiştir. Restorasyonun yapılmış olduğu kabul edilerek onarılmış halinin modeli, malzeme özellikleri revize edilerek yeniden analiz edilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler:

Hacı Kasım Camii, Taş Minare, Operasyonel Modal Analiz, Sonlu Eleman Analizi, Restorasyon

ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL METHODS USED IN INVESTIGATING THE STRUCTURAL SAFETY OF PILE STONE MINARETS: THE EXAMPLE OF THE MINARET OF MUHİTTİN MOSQUE IN TRABZON

Abstract

Analytical and experimental methods to determine the structural safety and restoration of the historical minaret of the Trabzon Hacı Kasım Muhittin Mosque is the subject of this work. Firstly, the material properties of the minaret are determined and the initial finite element model is constructed. Secondly, the initial finite element model is improved, based on Operational Modal Analyses. Thirdly, this updated finite element model of the minaret is analyzed with regard to its weight and the impact of earthquake, wind and temperature variants. The results obtained are used in the suggestions for the restoration of the building. Finally, there is an analysis of the proposed restoration to the material suggested.

Keywords:

Hacı Kasım Mosque, Stone Minaret, Operational Modal Analyses, Restoration

* İnş. Yük. Müh. Vakıflar Genel Müdürlüğü, Trabzon Bölge Müdürlüğü; ismetcalik@yahoo.com.tr
** İnş. Müh., Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü; betuldemirts@hotmail.com
*** Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü; alemdar@ktu.edu.tr
**** Yard. Doç. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü; temelturker@ktu.edu.tr

1. GİRİŞ

Tarihi yığma taş minareler gerek estetik gerekse simgesel anlamları ile taşınmaz kültür varlıkları içerisinde önemli bir yer tutmaktadırlar. Uzun ince fiziki yapıları ile narin yapılar olarak değerlendirilen minarelerin büyük bir kısmının bu özelliklerine rağmen yıllara meydana okuduğu söylenebilir.

Bu çalışma kapsamında taşınmaz kültür varlığı olarak tescilli Trabzon Merkez Hacı Kasım Muhittin Camiinin Taş Minaresinin statik ve dinamik davranışları analitik ve deneysel yöntemlerle araştırılmıştır. Minarenin malzeme özellikleri belirlenmiş, mevcut durumu SAP2000 bilgisayar programı ile modellenmiş, yapılan deneysel ölçümlere göre sonlu eleman modeli iyileştirilmiştir. İyileştirilmiş model, kendi ağırlığı ve deprem etkisi, kendi ağırlığı ve rüzgâr etkisi ile kendi ağırlığı ve sıcaklık değişimleri kriterlerine göre analiz edilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler neticesinde restorasyon aşaması için çeşitli öneriler geliştirilmiş ve öneriler doğrultusunda planlanan imalatların yaklaşık maliyeti tespit edilmiştir. Restore edildiği kabul edilen yapının modeli bu aşamada tekrar analiz edilmiş ve sonuçlar yorumlanmış, restorasyon önerileri geliştirilmiştir.

2. MİNARENİN TANITIMI

2.1. Eserin Konumu ve Tarihi

Taşınmaz kültür varlığı olarak tescilli Trabzon Merkez Hacı Kasım Muhittin Camii Trabzon Merkez Cumhuriyet Mahallesi 200 ada 45 parselde yer almaktadır. Eserin kuzeyinde Yavuz Selim Bulvarı (Tanjant Yolu), güneyinde konut, doğusunda boş arsa ve batısında yol bulunmaktadır. Eserin batısında bulunan yolun karşısında eski eser tescilli Fatih Hamamı olup, bulunduğu konum itibarı ile Trabzon kentinin önemli arterlerinden birinde yer almaktadır.

Eser Mazbut Hacı Kasım Muhittin Camii Vakfına ait olup İdaresi ve temsili Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından yürütülmektedir. Cami ilk olarak Yavuz Sultan Selimin defterdarı Hacı Kasım tarafından H. 938 (M. 1531) yılında ahşap bir mescit olarak yaptırılmıştır (Eroğlu 2007). Yerinde var olan ahşap mescidin yanması üzerine Hazinedarzade Osman Paşa tarafından 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).

Yeniden inşası Sultan II. Mahmut'un padişahlığı döneminde yapılan eserin o döneme damgasını vuran barok, rokoko ve ampir üslubun izlerini taşıyan öğeleri bulunmaktadır (Eroğlu 2007). Eser Trabzon Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu envanterine 425 numara ile kayıtlıdır (Özen vd. 2009). Caminin çevresi ile birlikte görünüşü Resim 1'de verilmektedir.



Resim 1. Hacı Kasım Muhittin Camii ve çevresi.

Hacı Kasım Muhittin Camii aynı dönemde yörede inşa edilen Trabzon Merkez Konak Camii ve Trabzon Merkez Hoca Halil Camii ile benzerlik göstermektedir. Hacı Kasım Muhittin Camii ve minaresi benzerlik gösterdiği bu eserlerden daha sadedir.

2.2. Caminin ve Minarenin Mimari Özellikleri

Kareye yakın planlı olan caminin beden duvarlarının dış kısmı düzgün kesme taştan iç kısımları ise moloz taştan yapılmıştır. Caminin güneybatı ve güneydoğu köşeleri daireseldir. Orijinal çatı örtüsünün yöresel örneklerine benzer şekilde ahşap olduğu tahmin edilen eserin şu andaki mevcut kubbesi betonarme olarak sonradan yapılmış olup kubbenin üzeri kurşun örtülüdür. Kubbe harici kalan çatı örtüsü ise kiremit kaplıdır. Ana mekânın kuzeyinde betonarme bir eklenti bulunmakta olup, bu eklenti altında cami müştemilatı yer almaktadır.

Caminin minaresi ise kuzeybatı cephesinde girişin sağında duvara bitişik olarak inşa edilmiştir. Minare, düzgün kesme taş malzemeden pabuç (kaide ve soğan), gövde, şerefe, petek ve külah ve âlem-den oluşmaktadır (Resim 2, Şekil 1 -bkz. *makale sonu ekler kısmı*-). Şerefe altı ve şerefe korkulukları işlemeli olup minareye estetik değer katmaktadır.

2.3. Minarenin Bulunduğu Alanın Özellikleri

Trabzon Merkez Hacı Kasım Muhittin Camiinin bulunduğu Trabzon Cumhuriyet Mahallesi, Trabzon ilinin tümü gibi IV. derece deprem bölgesinde bulunmaktadır (Deprem Bölgesi Haritası 1996). Her ne kadar IV. Deprem bölgesinde bulunsun da yapının çevre bölgelerde oluşabilecek şiddetli depremlerin etkisini hissetmesi beklenebilir. Bu sebeple deprem etkisi altındaki performansının irdelenmesi uygun görülmüştür.

Eserin bulunduğu alanda etkin olan hâkim rüzgâr yönü Meteoroloji Genel Müdürlüğü kayıtlarından alınmış olup SSW (güney güneydoğu); ortalama rüzgâr hızı 2.1 m/sn olarak belirlenmiştir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü İnternet Sitesi 2011). En yüksek ortalama sıcaklık Ağustos ayı ortalaması olan 23.4 °C; en düşük ortalama sıcaklık ise Ocak ayı için ölçülen 7.2 °C'dir. Toplam yıllık sıcaklık ortalaması ise 15.0 °C'dir (Trabzon Meteoroloji Bölge Müdürlüğü İnternet Sitesi 2011).



Resim 2. Hacı Kasım Camii batı cephesi ve minarenin görünüşü.

3. MİNARENİN MEVCUT DURUMU

Trabzon Merkez Hacı Kasım Camiinin iç mekânı bakımlı ve sağlıklı olmakla birlikte dış cephede kullanılan taş öğelerde ciddi hasarlar gözlenmektedir. Özellikle söveler ve kaplama elemanlarındaki taşlarda yer yer 8-10 cm derinliğe varan bozulmalar olmakla birlikte bir kısım taşların da tamamen özelliğini ve mukavemetini kaybettiği anlaşılmaktadır. Minarede görülen hasarlar taşlardaki bozulmalar olarak ortaya çıkmakta olup, herhangi bir çatlak ya da düşey ekseninde şakülünden kayma bulunmamaktadır. Minarenin kaidesinde bozulmalar bulunmakta olup, kaide ile soğan kısmının arasında geçiş elemanı olan ve taş silme olarak adlandırılan taşlar ise neredeyse tümüyle özelliğini kaybetmiştir. Kaidenin üzerinde yer alan soğan kısmında çok ciddi taş erimeleri ve tabaka atmaları gözlenmiştir. Minarenin gövde kısmında pek hasarlı eleman olmamakla beraber lokal olarak erimiş bazı taşlar bulunmaktadır. Şerefe altında ve şerefe korkuluklarında da pek görülmeyen taş erimeleri petek kısmında en yoğun şekilde karşımıza çıkmaktadır (Resim 3). Şerefe üzerindeki petek kısmının özellikle batı kısmı tümüyle özelliğini yitirmiştir.



Resim 3. Minarede şerefe üzeri bozuk taşlar.

4. CAMİNİN VE MİNARENİN GEÇİRDİĞİ ONARIMLAR

Trabzon Merkez Hacı Kasım Muhittin Camii doğal taş malzemeden yapılmış olup, geçmiş yıllarda betonarme çatı ve kubbe elemanları eklentileri ile günümüze kadar ulaşmıştır. Daha sonraki dönemlerde kuzey cephesine ve doğu cephesine de betonarme eklentiler yapılmıştır. 2000’li yılların başında yapının doğu kısmındaki eklenti kaldırılmış olup, kuzeyinde yer alan eklenti hali hazırda yapıya bitişik olarak bulunmaktadır. 2003–2004 yıllarında ise cami zemininde kazı yapılarak etrafı perde duvarlar ile örülmüş ve bir bodrum kat oluşturulmuştur.

Trabzon Merkez Hacı Kasım Muhittin Camiinin minaresi de cami beden duvarları ile aynı doğal taş malzemeden yapılmıştır. Yapılan araştırmalar ve yaşlı cami cemaatinden alınan bilgilere göre minareye herhangi müdahale olmamıştır.

5. MİNARENİN MALZEME ÖZELLİKLERİ

5.1. Taş Özellikleri

Minare ile benzer özellikte olan cami beden duvarlarından taş numuneleri alınmış ve numunelere laboratuvar da tek eksenli basınç deneyi, özgül ağırlık ve absorpsiyon deneyleri uygulanmış ve Tablo 1’deki veriler elde edilmiştir. Minarede kulla-

nılmış olan taşın yöreden temin edilmiş olan bir çeşit andezit olduğu düşünülmektedir.

Deney	Sonuçlar
Tek eksenli basınç deneyi	45.07 MPa (orta zayıf kaya-R3)
Kuru özgül ağırlık	2.25 g/cm ³
Doygun yüzey özgül ağırlık	2.30 g/cm ³
Zahiri özgül ağırlık	2.37 g/cm ³
Absorbsiyon	2.24 g/cm ³

Tablo 1: Taş Numunesi Deney Sonuçları

5.2. Zemin Özellikleri

Yapının oturduğu zeminin özelliklerinin belirlenmesi analitik modelin oluşturulmasında önemli bir kriterdir. Bu kapsamda öncelikli olarak yakın tarihte cami ana mekânının altında açılan bodrum katın kazısına şahit olan insanlardan bilgi edinilmiştir. Görgü tanıklarının verdiği bilgiler, yapının oturduğu zeminin toprak olduğu ve herhangi bir kaya kırımı yapılmadığı yönündedir. Eserin yaklaşık 30 metre kuzeyinde yer alan 202 ada 66 parselin zemin etüt raporuna ulaşılmış olup, görgü tanıklarının ifadesi ile örtüşür şekilde zemin deney sonuçlarının olduğu tespit edilmiştir (Ayar 2007). Raporda “İnceleme

alanında yüzeyde 0.50 m kalınlığında bitkisel toprak, altında kumlu düşük plastisiteli kil gözlenmiştir. Bu birim alttaki aglomera, volkanik breş ve tüflerin tamamen ayrışması sonucu oluşmuştur (Ayar 2007).” ifadesi bulunmakta ve zemin sınıfı CL olarak tanımlanmaktadır. Yukarıda belirtilen veriler ışığında inceleme yaptığımız Trabzon Merkez Hacı Kasım Camii ve Minaresi zemin sınıfı CL, zemin emniyet gerilmesi 1.5 kg/cm² olarak kabul edilmiştir. Belirlenen zemin sınıfına göre ilgili yönetmelik uyarınca yerel zemin sınıfı Z4 olarak belirlenmiştir (Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik 2007).

5.3. Harç Özellikleri

Harç özelliklerinin belirlenmesi malzeme özelliklerinin belirlenmesinin en zor ve maliyet ve süre isteyen kısmı olduğu için çalışma kapsamında harç analizi yaptırılmamıştır. Çalışma için literatürde daha önce bu konuda yapılmış çalışmalarda kullanılan harç örneklerinin verileri kullanılmıştır. Buna göre kireç harcının basınç dayanımı olarak 5.00 MPa, çekme dayanımı ise 0.50 MPa olarak kabul edilmiştir (Çizer vd. 2004).

5.4. Ahşap Özellikleri

Minare külâhının malzemesi ahşap olup, elastisite modülü olarak liflere dik yönde 12 GPa, liflere paralel yönde ise 0.7 GPa değerleri alınmıştır (İnşaat Mühendisliği El Kitabı 2000).

5.5. Elastisite Modüllerinin Hesabı

Minare taş ve harç malzemeden oluşmaktadır. Taş ve harç malzemenin elastisite modülü literatürde kullanılan aşağıdaki ifade ile hesaplanmıştır (Uniform Building Code Standards 2011).

$$E_p = 6500 * (f_b)^{0.6} \quad (1)$$

Burada,

E_p : Malzemenin elastisite modülünü (psi)

f_b : Malzemenin basınç dayanımını (psi)

göstermektedir.

Minarenin sonlu eleman modeli makro modelleme tekniği kullanılarak oluşturulmuştur. Makro modellemede harç ve taş birleşik model olarak dikkate alınmaktadır. Birleşik elemanlı malzemelerin elastisite modüllerinin hesaplanması literatürde aşağıdaki ifade ile yapılmaktadır (Bayraktar vd. 2010, Uniform Building Code Standards 2011).

$$E_d = \left(\frac{1 + (t)/(1 + (t)/(m))}{1 + (t)/(m)} \right) E_{taş} \quad (2)$$

Burada,

(t): Harç kalınlığı/Taş kalınlığı
(m): $E_{harç}/E_{taş}$
göstermektedir.

Yukarıda verilen formüller kullanılarak minare duvarlarının birleşik elastisite modülü $8.49 * 10^9$ N/m² olarak belirlenmiştir.

6. MİNARENİN ANALİTİK MODELİ

Minarenin sonlu eleman modeli, 19307 adet düğüm noktası ve 14217 adet 3 boyutlu 8 düğüm noktalı katı elemandan oluşmaktadır. Merdiven modele dahil edilmiştir. Başlangıç modelinde, sınır şartları olarak minarenin kaide kısmının alt bölgesindeki tüm serbestlikleri ile minarenin 8.30 m yüksekliğine kadar cami duvarıyla temas eden yüzeylerindeki serbestlikleri tutulmuştur. Minarenin SAP2000 sonlu eleman programı kullanılarak oluşturulan 3 boyutlu sonlu eleman modeli ve minarenin iç kısmını oluşturan taş sütun ve merdivenlere ait modeller Şekil 2’de (*bkz. makale sonu ekler kısmı*) gösterilmektedir (SAP2000 2009).

Sonlu eleman modelinde, Bölüm 5.5’te hesaplanan sağlam kısmın birleşik elastisite modülü, yapıda zayıf olan kısımlar için ise %25 azaltılmıştır. Ahşap olan külâh kısmının elastisite modülü $7 * 10^8$ N/m² olarak alınmıştır. Birim hacim ağırlıkları taş için 2.30 g/cm³, ahşap için 0.53 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Taş kısmın poisson oranı 0.2, ahşap kısmın poisson oranı ise 0.15 olarak alınmıştır. Minare modal analizi sonucu oluşan mod şekilleri Şekil 3’te (*bkz. makale sonu ekler kısmı*) sunulmaktadır.

7. MİNARENİN DENEYSEL ÖLÇÜMLERİ

Yapıların mevcut dinamik davranışlarını yansıtan ve doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı olarak adlandırılan dinamik özelliklerinin deneysel ölçüm metodlarına bağlı olarak belirlenmesinde Deneysel ve Operasyonel Modal Analiz yöntemleri olmak üzere başlıca iki yöntem kullanılmaktadır (Bayraktar vd. 2008). Bu yöntemlerden Deneysel Modal Analiz yönteminde yapı bilinen bir etki ile uyarılmakta ve yapının bu etkiye verdiği tepki ölçülmekte, Operasyonel Modal Analiz yönteminde ise yapı taşıt yükü, rüzgâr veya yaya hareketi gibi bilinmeyen çevresel etkiler ile uyarılmakta ve yapının bu etkilere verdiği tepki ölçülmektedir (Bayraktar vd. 2007).

Hacı Kasım Camii Minaresinin yapısal davranışının incelenmesi ve analitik modelin iyileştirilmesi amacı ile Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılmıştır. Ölçüm süreci iki aşamalı olarak yapılmıştır. İlk aşamada 6 adet ivmeölçer kullanılmış olup, ivmeölçerler minare taş merdiveninin çekirdek



kısına monte edilmiştir. İkinci aşamada ise minare duvarlarına monte edilen 1 adet sabit referans ve 8 adet hareketli ivmeölçerin yer değiştirilerek kullanılması yoluyla toplam 16 noktadan veriler toplanmıştır.

7.1. Minare Çekirdeğinde Yapılan Ölçüm

Minare çekirdeğinde güney ve batı yönlerine yerleştirilen 6 adet tek eksenli ivmeölçerler yardımı ile ölçümler yapılmıştır. İvmeölçerlerin yerleşim yerleri ve yönleri Şekil 4'te (bkz. *makale sonu ekler kısmı*) sunulmuştur. İvmeölçerler B&K 4507 tipinde olup kablolar yardımı ile 17 kanallı Brüel&Kjaer 3560 veri toplama ünitesine bağlanmış olup, veriler PULSE bilgisayar yazılımına aktarılmıştır (Resim 4).



Resim 4. Deneysel ölçüm düzeneği (Veri toplama ünitesi bilgisayar ve ivme ölçerler).

Piklerin Seçilmesi (PP) yöntemine ilişkin grafik Şekil 5'te (bkz. *makale sonu ekler kısmı*); zaman ortamında Stokastik Altalan Belirleme (SSI) yöntemine ilişkin grafik ise Şekil 6'da (bkz. *makale sonu ekler kısmı*) sunulmuştur.

Bu programda sinyallerin işlenmesinin ardından OMA yazılımı ile minarenin dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Dinamik karakterlerin belirlenmesinde frekans ortamında Piklerin Seçilmesi (PP) ve zaman ortamında Stokastik Altalan Belirleme (SSI) yöntemleri kullanılmıştır (OMA 2008, Bayraktar vd. 2009, Bayraktar vd. 2011).

Minare çekirdeğinde yapılan ölçümler neticesinde dinamik karakterlerin belirlenmesinde kullanılan

7.2. Minare Duvarlarında Yapılan Ölçüm

Minare beden duvarlarında güney, kuzey, doğu ve batı yönlerine yerleştirilen ve Şekil 7'de (bkz. *makale sonu ekler kısmı*) gösterilen biçimde 9 adet tek eksenli ivmeölçerler yardımı (16 ölçüm noktası) ile ölçümler yapılmıştır. İvmeölçerler yerleştirilirken, 1 adet referans ivmeölçer yerleştirilmiş olup 8 adet ivmeölçerin yer değiştirilmesi ile ölçüm yapılmıştır. Referans ivmeölçerin tanımlanması ile sinyaller bil

gisayar programı yardımı ile birleştirilmiştir. Minare çekirdeğinde yapılan ölçüm tekniği, bilgisayar programları ve analiz yöntemleri minare duvarlarındaki ölçüm için de aynı şekilde kullanılmıştır. Minare duvarlarına yerleştirilen ivmeölçerlerin yerleşim planları ve ölçümde kullanılan numaralandırma sistemi Şekil 7’de verilmiştir.

Minare duvarlarında yapılan ölçümler neticesinde dinamik karakterlerin belirlenmesinde kullanılan Piklerin Seçilmesi (PP) yöntemine ilişkin grafik Şekil 8’de (*bkz. makale sonu ekler kısmı*); zaman ortamında Stokastik Altalan Belirleme (SSI) yöntemine ilişkin grafik ise Şekil 9’da sunulmuştur.

7.3. Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Elde Edilen Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması

çalışmalarında elde edilen doğal frekanslar ile analitik modelimizde oluşan doğal frekansların farklılıklarını ortadan kaldırmak amacı ile modelimizin iyileştirilmesi yapılmıştır. Bu kapsamda minarenin cami ile bitişik olan 8.30 metre yüksekliğe kadar olan kısmına atanan sabit mesnetler yay olarak düzenlenmiştir. Yay katsayısı 6400 kN/m olarak seçilmiştir. Tablo 3’te deneysel ve analitik modellerin frekansları verilmektedir. Deneysel ve iyileştirilmiş model sonuçları arasındaki fark kabul edilebilir seviyeye çekilmiştir. Analizlerde iyileştirilmiş sonlu elaman modeli kullanılmıştır.

Minarenin deprem analizi yapılırken deprem etkisi, 2007-Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik esasları uyarınca belirlenmiştir.

Yapıya etki eden rüzgâr yükü TS 498 Yapı Eleman-

Tablo 2: Analitik ve Deneysel Verilerin Karşılaştırılması

Mod	Analitik	Minare çekirdeğinde yapılan ölçüm				Minare duvarlarında yapılan ölçüm			
		PP Yöntemi		SSI Yöntemi		PP Yöntemi		SSI Yöntemi	
	Frekanslar (Hz)	Frekanslar (Hz)	Sönüm Oranları	Frekanslar (Hz)	Sönüm Oranları	Frekanslar (Hz)	Sönüm Oranları	Frekanslar (Hz)	Sönüm Oranları
1	3.723	3.066	0.751	3.065	0.660	3.045	0.494	3.037	0.826
2	3.920	3.254	0.897	3.255	0.713	3.142	0.537	3.243	0.593
3	13.853	5.333	1.098	5.333	1.140	5.320	1.355	5.300	0.752
4	14.625	5.563	0.563	5.525	1.567	5.553	0.778	---	----
5	17.338	6.106	0.485	6.108	0.257	6.079	0.462	---	----
6	24.561	6.397	0.968	----	----	6.384	0.970	----	----

Analitik olarak elde edilen modların frekansları ve deneysel yöntemlerle yapılan çalışmalardan elde edilen modların frekanslarının karşılaştırılması Tablo 2’de gösterilmiş, analitik modelin iyileştirilmesi bu veriler ışığında yapılmıştır.

8. MİNARENİN ANALİTİK MODELİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ VE ANALİZİ

İyileştirmeye başlamadan önce deprem davranışında etkili mod sayısını belirlemek amacıyla iyileştirilmemiş analitik model üzerinde deprem analizleri yapılmış ve maksimum yer değiştirmeler karşılaştırılmıştır. Buna göre 2. modan sonraki mod katkıları yer değiştirmeleri önemli derecede etkilememektedir. Bu nedenle, iyileştirmede ilk iki mod esas alınmıştır.

Hacı Kasım Muhittin Camii Minaresinin deneysel

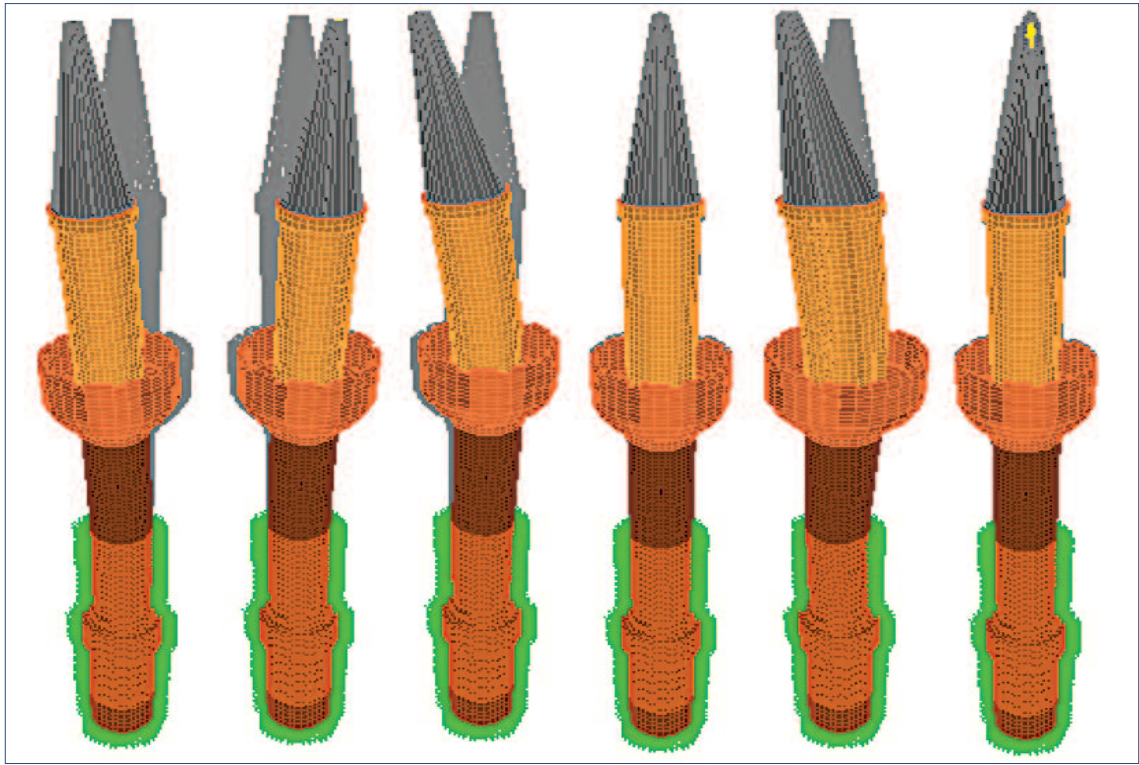
larının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri şartnamesinden belirlenmiş olup, Meteoroloji Genel Müdürlüğü verileri kullanılmıştır.

Minarenin sıcaklık etkisi altında analizlerinde de Meteoroloji Genel Müdürlüğü verileri kullanılmış, maksimum ortalama sıcaklık 23.4 0C, minimum sıcaklık 7.2 0C olarak alınmıştır. Taş için ısı genleşme katsayısı 1.90 sa/moC, ahşap için 0.17 sa/moC değeri kullanılmıştır. İyileştirilmiş sonlu eleman

Tablo 3: İyileştirilmemiş ve İyileştirilmiş Modelin Frekanslarının Karşılaştırılması

Mod Numarası	Frekanslar (Hz)			
	Deneysel	İyileştirilmemiş Model	İyileştirilmiş Model	Fark (%)
1	3.066	3.723	3.066	0
2	3.254	3.920	3.073	5.5

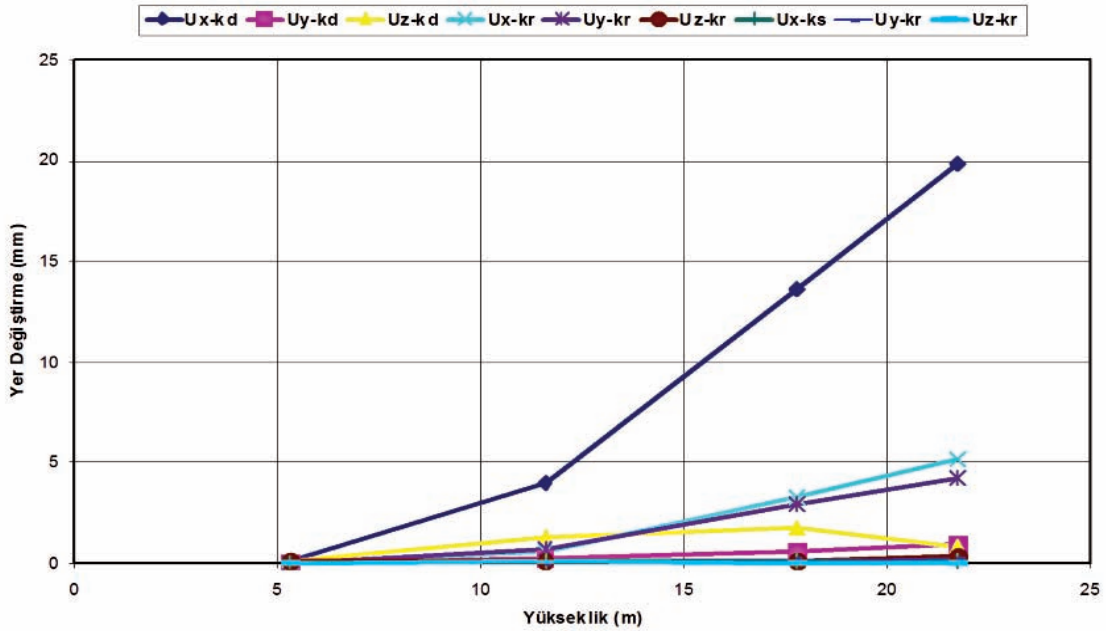
modeli kullanılarak minarenin elde edilen mod şekilleri Şekil 10'da gösterilmektedir.



1.Mod Şekli 2.Mod Şekli 3. Mod Şekli 4. Mod Şekli 5. Mod Şekli 6. Mod Şekli

Şekil 10. İyileştirilmiş modelin mod şekilleri.

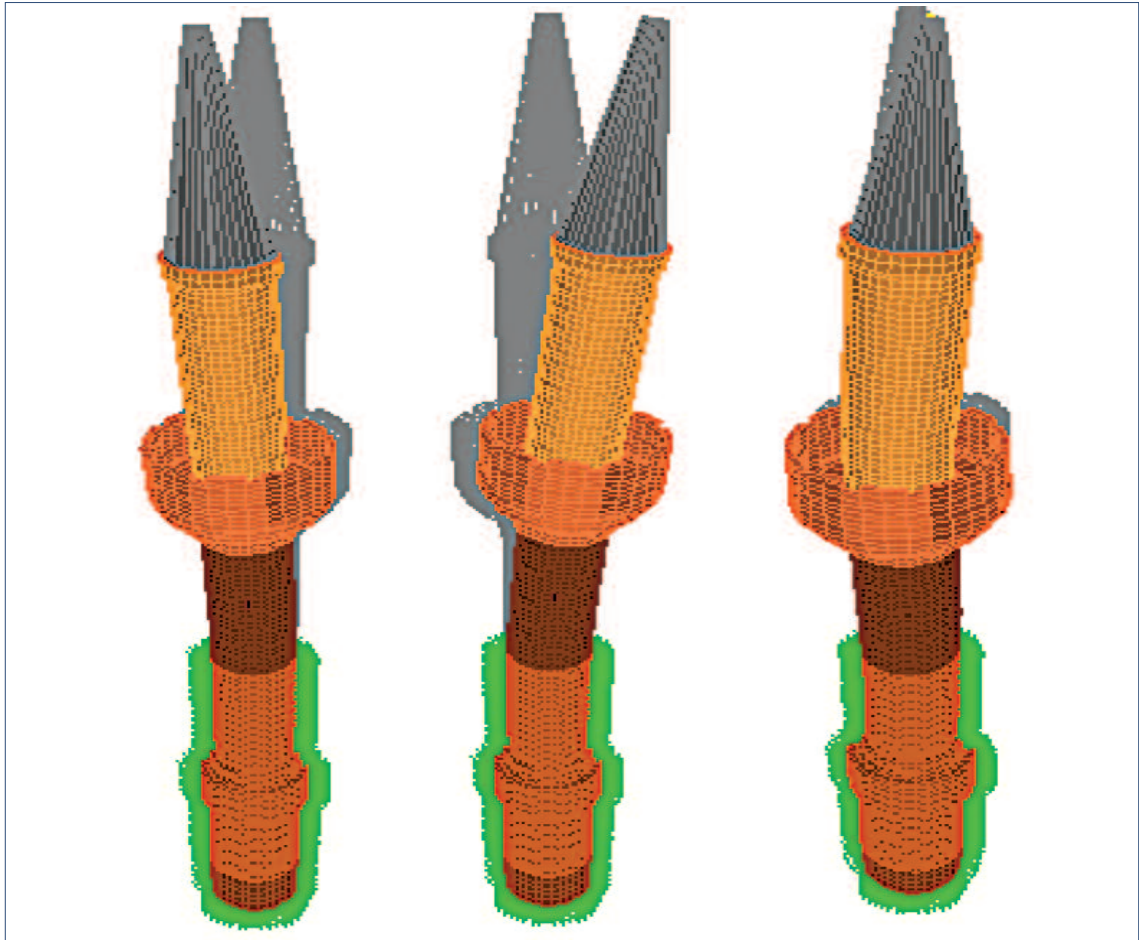
İyileştirilmiş sonlu eleman modeli kendi ağırlığı ve deprem etkisi, kendi ağırlığı ve rüzgâr etkisi ile kendi ağırlığı ve sıcaklık değişimleri durumlarına göre analiz edilmiştir. Çeşitli yükleme durumlarına göre yer değiştirmenin yüksekliği boyunca değişimi Şekil 11'de verilmektedir.



Şekil 11. Çeşitli yükleme durumlarına göre oluşan yer değiştirmeler.

Ux-kd: X doğrultusunda kendi ağırlığı ve deprem yükü etkisi altındaki yerdeğiştirme
Uy-kd: Y doğrultusunda kendi ağırlığı ve deprem yükü etkisi altındaki yerdeğiştirme
Uz-kd: Z doğrultusunda kendi ağırlığı ve deprem yükü etkisi altındaki yerdeğiştirme
Ux-kr: X doğrultusunda kendi ağırlığı ve rüzgar yükü etkisi altındaki yerdeğiştirme
Uy-kr: Y doğrultusunda kendi ağırlığı ve rüzgar yükü etkisi altındaki yerdeğiştirme
Uz-kr: Z doğrultusunda kendi ağırlığı ve rüzgâr yükü etkisi altındaki yerdeğiştirme
Ux-ks: X doğrultusunda kendi ağırlığı ve sıcaklık etkisi altındaki yerdeğiştirme
Uy-ks: Y doğrultusunda kendi ağırlığı ve sıcaklık etkisi altındaki yerdeğiştirme
Uz-ks: Z doğrultusunda kendi ağırlığı ve sıcaklık etkisi altındaki yer değiştirme

Şekil 12’de çeşitli yükleme biçimlerine göre yapıda oluşan yer değiştirme şekilleri sunulmuştur. Tüm yükleme çeşitlerine göre çeşitli kotlardaki yatay eksendeki yer değiştirme okumaları incelendiğinde, kendi ağırlığı ve deprem yükü altında yatay yer değiştirmelerin maksimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Kendi ve deprem etkisi altındaki yer değiştirme değerlerinin ardından yatay eksenlerdeki en büyük yer değiştirmeler kendi ve rüzgâr etkisi altında görülmektedir. En düşük değerler, kendi ağırlığı ve sıcaklık etkisi altındaki yatay yer değiştirmeler olarak tespit edilmiştir. Tüm yer değiştirmeler beklenildiği üzere yükseklilik boyunca artış göstermektedir.

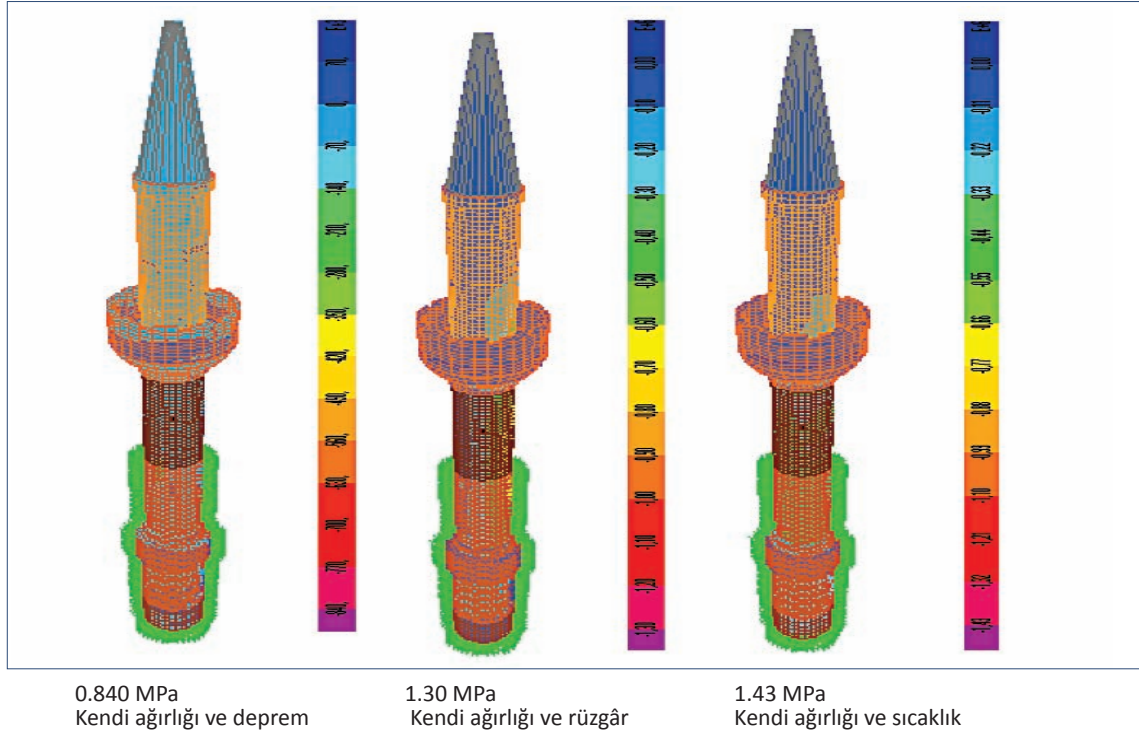


Kendi ağırlığı ve deprem Kendi ağırlığı ve rüzgâr Kendi ağırlığı ve sıcaklık

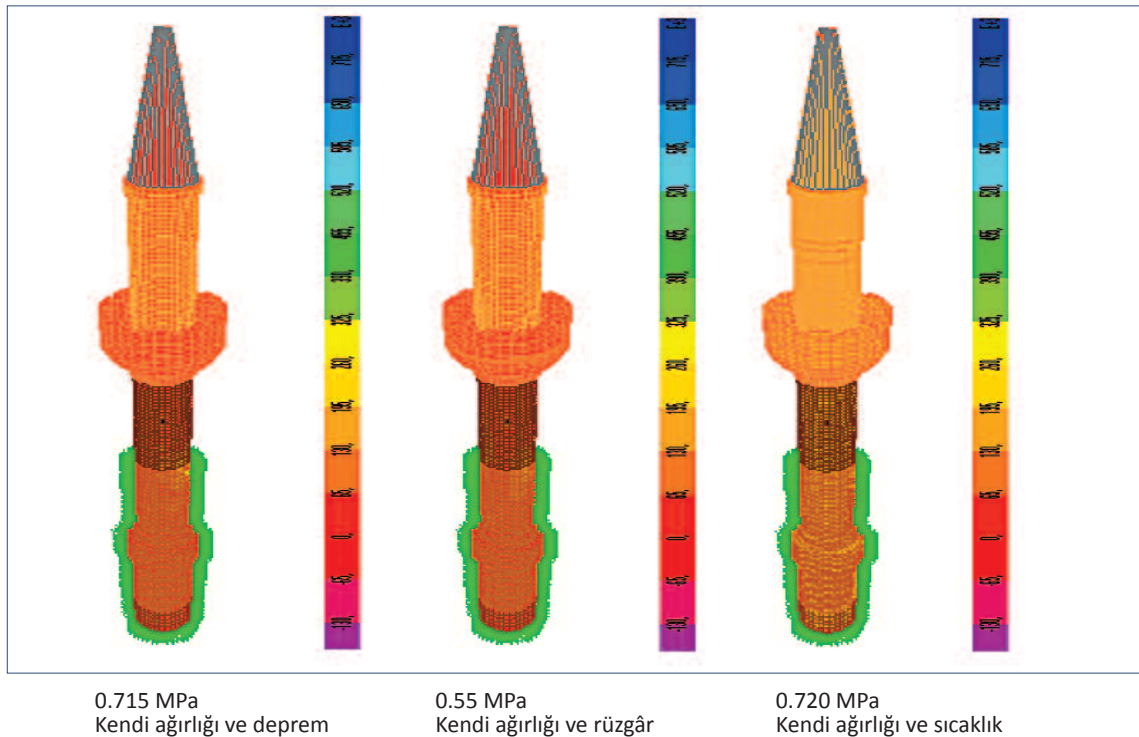
Şekil 12. Çeşitli yükleme biçimlerine göre oluşan yer değiştirme şekilleri.

Düşey eksendeki yer değiştirmeler incelendiğinde en yüksek yer değiştirmelerin kendi ve deprem etkisi altında ve minarenin taş kısmının üst seviyesinde olduğu belirlenmiştir. Deprem etkisinin ardından, kendi ağırlığı ve rüzgâr ile kendi ağırlığı ve sıcaklık yükleme durumları sırasıyla etken olmaktadır.

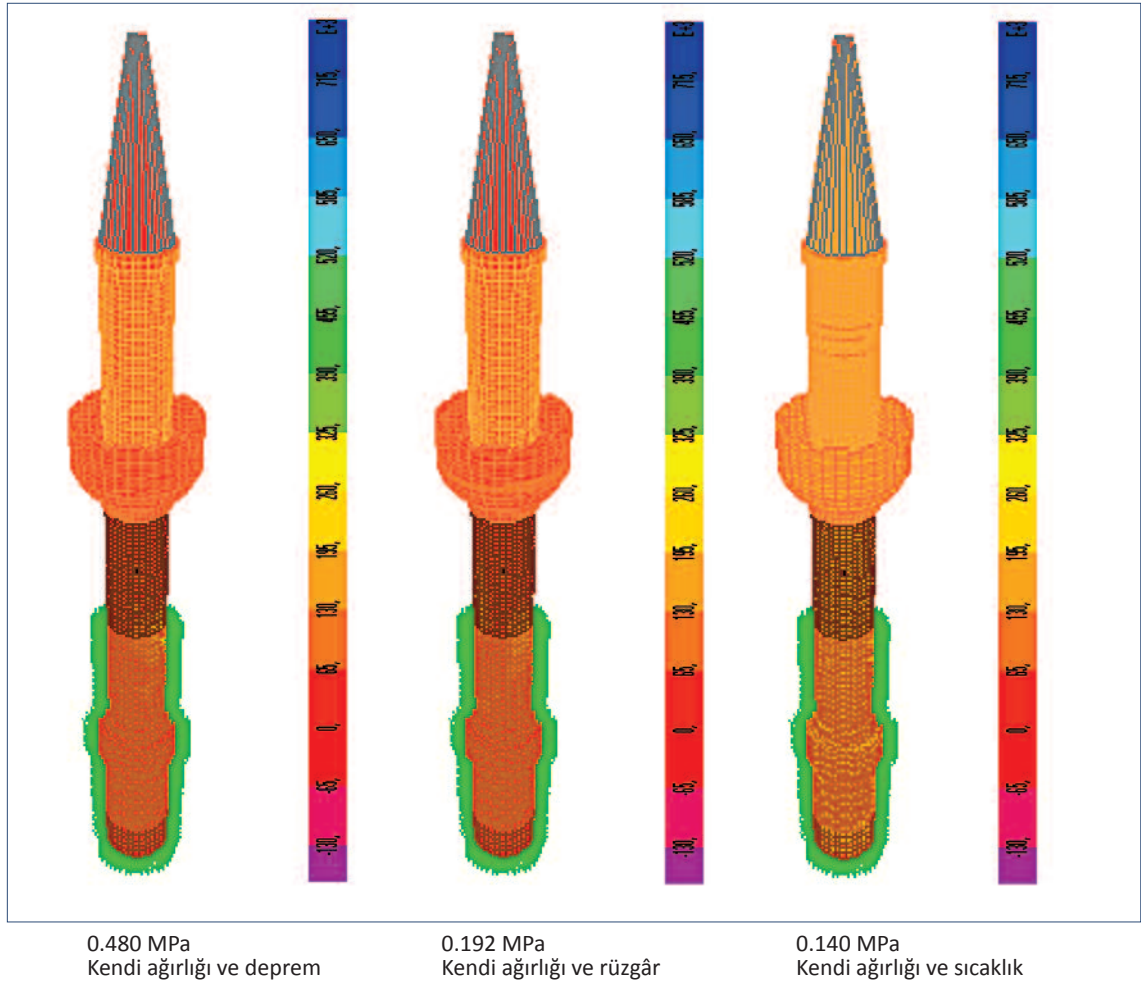
İyileştirilmiş analitik modelin çeşitli yükleme koşulları altında elde edilen asal basınç gerilme konturları Şekil 13'te, asal çekme gerilme konturları Şekil 14'te ve asal kayma gerilme konturları Şekil 15'de verilmektedir



Şekil 13. Asal basınç gerilmesi konturları.



Şekil 14. Asal çekme gerilmesi konturları.



Şekil 15. Asal kayma gerilmesi konturları.

Yapılan analizler neticesinde minarede oluşan basınç gerilmelerinin en yüksek olarak 1.43 MPa ile kendi ağırlığı ve sıcaklık değişimi etkisi ile oluştuğu görülmüştür. Basınç gerilmesi kendi ağırlığı ve rüzgâr etkisi altındaki 1.30 MPa, kendi ağırlığı ve deprem etkisi altında ise 0.84 MPa değerinde oluşmuştur. Belirlenen basınç gerilmeleri minarenin malzeme özellikleri ile kıyaslandığında, oluşan basınç gerilmesi değerlerinin 45.07 MPa olan taş basınç dayanımı ve 5.00 MPa olan harç basınç dayanımından oldukça düşük olmasından dolayı minarenin basınç yönünden emniyetli olduğu ifade edilebilir.

Minarenin analizleri sonucunda elde edilen çekme gerilmeleri, kendi ağırlığı ve deprem etkisi ile kendi ağırlığı ve sıcaklık etkilerinde, en yüksek seviyesi olan 0.72 MPa seviyesine çıkmıştır. Kendi ağırlığı ve rüzgâr etkisi ile çekme gerilmesi 0.55 MPa seviyesine ulaşmıştır. Elde edilen çekme gerilmelerinin taşın çekme mukavemetinden düşük olduğu ancak

harcın çekme mukavemetinden yüksek olduğu görülmektedir. Her ne kadar harç mukavemeti beklenen çekme gerilmelerinden düşük olsa da hesap değerlerine katılmayan ve geleneksel minare yapım tekniklerinde kullanılan kurşun kenet sistemlerinin minarenin çekme gerilmelerini destekleyeceği düşünülmektedir. Ancak bu destek elemanlarına rağmen yapının çekme gerilmeleri konusunda dikkatle izlenmesi ve gereken iyileştirmelerin yapılması gerekli görülmüştür.

Minare modelinin analizi sonucunda oluşan kayma gerilmelerinin beklenildiği şekilde kendi ağırlığı ve deprem etkisi altında en yüksek seviyeye ulaştığı görülmüştür. Kendi ağırlığı ve deprem etkisi ile oluşan 0.48 MPa değerindeki maksimum kayma gerilmesini 0.19 MPa ile kendi ağırlığı ve rüzgâr etkisi altında oluşan kayma gerilmesi takip etmektedir. Kendi ağırlığı ve sıcaklık ile oluşan kayma gerilmesi 0.14 MPa değerinde oluşmuştur.

9. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ, RESTORASYON ÖNERİLERİ VE MALİYETİ

Trabzon Hacı Kasım Muhittin Camii Minaresinin yapılan deneysel ve analitik incelemesi sonucunda yapının çekme gerilmelerinin, harç malzemenin çekme dayanımından daha yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Ancak yapı analizinde incelemeye katılmamış olup geleneksel yapı tekniklerinde kullanılan kurşun (çelik) kenetlerin çekme gerilmelerinin karşılanmasında harç malzemesine yardımcı olacağı dikkate alındığında yapının belirlenen çekme gerilmelerine karşı direnç göstereceği düşünülmektedir.

Ancak yapının ana ögesi olan taş elemanların bir kısmında doğal süreçten kaynaklanan özellik kaybı ve çürümelerin olduğu belirlenmiştir. Elde edilen verilerin yorumlanması ve yapılan gözlemler ışığında aşağıdaki öneriler uygun görülmüştür:

- Yapının kaide ve gövdesinde yer alan çürümüş taş elemanların çürütme tekniği ile yenilenmesi gerekmektedir.
- Taş aralarında boşalan derzlerin uygun malzeme ile doldurulması gerekmektedir.
- Petek kısmının sökülerek kullanılabilir taşların ıslah edilmesi, kullanılamayacak taşların yenilenerek uygun renk ve dokuda doğal taş malzeme ile yeniden örülmesi gerekmektedir.
- Taş şerefe korkuluklarının kırılmış ve bozulmuş elemanlarının uygun renk ve dokuda aslına uygun olarak yenilenmesi gerekmektedir.
- Külahın yenilenmesi ve üzerinin kurşun örtü ile kaplanması gerekmektedir.
- Minare şerefe kapısının yenilenmesi gerekmektedir.
- Minarede yüzey temizliği yapılması gerekmektedir.
- Elektrik tesisatının ve paratoner tesisatının yenilenmesi gerekmektedir.

Trabzon Merkez Hacı Kasım Muhittin Camiinin Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Trabzon Bölge Kurulunun 28.08.2007 tarih ve 1259 sayılı kararı ekinde onaylanan rölöve ve restorasyon projeleri kapsamında restorasyon önerileri bulunmaktadır. Onaylı restorasyon projelerinde cami minaresi ile ilgili aşağıda sunulan müdahale izinleri mevcuttur. Buna göre;

- Minarenin kaide kısmında bozuk taşlar çürütülerek orijinal renk, doku ve karakterinde taş kaplamalar yapılacaktır.
- Minare kaide üzerindeki çürümüş taş korniş

yenilenecektir.

- Gövdedeki taş elemanlardan özelliğini kaybetmiş olanlar çürütülerek yenilenecektir.
- Şerefe altında bulunan bozuk taşlar orijinali doğrultusunda yenilenecektir.
- Şerefe korkuluklarından bozuk olanlar orijinali doğrultusunda yenilenecektir.
- Minarenin şerefe üzerindeki petek kısmında özelliğini kaybetmiş taşlar çürütülerek yenilenecektir.
- Cami seren direği korunacak, ahşap külâh yenilenecek ve su yalıtımı yapılarak üzeri kurşun ile kaplanacaktır.
- Külâh ve kapı yapımında kullanılacak tüm ahşap elemanlar empenye edilecek ve üzerine ahşap koruyucu sürülecektir.

Minarenin statik ve dinamik analizleri yapılmadan hazırlanan rölöve ve restorasyon projeleri kapsamında öngörülen müdahale kararları, yapılan bu çalışmada ortaya çıkan veriler ışığında değerlendirildiğinde 6. maddede yer alan hüküm haricinde uygun görülmüştür. Ancak minarenin şerefe üstünde yer alan petek kısmının statik ve dinamik incelemeler neticesinde göstermiş olduğu zayıf yapı gereği çürütme tekniği ile müdahalenin bu kısımda yeterli olamayacağı düşünülmüştür. Taş özelliklerini büyük ölçüde kaybetmiş petek kısmında özellikle batı, kuzeybatı ve kuzey kısımlarında ciddi hasarlar bulunmaktadır. Kesit ölçülerinin küçük olması nedeni ile çürütme tekniklerinin uygulanmasının güvenli olmayacağı petek kısmının sökülerek kullanılabilir taşların kullanılması, bozuk taşların ise yenilenerek geleneksel yöntemler ile yeniden örülmesinin uygun olduğu düşünülmektedir. Henüz restorasyonu yapılmamış olan eserin daha önceden alınmış restorasyon kararlarının bu veriler ışığında revize edilerek ek kararların alınması gerekmektedir.

Restorasyon işinin yaklaşık maliyeti Vakıflar Genel Müdürlüğü 2011 yılı birim fiyatları, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2011 yılı birim fiyatları ve özel fiyat analizlerine göre belirlenmiştir. Maliyet hesabında nakliyeler ve diğer genel giderler dikkate alınmamış olup, sadece işin gerçekleştirilmesine esas metraj değerlendirilmiştir. Buna göre minarenin öngörülen restorasyon işleri için KDV hariç yaklaşık 90.000,00 TL bedel tespit edilmiştir.

10. RESTORASYON ÖNERİLERİNE GÖRE OLUŞTURULAN YENİ ANALİTİK MODELİN ANALİZİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Onarım yapıldığı kabul edilen minare yeni malzeme özelliklerine göre yeniden modellenerek analiz edil-

miş olup, yer değiştirmelerde ve gerilmelerde çok önemli değişiklikler tespit edilmemiştir. Hâlihazır hali ile yalnızca çekme gerilmelerine karşı riskli durumda olduğu belirlenen minarenin onarımının yalnızca bozulan taşların değiştirilmesi ile değil; boşalan derzlerin hidrolik kireç esaslı malzeme ile doldurulması ve yeni yerleştirilecek taşların hidrolik kireç harcı ve kurşun kenetli çelikler yardımıyla sabitlenmesi ile desteklenmesi uygundur.

11. SONUÇLAR

Bu çalışmada taş minarelerin restorasyonunda izlenecek yol, taşınmaz kültür varlığı olarak tescilli Trabzon Merkez Hacı Kasım Muhittin Camiinin Taş Minaresi örneği üzerinde anlatılmıştır. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler aşağıda sıralanmıştır:

- Taşınmaz Kültür Varlığı olarak tescilli Trabzon Merkez Hacı Kasım Muhittin Camiinin doğal taş malzemeden geleneksel tekniklerle inşa edilen minaresi, zaman içerisinde doğal nedenlerden dolayı malzeme özelliklerini kaybetmiş ve çeşitli hasarlara uğramıştır.
- Hasarlar minarenin özellikle batı cephesinde yoğunlaşmakta olup, kaide taş kaplamalarında yoğun, gövde bölümünde kısmi, korkuluk kısımlarında ve petek kısımlarında ise yoğun olarak yer almaktadır.
- Minarenin sonlu eleman modeli Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak elde edilen deneysel ölçüm sonuçlarına göre iyileştirilmiş ve kendi ağırlığı ve deprem etkisi, kendi ağırlığı ve rüzgâr etkisi ile kendi ağırlığı ve sıcaklık değişimleri durumlarına göre analiz edilmiştir.
- Tüm yükleme çeşitlerine göre çeşitli kotlardaki yer değiştirmeler incelendiğinde, beklenen şekilde kendi ağırlığı ve deprem yükü altındaki yer değiştirmeler en yüksek değerler olarak tespit edilmiştir. Yapının tüm etkiler altındaki analizlerinde elde edilen yer değiştirmelerinin yapı kotunun yükselmesi ile arttığı gözlenmiştir.
- Minarenin basınç yönünden emniyetli olduğu belirlenmiştir. Elde edilen çekme gerilmelerinin taşın çekme mukavemetinden düşük olduğu ancak harcın çekme mukavemetinden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Her ne kadar harç mukavemeti beklenen çekme gerilmelerinden düşük olsa da hesap değerlerine katılmayan ve geleneksel minare yapım tekniklerinde kullanılan kurşun kenet sistemlerinin minarenin çekme gerilmelerini destekleyeceği düşünülmüştür. Ancak bu destek elemanlarına rağmen yapının çekme gerilmeleri konusunda dikkatle

izlenmesi ve gereken iyileştirmelerin yapılması gerekli görülmüştür.

- Onarım yapıldığı kabul edilen minare yeniden analiz edilmiş olup, yer değiştirme ve gerilmelerde önemli değişiklikler tespit edilmemiştir. Hâlihazır hali ile yalnızca çekme gerilmelerine karşı riskli durumda olduğu belirlenen minarenin onarımı yalnızca bozulan taşların değiştirilmesi ile değil, boşalan derzlerin hidrolik kireç esaslı malzeme ile doldurulması ve yeni yerleştirilecek taşların hidrolik kireç harcı ve kurşun kenetli çelikler yardımıyla sabitlenmesi ile yapılmalıdır. Böylelikle harcın kabul edilen çekme gerilmeleri beklenen gerilmelerin üzerine çekilebilecektir.
- Minare şerefesinin üzerinde yer alan petek kısmındaki taşların özelliklerini büyük ölçüde yitirmiş oldukları ve gerilme değerlendirmelerinde kritik bölgeyi oluşturması sebebi ile petek kısmının tamamen sökülerek, kullanılabilir taşların yeniden ıslah edilerek kullanılması diğer taşların ise uygun renk ve dokuda taşlar ile yenilenerek geleneksel yapım teknikleri ile yeniden inşası uygundur.
- Şerefe korkuluklarının bozuk olanlarının uygun renk ve dokuda malzeme ile yenilenmesi, sağlam durumda olanların ise sabitlemesinin ve ıslahının yapılması gereklidir.
- Minare gövde kısmında yer alan bozuk taşların uygun renk ve dokuda doğal taş malzemeleri ile yenilenmesi gerekmektedir.
- Minare kaidesi ve geçiş elemanında özelliğini kaybetmiş taşlar çürütülerek yerlerine uygun renk ve dokuda taş malzeme ile kaplama yapılmalıdır.
- Minare restorasyonu için gerekli iş ve işlemler için metraj çalışması yapılmış ve 2011 yılı için yaklaşık maliyet hazırlanmıştır. Buna göre nakliye masrafları ve KDV hariç olmak üzere 90.000,00 TL bedelle minarenin restorasyonunun tamamlanabileceği belirlenmiştir.
- Deneysel ve analitik çalışmaların bir arada yürütülerek taşınmaz kültür miraslarının korunması, yaşatılması ve gelecek nesillere aktarılması hususlarında bilimsel çalışmalar artırılmalı ve tüm eski eserlerin bu ve benzeri yöntemlerle bir sağlık taramasına sokulması hedeflenmelidir.

TEŞEKKÜR

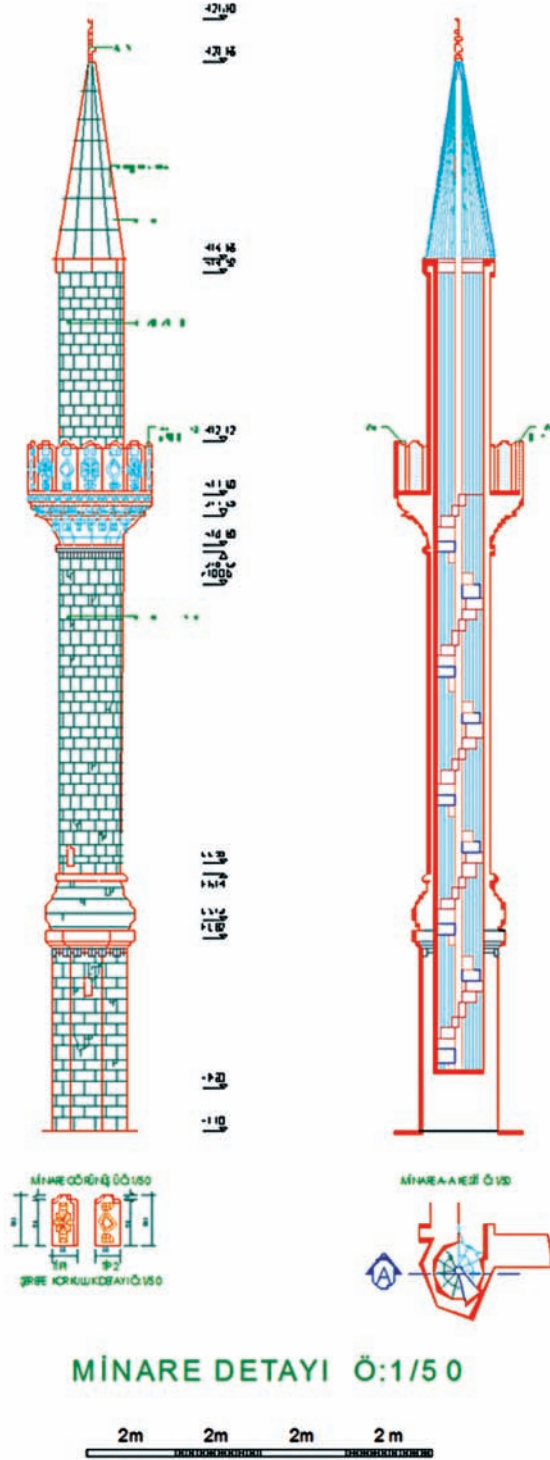
Bu çalışma 106M038 numaralı TÜBİTAK Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projesi kapsamında desteklenmiştir. Çalışma kapsamında verdikleri izinler ve destekler dolayısıyla Trabzon Vakıflar Bölge Müdürlüğüne ve değerli personeline teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

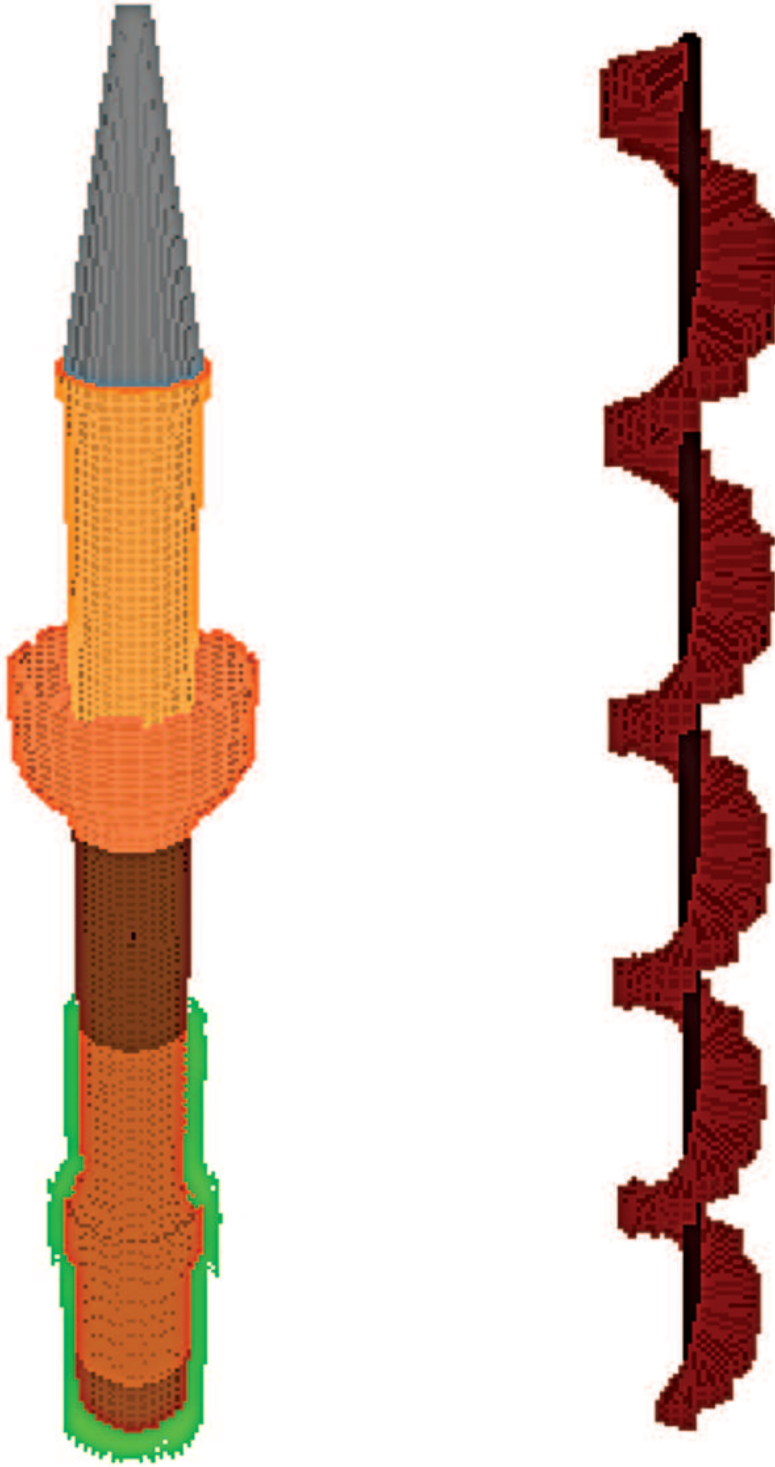
- Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, (2007). Ankara : Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Yayınları.
- Ayar, A. (2007). *Trabzon İli Cumhuriyet Mahallesi 202 Ada 66 Parsele Ait Jeolojik Zemin Etüd Raporu*, Emre Mühendislik, Trabzon.
- Bayraktar, A. Sevim, B. Altunışık, A.C. Türker, T. (2007). "Tarihi Yiğma Minarelerin Deprem Güvenliklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi", *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-1 Bildiriler Kitabı*, s.415-428.
- Bayraktar, A. Altunışık, A.C. Sevim, B. Türker, T. Akköse, M. Coşkun, N. (2008). "Modal Analysis, Experimental Validation and Calibration of a Historical Masonary Minaret", *Journal of Testing and Evaluation*, 36, 6, 516-524.
- Bayraktar, A. Altunışık, A.C. Sevim, B. Birinci, F. Özcan, M. Türker, T. (2009). "Tarihi Mikron Köprüsünün Restorasyon Sonrası Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi", *Uluslararası Katılımlı Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-2 Bildiriler Kitabı*, 367-378.
- Bayraktar, A. Şahin, A. Özcan, M. Yıldırım, F. (2010). "Numerical Damage Assessment of Hagia Sophia Bell Tower by Nonlinear FE Modeling", *Applied Mathematical Modelling*, 34, 92-121.
- Bayraktar, A. Altunışık, A.C. Sevim, B. Türker, T. (2011). "Seismic Response of a Historical Masonry Minaret using a Finite Element Model Updated with Operational Modal Testing", *Journal of Vibration and Control*, 17, 1, 129-149.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2011. Yılı Birim Fiyatları, (2011). Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Yayını.
- Çizer, Ö. Böke, H. İpekoğlu, B. (2004). "Bazı Osmanlı Dönemi Hamam Yapılarının Kubbe ve Duvarlarında Kullanılan Kireç Harçlarının Özellikleri", *II. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi*, 6-8 Ekim 2004, İstanbul, Kongre Bildirileri, ISBN 975-395-7877-4, 469-481.
- Deprem Bölgesi Haritası, (1996). Ankara: Afet İşleri Genel Müdürlüğü Yayınları.
- Eroğlu, E. (2007). *Hacı Kasım Camii Sanat Tarihi Raporu*, Trabzon.
- <http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/materialInFire/Masonry/thermalProperties.htm> (08.01.2012)
- İnşaat Mühendisliği El Kitabı*, (2000). Ankara: TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi Yayını, 94.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü İnternet Sitesi. www.dmi.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=TRABZON (28.12.2011).
- OMA, (2008). *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.
- SAP2000, (2009). Structural Analysis Program Version 14.1.0., Computer and Structures, Uni. of Berkeley, California.
- Trabzon Kültür ve Tabiat Varlıkları Koruma Bölge Kurulunun 28.08.2007 tarih ve 1259 sayılı kararı ve ekleri, Trabzon.
- www.trabzon.dmi.gov.tr/merkezler-tanitim.aspx?m=2, Trabzon Meteoroloji Bölge Müdürlüğü İnternet Sitesi, (28.12.2011).
- TS 498-Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri Şartnamesi, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü Yayınları.
- Uniform Building Code Standards*, International Code Council, 1991.
- Vakıflar Genel Müdürlüğü 2011 Yılı Eski Eser Birim Fiyatları*, (2011). Ankara Vakıflar Genel Müdürlüğü Sanat Eserleri ve Yapı İşleri Daire Başkanlığı Yayını.



EKLER



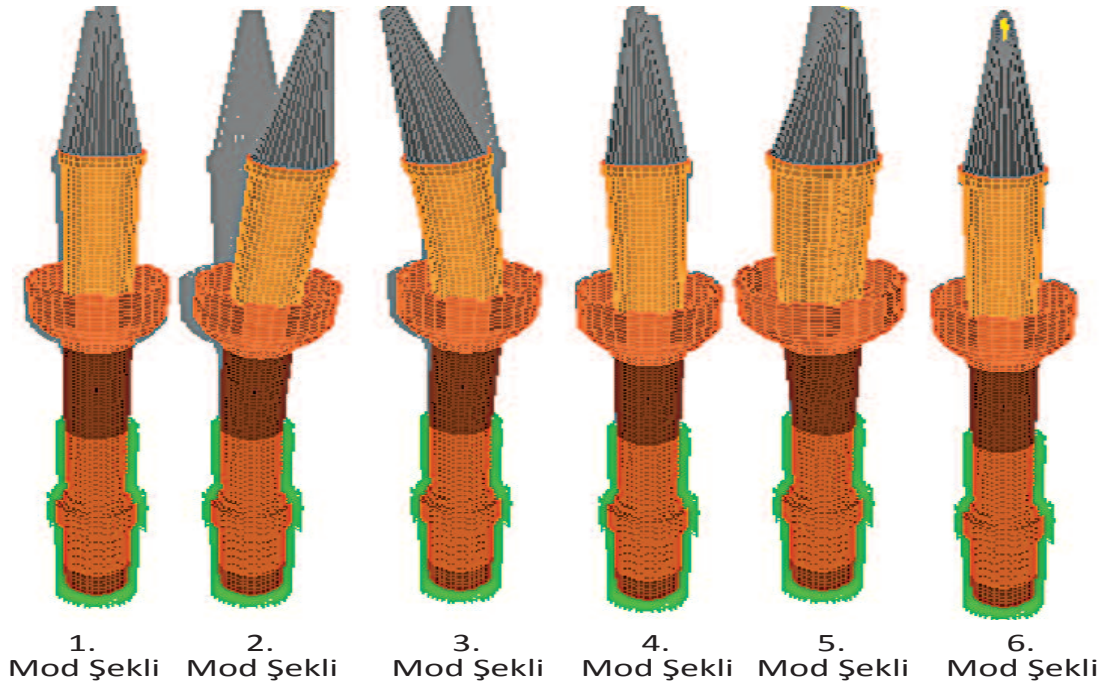
Şekil 1. Hacı Kasım Camii minaresi rölöve projesi (Kesit ve görünüş).



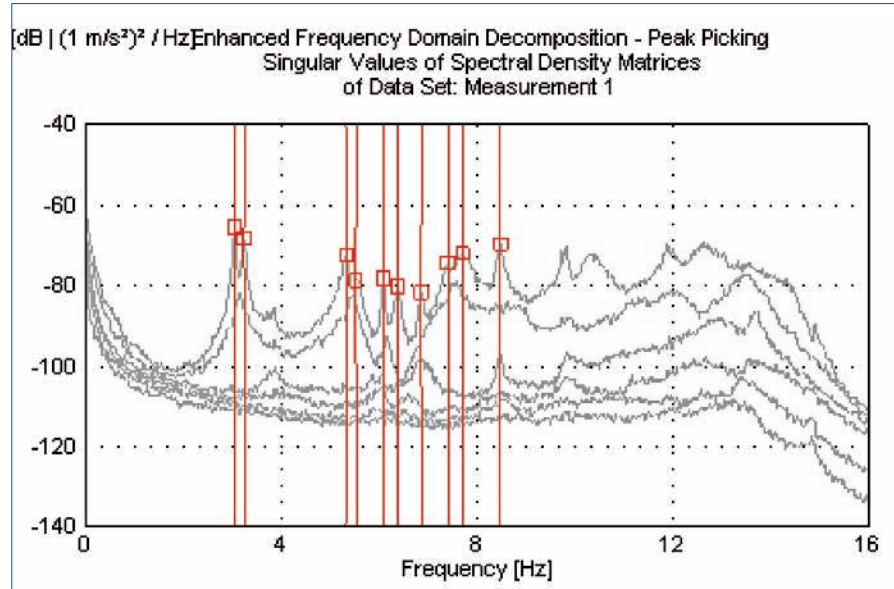
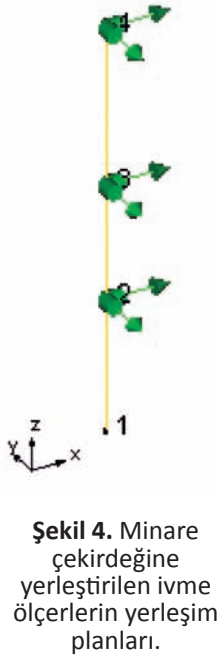
a) Minare Modeli

b) Taş çekirdek ve merdivenler

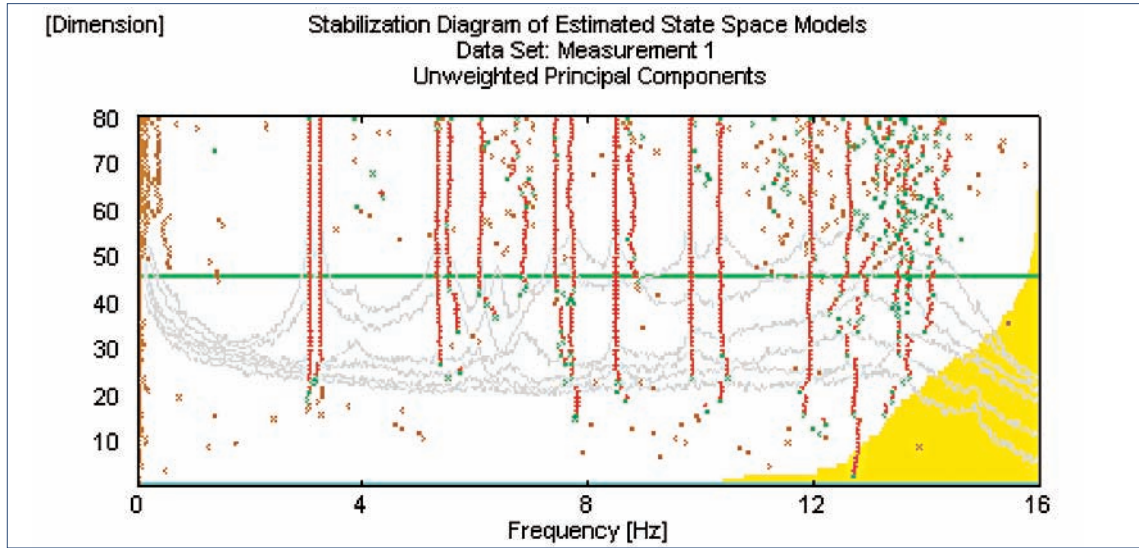
Şekil 2. Minare modeli.



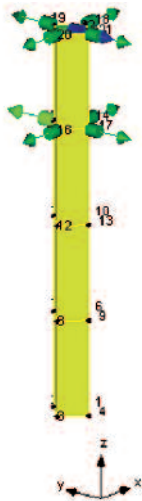
Şekil 3. Başlangıç sonlu eleman modeline göre elde edilen mod şekilleri.



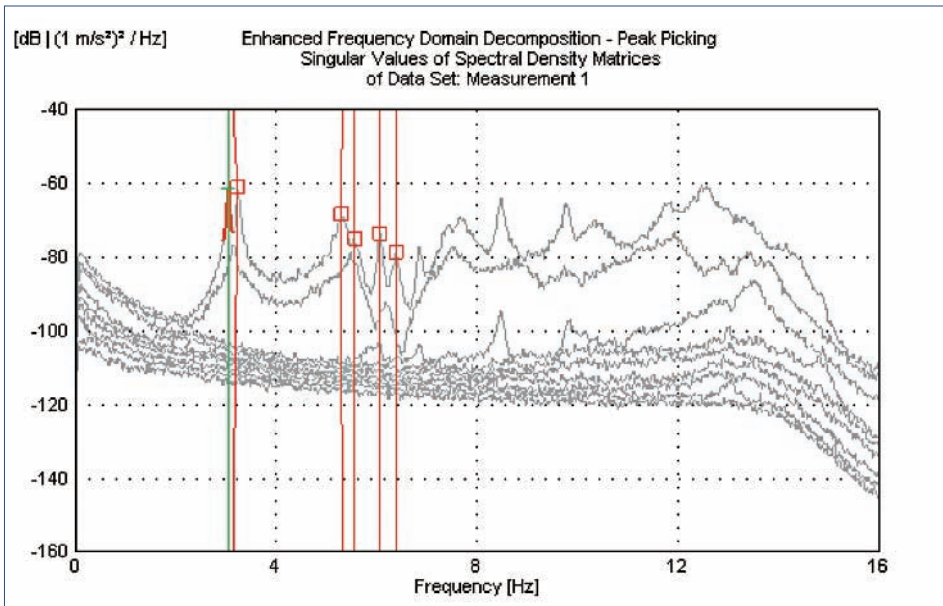
Şekil 5. Minare çekirdeğinde yapılan ölçümlerde piklerin seçilmesi yöntemiyle elde edilen tekil değerler.



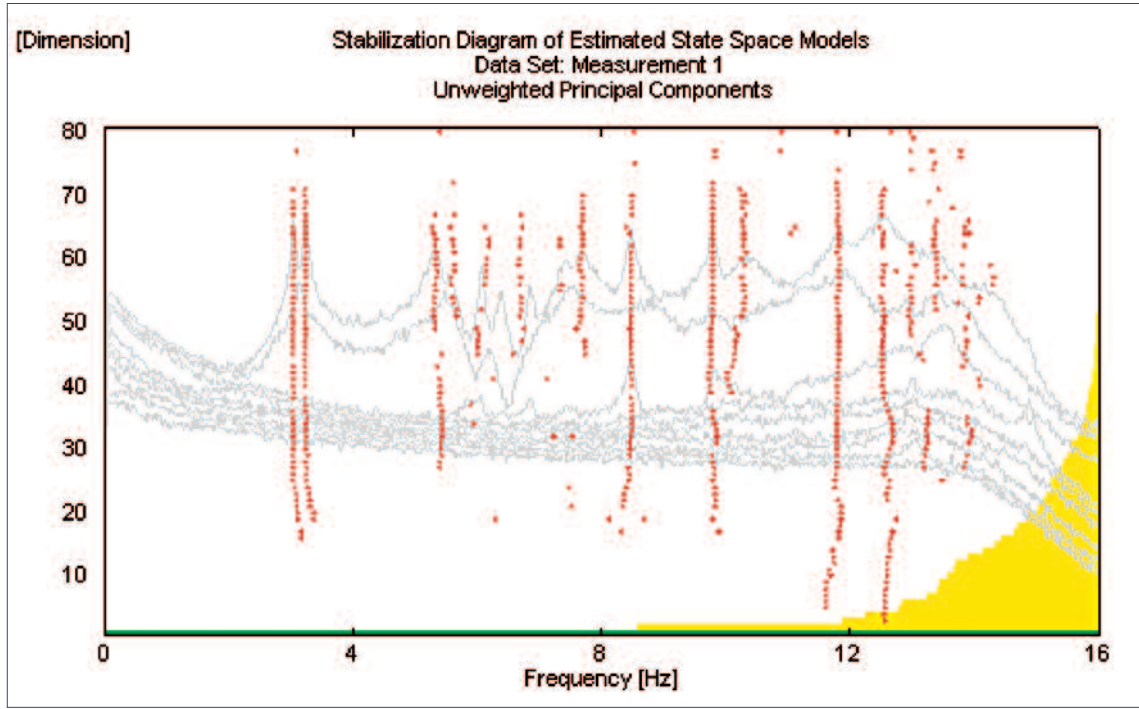
Şekil 6. Minare çekirdeğinde yapılan ölçümlerde stokastik altalan belirleme yöntemiyle elde edilen yığılmış değerler.



Şekil 7. Minare duvarlarına yerleştirilen ivmeölçerlerin numaralanma sistemi.



Şekil 8. Minare duvarlarında yapılan ölçümlerde piklerin seçilmesi yöntemiyle elde edilen tekil değerler.



Şekil 9. Minare duvarlarında yapılan ölçümlerde stokastik altalan belirleme yöntemiyle elde edilen yığılmı değerler.