

**BURSA TARİHİ YIĞMA MİNARELERİNİN DİNAMİK  
DAVRANIŞLARININ MODAL ANALİZ YÖNTEMİ İLE  
İNCELENMESİ**

**MEHMET HÜDAİ BAŞTÜRK**



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BURSA TARİHİ YIĞMA MİNARELERİNİN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ  
MODAL ANALİZ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

**İnşaat Müh. MEHMET HÜDAİ BAŞTÜRK**

Doç. Dr. Ramazan LİVAOĞLU  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2013

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**22/07/2013**

**Mehmet Hüdai BAŞTÜRK**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### BURSA TARİHİ YIĞMA MİNARELERİNİN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ MODAL ANALİZ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

**Mehmet Hüdai BAŞTÜRK**

Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman: Doç. Dr. Ramazan LİVAOĞLU**

Birçok medeniyete beşiklik etmiş, Osmanlı Devletine yıllarca başkentlik yapmış Bursa, hanlar, hamamlar, kervansaraylar, camiler ve mescitler gibi birçok tarihi esere ev sahipliği yapmaktadır. Bu tarihi kent silüeti içerisinde camiler ve bu camilere ait minareler şüphesiz büyük önem taşımaktadır. Bursanın birinci derece deprem bölgesi olması ve çok önemli tarihi eserleri barındırması, bu eserlerin korunmasına yönelik titiz bir çalışmayı gerektirmektedir. Çalışma kapsamında Bursa’da yer alan, camilerin ana unsurlarından biri olan fonksiyonelliğinin yanı sıra simgesel olarak da özel bir öneme sahip, yedi adet tarihi minare incelenmiştir. Minareler yapıları itibarı ile uzun ve ince olduklarından, yatay yüklere karşı oldukça hassastırlar. Bu hassaslık minareleri tasarlayanları ve inşa edenleri daha dikkatli davranmaya, bunlar için farklı yapım tekniklerinin geliştirilmesine, farklı geometrik özellikteki bölümlerin kullanılmasına yol açmıştır. Bu çalışmada incelenen minarelerin geometrik özellikleri, malzeme özellikleri ve yapım teknikleri hakkında bilgi verilmiş, minarelerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesine çalışılmıştır. Bunu yaparken hassas ivme ölçerler ve uygun yazılımlar kullanılarak dinamik karakteristiklerinin belirlenmesine dayalı deneysel modal analiz yöntemlerinden birisi olan çevresel titreşim testleri yapılmış, minarelere ait frekanslar ve mod şekilleri elde edilmiştir. Yine yerinde alınan ölçümlere göre minarelerin sayısal modelleri oluşturulmuş, malzeme özelliklerinde ve mesnetlenme koşullarında kalibrasyon yapılarak sonlu eleman analizinden elde edilen sonuçlarla deneysel yaklaşımla elde edilen sonuçların yakınsaklığının sağlanması amaçlanmıştır. Elde edilen bulgularla dinamik karakteristikler üzerinde etkili olan faktörler ve minarelerin deprem davranışları konusunda değerlendirmeler yapılmıştır. Çevresel titreşim testlerinden elde edilen verilerle uyumluluğu sağlanan sayısal modellerin çalışma kapsamındaki minareleri temsil yeteneğine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu aşamadan sonra söz konusu sayısal modeller ile, incelenen minarelerde herhangi bir deprem ivme kaydı kullanılarak yapının tepkisi oldukça gerçekçi bir şekilde hesaplanabilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Yığma Minareler, Dinamik karakteristikler, Çevresel titreşim testleri, Modal analiz



## ABSTRACT

MSc Thesis

### INVESTIGATION OF DYNAMIC BEHAVIOUR OF HISTORICAL MASONRY MINARETS WITH MODAL ANALYSIS METHOD IN BURSA

**Mehmet Hüdai BAŞTÜRK**

Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

**Supervisor: Assoc. Prof. Ramazan LİVAOĞLU**

Bursa played very significant role in ancient times as well as in the Ottoman period. Bursa has been served for a long time as a capital Ottoman Empire. There had been built many historical buildings like mosque, caravansary, baths etc. during this period. Undoubtedly in this historic city silhouette mosques and minarets have significant place. Since Bursa is in the first degree seismic zone, and has a lot of historical monuments, the studies for the protection of these monuments are crucial. The study involves the investigation of seven historical minarets which are the main components of the mosques in Bursa. Due to their slenderness and geometrical properties, they are sensitive to against horizontal loads. This sensitivity made designers more careful in their analyses and they should improve different construction methods with using several parts. This study is aimed to investigate minarets by taking care of the geometrical-material properties and construction techniques. It is also aimed to determine the dynamic characteristics of minarets. In this the study, sensitive accelerometers is used for evaluate the dynamic characteristics of the minaret by using operational modal analysis technique which is one of the experimental modal analysis. Numerical model developed by using in situ measurements. The mechanical properties and support conditions of the numerical model are calibrated to ensure the convergence of results by comparing the numerical model with the results of the operational modal analysis. The seismic behavior of minarets are evaluated and the parameters impressed the dynamic characteristics based on the obtained data are determined. The good agreement between two approaches indicates that the numerical model is adequate to analyze minarets. Therefore, the numerical model can be used to simulate the behavior of the minarets under earthquake loading.

**Key words:** Masonry Minarets, Dynamic characteristics, Ambient vibration tests, Modal analysis

## TEŞEKKÜR

Bursa Tarihi Yığılma Minarelerinin Dinamik Davranışlarının Modal Analiz Yöntemi ile İncelenmesini konu alan bu çalışma, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Ana Bilim Dalında hazırlanmıştır.

Yüksek lisans öğrenimim süresince gerek ders aşamasında gerekse tez aşamasında değerli vaktini benimle paylaşan, karşılaştığım zorlukların üstesinden gelmemde bana cesaret veren, bu sürecin tamamlanmasında desteğini hep yanımda hissettiğim, tez danışmanım Sayın Hocam Doç. Dr. Ramazan LİVAOĞLU'na teşekkürü borç bilirim.

Bu konudaki çalışmalarını temel kaynak olarak kullandığım, bilgi ve tecrübesini hiçbir zaman esirgemeyen, tanımış olmakla kendimi şanslı hissettiğim Sayın Hocam Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN'e teşekkür ederim.

Katkılarıyla tez hazırlanması sürecinin daha verimli olmasına olanak sağlayan Sayın Hocam Doç. Dr. Babür DELİKTAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

İdari prosedür süreçlerinin yönetiminde koordinasyonu ve gerekli bilgilendirmeleri sağlayan Sayın Arş. Gör. Süleyman ÖZEN' e teşekkür ederim.

Yerinde yapılacak ölçümlere müsaade ederek çalışmanın başlamasına vesile olan, yürütülmesi sırasında da her türlü kolaylığı sağlayarak bizi destekleyen Bursa Vakıflar Bölge Müdürü Sayın Mürsel SARI'ya ve Bursa İl Müftülüğüne teşekkür borçluyum.

Manevi desteklerini esirgemeyen değerli dostlarım Ümit HARPUTLU ve Sami ELÇİ'ye minnettarım.

Son olarak, birçok zorluğa katlanarak beni bu günlere getiren, hakkını nasıl ödeyeceğimi bilmediğim anneme, çalışmalarım süresince her an yanımda olan ve bana güç veren eşime, bu süreç içerisinde dünyaya gelen ve hayatıma yeni anlam kazandıran kızıma sonsuz şükranlarımı sunarım.

Mehmet Hüdai BAŞTÜRK  
22.07.2013

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR .....	iii
SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Minareler .....	2
1.1.1 Minare bölümleri .....	6
1.1.2. Minare inşa teknikleri .....	15
1.1.3. Tarihi minarelerin yapımında kullanılan malzemeler .....	18
1.1.3.1. Taşıyıcı olarak kullanılan malzemeler .....	19
1.1.3.2. Bağlayıcı olarak kullanılan malzemeler .....	22
1.1.4. Minarelerde konumlandırma .....	24
1.1.5. Minarelere etkiyen yükler .....	25
1.1.5.1. Rüzgar yükleri .....	25
1.1.5.2. Deprem yükleri .....	27
2. LİTERATÜR ÖZETİ .....	31
3. YAPILARIN DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ .....	34
3.1. Yapıların Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Yaklaşımlar .....	35
3.1.1. Teorik yaklaşımlar .....	37
3.1.2. Deneysel yaklaşımlar .....	39
3.1.2.1. Deneysel modal analiz .....	40
3.1.2.2. Çevresel titreşimlerle modal analiz (Operasyonel modal analiz) .....	42
3.1.3. Filtreleme yöntemleri .....	48
4. MATERYAL .....	50
5. YÖNTEM .....	52
6. YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	55
6.1. Bedrettin Camii .....	56
6.2. Emir Sultan Camii .....	58
6.3. Hacılar Camii .....	60
6.4. Hoca Muslihiddin Camii .....	62

6.5. Hoca Tabip Camii .....	63
6.6. Hocaalizade Camii .....	65
7. BULGULAR VE İRDELEMELER.....	69
7.1.Minarelere İlişkin Bulgular ve İrdelenmeler.....	69
7.1.1. Bedrettin Camii .....	70
7.1.2. Emir Sultan Camii.....	73
7.1.3. Hacılar Camii .....	75
7.1.4. Hoca Muslihiddin Camii .....	78
7.1.5. Hoca Tabip Camii .....	81
7.1.6. Hocaalizade Camii .....	84
7.1.7. Kayhan Camii .....	87
7.2. Kütle Katılım Faktörü .....	89
7.3. Mesnetlenme Koşullarının Dinamik Karakter Üzerinde Etkisi .....	91
7.4. Geometrik Özelliklerin Dinamik Davranışa Etkisi .....	93
7.5. Minarelerin Deprem Davranışlarının İrdelenmesi .....	98
8. SONUÇLAR .....	101
KAYNAKLAR.....	104
EK 1 MİNARELERİN GEOMETRİK VE MALZEME ÖZELLİKLERİ .....	107
ÖZGEÇMİŞ.....	108

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$A(T)$	Spektral İvme Katsayısı
$A^*$	Durum matrisi
$A_o$	Etkin Yer İvmesi Katsayısı
$B^*$	Veri matrisi
$C$	Sönüm matrisi
$C^*$	Sistem davranış matrisi
$D^*$	Doğrudan iletim matrisi
$g$	Yerçekimi ivmesi (9.81 m/s <sup>2</sup> )
$G_{xx}(j\omega)$	Etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu
$G_{yy}(j\omega)$	Tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu
$H(j\omega)$	Frekans davranış fonksiyonu
$H_{ik}(i\omega)$	Transfer matrisi
$I$	Bina Önem Katsayısı
$K$	Sistem rijitlik matrisi
$m$	Kütle
$M$	Sistem kütle matrisi
$N$	Mod sayısı
$R$	Sisteme etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörü
$R_r$	Artık değer fonksiyonu
$S(T)$	Spektrum Katsayısı
$S_{ae}(T)$	Elastik spektral ivme [m /s <sup>2</sup> ]
$T$	Bina doğal titreşim periyodu [s]
$T$	Transpoze
$T_1$	Binanın birinci doğal titreşim periyodu [s]
$T_A, T_B$	Spektrum Karakteristik Periyotları [s]
$T_m, T_n$	Binanın m'inci ve n'inci doğal titreşim periyotları [s]
$u$	Tekil vektör
$u_{ij}$	Tekil vektör
$u_k$	Belirgin etki sinyal vektörü
$v, w_k$	Model ve ivmeölçer hatalarından dolayı işlenen gürültü sinyalleri
$x, y, z$	Kartezyen koordinatları
$X_i(\omega)$	Frekans ortamındaki tepki fonksiyonu
$Y_k(\omega)$	Frekans ortamındaki etki fonksiyonu
$\delta_{pq}$	Kronecker delta
$\lambda_r$	Kutup fonksiyonu
$\lambda$	Özdeğer
$\mu$	Poisson oranı
$w$	Açısal frekans
$*$	Kompleks eşlenik
$\dot{U}$	Zamana bağlı hız vektörü
$\ddot{U}$	Zamana bağlı ivme vektörü

**Kısaltmalar****Açıklama**

SAB

Stokastik Altalan Belirleme

SEY

Sonlu Eleman Yöntemi

GFOA

Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma

GSY

Güç Spektral Yoğunluğu

ÇTY

Çevresel Titreşim Yöntemi

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Şekil 1.1.</b> Bursa camilerinden örnekler a) Hoca Muslihiddin Cami b)Emir Sultan Cami c)Hacılar Cami .....	2
<b>Şekil 1.2.</b> Bazı Minare Örnekleri: (a) Cairo, Ahmad İbn Tulun Cami (Tulunid Devri, 876-9), (b) Diyarbakır, Türkiye, Ayni Cami (Osmanlı Devri, 1489), (c). Marrakesh, Morocco, Kutubiyya Cami (Almohad Devri, 12. yüzyıl), (d). Buhara, Özbekistan, Kalyan Cami (1514), (e). Turfan, Xinjiang Şehri, Kuzey Çin, Amin Cami, (1778), (f). Timbukte, Mali, DjinguereBer Cami (Songhay Devri, 14. yüzyıl), (g). San'a Yemen, Al-Bakiriyya Cami (Osmanlı Devri, 1598), (ğ). Beni-Isguen, Algeria, Mzab Saharan Köyü Cami, (h). Lahore, Pakistan, Wazir Khan Cami (Mughal Devri, 1634), (ı). Cairo, Amir Qurqumas Cami (Memlük zamanı sonrası,1506) (Frishman ve Khan 1994). .....	4
<b>Şekil 1.3.</b> Osmanlı dönemi minare örnekleri: a)Selimiye Cami Minaresi b) Sultanahmet Cami Minaresi c) Büyükmecidiye Cami Minaresi d)Süleymaniye Cami Minaresi e)Eyüp Sultan Cami Minaresi f) Beyazıt Cami Minaresi .....	5
<b>Şekil 1.4.</b> Bursa minare örnekleri: (a) Emir Sultan Cami (b) Hacılar Cami (c) Hoca Muslihiddin Cami (d) Hoca Tabip Cami (e) Hocaalizade Cami (f) Kayhan Cami.....	6
<b>Şekil 1.5.</b> Minare bölümleri; a) Görünüş b) Düşey kesit .....	7
<b>Şekil 1.6.</b> Minarelerin tezyinatında kullanılan alem formları .....	8
<b>Şekil 1.7.</b> Külâh örnekleri: (a) Emir Sultan Cami (b) Hoca Muslihiddin Cami (c) Hoca Tabip Cami (d) Hocaalizade Cami.....	9
<b>Şekil 1.8.</b> Petek içi ahşap elemanlar.....	10
<b>Şekil 1.9.</b> Şerefe örnekleri: (a) Emir Sultan Cami (b) Hoca Muslihiddin Cami (c) Hocaalizade Cami (d) Hacılar Cami.....	11
<b>Şekil 1.10.</b> Merdiven basamaklarına ait görünümeler .....	12
<b>Şekil 1.11.</b> Küp (Pabuç) örnekleri: (a) Bedrettin Cami (b) Emir Sultan Cami (c) Hoca Naip Cami (d) Kayhan Cami .....	13
<b>Şekil 1.12.</b> Farklı küp örneklerine ait çizimler (Kuşüzümü ve Tokay 2011) .....	14
<b>Şekil 1.13.</b> Kaide örnekleri: (a) Kayhan Cami (b) Bedrettin Cami (c) Emir Sultan Cami (d) Hoca Naip Cami .....	15
<b>Şekil 1.14.</b> Yatayda kullanılan kenet demirleri (Emir Sultan Cami).....	16
<b>Şekil 1.15.</b> Minare bir “kur”u için inşaa tekniği (Doğangün ve ark. 2006).....	17
<b>Şekil 1.16.</b> Rüzgar etkisiyle oluşan minare hasarları. (a) Kahramanmaraş'ın Afşin İlçesindeki Ulu Caminin rüzgâr nedeniyle yıkılmış minaresi, (b) İçel'in	

Erdemli ilçesinde fırtına nedeniyle yıkılan minarelerden birisi (c) Ankara Kayaş'ta yıkılan bir minaret (Temüz 2007) .....	27
<b>Şekil 1.17.</b> Marmara Denizi çevresinde Kuzey Anadolu Fayı'nın başlıca aktif kolları ve gerçekleşmiş tarihi depremler .....	29
<b>Şekil 1.18.</b> Depremler nedeniyle hasar gören veya yıkılan minareler (a) Düzce depreminde (1999) yıkılmış bir minare , (b) Kocaeli depreminde (1999) şerefe seviyesinden yıkılmış minare (c) Çankırı, Orta depreminde hasar görmüş minare, (d) Kocaeli depreminde (1999) yıkılmış minare (Doğangün ve ark. 2006) .....	30
<b>Şekil 3.1.</b> Deneysel ve teorik modal analiz işlem akış şeması .....	36
<b>Şekil 3.2.</b> Sonlu eleman alt modellerinden bazı örnekler .....	39
<b>Şekil 4.1.</b> KB12VD Piezoelektrik ivme ölçer .....	50
<b>Şekil 4.2.</b> Quattro dört kanallı veri toplama ünitesi .....	51
<b>Şekil 5.1.</b> İvme ölçerlerin konumlanmaları .....	52
<b>Şekil 5.2.</b> Minareye ait sonlu eleman modeli .....	54
<b>Şekil 6.1.</b> Bedrettin Camiinin konumu .....	57
<b>Şekil 6.2.</b> Bedrettin Camiinin geometrik özellikleri ve fotoğrafı .....	58
<b>Şekil 6.3.</b> Emir Sultan Camiinin konumu .....	59
<b>Şekil 6.4.</b> Emir Sultan Camii minaresinin geometrik özellikleri ve fotoğrafı .....	60
<b>Şekil 6.5.</b> Hacılar Camiinin konumu .....	61
<b>Şekil 6.6.</b> Hacılar Camii minaresinin geometrik özellikleri ve fotoğrafı .....	61
<b>Şekil 6.7.</b> Hoca Muslihiddin (Mahkeme) Camiinin konumu .....	62
<b>Şekil 6.8.</b> Hoca Muslihiddin Camii geometrik özellikleri ve fotoğrafı .....	63
<b>Şekil 6.9.</b> Hoca Tabip Caminin konumu .....	64
<b>Şekil 6.10.</b> Hoca Tabip Camii minaresinin geometrik özellikleri ve fotoğrafı .....	64
<b>Şekil 6.11.</b> Hocaalizade Camiinin konumu .....	65
<b>Şekil 6.12.</b> Hocaalizade Camii minaresinin geometrik özellikleri ve fotoğrafı .....	66
<b>Şekil 6.13.</b> Kayhan Camiinin konumu .....	67
<b>Şekil 6.14.</b> Kayhan Camii minaresinin geometrik özellikleri ve fotoğrafı .....	67
<b>Şekil 7.1.</b> Bedrettin Cami - 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1,G2,G3 ve G4 doğrultularında güç yoğunluk spektrumları .....	71
<b>Şekil 7.2.</b> Bedrettin Cami minaresine ait birbirine dik doğrultularda ilk üç moda ait mod şekilleri .....	72
<b>Şekil 7.3.</b> Emirsultan Cami - 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1,G2,G3 ve G4 doğrultularında güç yoğunluk spektrumları .....	74



<b>Şekil 7.4.</b> Emir Sultan Cami minaresine ait birbirine dik doğrultularda ilk üç moda ait mod şekilleri .....	74
<b>Şekil 7.5.</b> Hacılar Cami - 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1,G2,G3 ve G4 doğrultularında güç yoğunluk spektrumları .....	76
<b>Şekil 7.6.</b> Hacılar Cami minaresine ait birbirine dik doğrultularda ilk üç moda ait mod şekilleri .....	77
<b>Şekil 7.7.</b> Hoca Muslihiddin Cami - 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1,G2,G3 ve G4 doğrultularında güç yoğunluk spektrumları.....	79
<b>Şekil 7.8.</b> Hoca Muslihiddin (Mahkeme) Cami minaresine ait birbirine dik doğrultularda ilk üç moda ait mod şekilleri.....	80
<b>Şekil 7.9.</b> Hoca Tabip - 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1,G2,G3 ve G4 doğrultularında güç yoğunluk spektrumları .....	82
<b>Şekil 7.10.</b> Hoca Tabip Cami minaresine ait birbirine dik doğrultularda ilk üç moda ait mod şekilleri .....	83
<b>Şekil 7.11.</b> Hocaalizade Cami - 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1,G2,G3 ve G4 doğrultularında güç yoğunluk spektrumları .....	85
<b>Şekil 7.12.</b> Hocaalizade Cami minaresine ait birbirine dik doğrultularda ilk üç moda ait mod şekilleri .....	86
<b>Şekil 7.13.</b> Kayhan Cami - 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1,G2,G3 ve G4 doğrultularında güç yoğunluk spektrumları .....	88
<b>Şekil 7.14.</b> Kayhan Cami minaresine ait birbirine dik doğrultularda ilk üç moda ait mod şekilleri .....	89
<b>Şekil 7.15.</b> <u>Gövde yüksekliği ile bir doğrultuda 1. Mod frekansları</u> .....	94
<b>Şekil 7.16.</b> Gövde-petek yüksekliği ile minare hakim periyotları arasındaki değişim ...	97
<b>Şekil 7.17.</b> Gövde kesit alanı ile minare hakim periyotları arasındaki değişim .....	98
<b>Şekil 7.18.</b> Yerel zemin sınıflarına göre elastik ivme spektrumu ve incelenen minarelerin talep değerleri.....	99

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Çizelge 1.1.</b> Doğal Yapı Taşlarının Ortalama Mekanik Özellikler (Çamlıbel 2000) .....	20
<b>Çizelge 1.2.</b> Küfeki taşının mekanik özellikleri (Coşkun ve Türk 2012) .....	20
<b>Çizelge 1.3.</b> Horasan harcının mekanik özellikleri (Canbaz ve ark. 2005) .....	23
<b>Çizelge 4.1.</b> KB12VD Piezoelektrik ivme ölçer teknik özellikleri.....	50
<b>Çizelge 6.1.</b> Minarelerin geometrik özellikleri .....	56
<b>Çizelge 7.1.</b> Bedrettin Cami minaresine ait frekans değerleri .....	72
<b>Çizelge 7.2.</b> Emir Sultan Cami minaresine ait frekans değerleri.....	75
<b>Çizelge 7.3.</b> Hacılar Cami minaresine ait frekans değerleri .....	77
<b>Çizelge 7.4.</b> Hoca Muslihiddin Cami minaresine ait frekans değerleri .....	80
<b>Çizelge 7.5.</b> Hoca Tabip Cami minaresine ait frekans değerleri .....	83
<b>Çizelge 7.6.</b> Hocaalızade Cami minaresine ait frekans değerleri .....	86
<b>Çizelge 7.7.</b> Kayhan Cami minaresine ait frekans değerleri.....	89
<b>Çizelge 7.8.</b> Minarelerin birinci modlarına ait kütle katılım oranları .....	90
<b>Çizelge 7.9.</b> Minarelerin ilk üç moduna ait toplam kütle katılım oranları.....	91
<b>Çizelge 7.10.</b> Emir Sultan Cami Minaresinde kaidenin yan taraflarından mesnetli ve mesnetsiz durumda elde edilen frekanslar .....	92
<b>Çizelge 7.11.</b> Minarelerin yükseklikleri ile ilk üç moda ait frekanslar.....	94
<b>Çizelge 7.12.</b> Kaide yüksekliği ile küp-gövde- petek yükseklikleri oranı .....	95
<b>Çizelge 7.13.</b> Minarelerin birinci modlarına ait periyotları .....	99

## 1. GİRİŞ

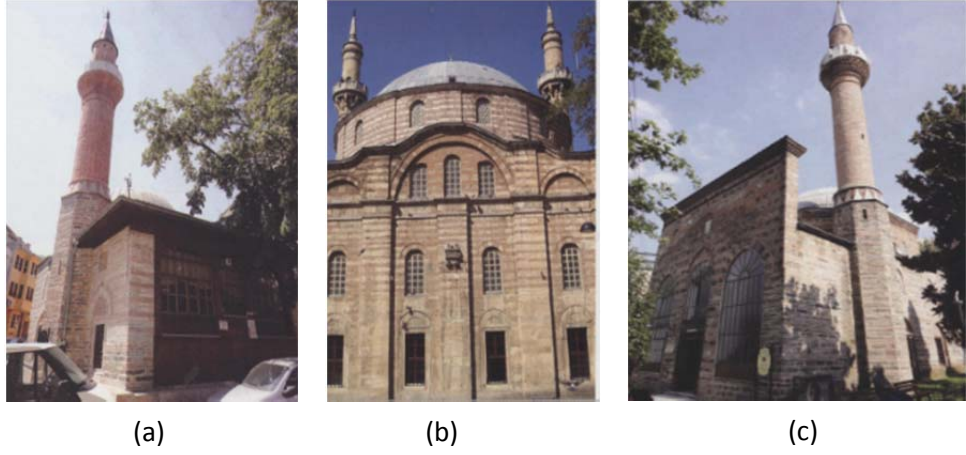
Bursa ve çevresi, çok eski yıllardan bu yana büyük kültürlerin beşiği olmuştur. Asya ile Avrupa arasında önemli bir jeopolitik nokta olması nedeniyle hem Asya, hem de Avrupa kültüründen etkilenen bu ilde Hitit, Lidya, Frigya, Roma, Bizans, Selçuklu kültürlerinin izlerine de rastlamak mümkündür. Yedi asıra yakın sürede Osmanlı İmparatorluğuna beşiklik etmiş Bursa'da elbette en belirgin izler bu imparatorluktan kalmıştır. Günümüzde bu hüviyetini halen koruyan Bursa ve çevresi yaşayan bir müze görünümündedir.

Bursa, Sultan Orhan Gazi devrinde, 1326 yılında Osmanlı hakimiyeti alındığında kent sadece hisar içinden ibaret idi. Ancak Osmanlılar Bursa'yı kuşatmaları esnasında uzun süren kuşatmalar nedeniyle şehir çevresinde mahalleler kurulmaya başlanmış bunlara ek olarak şehir alınmadan önce Orhan Gazi adına bir külliye dahi yaptırılmıştır. Kuruluş yıllarında devlete başkentlik yapmış ve her dönem İmparatorluk için büyük önem arz eden bu şehirde, surlar dışında mevcut yerleşmeye yakın, hâkim noktalarda cami, hamam, imarethane, darüşşifa, medrese gibi kamu yapıları inşa edilerek bu külliyelerin çevrelerinde konut alanları yaratılmış ve böylece bir yerleşme geleneği başlamıştır. Bu tarih itibariyle önemli kültürlerle beşiklik etmiş olan bu şehir, önemli ölçüde fetihle şekillenmiş ve halen izlerini görmenin mümkün olduğu bir merkez haline getirilmiştir.

Elbette bir islam medeniyeti olması hasebiyle İmparatorluğun Bursa'da yapılan anıtlar içinde en büyük önemi cami ve mescitlere verdiği kabul edilebilir. II. Murat da dahil olmak üzere ilk Osmanlı Sultanlarının eserlerinin büyük çoğunluğu Bursa'da yapılmıştır. Bu nedenle Osmanlıların ilk devirlerine özgü mescit ve cami yapımı Bursa'da gelişmiştir. Kanatlı veya "Ters T" planlı camiler olarak adlandırılan bu yapılar, adeta Bursa ile özdeşleşmiştir. Bu eserler zaman zaman meydana gelen yangın ve depremlerle büyük ölçüde zarar görmeye beraber, yapılan tamiratlarla varlıklarını günümüze kadar devam ettirmişlerdir.

Kültürel manada bugün dahi önemini koruyan bu eserler Bursa şehrine önemli bir hüviyet katmakta ve tüm dünyaca bir turizm kenti olma özelliğine sahip olmasına neden olmaktadır. Buradan hareketle önemli bir kültürel mirasa sahip kentin yüksek deprem riski ile karşı karşıya olması söz konusu yapılar hakkındaki çalışmaları önemli

kılmaktadır. Yüzyıllardır mevcudiyetlerini koruyabilen ve halen mevcut yükleri emniyetli bir şekilde taşıyarak ayakta kalabilmiş bu yapıların kuvvetli yer hareketi etkisinde nasıl davranacakları ise önemli bir soru işareti olarak karşımızda durmaktadır. Oysaki bu çalışmada konu edilen toplam yedi adet minare için 1855 Bursa depreminden sonra tecrübe edilmiş herhangi bir önemli kuvvetli yer hareketi bulunmamaktadır. Söz konusu depremde de her birinin hasar gördüğü, kiminin onarıldığı kiminin ise yeniden yapıldığı bilinmekteyken, mevcut durumda deprem davranışının belirlenmesinde en önemli parametre olan dinamik karakteristiklerinin tespiti önemli bir aşama olarak karşımızda durmaktadır.



**Şekil 1.1.** Bursa camilerinden örnekler a) Hoca Muslihiddin Cami b)Emir Sultan Cami c)Hacılar Cami

### 1.1. Minareler

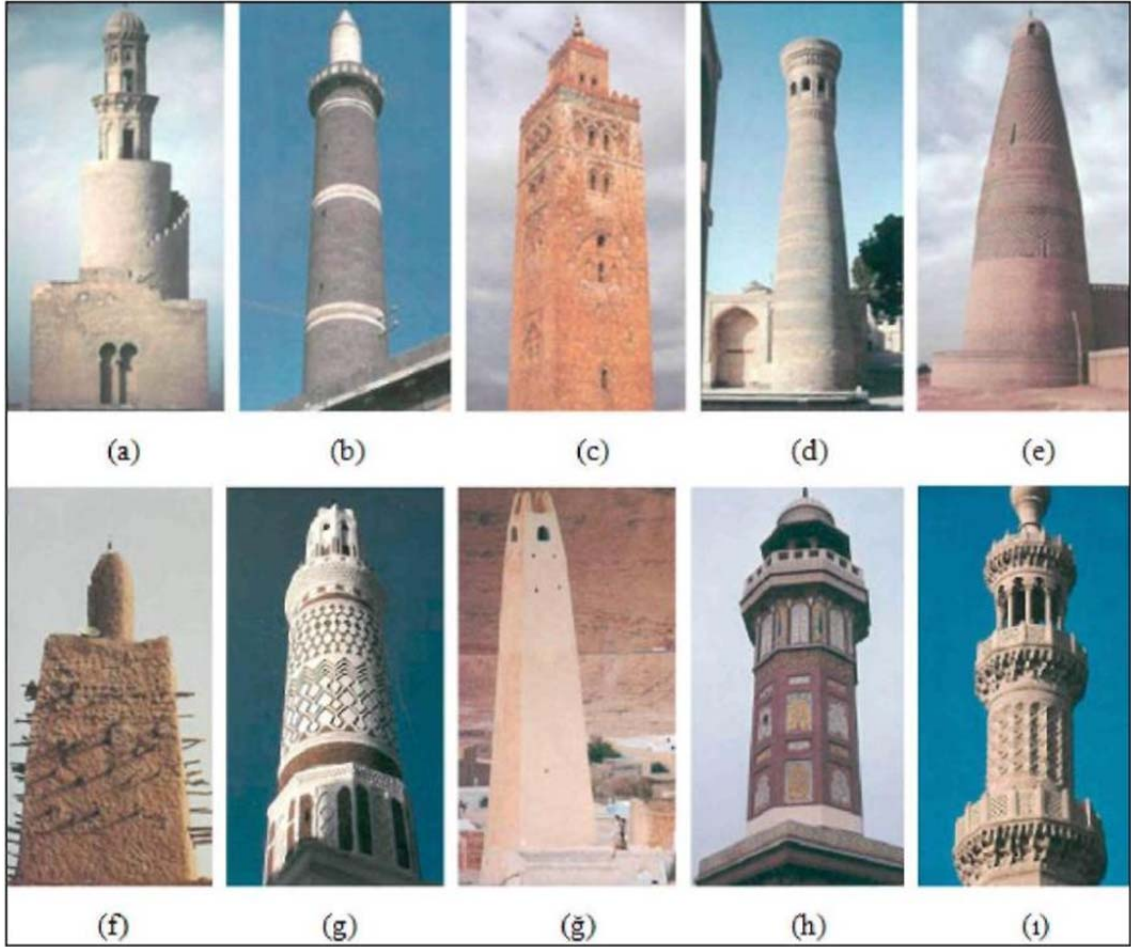
Minare, caminin ana unsurlarından biri, namaza davet olan ezanın okunduğu özel mimari bir formu olan mekândır (Sayar 1977). Ezan; Arapça bir fiil olan “Ezine” den türetilmiştir. Lügatte “bir şeyi bilmek” anlamına gelen bu fiilin “if al” babından mastarı olan “izan” kelimesi “nida edip bildirme” manasına gelmektedir. Günümüz Arapça lügat kitaplarında ezan, “Ezine” fiilinin mastarı olarak kullanılmakta ve “namaza çağrı” manasında bir isim olarak kabul edilmektedir. Ezan İslam’ın ilk zamanlarında Medine’de Hz. Peygamberin evinin damında kibleye dönülerek ve en yüksek yapının çatısına çıkılarak okunmakta iken, daha sonraki dönemlerde minareye çıkılarak okunmaya başlamıştır (Güleç 2006). Camilerin bitişiğinde veya camiden ayrı olarak inşa edilmiş ezan okumak ve bunu civara duyurmak için, yüksek bir kule şeklinde

yapılan bir veya birden fazla şerefesi bulunan minareler, günümüze kadar hemen her dini yapının önemli bir elemanı olarak inşa edilmiştir. Dini mimaride önemli bir unsur haline gelen minare, islam ülkelerinde şehirlerin merkezini oluşturan, cami ve mescitlerin en karakteristik unsuru haline gelmiştir. Buna ek olarak başlangıçtaki amacına ek olarak islam medeniyetleri bu yapı sistemine simgesel bir değer atfederek gelişmişliğin, kültürün ve gücün bir simgesi olarak mimaride ön plana çıkartılan bir unsur olmuşlardır. Bu yapı tarzı camilerde olduğu gibi diğer birçok simgesel öneme sahip tarihi yapılarda da kullanılmıştır. Bunun en güzel örneklerinden biri Sivas Çifte Minareli Medresesidir ki bu tür örneklere birçok tarihi yapıda rastlamak mümkündür.

Minarenin ilk örneği Kahire’de Amr Cami’inde görülmektedir. Amr Camiinden sonra inşa edilen camilerde birer minare yapılması gelenek olmuştur. Minare; “Munar” kamus’ ta çırakman manasındadır. Buna evvelce ezan okunan yer manasında mi-zene denilmiş olup daha sonraları menare denilmiştir. Minarenin kelime anlamı ile ilgili olarak araştırmacılar değişik yorumlarda bulunmuşlardır. Kelimenin aslı Arapça olup, ateş anlamına gelen “Nur’dan türetilmiştir. Minare kelimesi “Nar” veya “Nur” kelimelerinden türemiş olup, hem, “üzerinde ezan okunan yer”, hem de “Üzerinde ateş yanan yer” anlamına gelmektedir. Seyyid Hüseyin Nasr’a göre “Nur” kelimesinden türeyen minare isminin, ezan okunan yerlere verilmesi, bu kelimenin İslam dininde sahip olduğu önemiyle açıklanmalıdır (Güleç 2006).

Bu yapı tarzının ilk örneklerinin yapımında, akdeniz ülkelerindeki deniz fenerleri, Suriye’de gözetleme kuleleri ile kilise kulelerinden etkilenildiği, bu şekilde gerçekleştirilen minarelerin ilk formlarının söz konusu yapılara benzer özellikler taşıdığı bilinmektedir. Bu nedenle meydana gelen yapı formlarının oldukça büyük alanlar işgal etmesi, bugün dahi Tunus, Fas, Cezayir, Mısır ve Suriye’de görülen dört veya çok köşeli minareler kültürünün ortaya çıkmasına neden olmuş, ezan okuma işlevi yanında konut olarak da kullanılmalarına neden olmuştur. Bu işlevleri nedeni ile bu tip minareler ağır, alçak ve birbirine benzemeyen tekil kule yapıları görünümü almıştır. Bu tip minarelere mağrip (batı) minareleri denir.

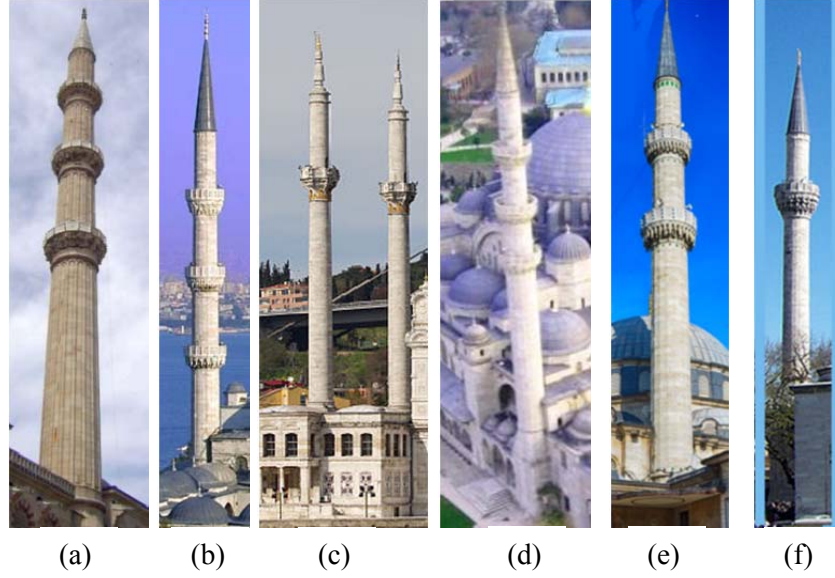
İran, Irak ve Anadolu’daki minareler bölgeleri itibari ile doğu minareleri grubunu oluştururlar. Bu grup minareler yalnız ezan okuma işlevi için yapılmıştır (Ertek ve Fahjan 2007). Şekil 1.2’de farklı bölgelerde inşa edilmiş minare örnekleri gösterilmiştir.



**Şekil 1.2.** Bazı Minare Örnekleri: (a) Cairo, Ahmad İbn Tulun Cami (Tulunid Devri, 876-9), (b) Diyarbakır, Türkiye, Ayni Cami (Osmanlı Devri, 1489), (c). Marrakesh, Morocco, Kutubiyya Cami (Almohad Devri, 12. yüzyıl), (d). Buhara, Özbekistan, Kalyan Cami (1514), (e). Turfan, Xinjiang Şehri, Kuzey Çin, Amin Cami, (1778), (f). Timbukte, Mali, DjinguereBer Cami (Songhay Devri, 14. yüzyıl), (g). San'a Yemen, Al-Bakiriyya Cami (Osmanlı Devri, 1598), (ğ). Beni-Isguen, Algeria, Mzab Saharan Köyü Cami, (h). Lahore, Pakistan, Wazir Khan Cami (Mughal Devri, 1634), (ı). Cairo, Amir Qurqumas Cami (Memlük zamanı sonrası, 1506) (Frishman ve Khan 1994).

Özellikle Osmanlı döneminde inşa edilen yapılara ait minareler, cami kubbeleriyle birlikte farklı ve ahenkli bir üslupla İslam şehri silüetini anlamlandırmada en önemli ifade şekli olmuştur. Osmanlı mimarisinde; Anadolu Selçuklu minare kültürünün daha sade, zarif ve mükemmel bir forma intikal ederek devam ettiği görülmektedir. Osmanlı devri minareleri, tezyinat itibarıyla sadeleşmesine rağmen, bağlı buldukları Cami binasının dış güzelliğinin tamamlayıcı unsuru olmuştur. Osmanlı minareye, cami mimari kompozisyonu içinde önemli bir yer vermiştir. Osmanlı döneminde minare en güzel ve uyumlu şeklini XVI. asırda Mimar Sinan zamanında yakalamıştır (Güleç

2006). Osmanlı döneminde inşa edilen ve günümüze kadar ulaşmış camilerin minarelerinden öne çıkanları Şekil 1.3’de gösterilmiştir.



**Şekil 1.3.** Osmanlı dönemi minare örnekleri: a)Selimiye Cami Minaresi b) Sultanahmet Cami Minaresi c) Büyükmeceidiye Cami Minaresi d)Süleymaniye Cami Minaresi e)Eyüp Sultan Cami Minaresi f) Beyazıt Cami Minaresi

Bursada yer alan minareler incelendiğinde minarelerin birçoğunun 1855 depreminde yıkıldığı ve daha sonra yeniden inşa edildiği bilgisi eserlere ait kitabelerden ve yazılı kaynaklardan anlaşılmaktadır. Depremden zarar gören minarelerin aynı türde hasar görmesinin önüne geçilmesi için tamiratı veya rekonstrüksiyonu yapılan minarelerin boy/gövde çapı oranının daha küçük ve kısa olduğu görülmüştür. Bursa genelindeki minarelerin çoğunda bu özellik göze çarpmaktadır. Bursadaki bazı minare örnekleri Şekil 1.4’de gösterilmiştir.





(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



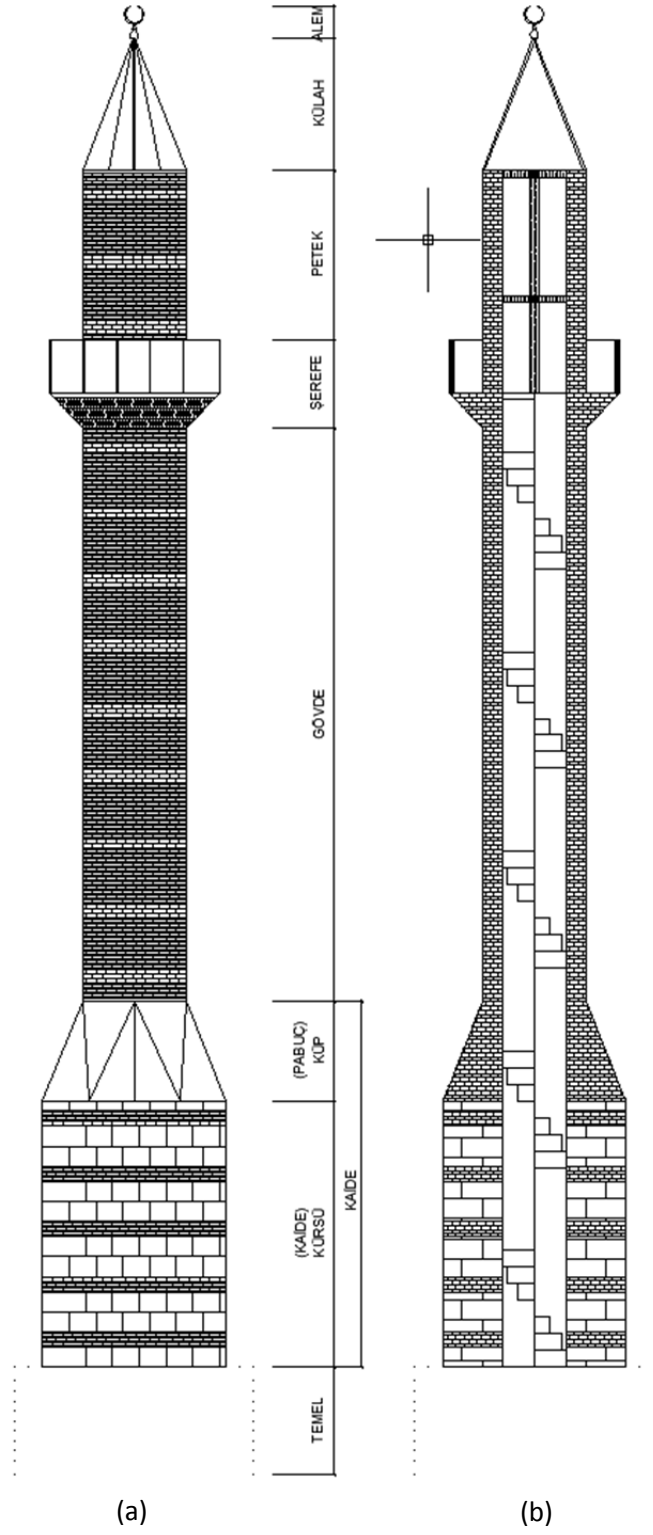
(f)

**Şekil 1.4.** Bursa minare örnekleri: **(a)** Emir Sultan Cami **(b)** Hacılar Cami **(c)** Hoca Muslihiddin Cami **(d)** Hoca Tabip Cami **(e)** Hocaalizade Cami **(f)** Kayhan Cami

### 1.1.1 Minare bölümleri

Yapısal manada birçok yapı tarzından farklı özelliklere sahip olan minareler oldukça farklı karakteristik yapısal özelliklere sahiptir. Bu bakımdan minareler farklı yapısal işlev ve mimari özellikleri bakımından; âlem, külah, petek, şerefe, gövde, merdiven, küp (pabuç), kaide (kürsü), temel olmak üzere dokuz ana bölüme ayrılabilir. Bu bölümlerin gösterildiği tipik bir Osmanlı ve/veya Selçuklu Minare bölümleri Şekil 1.5’de gösterilmiştir.





Şekil 1.5. Minare bölümleri; a) Görünüş b) Düşey kesit

➤ **Alem:** Arapçada bir şeyi tanıtmak için kullanılan işaret, alamet ve bayrak demektir. Bayrakların, minare ve kubbelerin tepelerine takılan Ay'a (Hilal) benzeyen bu süslemenin menşei eski Türklerin ve hattâ başka milletlerin, kuvvet remzi olarak kullandıkları boynuzdan gelmektedir. Alemler, madeni, taştan veya seramikten yapılabilmektedir. Bunun yanında, binaya nisbetle büyük ölçüde olanlar ise umumiyetle bakırdan altın yaldızlıdır. Alemin kullanılmasında başlıca üç sebep vardır:

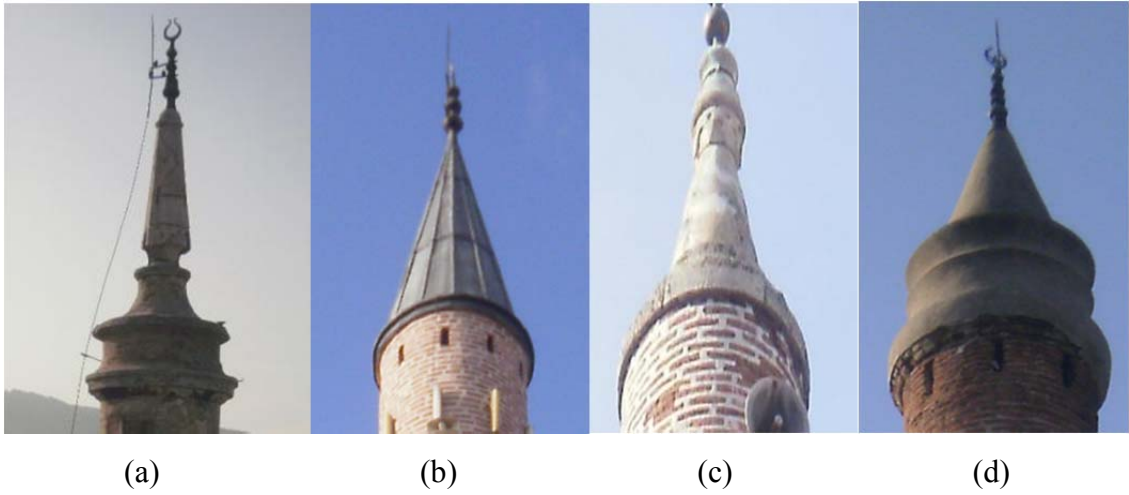
Bunlardan ilki yapısal gerekliliktir. Kubbelerin üstüne kaplanan kurşunların tepede birleştikleri yerde açıklığı bir örtü ile örtmek ve buralardan rüzgâr ve yağmurun girerek kurşunları kaldırmaması için kapak gibi ağırca bir şey ile söz konusu mekanın kaptılması ihtiyacı bulunmaktadır. Diğer bir önemli unsur ise estetikdir ki, kişinin dikkatini tepede tutarak oradan alemin şakuli çizgisini takip etmek suretiyle semaya doğru çekmek ve buradan hareketle kubbeye bir yükseliş tesiri vermek amaçlanmaktadır. Diğer taraftan bu alamet minareleri olduğundan daha yüksek göstermeye yaramaktadır. Bir diğer önemli ve bir okadar tesirli etmen ise gelenek ve görenek tesiridir. Eski Türkler çadır ve binaların tepesine gerek tezyini mahiyette ve gerekse kötü ruhlara ve nazara karşı bir tılsım olarak bir sırığa geçirilmiş yuvarlaklar şeklinde tepelikler koyarlardı ki bunlara moncuk veya boncuk denirdi. Bu geleneğe diğer sebeplerde eklenerek alemlerin bugüne kadar kullanılmasına ve mimaride mühim bir unsur haline gelmesine sebep olduğu literatürde ifade edilmektedir (Güleç 2006).



**Şekil 1.6.** Minarelerin tezyinatında kullanılan alem formları

➤ **Külâh:** Peteğin üzerini örten ve minareyi üst noktadan kapatan kısımdır. Minarelerde külâh; taştan, tuğladan veya ahşap karkas üzerine kurşun kaplanarak oluşturulmaktadır. Yapımlarında taş veya tuğlada kullanılabilen külâhların özellikle petek duvarı ile bağlantısının iyi kurulmadığı durumlarda, yatay yükler etkisi nedeniyle

göçme riskleri de artmaktadır. Bu olumsuz durumun önüne geçilebilmesi için tasarımcılar veya yapım ustaları estetiği de koruyarak daha hafif ve bağlantının daha kolay yapılabilirdiği ahşap karkas sistem üzerine kurşun kaplama yöntemine yönelmişlerdir. Bu sayede kaplama olarak kullanılan bu malzeme, yapısal olarak diğer malzemelere göre önemli ölçüde küçük bir düşey yük doğururken, yalıtım da önemli ölçüde sağlanmış olmaktadır.



**Şekil 1.7.** Külâh örnekleri: (a) Emir Sultan Cami (b) Hoca Muslihiddin Cami (c) Hoca Tabip Cami (d) Hocaalizde Cami

➤ **Petek:** Minarenin külâhla şerefe arasında kalan kısmıdır. İç çapı gövde ile aynı olanlar olduğu gibi gövdeden daha küçük iç çapı olanlara da rastlanmaktadır. Duvar kalınlığı genellikle gövde duvar kalınlığından daha düşüktür. Gövdeden gelen merdiven şerefe seviyesinde sonlandığından petek duvarı boyunca duvarları birbirine bağlayan elemanlara ihtiyaç duyulmuştur. Peteğin bir bütün olarak çalışmasını sağlamak için petek içerisinde düşeyde şerefe zemininden başlamak üzere ahşap dikme ve bu ahşaba bağlı yatayda ahşap bağlantı elemanları kullanılmaktadır. Yataydaki ahşaplar her iki yönde uygulanmakta ve duvar içlerine sabitlenmektedirler. Düşey eleman ise genellikle külâh alt seviyesinde sonlandırılmaktadır. Bu uygulamayla Peteğin, rüzgar ve deprem gibi nedenlerle ortaya çıkabilecek yatay yüklere karşı davranışının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Şekil 1.8’de petek içindeki ahşap taşıyıcılara örnekler verilmektedir.



**Şekil 1.8.** Petek içi ahşap elemanlar

➤ **Şerefe:** Arapça “surfa” ve “surafa” dan gelen çıkıntılı yer, burç” anlamına gelen bu kelime, müezzinin rahatça, dolaşarak ezan okumasını sağlayan yer anlamına gelen minare elemanı için kullanılmıştır. Minarenin yapılma gayesi olan, halkı namaza çağırarak ezanın okunduğu, gövdeyi belli yüksekliklerde çepeçevre dolanan, çıkma şeklindeki elemandır. Ezanın, uzak yerlere duyulmasını sağlamak için, dönerek okunması gerektiğinden üzerlerinde şerefeler yapılmıştır. Şerefe sayısı bir-üç arasında değişmekte olup kapıları kible yönüne açılmaktadır. Şerefeler üç kısımdan oluşur; taban kısmını taşıyan, gövdeye bağlayan taşmalar, müezzinin üzerinde dolaştığı taban ve tabanın etrafını çeviren kagir veya ahşap korkuluk üç temel yapısal unsurdur.

Taban genellikle çekirdekten dışa doğru genişleyen, dilimli tek parçalı ve taştan yapılan bir elemandır. Şerefenin taşıma payı, gövdeyle orantısına bağlı olup, kullanılan malzeme ile de ilişkilidir. Bu bağ çıkımların biçimini de etkiler (profilli, mukarnaslı, testere dişli vb.). Şerefe korkulukları taş veya mermer olup, şebekelerle zenginleştirilirler (Güleç 2006). Farklı şerefe tiplerine ait örnekler Şekil 1.9’da gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Şekil 1.9.** Şerefe örnekleri: (a) Emir Sultan Cami (b) Hoca Muslihiddin Cami (c) Hocalizade Cami (d) Hacılar Cami

➤ **Gövde:** Minarenin küp ile şerefe arasında kalan bölümüdür. Genellikle silindirik olan gövde taş veya tuğla ile oluşturulur. İçerisinde helezonik biçimde yukarıya yükselen merdiven taşları aynı zamanda gövde duvarının oluşumuna da katılırlar. Duvar örgü sistemi düşeyde derzlerin şaşırılması suretiyle oluşturulur. Minarenin içinin havalandırılması ve aydınlatma amacıyla gövde boyunca belirli aralıklarla pencereler açılarak bu işlevler minareye kazandırılmaktadır. Çoğunlukla gövde boyunca çap sabit olup üzerlerinde dönemlerini yansıtan süslemeleri de görmek mümkün olabilmektedir.

Anadolu Selçuklularından beri onaltıgen şeklinde yapılan gövdeler, daha sonraları silindirik gövdelere dönüştürülmüştür. Fakat Fatih devrinden itibaren yine 16 yüzlü



gövdelerin kullanımını artmıştır. Önceleri çapı gittikçe azalan gövdeler kullanılırken daha sonra sabit bir şekilde yükselen gövdeler kullanılmaya başlamıştır (Temuz 2007).

➤ **Merdiven:** Merdiven kaideden başlayarak şerefe zeminine kadar helezonik biçimde uzanan birimdir. Mimari olarak şerefeye çıkmakta araç olarak kullanılsa da yapının özellikle yatay yüklere karşı dayanımında önemli bir görev üstlenmektedir. Dairesel kesitli gövdede her sırada bir basamak taşı kullanılarak, minarenin yatay yüklere karşı rijitliği önemli oranda arttırılmaktadır.

Basamak yükseklikleri genellikle 25-30 cm arasında olup, genişliği ve uzunluğu gövde çapına bağlı olarak değişebilmektedir. Basamak taşının geniş olan kısmı gövdede “kur” diye adlandırılan bir sırayı tamamlarken, dar kısmı gövdenin ortasında birleşerek şerefeye kadar üstü üste gelecek şekilde yükselir. Minarede kullanılan malzemenin cinsine göre basamaklarda taş veya tuğla olabilir. Şekil 1.10’da merdiven basamaklarının farklı açılardan görünüşlerine ilişkin fotoğraflar verilemektedir.



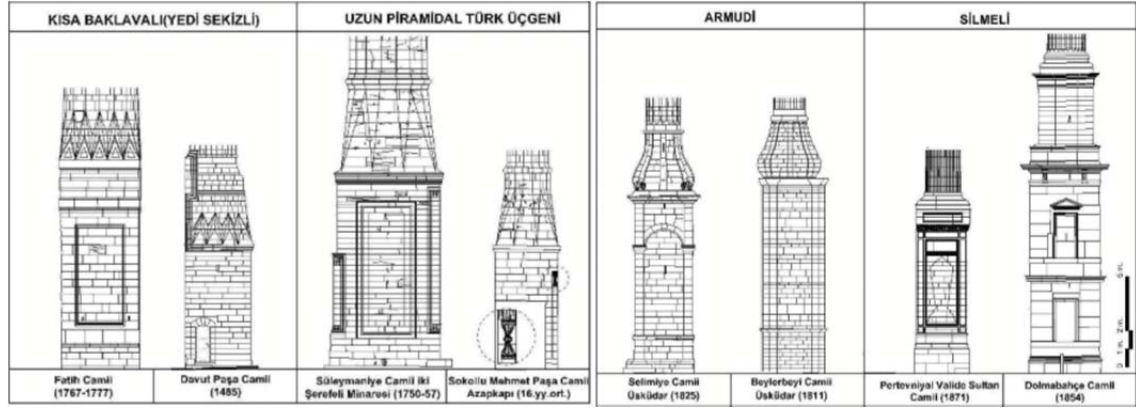
**Şekil 1.10.** Merdiven basamaklarına ait görünümler

➤ **Küp-(Pabuç):** Mimari ve yapısal anlamda minarenin en önemli kısmını oluşturmaktadır. Kaidenin kare veya geniş satırlı poligonal planından, minare gövdesinin daha dar çaplı yuvarlak planına geçiş ancak bu pabuç kısmında meydana

getirilecek geçiş birimleri ile mümkün olabilmektedir. Pabuç, kaideden gövdeye yumuşak bir geçiş sağlar. Pabuç, pahlı (düz, profilli ve mukarnaslı), dışbükey aslan göğüslü, üçgenli (üçgen piramit), türleri yanında bazen kare, çokgen, formlarda karşımıza çıkabilmektedir (Şekil 1.11, Şekil 1.12). Silindirik ve basık soğan formunda pabuçlara azda olsa rastlanmaktadır. Malzeme olarak taş veya tuğla kullanılmakta olup taş-tuğla almasıyla az rastlanmaktadır. Karahanlı, Gazneli ve Büyük Selçuklu minarelerinde, kaidenin gövde ile aynı ölçü ve geometride olması, pabuç bölümlerini ortadan kaldırır. Anadolu Selçuklu minarelerinde ise gövdenin kaideye nazaran daha ince yapılması bu bölümü zorunlu kılmaktadır. Osmanlı minarelerinde pabuç kısmı, Selçuklu minarelerine göre daha uzun ve zarif tutulmuştur. Bazı kaynaklarda bu bölüm küp olarak da adlandırılmaktadır (Temüz 2007). Bu çalışma kapsamında da bu bölüm küp olarak adlandırılmaktadır.



**Şekil 1.11.** Küp (Pabuç) örnekleri: (a) Bedrettin Cami (b) Emir Sultan Cami (c) Hoca Naip Cami (d) Kayhan Cami



**Şekil 1.12.** Farklı küp örneklerine ait çizimler (Kuşüzümü ve Tokay 2011)

Kaideden gövdeye geçişte oluşturulan küp bölümü rüzgâr ve deprem gibi yanal etkiler nedeniyle minarelerde en fazla hasar gözlemlenen minare yapısal bölümüdür. Bu bölümde alttan üste doğru kesitteki daralma ve yük etkilerinin daha fazla olması nedeniyle gerilme yığılmaları ve sonucunda da hasar oluşmaktadır. Farklı geometrik özellikteki küp örneklerine ait görseller Şekil 1.11 ve 1.12’de görülmektedir.

➤ **Kürsü-(Kaide):** Temel ile pabuç arasında bulunan minarenin en alt bölümüdür. Kare, çokgen, altıgen, sekizgen, ongen şeklinde olanları vardır. Çok azı silindirik formdadır. Bunlar genelde en erken örneklerdir. Diğer bölümlerden geniş olması teknik bir zorunluluktur. Çoğunlukla taş (inceyonu, sıralı moloz) veya taş-tuğla almaşık örgülüdür. Almaşık sisteme en güzel örneklerden biri Şekil 1.13b’de görülmektedir.

Minare yapıdan ayrı, bitişik, harim ya da diğer bir ifadeyle beden duvarıyla ortak (az veya çok taşkın) kitleye bağlı bir konumda, taçkapı yanı, üstü veya kitlenin damında olabilir. Minareye girişi dışardan, içerden, biraz yüksekten (dam vb.) mahfilden verildiği örnekler vardır. Girişin yönünü kitleye olan bağlantısı belirler (Harim, son cemaat yeri veya kitle cephesi). Minare girişine özen gösterilir. Kapı lentoları düz veya yuvarlak kemerlidir. Minare kitabeleri çoğunlukla kaidede bulunmaktadır (Güleç 2006). Bazı kaynaklarda bu bölüm kürsü olarak, küp ile kürsünün tamamı ise kaide olarak adlandırılmaktadır (Temüz 2007). Dikdörtgen, kare, altıgen ve sekizgen geometrilere sahip kaide örnekleri Şekil 1.13’de gösterilmiştir.





**Şekil 1.13.** Kaide örnekleri: (a) Kayhan Cami (b) Bedrettin Cami (c) Emir Sultan Cami (d) Hoca Naip Cami

➤ **Temel:** Temeller, toprak altında kalan ve kaideden gelen düşey ve yatay yükleri güvenli bir şekilde zemine aktarması gereken yapı elemanlarıdır. Temel boyutları ve malzemesi, minare boyutlarına ve zemin özelliklerine göre farklılıklar göstermektedir. İnceleme konusu minareler için temel türüne bağlı olarak herhangi bir etki ve/veya hasar gözlemlenmemiş olmakla birlikte, yapılan literatür taramasında da bu tür yapıların temele bağlı olarak hasar gördükleri pek rastlanan bir durum değildir. Bazı bölgelerde lokal oturmalara bağlı olarak yapısal bozulmalar az da olsa rastlanan bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak genel manada bu tür yapıların inşa teknikleri düşünüldüğünde temele bağlı hasarlar oldukça nadiren karşılaşılan bir husustur.

### 1.1.2. Minare inşa teknikleri

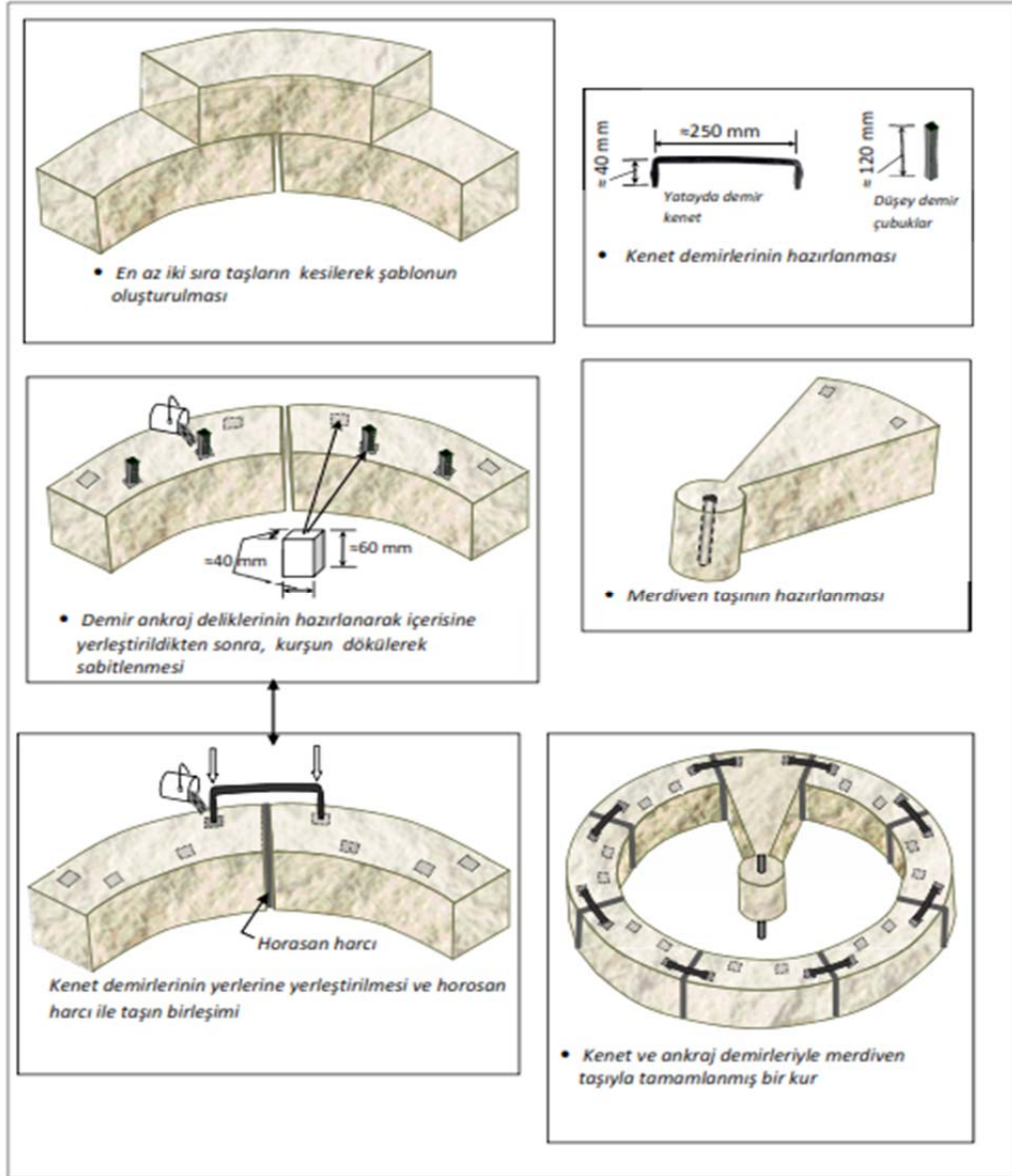
Minare yapısı mimaride ayrı bir ihtisas yapmayı gerektirir. Her taşın kendi yerine göre traş edilmesi ve minarenin içinde merdiven basamaklarının ortasına gelen bir mihrap etrafında taşların birbirine uyması ve kenetlenmesi önemli bir inşa meselesidir. Minare, pek çok iş kaleminin bir araya gelmesiyle oluşan ve çok özelleşmiş yapım yöntemlerinin kullanıldığı bir yapıdır. Tipik bir minarede taş işçiliği (ki buna mukarnas yapımı, şebeke yapımı, küp veya yedi-sekiz yapımı gibi maharet gerektiren taş işçiliği de dahildir), ahşap işçiliği, kurşun işçiliği, alem için bakır işçiliği ve sıcak demir işçiliği bulunur. Cami inşaatı henüz erken safhalarındayken, minare ya da minarelerin inşaatına başlanır; çünkü caminin beden duvarları yükseldikçe, minare merdivenleri kullanılarak kolaylıkla üst seviyelere insan ve malzeme çıkartılabilir.

Minare inşasında bir kur içerisinde kullanılan basamak taşları ile merdivenler oluşturulurken çekirdeğe de biçim verilmektedir. Merdivenler gövdenin içine helezonik şekilde, basamaklar ise bir merkez etrafında dolaşarak yerleştirilmektedir. Basamaklar minarenin şerefe tabanına kadar yükselerek, burada gövdenin tam merkezine gelecek şekilde çoğunlukla ahşap bir direk yerleştirilerek bunun tepesine külah oturtulmaktadır. Bir örgü bütünlüğü sağlaması açısından, basamakları birbirine ve gövdeye bağlamaya yarayan çekirdek, çoğu örnekte silindirik formdadır. Tuğla basamaklı merdivenlerde, basamağın üst kısmında yer alan ahşap, çekirdek ve gömleğe uzanarak bağlantıyı güçlendirirken, gövdenin içine girmesiyle rijitliği ve taşıma gücünü artırır.

Minare basamaklarının etrafını dolanan, duvarın kalınlığı değişken olup, minarenin iç çapı bütün uzunluk boyunca sabittir. 16. yy'ın başlarında, 1509 yılındaki büyük depremden sonra, Osmanlı, depreme dayanıklı, büyük minare yapımına girişmiş ve geleneksel sıva yapımı yerine, esas olarak dikey ve yatay yönde taş kümesi ile işlenmiş demir bağlantılarını birleştiren özel bir sağlamlaştırma metodunu kullanmaya başlamışlardır. Bu tür tekniklere ait görseller inceleme konusu minareler içinde Emir Sultan Camii için elde edilmiştir (Şekil 1.14). Duvar ve minarelerde gereken sağlamlığı temin için, taşlar birbirine demir kenetlerle bağlanmıştır. Demir kenedin eğri uçlarının taşın içinde sağlam bir şekilde tutunabilmesi için de, sokulmuş oldukları oyuklar kurşun dökülerek doldurulmuştur. Şekil 1.15'de merdivenin inşası, kenetlerin kullanımı ve kurşun dökülmesinin sistematiği gösterilmektedir (Doğangün ve ark. 2006).



**Şekil 1.14.** Yatayda kullanılan kenet demirleri (Emir Sultan Cami)



**Şekil 1.15.** Minare bir “kur”u için inşaa tekniği (Doğangün ve ark. 2006)

Minare inşasında dikey yöndeki taş blokları arasında bulunan elemanları birleştirmek için kenetler / kümeler, kullanılmaktadır. Kenetler/ kümeler II. Beyazid döneminden önce sıkça kullanılmıştır. Özellikle Mimar Sinan onları etkin şekilde 16. YY’da kullanmış ve döneminin en yüksek seviyelerine ulaştırmıştır. Osmanlılar taşları birleştirmek için sadece “U” tipi mengenerler kullanmıştır. Mengenerlerin uzunlukları 17-55 mm olarak değişmektedir. Taşları birleştirmede kullanılan diğer bir eleman kol demirleridir. Kol demirleri Türkçede orijinal olarak zıvana diye bilinmektedir. Zıvanalar taş blokları dikey şekilde birleştirmek için kullanılır. Zıvanalar şekil ve ölçü yönünden

çok fazla değişmezler. Hemen hemen 0,12 m. uzunluktadırlar ve her iki yanları ön dolgular ile daha iyi yapıştırma sağlamak için genişletilirler (Güleç 2006).

Minarelerde şerefe tabanı, rahatça yürünebilecek şekilde, gövde çapından daha geniş olarak inşa edilirler. İnşa sırasında şerefenin 1-1,5 m altından başlamak üzere gövdeden şerefe tabanına kadar kademeli olarak genişleyen ve konsol gibi çalışan tabanı destekleyen kısım oluşturulur. Şerefenin stabilitesi için oluşturulan bu kısım süsleme teknikleri ile görsel anlamda da minareye katkı sağlar. Şerefe korkulukları yükün dengelenmesini sağlamak amacıyla petek inşası tamamlandıktan sonra oluşturulmaktadır.

### **1.1.3. Tarihi minarelerin yapımında kullanılan malzemeler**

Malzeme seçimi genelde her yapının işlev, tasarım ve yapım tekniği, yapım ve kullanım süresi gibi açılardan özel olmasına, karar vericilerin değişkenliğine, karardaki etkinliklerine, amaçlarına, çevre koşullarına, malzeme bilgisi birikimine, ekonomik ve teknolojik olanaklar gibi birçok farklı etmene bağlıdır. Bu seçimde kullanılan birtakım ölçütler ise bulunabilme, nakliye ve işçilik kolaylığı, dış etkenlere dayanım gibi zaman boyutunun dışında kalmış, başka bir ifade ile daima öncelikli ölçütler olmuştur. Diğer taraftan "imar ve inşa" işlerinin toplumların zenginliği ve yoksulluğu, devletin kurumsallaşması, gelişmişliği, kültür ve sanat düzeyi ile ilişkili olduğu bilinmektedir. Tüm bu olgular ise yapı kalitesinin, özelliğini, sayısını, büyüklüğünü etkilemektedir (Arioğlu ve Arioğlu 1997). Genellikle, minare hangi ülkede inşa edilmiş ise, o ülkede çok bulunan malzemenin "minare malzemesi" olarak kullanıldığı görülmektedir. İspanya'da minarelerin taştan; Kuzey Afrika'da tuğladan; Kahire'de taştan; Arabistan, Suriye, Anadolu ve Elcezi-re'de taş veya tuğladan; Irak, İran ve Afganistan'da tuğladan ve Hindistan'da taş ve tuğladan minareler inşa edilmiştir (Ertek ve Fahjan 2007).

Önemli bir kültürel birikime sahip Anadolu coğrafyası bilindiği üzere çok farklı medeniyetlere beşiklik etmiş bir coğrafyadır. Yukarıda adı geçen coğrafyalardan dönem içerisinde birçok halk Anadolu'ya göç edip yerleştikleri gibi tarih içerisinde diğer bölgelerden de göçler olmuştur. Dolayısıyla böylesine önemli kültürlerin kesişme noktası haline gelen bir coğrafyanın hemen tüm tekniklerin yoğrulduğu ve geliştirildiği bir yer olması da kaçınılmazdır. Büyük ölçüde yapı malzemesi olarak bilinen hemen her

malzemin de rahatlıkla temin edilebiliyor olması söz konusu tekniklerin kullanımına ve geliştirilmesine bu coğrafyada olanak sağlamıştır. Buradan hareketle söz konusu malzemelerden en yaygın olarak kullanılan taş ve tuğla gibi malzemeler ile bağlayıcı olarak kullanılan malzemelere ilişkin açıklamalar takip eden başlıklarda özetlenmektedir.

### **1.1.3.1. Taşıyıcı olarak kullanılan malzemeler**

#### **➤ Doğal taş**

İnsanoğlu çok eski zamanlardan bugüne değin taşı değişik amaçlar için kullanmışlardır. Betonun ve çeliğin bir arada kullanımının yaygınlaşmasından önce ihtiyaç duyulan yapıların inşasında taş ana yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Taşın doğada doğal olarak bulunması, kolay temini ve işlenebilirliği yapılarda kullanımını yaygınlaştırmıştır. Ayrıca mazlemenin dış etkenlere karşı dayanımı yüksek olduğundan bu tür yapıların ömürleri oldukça uzun olabilmektedir. Ancak; kullanıldıkları yapıların ağırlıklarının fazla olması, yapıya etkiyen deprem yükünü de artırmaktadır. Her ne kadar malzeme olarak dayanıklı olduğundan söz etmek uygun olsa da, yapı taşıyıcılarının teşkilinde kullanımlarında uygun birleşimler sağlanamaz ise yatay yüklere karşı istenen performans elde edilememektedir.

Doğal taşlar, kaynaklarına göre farklı mekanik özellikler gösterebilirler. Damarlı olması, boşluklu olması, içeriğindeki maddeler mekanik özelliklerini etkilerler. Taşların genel olarak basınç dayanımları yüksek çekme dayanımları ise düşüktür. Bu özelliklerinden dolayı yatayda büyük açıklıkların geçilmesinde kemer kubbe veya tonoz gibi özel formlar kullanılmaktadır. Bu sistemlerde, taşın basınç mukavemetinden yararlanılarak basınç gerilmelerinin düşey taşıyıcılara aktarılması suretiyle söz konusu açıklıklar geçilebilmektedir.

Basınç altında bazı taşların deformasyonu, betonla benzer özellikler gösterir. Betonun elastisite modülü  $E = (14\sim30) \times 10^3$  MPa iken, granitin elastisite modülü  $E = (15\sim70) \times 10^3$  MPa mertebesindedir. Elastisite modülünün bilinmesi, taşıyıcı elemanın yüklenmesi sonucu yaptığı sehim hesabı için gereklidir (Çamlıbel 2000). Yapı taşı olarak kullanılan bazı kayaçlar için ortalama mekanik özellikler Çizelge 1.1' de sunulmaktadır. Daha

önce de ifade edildiği üzere burada verilen değerler kayacın boşluk oranı, damarların gelişimine vb. gibi birçok faktöre göre önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Bu nedenle değerler ortalama olarak ifade edilmektedir.

**Çizelge 1.1.** Doğal Yapı Taşlarının Ortalama Mekanik Özellikler (Çamlıbel 2000)

Taşın Cinsi	Basınç Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
<b>Granit</b>	30-70	14-33	4-7	15000-70000
<b>Mermer</b>	25-65	9-45	1-15	25000-70000
<b>Kireç taşı</b>	18-65	6-20	2-6	10000-55000
<b>Kumtaşı</b>	5-30	2-10	2-4	13000-50000
<b>Kuvars</b>	10-30	3-10	3-4	15000-55000
<b>Serpantin</b>	7-30	2-10	6-11	23000-45000

Coşkun ve Türk (2012) Tarihi minarelerin dinamik davranışlarının belirlenmesine yönelik yaptıkları çalışmada, küfeki taşının mekanik özelliklerini belirtmişlerdir. En önemli özelliği doğadan çıktığı anda her türlü işleme uygun olması ve kolay işlenebilirliği yüksek olan bu yapı taşı, asıl itibarıyla bir tür kireç taşıdır (kalker) ve havayla temastan sonra havadaki karbon dioksiti bünyesine alarak sertlik, dayanıklılık ve güç kazanmaktadır. Buna göre küfeki taşının mekanik özellikleri ise Çizelge 1.2’ de gösterilmiştir.

**Çizelge 1.2.** Küfeki taşının mekanik özellikleri (Coşkun ve Türk 2012)

Yoğunluk değil birim ağırlık, Mpa değil MPa

Fiziksel özellikler	Maks.	Min.	Ortalama
Yoğunluk (kuru, kN/m <sup>3</sup> )	25,0	22,8	23,9
Yoğunluk (suya doygun, kN/m <sup>3</sup> )	25,3	23,7	24,5
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	19,2	12,3	16,7
Tek eksenli çekme dayanımı (Mpa)	0,95	0,88	0,9
Elastisite modulu (Gpa)	7,36	4,30	5,84

Uygulamada mümkün olduğunca taşın çekme gerilmesine maruz kalmaması için önlemler alınmalıdır. Düşük çekme dayanımı nedeniyle bu dayanımının aşıldığı durumlarda taşlarda çatlaklar oluşur. Bu çatlakların; fiziksel koşullar (donma, çözülme, genişleme vb.) nedeniyle büyümesi ve derinleşmesi ise yapı güvenliğini tehlikeye sokar.

Bursa’da yer alan tarihi yığma yapıların büyük kısmında küfeki taşı kullanıldığı görülmüştür. İncelenen minarelerin bir kısmı tamamıyla taştan diğer bir kısmı ise taş ve tuğla almalı sistemle oluşturulmuştur. Küfeki taşının bölgede çok fazla kullanılıyor olması yöredeki taş ocaklarından kolaylıkla temin edilmesine bağlanmaktadır.

### ➤ Tuğla

Tarihi yapılarda, pişirilmiş kilden üretilen tuğlayı oluşturan malzemeler genellikle dere yataklarında yüzeysel olarak biriken kum taşlarının kalıntılarından elde edilirdi. Pişmiş kilden üretilen tuğlalar, görünümleri ve işlevlerine göre sınıflandırılır; fırınlarda yüksek ısı altında pişirilir; fırın teknolojisinin bulunmadığı yerlerde ise güneş ısısından yararlanılarak üretilirlerdi. Bugünün teknikleri ile karşılaştırıldığında oldukça zor ve zahmetli bir üretim aşamalarına sahip bu yapı elemanı, istenilen formda üretilebildiğinden ve yapı elemanına istenilen formu vermekte rahatlıkla kullanılabilirdiğinden yaygın şekilde kullanılmaya başlamıştır.

Tuğlayı oluşturan malzemenin kalitesi, kullanılan harç ve tuğlanın örülme düzeni; tuğla duvarın dayanımını belirler. Tuğlaların basınç dayanımı, malzeme özelliklerine bağlı olarak 10 MPa dan 30 MPa’ya kadar değişir. İyi fırınlanmış tuğla, iyi fırınlanmamış tuğlaya göre üç kat daha fazla dayanıma sahip olabilir. Genel olarak tuğlanın çekme dayanımı basınç dayanımının %10’u, kayma dayanımı ise basınç dayanımının %30’u kadardır (Ünay 2002). Mahrebel (2006) tarafından yapılan çalışmada, tuğlaların ortalama mekanik özellikleri; basınç dayanımı 10-30 MPa, çekme dayanımı 2,5-5 MPa, ve kayma dayanımı ise 10-20 MPa olarak belirtilmektedir.

Aş (2007) çalışmasında tekli ve üçlü tuğla deneyleri yapmış ve tuğlanın mekanik özelliklerini tekli tuğla deneyi için ortalama basınç dayanımını 5 MPa ve ortalama elastisite modülünü 118 MPa olarak, üçlü tuğla deneyi için ortalama basınç dayanımını 2,10 MPa ve ortalama elastisite modülünü 192 MPa olarak belirlemiştir. Tekli tuğla basınç deneyi sonuçları değerlendirildiğinde, bu çalışmada elde edilen ortalama tuğla basınç değerinin gerçek tuğla basınç değerini, tuğla başlıkları ile yükleme cihazının piston başlıkları arasında oluşan sürtünme etkisi sonucunda tuğla başlıklarının sargılama etkisi yapması ile yüksek çıkması nedeniyle, yansıtmadığı ifade edilmektedir. Üçlü

tuğla basınç deneyinin, deney sırasında sürtünmenin dayanıma etkisi azaltıldığından daha gerçekçi olduğu belirtilmiştir.

### **1.1.3.2. Bağlayıcı olarak kullanılan malzemeler**

#### **➤ Horasan harcı**

Harçlar yığma yapılarda yapı elemanlarının birbirlerine bağlanmasında kullanılan bir ara yüzey malzemesidir. Birleşimlerde kullanılan harç yapının karşılaşıcağı yükler karşısında bir bütünmüş gibi davranmasını sağlayacak ve servis ömrünü uzatacaktır. Genel olarak bölgeye, yapıda kullanıldıkları yerlere, içeriğindeki malzemelere ve yapım tekniğine göre farklılıklar gösterebilirler. Ancak işlev bakımından tümü bağlayıcı ve bütünleştirici özellik gösterirler. Bu nedenle harç kullanımının temel amacı, yapı bileşenlerini meydana getiren elemanların birbirleri ile bağlantısını sağlayarak bir bütün olarak çalışmalarını sağlamak olarak ifade edilebilir. Böylece, bileşene gelen basınç yüklerinin dağılımını gerçekleştiren harç, taşıyıcı sistemi oluşturan ana bileşenlerin de kısmen belirli bir esnekliğe sahip olmasına yardımcı olmaktadır. Taş veya tuğladan yapılmış, olan, birçok eski eserin kalın duvarlarında kullanılmış olan harçlar, sınırlı basınç dayanımına sahip olsa da, yukarıda ifade edilenlere ek olarak harç kullanımının yapı elemanlarını çevresel faktörlerden de koruduğu bilinmektedir (Sabbioni 1997).

Bölgesel olarak farklı kültürlerin farklı bağlayıcılar kullandığı, benzeri bağlayıcıların bugün dahi halen kullanımda olduğu bilinmektedir. Ülkemizin de içerisinde bulunduğu bu coğrafyada ise Horasan harç ve sıvaları, Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı dönemi yapılarında ve genellikle hamamlar, su kanalları ve su sarnıçlarında yaygın olarak kullanılmıştır. Horasan harç ve sıvalarında bağlayıcı olarak kireç, agrega olarak ise tuğla veya kiremit kırıkları gibi pişirilmiş toprak malzemeler kullanılmıştır (Kılıç 2007). Horasan, kırılmış ve öğütülerek toz haline getirilmiş, tuğla, kiremit, çömlek vb. pişmiş, kildir. Horasanın belli oranlarda kireç ve su ile karıştırılmasıyla elde edilen harç ise horasan harcı olarak tanımlanır. Bazı uygulamalarda harcın içerisine kum katılırken, bazılarında ise nohut büyüklüğünde, parçalar halinde tuğla, kiremit kırıklarına rastlanır. Bu ikinci grup harçlar, yapıda kullanılan yontulmuş taşları birleştiren, bağlayan klasik harçlardan farklıdır. Fonksiyonları bakımından günümüz betonuna eşdeğerdir. Tarihi eserlerin incelenmesinde bunlara da horasan denilse de daha gerçekçi bir sınıflandırma



yapıldığında “horasan betonu” adını almalarının daha doğru olacağı bazı kaynaklarda ifade edilmektedir (Akman 1986).

Canbaz ve ark. (2005) horasan harcının ve betonun özelliklerini belirlemeye yönelik yaptıkları çalışmada Çizelge 1.3’deki sonuçları vermişlerdir.

**Çizelge 1.3.** Horasan harcının mekanik özellikleri (Canbaz ve ark. 2005)

Numune Tipi	Ağırlıkça Karışım Oranları					Sertleşmiş Harç Özellikleri		
	Kireç	Su	İnce Horasan	İri Horasan	İlave Su	Birim ağı. (kg/dm <sup>3</sup> )	Eğilme Day. MPa	Basınç Day. MPa
C1H	1	1,22	2,1	2,34	0,80	1,76	2,00	4,31
C1D						1,47	1,71	5,31
M1H	1	1,22	2,1	0	0,35	1,66	2,13	4,5
M1D						1,36	1,87	7,59
C2H	1	1,22	2,05	2,30	0,80	1,68	1,32	3,27
C2D						1,67	1,38	4,92

Çizelge 1.3’de “C” horasan betonunu, “M” horasan harcını, “H” nemli ortamı “D” de kuru ortamı ifade etmektedir. Deneyler numune üretiminden 12 hafta sonra yapılmıştır. Camlaşmış iyice pişerek aktivite kazanmış tuğla yerine Harman tuğlasından yararlanılması da puzolanik etkinin yeterliliğini zedelemiştir. Tablodan da görüleceği gibi horasan harcı içinde iri horasan bulunmamaktadır. Kuru numunelerde birim hacim ağırlığın düşük olduğu belirlenmiştir. Burada nemli ortamda bulunan numunenin eğilme dayanımı daha yüksektir. C1D ve C2D numuneleri arasındaki basınç dayanımı farkı ise kullanılan tuğla kalitelerinden kaynaklandığı ifade edilmektedir (Canbaz ve ark. 2005). Bunlara ek olarak Horasan harcının yapımında kullanılan kirecin, eritilip süzöldükten sonra, mayalanıp sağlamlaşması için 10-15 yıl toprak altında bekletildikten sonra kullanıldığı durumlardan da tarihi kaynaklarda bahsedildiği bilinmektedir (Doğangün ve ark. 2006).

Horasan harcını oluşturan malzemeler doğal olduğundan malzemeyle uyum içerisinde çalışırlar ve birleştirdikleri elemanlara zaman içerisinde zarar vermezler. Oysa çimento katkılı harçlarla oluşturulan taş veya tuğla yığma birimlerde çimento kullanımı kaynaklı tuzlanmalar ve malzemede tahribatlar görülmektedir. Dolayısıyla eski eser

onarımalarında ve taş veya tuğladan oluşturulan yeni yığma yapılarda muhakkak aslına uygun veya kullanılan malzemeye uygun harç hazırlamak ve kullanmak gerekmektedir.

#### **1.1.4. Minarelerde konumlandırma**

Klasik Osmanlı öncesi Erken Dönemde minarelerin sayısının ve konumlarının kesinleşmediği, ya yapıdan biraz uzakta, ya yapının beden duvarına bitişik ya da beden duvarı üzerinde konumlandıkları dikkati çekmektedir. Özellikle XIV. yüzyıl Bursa tipi camilerinde minarelerin genellikle cami kuzey duvarının bir köşesine veya iki başına yerleştirildiği, kaide ve pabuç kısmının ise beden duvarı içerisinde kaybolduğu, Klasik Osmanlı Döneminde ise minarelerin genellikle kaide, bazen de pabuç kısımlarıyla cami kütesine bitişik, zeminden itibaren yükseldikleri görülmektedir.

Bunun yanında yine bu dönemde minare, yapı kitlesindeki konumu ve beden duvarlarıyla kurulan ilişkisi nedeniyle işlevsel özelliği yanında zaman zaman bir yapısal eleman olarak da kullanılmıştır. Bu tür örneklerde minare, yapının köşelerindeki konumları ve payanda nitelikleriyle köşeleri tutan destek elemanı durumundadırlar. Bir yapının kütesinin ve düşey taşıyıcı elemanlarının rijitliklerinin plan düzleminde simetrik olarak dağıtılması, deprem davranışı açısından en uygun düzenlemedir. Simetriden uzaklaşan bir plan düzenlemesinde, taşıyıcı sistemdeki dengesizlik artmaktadır. Türk cami mimarisinde her iki yanına eşit yerleştirilmiş minare uygulamalarının yanında, sadece caminin sağına ya da soluna yerleştirilmiş asimetrik minare uygulamalarına da sıkça rastlanmaktadır (Acar ve ark. 2006).

Çalışma kapsamında incelenen minarelerin genellikle ana yapıya bitişik veya ana yapı beden duvarı içerisinde oluşturulduğu görülmüştür. Ana yapıdan ayrı olarak inşa edilmiş minareler olsa da bunların sayısı, geneli itibariyle dikkate alındığında oldukça azdır. Yapısal özellikleri nedeniyle narin olan minarelerin ana yapıya bitişik yapılması veya beden duvarı üzerine inşası yanal desteklenme ve serbest boyun azalması şeklinde, yanal etkilere karşı dayanımı arttıracığından, tarih boyunca depremleri tecrübe etmiş bölgelerde minare boylarının kısa tutulmasına özel gösterilmiştir. Bununla beraber estetik olarak da minare ile cami ana yapısı arasında mimari ilişkiler nedeniyle bir ölçü oranına da riayet edilmeye çalışılmıştır. Ancak güvenlik talebinin daha ağır basıyor olması, kimi tarihi minarelerin depremden sonra tekrar inşası aşamasında orjinalinden

daha küçük olarak ve/veya daha büyük çap/yükseklik oranlarında inşa edildiği örneklere de rastlamak mümkündür.

### **1.1.5. Minarelere etkiyen yükler**

Hemen tüm yapı türlerinde olduğu gibi minare türü yapı sistemlerine de etkiyen yükleri benzer şekilde sınıflandırmak mümkündür. Bunlardan en önemlileri rüzgar ve deprem yükleri olmakla birlikte, taşıyıcı sistemleri itibariyle önemli kütlelere sahip olmaları zati(sabit) yükleri de önemli kılabilmektedir. Minareler, ince ve uzun taşıyıcı sistemleri nedeniyle deprem, rüzgar gibi yatay yük oluşturan dış etkilere karşı son derece hassas oldukları hemen her yıl defaatlerce yaşanan olaylardan bilinmektedir. Özellikle depremlerde tarihi yapıların performanslarının günümüz özensiz yapılarına nazaran daha iyi olduğu söylenebilir. Bu üstünlüğün nedeni olarak, geçmiş depremlerden bu tür yapı sistemleri için çıkartılan derslerin dikkate alınmıyor olması olarak açıklanabilir. Özellikle minare boylarında ve diğer geometrik boyutlarındaki değişimlerin; deprem ve rüzgar davranışlarını iyileştirme doğrultusunda önemli olduğu açıktır. Diğer taraftan günümüzde bu hassasiyetler, minareleri tasarlayan ve inşa edenleri daha dikkatli davranmaya yöneltmiş, bunlar için farklı geometrik şekillerin geliştirilmesine de yol açmıştır. Tarihi yapılar üzerinde yapılan incelemelerden de görülmüştür ki taşıyıcı sistemin yatay yükler etkisinde daha iyi bir performans gösterebilmesi için farklı malzemeler denenmiş ve yığma birimler kenet ve zıvana gibi bağlayıcı elemanlarla güçlendirilmiştir.

#### **1.1.5.1. Rüzgar yükleri**

Bir akışkan olan havanın atmosfer koşullarına göre hareketi sırasında yapıların rüzgara karşı olan yüzeyleri rüzgar etkisinde kalmaktadır. Rüzgar yükü, rüzgar hızının ve yönünün değişmesiyle zamanla artıp eksilen bir yüküdür. Diğer taraftan yapıların şekilleri de rüzgar yüklerinin değişmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Genellikle hesapları rüzgar yükünün en fazla olan değerine göre yapmak yeterli olmaktadır. Ancak burada rüzgarın bazı özel yapılar üzerinde titreşim hali; dolayısıyla dinamik etki yapabileceğini belirtmek uygun olmaktadır (Temuz 2007).

Minare tipi yüksek yapılarda rüzgar; yüklerin hakim kaynağını oluşturur. Bu yapılarda rüzgar etkisi genel olarak “boyuna rüzgar etkileri” ve “enine rüzgar etkileri” olmak üzere iki kısma ayrılır. Bu bileşenlerde minarede hem statik hem de dinamik etkilere neden olmaktadır. Bu nedenle rüzgar etkilerinin belirlenmesi bu iki tür yükün belirlenmesini içermektedir (Aliyazıoğlu 2004).

Rüzgar olayının çok karmaşık bir yapıya sahip olması rüzgar hızının tayininde olasılık yöntemlerinin kullanılmasına sebep olmaktadır. Rüzgarın etki ettiği yüzey olarak yapı düşey ekseninden geçen düzlem alınıp, rüzgar yükünün tatbik noktası alanın ağırlık merkezi olarak dikkate alınmakta ve rüzgar etkisinin yatay olduğu kabul edilmektedir (Aliyazıoğlu 2004).

Yığma tekniği ile oluşturulan tarihi minarelerde yapım malzemesi olarak taş, tuğla ve bağlayıcı olarak da horasan harcı kullanılmış, sistemin bir bütün olarak çalışabilmesine yönelik değişik çözümler (lamda-zıvana sistemi, demir kenetler vb.) üretilmiştir. Bu tür yığma yapıların büyük çoğunluğu, monolitik çalışmalarına yönelik alınan tüm önlemlere rağmen, yapısal sistemlerindeki süreksizlikler, malzemenin mekanik özellikleri vb. nedenlerle, yatay yük etkileri karşısında hasar görmekten kurtulamamışlardır. Tarihi minarelerin taşıyıcı sistemlerine ve yatay yükler nedeniyle oluşan hasar türlerine ve hasar bölgelerine ilişkin çalışmalara literatürde rastlamak sınırlı olsa mümkündür. Yapılan çalışmalarda minarelerde hasarların büyük kısmının kaideden gövdeye geçişte küp diye adlandırılan bölgede ve şerefe seviyesinde olduğu belirtilmiştir. Küp kısmında oluşan hasarlar ani kesit değişimi nedeni ile oluşan gerilmeler nedeniyle oluşmaktadır. Çalışma kapsamında incelenen minarelerde de, tarihi minarelerin genel karakteristik özelliklerinden olan, kaideden gövdeye geçişte yaklaşık bir ila bir buçuk metre yüksekliğinde küp bölümüyle bu ani kesit değişimi kademeli şekilde yumuşatılmaya çalışılmıştır. Diğer en sık hasar görülen bölge olan şerefe kısmında ise hasar, şerefenin ( şerefe tabanı, şerefe korkulukları, şerefe tabanı gövde geçiş bölümü) ağırlığından dolayı fazla yatay yük çekmesi ve gerilmelerin sınır değerini üzerine çıkmasıyla oluşmaktadır. Farklı bölgelerde tarihi yığma minarelerde kuvvetli rüzgar etkisi ile oluşan hasarlar Şekil 1.16’da gösterilmektedir.



(a)

(b)

(c)

**Şekil 1.16.** Rüzgar etkisiyle oluşan minare hasarları. (a) Kahramanmaraş'ın Afşin İlçesindeki Ulu Caminin rüzgâr nedeniyle yıkılmış minaresi, (b) İçel'in Erdemli ilçesinde fırtına nedeniyle yıkılan minarelerden birisi (c) Ankara Kayaş'ta yıkılan bir minaret (Temüz 2007)

### 1.1.5.2. Deprem yükleri

Tarih boyunca insanoğlu, bir takım doğal afetlere maruz kalmıştır. Afetleri oldukça farklı şekilde sınıflandırmak mümkün olmakla birlikte ülkemiz için, yapı sistemleri üzerinde en etkili olanını depremler olarak ifade etmek uygun olacaktır. Keza bilindiği gibi deprem, "yer kabuğu içindeki bir kaynaktan ani olarak çıkan titreşimlerin dalgalar halinde yayılarak, geçtikleri ortamları ve yer yüzeyini önemli mertebede harekete ve sarsıntılara neden olabilen bir doğa olayıdır. Bu olay(lar), dünyanın oluşumundan beri, sismik bakımdan aktif bulunan bölgelerde ardışık olarak süregelmiş, sayısız insanın ve yapı sistemlerinin yok olmasına neden olmuştur. Bu nedenle depremleri insanlar açısından çok yönlü sonuçlar ve zararlar doğuran en önemli afet olarak tanımlamak uygun olmaktadır. Depremlerin neden olduğu bu zararları demografik, sosyal ve ekonomik olmak üzere başlıca üç bölümde toplamak mümkündür: Depremlerin yol açtığı önemli zararların başında, insan eliyle yapılmış yapılar üzerinde tahribatlar meydana getirmesi ve bunların yıkılması dolayısıyla, can ve mal kayıplarının ortaya çıkması gelmektedir. Büyük depremler genellikle arkalarından taşkın, heyelan, yangın, kaya düşmesi, çığ ve zeminin sıvılaşması gibi diğer ikincil doğal olaylarını da getirirler. Bu olayların etkileri, bazen depremin doğrudan etkisinden daha büyük olabilmektedir. Depremlerin sosyal, ekonomik v.b. gibi zararları da vardır. Bunlar da kimi zaman

depremin yıkıcı etkisi kadar tesirli olabilmekte, hatta bazen daha büyük boyutlara da ulaşabilmektedir.

Bilindiği gibi Anadolu da, dünyanın en eski ve etkin deprem kuşaklarından birisinin üzerinde bulunmaktadır. Türkiye'nin de içinde bulunduğu ve "Akdeniz deprem kuşağı" denilen coğrafi bölgede, depremlerin % 15 inin yoğunlaştığı görülmektedir.

Bu bilgilerin ışığında Türkiye'deki deprem kuşaklarını başlıca üçe ayırmak mümkündür:

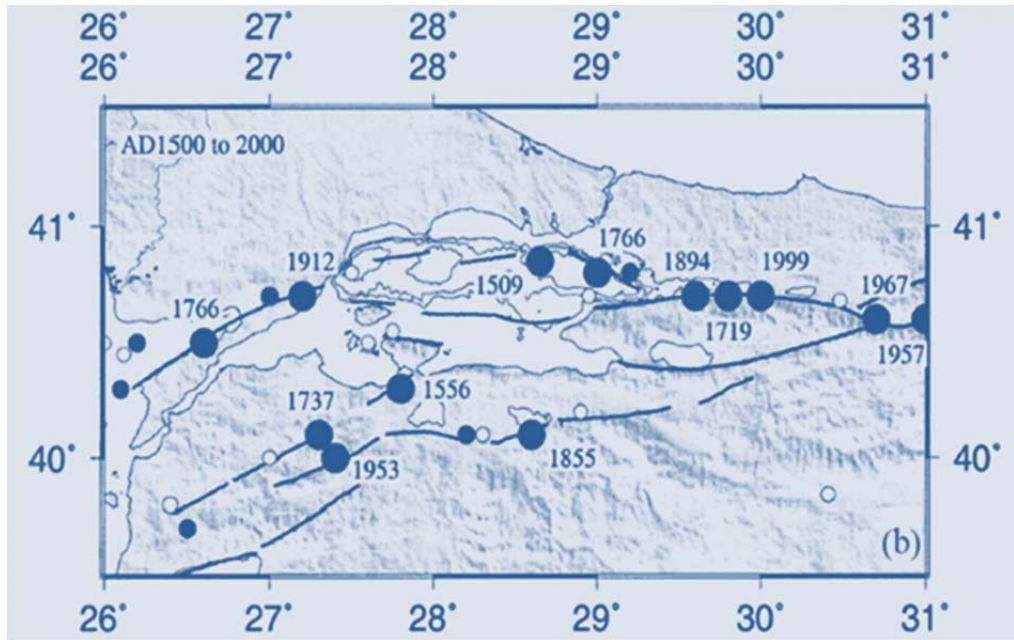
**Kuzey-Anadolu Deprem Kuşağı(KAF):** Bu deprem kuşağı batıda Biga yarımadasından başlayıp, Marmara bölgesini içine alarak Bolu-Kurşunlu- Amasya-Erzincan'dan Van Gölü'ne kadar uzanmaktadır. Deprem bakımından çok aktif olan bu bölgede tarihte büyük depremler meydana gelmiştir.

**Batı-Anadolu Deprem Kuşağı:** Türkiye'nin batı bölümünü kapsayan bu alan, Edremit körfezinden, güneyde güney Anadolu kıvrımlarının sınırladığı Akdeniz'e kadar uzanmaktadır. Bu bölgede çok eskiden beri Roma, Bizans ve Osmanlı devirlerinde birçok yıkıcı depremin olduğu bilinmektedir.

**Doğu-Anadolu Deprem Kuşağı (DAF):** Antakya'dan başlamakta, Maraş, Malatya, Elazığ, Bingöl, Bitlis ve Van'a kadar uzanmakta ve yukarıda bahsedilen birinci kuşak ile Karlıova civarında birleşmektedir. Yakın geçmişte ve günümüzde sakin olarak gözüken bu bölgede ve özellikle Antakya'da eski devirlerde şiddetli, büyük depremler vuku bulmuştur.

Ülkemiz toprakları geçmişte çok sayıda yıkıcı depreme maruz kalmıştır. Bu husustaki bilgi ve kayıtlar, Erzincan, Antakya, İzmir, Bursa, İstanbul v.b. gibi şehirler ile dolaylarında bilinen tarih içinde birçok depremin meydana geldiğini göstermektedir. Günümüzde yapılan çalışmalar, topraklarımızın % 92 sinin, değişik deprem tehlikesiyle karşı karşıya bulunan bölgeler içerisinde bulunduğunu, nüfusumuzun % 95'nin bu bölgelerde yaşadığını, yine büyük sanayi merkezlerimizin % 98 nin ve barajlarımızın % 92 sinin deprem bölgelerinde olduğunu ortaya koymaktadır. Bunlar ülkemiz için depremin önemini, deprem meselesinin bizim için ne kadar ehemmiyet arz ettiğini göstermektedir ( Arık 1994).

Avrupa, Asya ve Afrika plakaları arasında bulunan Türkiye çağlardan beri süregelen yer kabuğu hareketlerinin etkisi altındadır. 1999'da yaşanan son depremler özellikle Marmara Denizi'nin altında bulunan yer kabuğundaki gerilmeyi arttırmıştır ( Atalı 2012).1855'e kadar meydana gelen depremlerden Bursa ve çevresini etkisi altında alanlar tarih itibariyle; 1508, Mayıs 1556, Ağustos 1668, 1674, Ağustos 1705, Mayıs 1719, 1754, Mayıs-Ağustos 1766 ve 1794 depremleridir. Bunlardan 1674 ve 8 Ağustos 1705 yıllarında meydana gelen zelzelelerin merkez üssü Bursa olup, bir hayli hasara sebep olmuştur. 1855 yılında meydana gelen iki şiddetli deprem, tarihi eserlerin yanı sıra birçok ev ve dükân gibi yapıların büyük ölçüde hasar görmesine ve bir kısmının da tamamen yıkılmasına sebep olmuştur. İlki 2 Mart, ikincisi 12 Nisan 1855 tarihlerinde görülen şiddetli yer sarsıntıları, yaklaşık üç buçuk ay kadar tedirgin edici özelliğini devam ettirmiş, hafif sarsıntılar ise Aralık ayı ortalarına kadar sürmüştür (Özcan 1999).



**Şekil 1.17.** Marmara Denizi çevresinde Kuzey Anadolu Fayı'nın başlıca aktif kolları ve gerçekleşmiş tarihi depremler

Tarihi kayıtlardan ve belgelerden anlaşılacağı üzere 1855 yılında meydana gelen bu depremler nedeniyle Bursa'da bulunan, camiler, türbeler, medreseler, imaret ve hanların yanı sıra kagir ve ahşap binaların bazıları önemli ölçüde hasar görmüş, bir kısmı da

tamamen yıkılmıştır. Yıkılan minareler yeniden inşa edilerek, hasar görenler ise onarılarak günümüze kadar ulaşmıştır.

Minarelerde görülen hasarlar kuvvetli rüzgar etkisiyle oluşan hasarlara benzer şekildedir. Depremler nedeniyle hasar gören minarelerde hasarlar genellikle ani kesit değişiminin görüldüğü küp bölümünde ve şerefe seviyesinde görülmektedir. Farklı bölgelerde meydana gelen depremler nedeniyle minarelerde oluşan hasarlar Şekil 1.17'de gösterilmektedir.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Şekil 1.18.** Depremler nedeniyle hasar gören veya yıkılan minareler (a) Düzce depreminde (1999) yıkılmış bir minare , (b) Kocaeli depreminde (1999) şerefe seviyesinden yıkılmış minare (c) Çankırı, Orta depreminde hasar görmüş minare, (d) Kocaeli depreminde (1999) yıkılmış minare (Doğangün ve ark. 2006)



## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Tarihi yığma minarelerin ve yapısal anlamda benzer yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesine, deprem davranışlarının incelenmesine yönelik yapılan çalışmalar, diğer yapı türlerine oranla oldukça sınırlıdır. Diğer taraftan, yapılan literatür taramasından, depremden hemen sonra acilen hazırlanan Diyanet İşleri Başkanlığı'nın "Minarelerin Yapımında Uygulanacak Esaslar" talimatı dışında doğrudan minarelerin hesap ve tasarımı için hazırlanmış herhangi bir standart ya da yönetmeliğin bulunmadığı anlaşılmaktadır. Oysa deprem kuşağında yer alan ülkemizde, tarihi ve kültürel mirasımızın önemli örneklerinden olan camiler ve camilerin ana unsurlarından minarelerin dinamik karakteristiklerinin belirlenerek olası deprem, rüzgâr ve benzeri dinamik yüklemeler altında nasıl davranış sergileyeceklerinin belirlenmesi önemli bir araştırma konusudur. Ülkemizde ve yurtdışında konu ile ilgili farklı çalışma grupları tarafından yapılan çalışmalar bu bölümde sunulmuştur.

El-Attar ve ark. (2001) tarafından yapılan çalışmada, 1992'de Mısırda meydana gelen depremde büyük hasar gören Memluk tarzı minarelerin dinamik davranışları incelenmiştir. Temsili olarak Manjaq AI-Yusufi (1349) Cami minaresi ele alınmış ve sonlu elemanlar yöntemi ile dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Aynı yapıda farklı depremlere ait zemin hareketleri neticesinde oluşacak tepkiler belirlenmeye çalışılmış ve bu tarz minarelerin hangi büyüklükte bir yer hareketinden nasıl etkileneceği üzerinde durulmuştur.

Şahin ve Nuhoğlu (2005) tarafından yapılan çalışmada, sanayi bacası ve minare gibi narin yapıların deprem davranışları incelenmiştir. Mod birleştirme yöntemiyle yapılan deprem analizinde farklı zemin durumlarının dinamik davranışa etkileride açıklanmaya çalışılmıştır. Çalışmada 40, 100 ve 160 metre yüksekliğinde farklı yapısal özelliklere sahip boru kesitli kule tipi yapı örnekleri ele alınmış, bu yapılarda depremle beraber rüzgarın da neden olduğu etkiler gösterilmeye çalışılmıştır.

Doğangün ve ark. (2006) çalışmalarında yığma minarelerin deprem ve rüzgar etkileri karşısında sergiledikleri davranışı açıklamaya çalışmışlardır. Çalışmada deprem veya rüzgar etkileri nedeniyle minarelerin hangi bölümünde en sık hasar oluştuğu üzerinde durulmuş, yaşanmış doğal afetlerde minarelerin nasıl etkilendikleri gösterilmiştir.

Sayısal modeli oluşturulan Rızvaniye Cami minaresinde modal analiz yapılarak minarenin dinamik karakteristikleri (doğal titreşim periyodu, mod şekilleri) elde edilmiştir. Üzerinde çalışma yapılan minarede Düzce 1999 ve Kocaeli 1999 depremi ivme kayıtları kullanılarak yapılan deprem hesabının sonuçlarından da, gözlemlen hasarları-hasar bölgelerini doğrular nitelikte aynı bölgelerde gerilme yığılmalarının olduğu gösterilmiştir.

Mahrebel (2006) çalışmasında tarihi yapılarda taşıyıcı sistem özellikleri, hasarları, onarım ve güçlendirme tekniklerini irdelenmiştir. Tarihi yapılarda kullanılan malzemelerin çeşitleri ve mekanik özellikleri verilerek bu tür yapıların taşıyıcı sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. Tarihi yapılarda oluşan hasar tipleri gösterilerek, hasarların nedenine ilişkin değerlendirme yapılmış, onarım ve güçlendirme için öneriler sunulmuştur.

Ertek ve Fahjan (2007), tarafından yapılan Osmanlı minarelerinin yapısal sistemlerinin incelendiği çalışmada Osmanlı döneminde inşa edilen minareler yapısal bölümlerine ve sistemlerine göre sınıflandırılmış tanımlamalar yapılmıştır. Minarelerde kullanılan farklı yapı teknolojileri ve malzemelerine ilişkin bilgi verilmiştir. Tarihi yapıların modellenmesi ve analizi farklı yönlerinden incelenmiş ve geometrik modellemede karşılaşılan farklı zorluklar irdelenmiştir. Sonlu elemanlar modellerinde yapılan kabuller ve bunların dinamik davranışı yansıtmadaki etkinlikleri sunulmaya çalışılmıştır.

Bayraktar ve ark. (2010) tarafından tarihi yapıların deprem güvenliklerinin tahribatsız deneysel yöntemlerle belirlenmesine yönelik yapılan çalışmada, Osmanlı Köprüsü, İskenderpaşa Cami minaresi, Ayasofya Kulesinin (Trabzon) yerinde deneysel çalışmalar yapılarak dinamik özellikleri belirlenmiş daha sonra yapıların geometrik özellikleri kullanılarak üç boyutlu sayısal modelleri oluşturulmuştur..

Bayraktar ve ark. (2011) minarelerin deprem performanslarının çevresel titreşimlerle modal analizle belirlenmesine yönelik yaptıkları çalışmada, ilk olarak yapıların dinamik özelliklerini belirlemek için kullanılan yöntemler hakkında bilgi verilmiştir. Minarelerde çevresel etkiler nedeniyle oluşan tepkiler hassas ivme ölçerler yardımıyla ölçülmüş, minarenin geometrik ve yapısal özellikleri dikkate alınarak sonlu eleman modeli

oluşturulmuştur. Oluşturulan sayısal model üzerinde modal analiz yapılarak doğal frekanslar ve mod şekilleri belirlenmiştir. Sayısal model için Erzincan 1992 depreminin ivme kayıtları kullanılarak deprem hesabı yapılmış ve maksimum yer değiştirmeler ve konumları, maksimum gerilmeler ve oluşan bölgeler çalışma kapasamında sunulmuştur.

Coşkun ve Türk (2012) çalışmalarında tarihi yığma minarelerin dinamik davranışlarını analiz etmiş ve dinamik davranışın iyileştirilmesine yönelik öneriler sunmuşlardır. Çalışma, gerçekçi sonuçlar elde edilebilmesi için daha önce restorasyon uygulaması görmemiş olan minare üzerinde yapılmıştır. Minarede kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri tanıtılarak bilgisayarda yapının üç boyutlu modeli oluşturulmuş ve modal analiz yapılmıştır. Yapılan dinamik analiz sonuçlarıyla muhtemel göçme bölgeleri maksimum gerilme bölgeleri belirlenmiş, FRP veya CFRP ile güçlendirme yapıldığında kapasitenin ne ölçüde arttığı çalışma kapsamında sunulmuştur.

Oliveira ve ark. (2012) çalışmalarında İstanbulda yer alan yükseklikleri 23-67 m arasında değişen yedi adet minarede çevresel titreşim testleri yaparak dinamik karakteristikleri belirlemeye çalışmışlardır. Minarelerin geometrik özellikleri ve buldukları zemin sınıfları belirlenerek, sayısal modelleme yapılmıştır. Sayısal modelin kalibrasyonu yapılarak minarelerde deprem analizleri yapılmıştır. Yapılan çalışmayla minarelerin dinamik davranışları ve bunun üzerinde etkili olan unsurlar açıklanmaya çalışılmıştır.

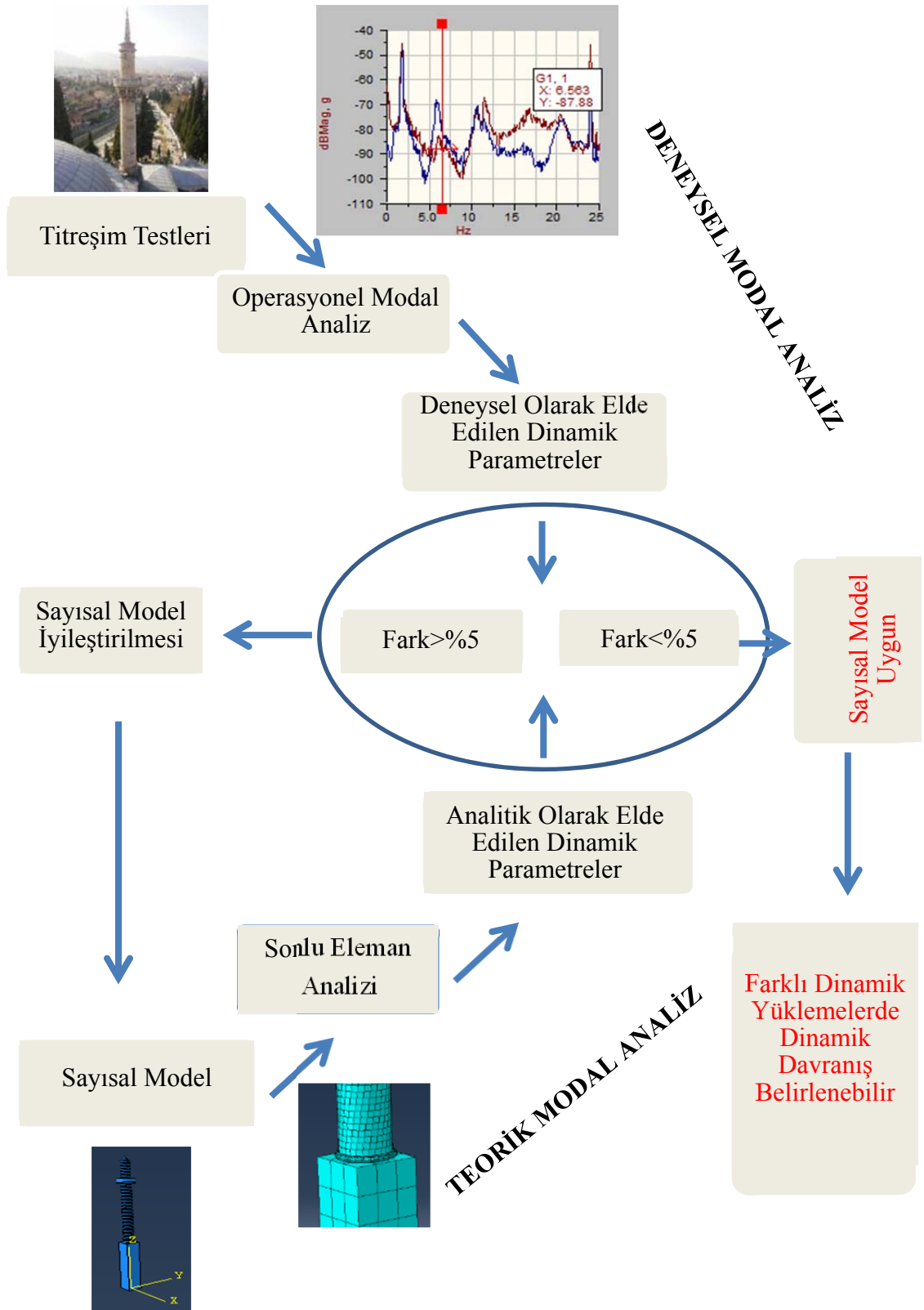
### 3. YAPILARIN DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Tasarlanmış ve inşa edilmiş tüm yapılar kendilerine özgü doğal frekans ve mod şekillerine sahiptirler. Bu karakteristikler yapının kütesine ve rijitliğine bağlı olarak değişmektedir. Bu parametrelerin bilinmesi, yapıya etkiyen yükler nedeniyle yapının sergileyeceği davranışın belirlenmesi ve daha güvenli yapıların oluşturulabilmesi için mühendislere kolaylık sağlar.

Yapıların dinamik yükler etkisindeki davranışları birçok belirsizliği içermektedir. Dinamik yüklerdeki belirsizliklerin yanı sıra dinamik davranışı etkileyen parametrelerdeki belirsizlikler, yapı dinamik davranışının gerçekçi olarak belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Dinamik karakteristikler olarak adlandırılan doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranının mevcut yapının özelliklerini yansıtacak şekilde deneysel yöntemler ile belirlenebilmesi, yapı dinamik davranışının daha gerçekçi elde edilmesine imkan sağlamaktadır. Yapı dinamik karakteristikleri, oluşturulan analitik modellerin doğruluğunun kontrolü ve yapıya etkiyecek deprem kuvvetlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Ayrıca yapının modal davranışına bakılarak rijitlik dağılımı ve burulma düzensizliği gibi birçok düzensizlik halinin olup olmadığı hakkında fikir sahibi olunabileceği gibi, bu yöntemle uzun süreli takip edilecek sistemlerde hasar düzeyleri hakkında da fikir sahibi olunabilmektedir. Tüm bu gerekçeler ışığında modal analiz testleri yardımıyla yapı sistemlerinin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi oldukça önemli bir tekniktir. Burada ayrıca belirtmek gerekmektedir ki tüm testlerin malzemenin elastik sınırları içerisinde gerçekleştiriliyor olması yapı sistemlerinin elastik ötesi davranışları hakkında fikir vermeyecektir. Ancak bu durum söz konusu yöntemin değerini hafifletmemekle birlikte, kalibre edilen sayısal modeller ile yapı sistemlerine ait malzeme modellerinin uygun şekilde tespit edilmesi bu davranışın da daha gerçekçi bir şekilde ortaya konmasına olanak sağlayacaktır. Tüm bu veriler ışığında uzun yıllardır geliştirilen yöntemler yardımıyla dinamik karakteristiklerin belirlenmesi mümkündür. Burada yapı sisteminin niteliği, taşıyıcı sistem özellikleri, mesnetlenme şekilleri, malzeme özellikleri, süreksizlikler vb., birçok özelliğin iyi tespit edilmesi gerekliliği açıktır. Aynı zamanda kullanılan test yöntemlerinin kabiliyetlerinin de bilinmesi gerçekçi sonuçlara ulaşmayı kolaylaştıracaktır. Bu bağlamda takip eden başlıklarda yaygın olarak kullanılan yaklaşımlar ile ilgili genel bilgiler sunulmaktadır.

### **3.1.Yapıların Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Yaklaşımlar**

Mevcut yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi için literatürde kullanılması muhtemel iki yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan ilki ve en yaygın olarak kullanılanı, mevcut geometrik özellikler yanında, malzeme özellikleri ve mesnetlenme şekillerini de dikkate alarak gerçekleştirilecek sayısal yaklaşımlardır. Bu maksatla sonlu farklar, sonlu elemanlar ve sınır elemanlar gibi sayısal yaklaşımlar kullanılabileceği gibi, yapı sistemi özelliklerine bağlı olarak belirlenmiş yaklaşık analitik yaklaşımlarda kullanılabilmektedir. Benzer yaklaşımlar ile yapılacak modellemeler ile mevcut yapı sistemlerinin dinamik karakteristiklerinin tespiti yaklaşık olarak mümkün olmakla birlikte, yukarıda ifade edilen ve bunların bağlı olduğu birçok parametredeki belirsizliklere bağlı olarak önemli mertebede hata yapmak mümkündür. Mevcut yapıların dinamik özelliklerini belirlemek için tercih edilen ve son yıllardaki gelişmelere bağlı oldukça yaygın şekilde kullanılmaya başlayan bir diğer yaklaşım ise deneysel yöntemlerdir. Söz konusu deneysel yöntemler kendi içerisinde uygulanış şekline bağlı olarak deneysel modal analiz ve çevresel titreşimlerle modal analiz olarak ikiye ayrılmaktadır. Teorik ve deneysel olarak dinamik parametrelerin belirlenmesi şematik olarak Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Deneysel ve teorik modal analiz işlem akış şeması

### 3.1.1. Teorik yaklaşımlar

Yapıların dinamik parametreleri sayısal yaklaşımlar kullanılarak gerçekleştirilen modeller ve/veya yaklaşık yöntemler kullanılarak belirlenebilmektedir. Yukarıda da ifade edildiği gibi yapı sistemi özelliklerine bağlı olarak dinamik karakteristiklerin belirlenebilmesi için birçok basitleştirilmiş yöntem de mevcuttur. Bu yaklaşımlar baz alınmak suretiyle, birçok yapı standardında yapı sistemlerinin birinci frekans değerinin belirlenmesine yönelik yaklaşık bağıntılar da kullanılmaktadır. Standartlarda tanımlanan kurallara göre inşa edilen yapılar için birinci periyot değeri yapı boyutlarına bağlı olarak tanımlanabildiği gibi, yaklaşık rijitlik ve kütle tahminlerine bağlı olarak da tanımlanabilmektedir. Bu yaklaşımlardaki temel mantık, yapı sistemi birinci moduna ait modal yerdeğiştirmelerin baz alınmasına dayanmaktadır ki, genel manada düzenli yapı sistemleri için oldukça gerçekçi sonuçlar verebilmektedir. Diğer taraftan yapıların doğal titreşim frekansları sayısal modeller oluşturulmak suretiyle de belirlenebilmekte, bu sayede hem doğal frekanslar hem de mod şekilleri, daha önce de ifade edildiği üzere, tahmin edilen parametrelerdeki doğruluk çerçevesinde tahmin edilebilmektedir. Bu sayede yapının dinamik davranışı hakkında fikir sahibi olunabilmektedir.

Bu bağlamda sayısal modelleme yöntemleri yardımıyla yapısal dinamik karakteristiklerin belirlenebilmesi için çok serbestlik dereceli lineer sistemlere ait hareket denkleminin çözümünü hatırlamak gerekmektedir. Yaygın olarak bilindiği üzere doğal titreşim periyodu ve mod şekilleri, aşağıda sönümsüz ve zorlanmamış sistemler için verilen hareket denklemi yardımıyla belirlenebilir. Serbest titreşim yapan sönümsüz bir sistemin hareket denklemi,

$$m\ddot{u} + ku = 0 \quad (3.1)$$

şeklindedir. Burada m ve k sırasıyla kütle ve rijitlik matrislerini,  $\ddot{u}$  ve u ise sırasıyla ivme ve yer değiştirme vektörlerini göstermektedir. Yer değiştirme; mod şeklinin zamana bağlı olarak değişmediği göz önünde bulundurularak;

$$u(t) = q_n(t)\phi_n \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilir. Yer değiştirmenin zamanla değişimi ise basit harmonik hareketin fonksiyonu yardımıyla;

$$\mathbf{q}_n(t) = A_n \cos \omega t + B_n \sin \omega t \quad (3.3)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada  $A_n$  ve  $B_n$  başlangıç koşullarından bulunan integral sabitleridir. Dolayısıyla denklem (3.2) de  $q_n(t)$  yerine koyulursa denklem;

$$\mathbf{u}(t) = (A_n \cos \omega t + B_n \sin \omega t) \phi_n \quad (3.4)$$

şeklini alır.  $u(t)$  nin ikinci dereceden türevi alınarak hareket denkleminde denklem (3.1) yerine yazılırsa;

$$[w_n^2 m \phi_n + k \phi_n] q_n(t) = 0 \quad (3.5)$$

ifadesi elde edilmiş olur. Bu denklemin çözümünün olabilmesi için ya  $q_n(t)=0$  olmalıdır ki bu hareketin olmadığını gösterir, yada  $-w_n^2 m \phi_n = k \phi_n$  olmalıdır. Özdeğer problemi olarak adlandırılan bu probleme  $\det |k - w_n^2 m|$  şeklinde çözüm aranır serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal frekans elde edilir. Doğal frekanslar yardımı ile de mod şekilleri belirlenerek yapının dinamik karakteristikleri teorik olarak belirlenmiş olur. Ancak genel olarak mühendislik yapılarının çok serbestlik dereceli olması teorik yöntemin kullanılarak dinamik davranışın belirlenmesini oldukça zorlaştırır ve uzun zaman gerektirir. Bu yüzden yapıların bilgisayar ortamında sayısal modellerinin oluşturulup uygun yazılımlar kullanılarak dinamik davranışın belirlenmesi daha pratik olmaktadır. Bu durumda yapının sayısal modelinin yapıyı gerçek anlamda yansıtması doğru sonuca ulaşılmasını sağlayacak, aksi takdirde irdelenen yapı gerçekte beklenen davranışı sergilemeyecektir.

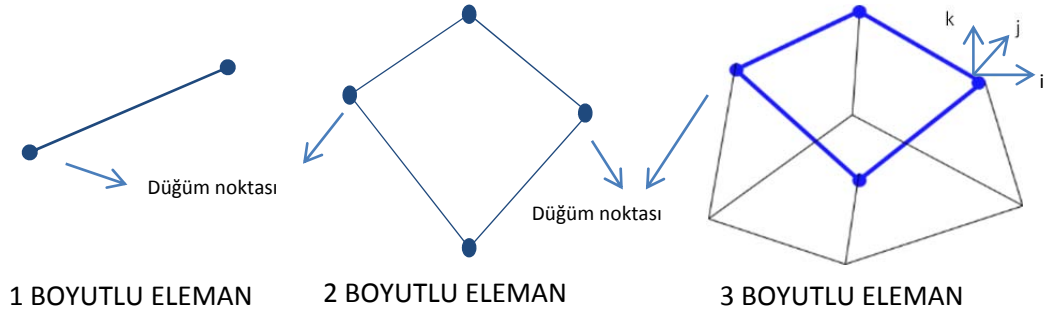
Sayısal model çözümünde genellikle sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi; malzeme özelliklerinin çeşitliliğini ve sınır koşullarının farklılığını güçlüklerle karşılaşmadan bağdaştırabilen kullanımı kolay çok yönlü sayısal analiz yöntemlerinden birisidir. Ayrıca lineer ve non-lineer malzeme özelliklerini aynı anda problemde kullanabilen, toplam ve efektif gerilme durumunu verecek şekilde formüle edilmiş bir analiz yöntemidir (Şenel 1996).

Yapısal analizlerde sıklıkla kullanılan sonlu elemanlar yönteminde temel prensip cismin uygun alt bölgelere ayrılmasıdır. Bu alt bölgelerin her birinin bir diğerine düğüm



noktaları ile bağı olduğu kabul edilir. Seçilen eksen takımında, bu düğüm noktalarında sınır koşulları kullanılarak ve denge şartları aranarak bilinmeyen büyüklüklere ulaşılır.

Sonlu elemanlar yönteminde dört ana konudan söz edilebilir. Bunlar sonlu eleman modelinin türetilmesi, gerçek problemi idealize ederek sonlu eleman modeline dönüştürülmesi, sonlu elemanlar teorisinin uygulaması için bilgisayar programlarının geliştirilmesi ve sonlu elemanlar çözümü için gerekli verilerin ve bilgilerin araştırılmasıdır (Şenel 1996).



**Şekil 3.2.** Sonlu eleman alt modellerinden bazı örnekler

### 3.1.2. Deneysel yaklaşımlar

Deneysel modal analiz, 1970'li yılların başında dijital FFT (Fast Fourier Transform) spektrum analizörü kullanımı ile birlikte bugüne kadar düzenli bir şekilde gelişme göstermiştir. Bugün ise, bu amaçla geliştirilen makina ve sistemler kullanılmaktadır. Deneysel modal analiz yöntemi, incelemeye konu sistemde titreşim etkisi yaratılarak FFT analizörü yardımı ile FRF (Frequency Response Function) değerlerinin ölçümü temeline dayanmaktadır. Titreşim ölçümü ve titreşim testi, modal test, modal analiz ve deneysel modal analiz gibi yöntemlerle yapılmaktadır (Doğruer 2006). Deneysel modal analiz çalışmasında, amaç sistemde bir zorlanma meydana getirmek olduğundan, ivme ölçer, titreşim analizörüne ek olarak çekiç ve benzeri titreşim meydana getiren aynı zamanda da zorlanma şiddetini kaydedebilen temel ölçüm elemanları kullanılır.

Deneysel Modal Analiz Yöntemi'nin geçerli olabilmesi için bazı temel kabuller yapılmaktadır (Heylen ve ark. 2007). Bu kabuller birbirleriyle ilişkili olup kısaca şu şekilde sıralanabilir:

- Deneysel ölçümler sırasında, sıcaklık, nem vb. gibi bir etki altında yapının malzeme özelliklerinde ve sınır şartlarında herhangi bir değişim olmadığı kabul edilmektedir.
- Yapıda oluşan titreşimlerin küçük olduğu yani, yapının lineer davranış sergilediği kabul edilmektedir. Yapının rijitliğini değiştirebilecek çok büyük titreşimler altında yapılan ölçümlerin sonuçlarının geçerli olmayacağı kabul edilmektedir.
- Yapının bir bütün ve sürekli olduğu kabul edilmektedir. Diğer bir ifadeyle, yapının bir noktasında elde edilen davranışın bütün yapıyı temsil ettiği kabul edilmektedir. Dolayısıyla süreksizlik arz eden elemanların kendi lokal titreşim modlarının olmadığı kabul edilmektedir. Bu kabulün örneğin; süreksiz bir taşıyıcı sisteme sahip yığma yapı örneğinde uygun şekilde değerlendirilmesi gerekliliği açıktır. Barajlar gibi büyük yapılar için de, özellikle Zorlanmış Titreşim Yöntemi'ne göre yapılan Deneysel Modal Analizi'nde, bu kabulün sağlanması oldukça zordur (Sevim 2010).

Deneysel modal analizde ölçülebilen ve tespit edilebilen dinamik karakteristikler ile matematiksel model oluşturularak davranışı gerçekçi bir şekilde temsil edebilecek sayısal modeller oluşturulabilir. Buradan hareketle gerçekleştirilecek çözümlerle yapının performansı ve diğer hususlar üzerinde rahatlıkla sonuca varılabilir.

### **3.1.2.1. Deneysel modal analiz**

Yer kabuğundaki hareketlerden başlayarak çevresel etkilere ve yapıların içerisinde kullanılan dönen makina parçalarına kadar birçok nedenden dolayı yapı sistemleri her an titreşime maruz bulunmaktadır. Bu tür titreşim etkilerini belirli bir kaynaktan yararlanarak oluşturmak da mümkündür. Bu durumda oluşturulan yükün yada zorlamanın genliği ve zamanla değişimi vb., tüm karakteristikleri bilinceğinden ölçüm alınan yapı sistemi ile ilgili tespitler rahatlıkla yapılabilmektedir. Uygulanan kuvvet etkisindeki yapı, mevcut sınır şartları, malzeme özellikleri ve varsa hasar durumuna bağlı olarak titreşim hareketi sergilemektedir. Yapıya uygulanan kuvvet, titreşim uygulayan çekiç (hammer) sarsıcı (shaker) üzerinde yerleştirilmiş bir yük ölçer; yapının titreşim tepkileri ise yapıya bağlanan ivme ölçerler yardımıyla ölçüm süresi boyunca

ölçülerek kayıt edilirler. Zaman ortamında kayıt edilen sinyallerden farklı yöntemler kullanılarak yapıya ait dinamik karakteristikler elde edilir.

Çok serbestlik dereceli bir sisteme ait hareket denkleminin çözümünde yapının tepki modelini oluşturmak için yapının aynı frekansta fakat değişen genlik ve fazda sinüzoidal bir kuvvetle titreştirildiği varsayıldığında, hareket denklemi;

$$([K] - \omega^2 [M])\{X\}e^{i\omega t} = \{F\} e^{i\omega t} \quad (3.6)$$

şeklinde düzenlenir.

Bu ifadeden frekans davranış fonksiyonu  $H(\omega)$ ;

$$\{X\} = ([K] - \omega^2 [M])^{-1} \{F\} \quad (3.7)$$

$$H(\omega) = \frac{\{X\}}{\{F\}} \quad (3.8)$$

olarak elde edilir.

Deneysel modal analizde laboratuvar ortamında geleneksel yöntemlerle çalışmalar yapılır. Bu tür analizde farklı noktalarda dışarıdan uygulanan kuvvet-etki ile dinamik tepkiler birlikte ölçülerek değerlendirme yapılır. Hareketi başlatan kuvvet ölçüm noktalarında yeterli tepkiyi oluşturacak büyüklükte olmalıdır. Buna rağmen bu kuvvet lineer sistem olarak düşünülen yapılarda oldukça küçüktür. Deneysel modal analiz teknikleri lineer olmayan sistemlerde kullanılabilir. Burada sarsıcı yardımıyla yük kontrol edilebildiğinden, sistem uygun yük düzeyinde elastik sınırlar ötesine zorlanabilmekte, dolayısıyla elastik ötesi davranış da dikkate alınabilmektedir. Her yöntemin olduğu gibi bu yöntemin de diğer yöntemlere göre dezavantajları bulunmaktadır. Sarsıcı ve ivmeölçer yerleşimlerinin kayıdı önemli ölçüde etkileyebildikleri, dolayısıyla ölçümün bir kaç farklı konfigürasyonla tekrarlanması ve sonucun teyit edilmesi gerekliliği bilinmektedir. Ayrıca sarsıcı için kullanılan yükleme fonksiyonlarının kayıtlardaki gürültü düzeyini arttırabildikleri bu nedenle bu tür

fonsiyonların yapı sistemine ve alıcıların yerleşimine uygun olarak seçilmesi gerekliliği yine bu yöntemde dikkat edilmesi gereken hususlar arasında gelmektedir.

### **3.1.2.2. Çevresel titreşimlerle modal analiz (Operasyonel modal analiz)**

Çevresel Titreşim Yöntemi'nde (operasyonel modal analiz), yapı çevresel veya doğal etkilerle (değeri ölçülmemiş) titreştirilmekte ve yapının titreşimlere göstermiş olduğu tepki davranışı ölçülmektedir. Çevresel veya doğal etki olarak, deprem, rüzgar, patlatma, trafik, su dalgası veya değeri ölçülmemiş rastgele titreşimlerden faydalanılmaktadır (Sevim 2010).

Büyük mühendislik yapıları ağır ve hantal olduklarından büyük uyarıcı kuvvete ihtiyaç duyarlar. Bu gibi yapılarda hareketi başlatacak kuvvetin tek noktadan uygulanması yeterli olmayabilir. Bu nedenle büyük yapılarda farklı noktalarda birçok sarsıcı kuvvet uygulayıcı kullanılması ihtiyacı olduğundan çok maliyetli ve zaman alıcıdır.

Bazı yapılar doğal etkiler nedeniyle titreşim yaparlar. Bazen yapıların buldukları ortamda çevresel veya ısı etkileri nedeniyle oluşan titreşimlerle dinamik özelliklerin test edilmesi gerekir. İşletme durumunda bir yandan hareketi başlatıcı kuvvetin kontrolü karmaşık ve tehlikeli olabilmekte diğer taraftan ölçülemeyen iç ve çevresel kuvvetlerin karakteristiklerin belirlenmesini riske atabileceğinden, deneysel modal analizin kullanılması genelde mümkün olmamaktadır. İşletme durumunda sözde doğal uyarıcıların varlığı nedeniyle çevresel titreşim testi veya çevresel titreşimlerle modal analizin göz önüne alınması gerekir. Çevresel titreşimlerle modal analizin başlıca avantajları;

- Test daha ucuz ve daha hızlıdır,
- Ölçümler gerçek işletme durumlarında yapılır ve belirlenen modal parametreler yapının dinamik davranışını gerçek kullanım durumuna göre gösterir,
- Test yapılırken yapının kullanımının sınırlandırılmasına gerek yoktur.

Deneysel yöntemlerle belirlenen dinamik karakteristikler analitik olarak elde edilenlerle karşılaştırıldığında büyük oranda farklılıklar içermiyorsa (oran < % 5-10), analitik dinamik karakteristiklerin yapının mevcut durumunu yansıttığı kabul edilmekte ve deprem, rüzgar vb. gibi yükleme koşulları altında ileri performans analizlerinin

gerçekleştirilebileceği modeller elde edilmiş olmaktadır. Eğer bu oran farkı büyükse (oran > %5-10), analitik dinamik karakteristiklerin yapının mevcut durumu yansıtmadığı kabul edilmektedir. Bu durumda analitik ve deneysel dinamik karakteristikleri istenen sınırlar içerisinde birbirine yaklaştırmak için, yapının sonlu eleman modelinde yapılan kabuller, malzeme özellikleri ve sınır şartları gözden geçirilerek yapının mevcut davranışını yansıtacak en uygun koşullar belirlenmektedir (Sevim 2010).

Çevresel titreşim testlerinden modal parametrelerin elde edilmesine yönelik farklı yaklaşımlar mevcuttur. Bunlardan geliştirilmiş frekans ortamında ayırıştırma yöntemi ve stokastik alt alan belirleme yöntemine ilişkin teorik altyapı aşağıda kısaca açıklanmıştır.

#### ➤ **Geliştirilmiş frekans ortamında ayırıştırma yöntemi**

Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) yöntemi kullanımı kolay olan Frekans Ortamında Ayırıştırma (FOA) yönteminin genişletilmiş halidir. Bu yöntemde, modlar davranışın spektral yoğunluk fonksiyonundan hesaplanan tekil değer ayırıştırma grafiklerindeki piklerin seçilmesiyle elde edilmektedir. FOA yöntemini Hızlı Fourier Dönüşümü'nden (HFD) tek bir frekans hattının kullanımına dayalı olduğundan, belirlenen doğal frekansın kesinliği HFD'nin çözünürlüğüne bağlıdır. FOA yönteminde yapının sönüm oranları belirlenemez. Diğer taraftan GFOA yönteminde belirlenen doğal frekansların ve mod şekillerinin kesinliği artırılmakta ayrıca, sönüm oranları elde edilebilmektedir (Jacobsen ve ark. 2006).

GFOA yönteminde, bir titreşim pikinin etrafında tanımlanan tek serbestlik dereceli Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu (GSY), Ters Ayrık Fourier Dönüşümü kullanılarak zaman ortamına geri dönüştürülebilmektedir. Doğal frekans zamana bağlı sıfır geçiş sayısının belirlenmesiyle, sönüm ise tek serbestlik dereceli normalize edilmiş oto korelasyon fonksiyonunun logaritmik azalışıyla elde edilmektedir (Jacobsen ve ark. 2006). GFOA yönteminde ölçülmeyen etki kuvveti ve ölçülen davranış fonksiyonu arasındaki ilişki;

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega)^* G_{xx}(j\omega) H(j\omega)^T \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Bendat ve Piersol 2010). Burada;  $\mathbf{G}_{xx}(j\omega)$  etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk (GSY) fonksiyonunu,  $\mathbf{G}_{yy}(j\omega)$  tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu ve  $\mathbf{H}(j\omega)$  frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. Denklem (3.9)'daki \* ve T sırasıyla ifadelerin kompleks eşleniğini ve transpozmesini göstermektedir. Matematiksel düzenlemelerden sonra tepki sinyaline ait GSY fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda,

$$\mathbf{H}(j\omega) = \sum_{r=1}^N \left( \frac{\mathbf{R}_r}{j\omega - \lambda_r} + \frac{\mathbf{R}_r^*}{j\omega - \lambda_r^*} \right) \quad (3.10)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada; N mod sayısını,  $\lambda_r$  kutup fonksiyonunu ve  $\mathbf{R}_r$  artık değer fonksiyonunu göstermektedir. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra denklem (3.9),

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega) = \sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N \left[ \left( \frac{\mathbf{R}_r}{j\omega - \lambda_r} + \frac{\mathbf{R}_r^*}{j\omega - \lambda_r^*} \right) \right] \mathbf{G}_{xx}(j\omega) \left[ \left( \frac{\mathbf{R}_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{\mathbf{R}_s^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right) \right]^H \quad (3.11)$$

şeklinde elde edilmektedir (Brincker ve ark. 2000). Burada; s tekil değerleri, H kompleks eşleniği ve transpozeyi ifade etmektedir. Matematiksel ifadeler sadeleştirildiğinde tepki sinyaline ait GSY fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda,

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega) = \sum_{r=1}^N \left( \frac{\mathbf{A}_r}{j\omega - \lambda_r} + \frac{\mathbf{A}_r^H}{-j\omega - \lambda_r^*} + \frac{\mathbf{A}_r^*}{j\omega - \lambda_r^*} + \frac{\mathbf{A}_r^T}{-j\omega - \lambda_r} \right) \quad (3.12)$$

şeklinde elde edilmektedir (Brincker vd., 2000). Burada;  $\mathbf{A}_r$  tepki sinyalinin GSY fonksiyonuna ait k. artık değer matrisini göstermektedir. GFOA yönteminde ilk adım GSY matrisini belirlemektir. Ayrık frekanslarda tepki sinyalinin GSY'sinin tahmini  $\omega = \omega_i$  olarak bilinmekte ve sonra tekil değer ayrışım matrisi alınarak ayrıştırılmaktadır (Brincker ve ark. 2000). Buna göre denklem (3.12),

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega_i) = \mathbf{U}_i \mathbf{S}_i \mathbf{U}_i^H \quad (3.13)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;  $u_{ij}$  tekil vektörleri,  $\mathbf{U}_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]$  tekil vektörleri içeren bütün matrisi,  $s_{ij}$  skaler tekil değerleri ve  $\mathbf{S}_i = [s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im}]$  skaler tekildeğerleri içeren diyagonal matrisi göstermektedir. Denklem (3.13)'da verilen GSY fonksiyonunda, pik değer yapan noktalar doğal frekanslara karşılık gelmektedir. Pik noktalar oluşturan tekil vektörler ( $u_{ij}$ ) ise doğal mod şekillerine karşılık gelmektedir.

Pik etrafındaki GSY fonksiyonundan elde edilen tek serbestlik dereceli tekil değer yoğunluk fonksiyonu kullanılarak doğal frekans ve sönüm elde edilmektedir. Bu işlem ters HFD yapılarak zaman ortamında doğal frekans ve sönüm belirlenebilmektedir. İki modun belirgin olması durumunda, birinci tekil vektör her zaman için iyi bir mod şekli ortaya koyacaktır. Bununla birlikte, iki mod ortagonal olması durumunda, bu modlara ait tekil vektörler ilgili mod şekil vektörlerini göstermektedir (Brincker ve ark. 2000).

#### ➤ **Stokastik altalan belirleme (SAB) yöntemi**

Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemi korelasyon veya spektruma ihtiyaç duymadan doğrudan zaman verileriyle çalışan, zaman ortamına dayalı bir yöntemdir. Bu yöntem dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için çok uygundur (Overschee ve Moor 1996; Peeters ve Roeck 2000; Peeters 2000; Yu ve Ren 2005). Bu yöntemde yapı sisteminin dinamik davranışı lineer, sabit katsayılı ikinci derece diferansiyel denklem olarak,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{R}(t) = \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (3.14)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}$  sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir.  $\mathbf{F}(t)$  titreşim kuvvetini,  $\mathbf{U}(t)$ ,  $\dot{\mathbf{U}}(t)$ ,  $\ddot{\mathbf{U}}(t)$  ise zamana bağlı yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. Burada,  $\mathbf{F}(t)$  kuvvet vektörü, ortamdaki verileri simgeleyen  $\mathbf{B}$  matrisi ve  $\mathbf{u}(t)$  vektörü cinsinden ifade edilebilmektedir. Dinamik denge denklemi, denklem (3.14), titreşen yapının davranışını temsil etmesine rağmen bu şekliyle SAB yöntemine uygun değildir. Bu yüzden, denklem (3.14) daha uygun bir form olan ayrık-zaman stokastik durum-uzay modeline dönüştürülmektedir (Yu ve Ren 2005). Durum-Uzay modeli kontrol teorisinden üretilmekte, fakat bu model inşaat

mühendisliğinde viskoz sönüme sahip yapıların dinamik karakteristiklerini hesaplamak için kullanılmaktadır (Yu ve Ren 2005). Aşağıdaki tanımlamalar kullanılarak (3.14) denklemi,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \begin{pmatrix} \mathbf{U}(t) \\ \dot{\mathbf{U}}(t) \end{pmatrix} \\ \mathbf{A}_* &= \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_{n_2} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{pmatrix} \\ \mathbf{B}_* &= \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_*\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_*\mathbf{u}(t) \quad (3.16)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada;  $\mathbf{A}_*$  durum matrisini,  $\mathbf{B}_*$  veri matrisini ve  $\mathbf{x}(t)$  durum vektörünü göstermektedir. Çevresel titreşim testlerinde, yapının bütün serbestliklerini ölçmek pek mümkün olmamaktadır. Dolayısıyla, durum-uzay vektörünün eleman sayısı, sistemin durumunu tanımlayan bağımsız değişken sayısına eşittir ve gözlem denklemi,

$$\dot{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{C}_*\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_*\mathbf{u}(t) \quad (3.17)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren 2005). Burada;  $\mathbf{C}_*$  sistem davranış matrisini,  $\mathbf{D}_*$  doğrudan iletim matrisini göstermektedir. Denklem (3.16) ve (3.17) sürekli-zaman belirli durum-uzay modelini oluşturmaktadır. Burada, “Sürekli Zaman” ile ifadelerin herhangi bir  $t \in \mathbb{N}$  anında değerlendirilebileceği ifade edilmektedir. Fakat ölçümler  $k\Delta t$  ( $k \in \mathbb{N}$ ) gibi ayırık zamanlarda gerçekleştirilmektedir. Örnekleme süresi ve ortamdaki gürültü sinyal verilerini her zaman için etkilemektedir. Örneklemeden sonra, durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1}(t) &= \mathbf{A}_*\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_*\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}_k(t) &= \mathbf{C}_*\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}_*\mathbf{u}(k) \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren 2005). Burada;  $\mathbf{x}_k = \mathbf{x}(k\Delta t)$  ayırık-zaman durum vektörünü,  $\mathbf{u}_k$  belirgin etki sinyal vektörünü göstermektedir. Gerçek operasyonel koşullarda yapılan ölçümler, yapıya ve dış ortamdaki gürültüye ait sinyalleri



içermektedir. Dolayısıyla denklem (3.18)'e stokastik gürültü bileşenleri eklendiğinde belirli-stokastik durum-uzayı modeli,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1}(\mathbf{t}) &= \mathbf{A}_* \mathbf{x}(\mathbf{k}) + \mathbf{B}_* \mathbf{u}(\mathbf{k}) + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k(\mathbf{t}) &= \mathbf{C}_* \mathbf{x}(\mathbf{k}) + \mathbf{D}_* \mathbf{u}(\mathbf{k}) + \mathbf{v}_k \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;  $\mathbf{w}_k$ , modeldeki belirsizlikler ve kusurlar nedeniyle işlenen gürültü sinyallerini,  $\mathbf{v}_k$  ise ivmeölçer kusurlarından dolayı işlenen gürültü sinyalini göstermektedir. Her iki vektörde değeri ölçülemeyen sinyallerden oluşmaktadır. Etkisi olmayan beyaz gürültü ve kovaryans matrisleri,

$$\mathbf{E}_* \left[ \begin{pmatrix} w_p \\ v_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_q^T & v_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{S} \\ \mathbf{S}^T & \mathbf{R} \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (3.20)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren 2005). Burada;  $\mathbf{E}_*$  beklenen değer operatörünü,  $\delta_{pq}$  ise Kronecker deltayı göstermektedir. Kronecker delta iki değişkenli bir fonksiyondur ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\delta_{pq} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } p = q \\ 0, & \text{eğer } p \neq q \end{cases} \quad (3.21)$$

SAB yönteminde yapı sisteminin davranışı, normal operasyon koşullarında değeri ölçülemeyen sinyallerle titreştirilerek belirlenmektedir. Bu veri eksikliğinden dolayı, denklem (3.19)'da gösterilen belirgin sinyal verisi  $\mathbf{u}_k$  'yi, gürültü terimleri olan  $\mathbf{w}_k$  ve  $\mathbf{v}_k$  'den ayırt etmek mümkün değildir. Bu durumda,  $\mathbf{u}_k$  gürültü terimleri  $\mathbf{w}_k$  ve  $\mathbf{v}_k$  cinsinden yazılırsa yapının ayrık-zaman stokastik durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1}(\mathbf{t}) &= \mathbf{A}_* \mathbf{x}(\mathbf{k}) + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k(\mathbf{t}) &= \mathbf{C}_* \mathbf{x}(\mathbf{k}) + \mathbf{v}_k \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (3.22), çevresel titreşimlerden dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde zaman alanının temelini oluşturmaktadır (Sevim 2010).

### 3.1.3. Filtreleme yöntemleri

Herhangi bir sayısal sistemde arzu edilen çıkışı üretmek için kullanılan yazılımsal veya donanımsal yapılara sayısal filtre adı verilmektedir. Bir sayısal filtre impuls cevabına göre, sonlu impuls cevaplı filtre (FIR filtre) ve sonsuz impuls cevaplı filtre (IIR Infinite Impulse Response) şeklinde ikiye ayrılmaktadır. Tekrarsız olarak gerçekleştirilen bir filtrenin ideal genlik cevabının sınırlı sayıda eleman alınarak tasarlanması işleminde keskin kesim frekansı bölgesinde istenmeyen Gibbs salınımları meydana gelmektedir. Oluşan bu salınımlar pencere fonksiyonları yardımıyla ortadan kaldırılmaktadır. Bu işlemlerde kullanılan pencere fonksiyonları için literatürde çeşitli özelliklere sahip farklı pencere türleri geliştirilmiştir.

Pencere fonksiyonları (veya kısaca pencere), sonlu impuls cevaplı (FIR, Finite Impulse Response) sayısal filtre tasarımında istenmeyen salınımları ortadan kaldırmak için kullanılan yapılardır. Pencere fonksiyonu, analob genişliği, dalgalanma oranı ve yanlob azalma oranı gibi fonksiyonun performansını etkileyen parametrelere sahiptir. Bir pencere fonksiyonu tasarımında temel amaç, istenilen özellikleri sağlayacak genlik spektrumuna uygun spektral parametre değerlerine ulaşmaktır.

Pencere fonksiyonları sahip oldukları parametrelere göre sabit ve ayarlanabilir pencereler şeklinde iki gruba ayrılmaktadırlar. Sabit pencere fonksiyonları sahip oldukları tek bir parametre (pencere uzunluğu) ile yalnızca pencere fonksiyonunun analob genişliğini ayarlayabilmektedir. Ayarlanabilir pencereler ise sahip oldukları iki veya daha fazla parametre ile sabit pencerelerde olduğu gibi pencere uzunluğu ile analob genişliğini ayarlayabilmekte, diğer parametreler yardımıyla da diğer pencere spektral parametrelerini kontrol etmektedirler. Literatürde kullanılan ve çok fazla tercih edilen ayarlanabilir pencere fonksiyonları Kaiser, Saramaki, Dolph-Chebyshev, ve Ultraspherical ile son zamanlarda geliştirilerek kullanılan Üstel, Cosh, modifiye edilmiş Cosh, modifiye edilmiş Kaiser gösterilebilir (Kaya ve İnce 2010).

Sabit pencere fonksiyonları yaygın olarak sinyal işleme uygulamalarında tercih edilmektedir. Yaygın olarak kullanılan bu tür pencerelere, Dikdörtgen, Hamming, Hann, Blackman, Bartlett v.s. gösterilebilir. Bu fonksiyonlara ait denklemler aşağıda verilmiştir.

$$\text{Dikdörtgen: } w[n] = \begin{cases} 1 & \ln | \leq \frac{N-1}{2} \\ 0 & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad (3.23)$$

$$\text{Hamming : } w[n] = \begin{cases} 0,54 + 0,46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), & \ln | \leq \frac{N-1}{2} \\ 0 & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad (3.24)$$

$$\text{Hann: } w[n] = \begin{cases} 0,5 + 0,5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), & \ln | \leq \frac{N-1}{2} \\ 0 & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad (3.25)$$

$$\text{Blackman: } w[n] = \begin{cases} 0,42 + 0,5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0,08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right), & \ln | \leq \frac{N-1}{2} \\ 0 & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad (3.26)$$

$$\text{Barlett : } w[n] = \begin{cases} 1 - \frac{\ln |}{N-1} & \ln | \leq \frac{N-1}{2} \\ 0 & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad (3.27)$$

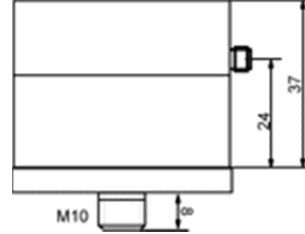
Sabit pencere fonksiyonlarının bir tek parametreye sahip olmalarından dolayı diğer pencere spektral parametrelerin ayarlanmasında kullanılamamaktadırlar. Bunların yerine daha fazla parametreye sahip ayarlanabilir pencere fonksiyonları geliştirilmiştir (Kaya ve İnce 2010).

#### 4. MATERYAL

Çalışma kapsamında, yapıda çevresel etkiler nedeniyle meydana gelen titreşimlerin tespit edilebilmesi için hassas ivme ölçerler kullanılmıştır. İvme ölçerler belirli hassasiyet ve frekans aralıkları için tasarlandıklarından çalışmada kullanılacak ivme ölçerin seçimi oldukça önemlidir. Bu tez kapsamında Çizelge 4.1’de teknik özellikleri belirtilen ivme ölçerler kullanılmıştır. Kullanılan ivme ölçerler, yapıda matkapla açılan deliklere çelik dübelleri vasıtasıyla sabitlenmişlerdir.

**Çizelge 4.1.** KB12VD Piezoelektrik ivme ölçer teknik özellikleri

İvme Ölçer:		KB12VD -PİEZOELECTRİC ACCELEROMETER	
Hassasiyet	10000 mV/g $\pm$ 5 %	Çalışma Sıcaklığı	-20 _ 80 °C
Lineer Frekans Aralığı	0.08 - 260 Hz	Boyutlar	R=50mm H=37mm
Ölçüm Aralığı	-0.6 - 0.6 g	Toplam Kütle	150 gr



**Şekil 4.1.** KB12VD Piezoelektrik ivme ölçer

Çalışma kapsamında QUATTRO dört kanallı veri toplama ünitesi kullanılmıştır.(Şekil 4.2). İvme ölçerlerden gelen sinyaller bu üniteye aktarılıp daha sonra uygun yazılım yardımıyla kullanılabilir hale getirilmektedir. Veri toplama ünitesinden aktarılan sinyaller Dataphysics tarafından hazırlanan SignalCalc 240 yazılımıyla işlenerek kullanılabilir hale getirilmiştir. Ayrıca yapının rölövesi hazırlanırken ölçülerin alınabilmesi için lazer metre ve şerit metreden yararlanılmıştır.



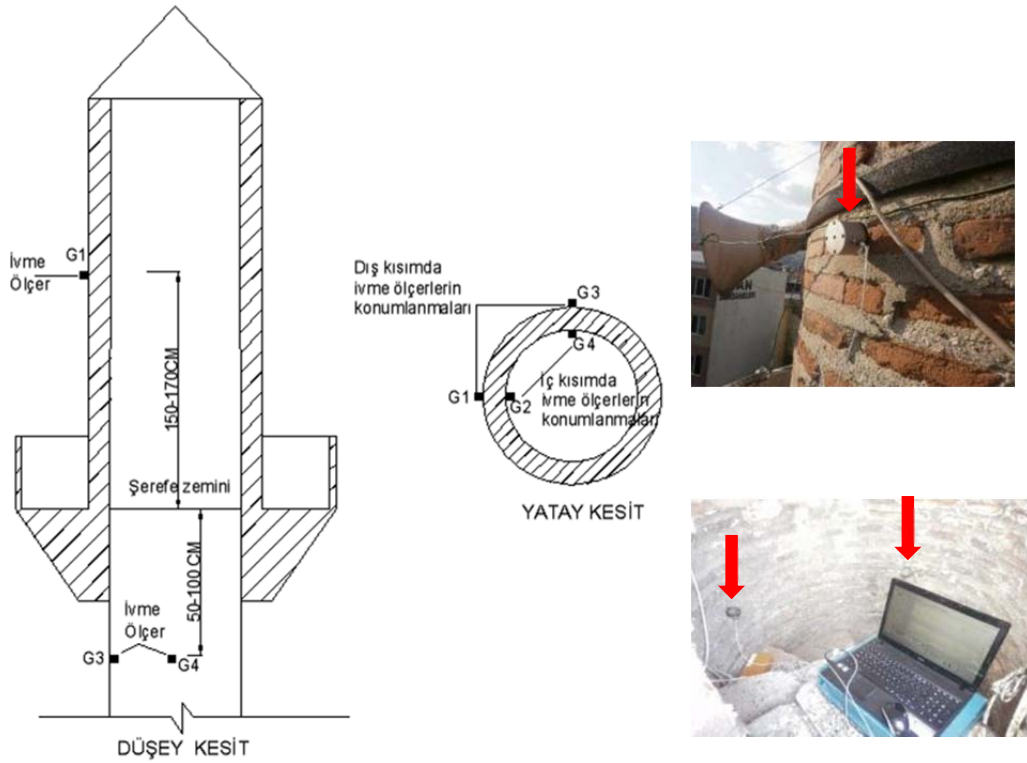
**Şekil 4.2.** Quattro dört kanallı veri toplama ünitesi

Yapılan çalışmada yerinde alınan ölçülere göre sonlu eleman modelinin oluşturulmasında Abaqus Cae sonlu eleman yazılımı kullanılmıştır. Abaqus genel amaçlı bir SE (sonlu eleman) yazılımı olduğundan bir çok mühendislik alanında kullanılır. Doğrusal ve doğrusal olmayan statik, dinamik, ısı transferi, akustik ve bağlaşımlı (çift etkili: ısı-yapı, akustik-yapı gibi) mühendislik problemlerinin çözümünde araştırmacılara kolaylık sağlar.

## 5. YÖNTEM

Çalışma kapsamında ilk olarak incelenecek minarelere ilişkin araştırmalar yapılmış, inceleme neticesinde belirlenen minarelerde çalışma yapılabilmesi için Bursa Vakıflar Bölge Müdürlüğü ve Bursa Valiliği İl Müftülüğünden gerekli izinler alınmıştır. İrdelenecek minarelerin seçiminde, minare yükseklikleri, minare konumlanmaları, minarelerde kullanılan yapı malzemesindeki farklılıklar etkili olmuştur. Arazide çalışmaya başlamadan önce seçilen minarelere ilişkin literatür araştırması yapılmış ve minarelerin yapım tarihleri, gördükleri onarımlar vb. konularda bilgi sahibi olunmuştur.

Materyal kısmında bahsi edilen ivme ölçerlerden iki tanesi petek dış duvarında (G1-G3), birbirine dik iki doğrultuda, şerefe taban seviyesinin 1,50-1,70 m üzerinde, diğer ikisi (G2-G4) ise iç kısımda yine birbirine dik doğrultuda, şerefe tabanından 0,50-1,00m altında olacak şekilde çelik dübellere yapıya sabitlenmiştir. Şekil 5.1’de ivme ölçerlerin içeride ve dışarıda konumlanmaları gösterilmiştir.



Şekil 5.1. İvme ölçerlerin konumlanmaları

İvme ölçerler uygun kablolar ile veri toplama ünitesine, veri toplama ünitesi de bilgisayara bağlanmıştır. Çalışmada 5 Hz, 10 Hz, 25 Hz ve 50 Hz olmak üzere 4 farklı frekans aralığında, sırasıyla 20, 10, 10, 10 dakikalık süreler boyunca ölçümler yapılmıştır. Ölçümlerden elde edilen veriler SignalCalc 240 tarafından işlenerek kaydedilmiştir. Yapıya ait frekans değerleri 3. bölümde açıklanan yapısal karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik yapılan deneysel çalışmalardan, Çevresel titreşimlerle modal analiz yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Bu yöntemde yapı doğal ortamında maruz kaldığı çevresel etkilerle titreşim yapmakta dışarıdan ayrıca bir yük etkitilmemektedir. Yapıda oluşan titreşimler ise hassas ivme ölçerler vasıtasıyla tespit edilerek yapının dinamik özelliklerine ilişkin veriler elde edilir.

Deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde operasyonel Modal Analiz Yöntemi'nin bir alt yöntemi olan Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi kullanılmıştır. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) yöntemi kullanımı kolay olan Frekans Ortamında Ayırıştırma (FOA) yönteminin geliştirilmiş halidir. Bu yöntemde modlar, davranışın spektral yoğunluk fonksiyonundan hesaplanan tekil değer ayırıştırma grafiklerindeki piklerin seçilmesiyle elde edilir.

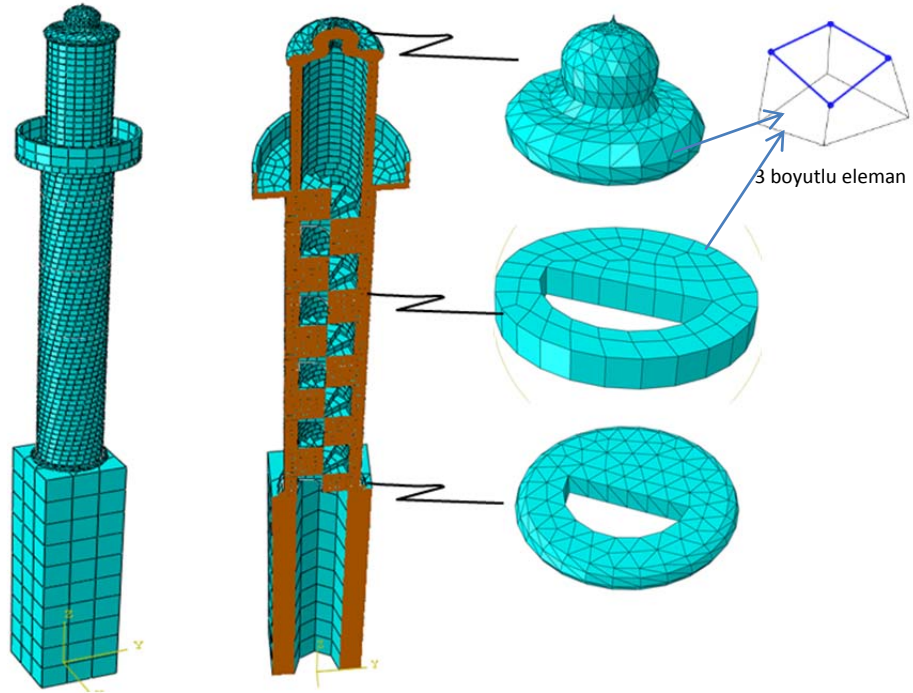
GFOA yönteminde etki ve tepki arasındaki ilişki; denklem 3.9'da verilmiştir. Denklemin çözümüne ilişkin 3. Bölümde gerekli açıklamalar yapıldığından burada tekrar edilmeyecektir.

İvme ölçerlerden alınan veriler gürültü gibi istenmeyen etkileri de içerdiğinden, bu etkilerin spektrumdan uzaklaştırılarak daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesi için filtreleme fonksiyonlarından Hamming pencereleme fonksiyonu kullanılmıştır. Sabit pencere fonksiyonlarından Hamming fonksiyonuna ilişkin denklem 3.24'de verilmiştir.

Çalışma konu edilen toplam 7 minarede yukarıda ifade edilen yöntemler yardımıyla arazide söz konusu testler her bir minare için ayrı ayrı tekrarlanmıştır. Yerinde yapılan inceleme ve ölçümler neticesinde minarelerin rölöveleri çıkarılmış bu kapsamda malzeme türleri, yükseklikler, yapı boyunca çaptaki değişim ve minarelerin yapıyla olan ilişkileri tespit edilmiştir. Bu aşamada minarelerin yapımında yaygın tekniklerin aksine farklı özel tekniklerin kullanılıp kullanılmadığının araştırması yapılmıştır. Yapılan

ölçümler neticesinde belirlenen boyutlar ve özellikler sonlu eleman modeli oluşturulmasında kullanılmıştır.

Mevcut yapıların karmaşıklığı göz önüne alındığında bu tür yapıların sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak el ile hesabı mümkün değildir. Ancak bu yöntemi kullanarak hesap yapabilen birçok bilgisayar yazılımı geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında da bu yazılımlardan biri olan Abaqus CAE programı kullanılmıştır. Analizden önce yapı elemanlarının modelleri geliştirilmiş ve her bir parça uygun sonlu elemanlara ayrılmıştır. Şekil 5.2’de sayısal modeli oluşturulan minarelerden birine ait sonlu eleman modeli gösterilmiştir.



**Şekil 5.2.** Örnek bir minareye ait sonlu eleman modeli

Sayısal modelleme tamamlandıktan sonra çözümler gerçekleştirilmiş ve bu çözümlerden doğal titreşim frekansları elde edilmiştir. Deney sonucu elde edilen doğal frekanslarla, yapıyı temsil etmesi beklenen sayısal model çözümünden elde edilen doğal frekanslar karşılaştırmalı olarak irdelenerek, sayısal modellerin gerçek yapı davranışını temsil edecek şekilde kalibre edilmesi sağlanmıştır.



## 6. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Çalışma kapsamında yedi adet minare incelenmiştir. Burada araştırmaya konu edilen minareler farklı yükseklikte ve çapta, farklı yapı malzemeleri ile ve farklı tekniklerle inşa edilmiş durumdadırlar. Diğer taraftan incelemeye konusu minarelerin ana gövdeyle ilişkileri bakımında yapıdan ayrı, yapıya bitişik ve ana beden duvarı içerisinde konumlandırılmış örnekler de bulunmaktadır. Yapılan çalışmalardan görülmüştür ki Bursa'da yer alan tarihi minarelerin tipik olarak yükseklikleri az, gövdeleri ise kalındır. Yapılan literatür araştırmasında, minarelerin genelde hasar gören bölümleri, hasar türleri hakkında bilgi sahibi olunulduğundan incelemelerde bu bölümlere ayrıca bir önem verilmiştir. Minarelere ait kitabelerden ve yazılı kaynaklardan da söz konusu camilerin özellikle minareleri büyük çoğunluğunun 1855 depremlerinde yıkıldığı veya büyük hasara uğradığı, yeniden inşa edilen minarelerde de bugünkü halleriyle yükseklik/çap oranının azaltıldığı anlaşılmaktadır. Yapım tarihleri itibarıyla incelenen minareler hemen hemen aynı dönemde inşa edilmelerine rağmen birkısmı sonradan yapılan müdahalelerle özgünlüklerini koruyamamıştır. Minarelerin yapımında; bölgede kolaylıkla bulunabilen küfeki taşının, ayrıca dolu harman tuğlasının kullanıldığı görülmüştür. Minarelerin geometrilerine ve yapı malzemelerine ilişkin özet bilgiler Çizelge 6.1'de gösterilmiştir.

Takip eden başlıklarda ilk olarak inceleme konusu minareler ve camilere ilişkin bilgiler verilmektedir. Camilerin ve dolayısıyla minarelerin Bursa ilindeki konumları verildikten sonra yerinde yapılan ölçümler ve incelemeler neticesinde minareler için elde edilen rölemler de yine bu başlıklarda her bir minare için sunulmaktadır. Bu başlıklarda ifade edilmeye çalışılan diğer önemli bir husus ise camilere ve dolayısıyla da minarelere ilişkin hizmet geçmişleridir. Elde edilen tüm veriler göz önünde bulundurularak, camilerin her biri için tarihi kayıtlardan elde edilen bilgiler de bu başlıklarda sunulmaktadır. Tüm bu bilgiler ışığında minare geçmişi hakkında bilgi sahibi olunabilmekte, yapıyla minare ilişkisi ve minare boyutları tespit edilebilmektedir.

Çizelge 6.1. Minarelerin geometrik özellikleri

	Bedrettin Camii	Emirsultan Camii	Hacılar Camii	Hoca Muslihiddin Camii	Hoca Tabip Camii	Hocaalizde Camii	Kayhan Camii
<b>Minare yüksekliği (m)</b>	20,52	30,85	24,45	21,6	14,3	24,59	19,42
<b>malzeme</b>	kaide	taş	taş+tuğla	taş+tuğla	taş+tuğla	taş+tuğla	taş+tuğla
	gövde/petek	taş	tuğla	tuğla	tuğla	tuğla	tuğla
<b>minare bölüm yükseklikleri</b>	kaide	11,4	8	8,6	4	8,5	6,4
	küp	0,25	1	1,2	1,12	1,08	1,12
	gövde	14	10,25	7,2	6,16	9,99	7,28
	petek	4,5	4,5	3,9	2,52	4,32	3,92
külâh	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,7	0,7
<b>dış çap</b>	kaide	sekizgen l=1,05	sekizgen l=1,04	sekizgen l=1,15	altıgen l=1,20	altıgen l=1,20	kare l=2,80
	gövde	R=2,25	R=1,90	R=2,00	R=1,62	R=1,80	R=1,65
	petek	R=1,95	R=1,76	R=1,80	R=1,46	R=1,60	R=1,45
<b>iç çap</b>	kaide	R=1,35	R=1,30	R=1,40	R=1,16	R=1,20	R=1,40
	gövde	R=1,35	R=1,30	R=1,40	R=1,16	R=1,20	R=1,05
	petek	R=1,35	R=1,30	R=1,40	R=1,16	R=1,20	R=1,00
<b>duvar kalınlığı</b>	kaide	0,6	0,6	0,65	0,4	0,45	0,7
	gövde	0,45	0,3	0,3	0,23	0,3	0,3
	petek	0,3	0,23	0,2	0,15	0,2	0,2

## 6.1. Bedrettin Camii

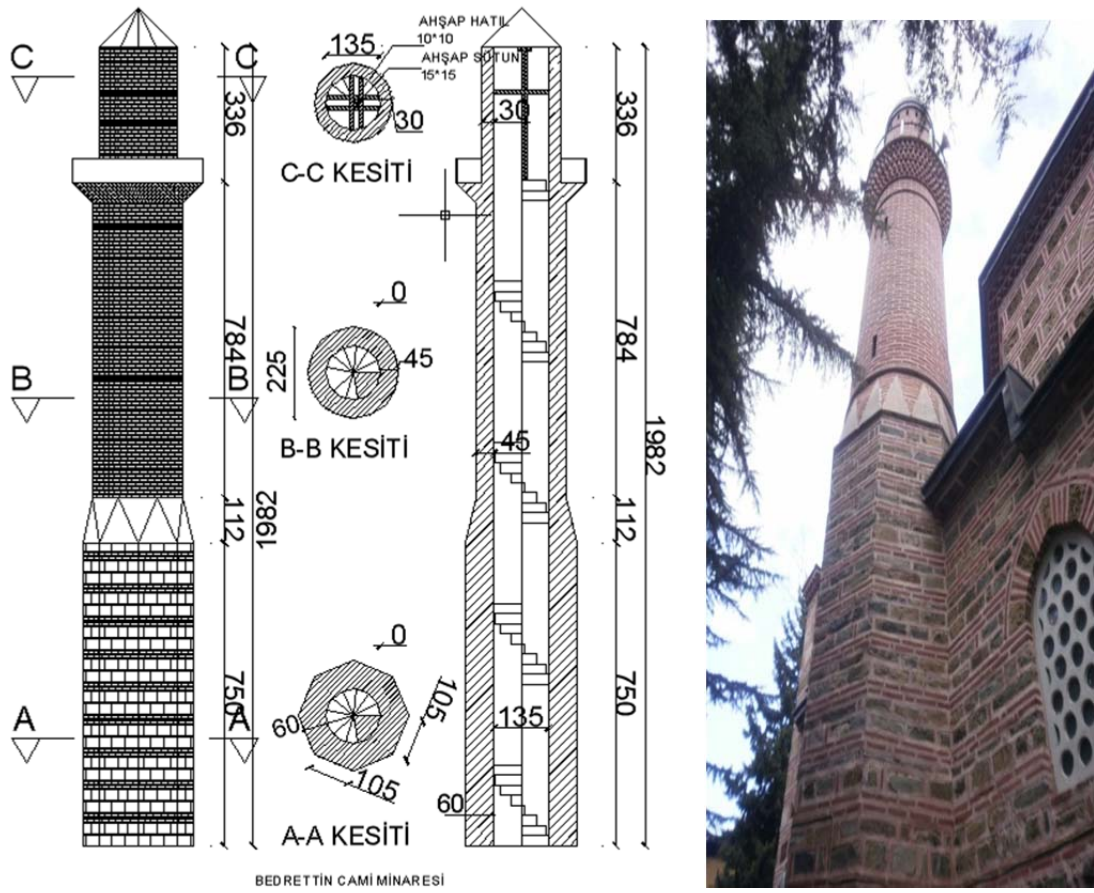
Cami eski kent merkezinde Kayhan Mahallesinde yer almaktadır (Şekil 6.1). Kitabesinden 1443 yılında Çelebi Mehmet'in kızı Hafsa Sultan tarafından inşa ettirildiği anlaşılmaktadır. Minarenin sekizgen olan kaidesi cami beden duvarlarında olduğu gibi

iki sıra taş iki sıra tuğla olarak almaşık düzende inşa edilmiştir. Kitabesinden caminin ilk olarak 1586 yılında daha sonra 1888 yılında ve son olarak 1995 yılında onarım geçirdiği anlaşılmaktadır. Caminin 1888 yılında onarım geçirmesi 1855’de meydana gelen büyük depremlerden etkilendiğini düşündürmektedir. Yapısal anlamda değerlendirildiğinde minare günümüzde gayet iyi durumdadır.



**Şekil 6.1.** Bedrettin Camiinin konumu

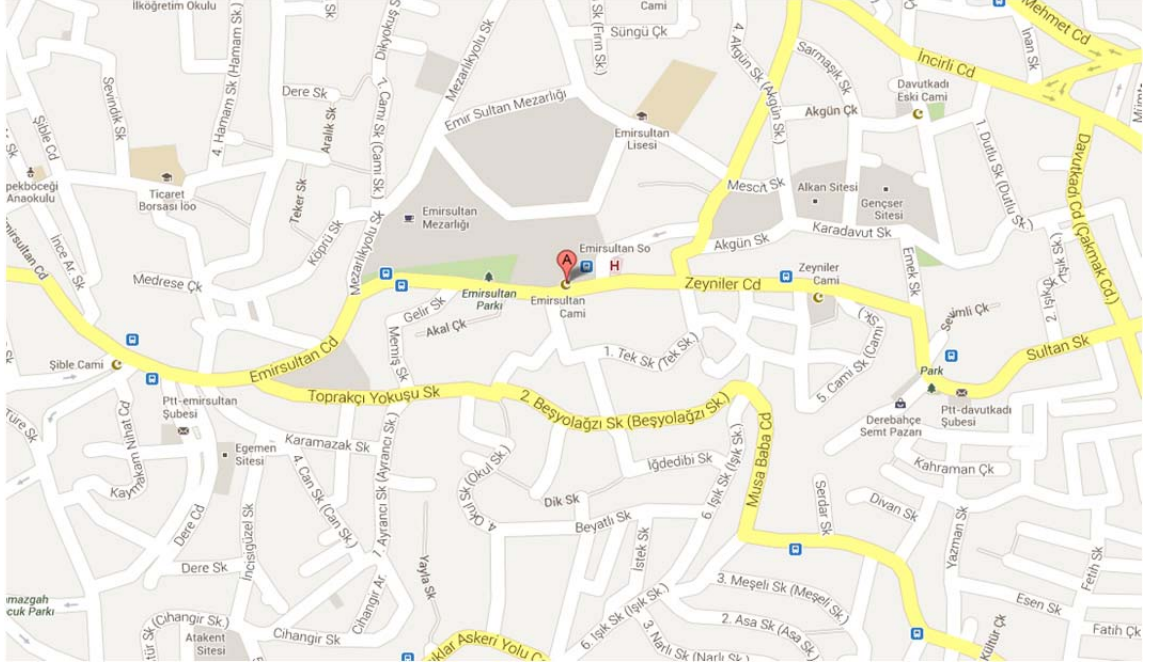
Minarenin gövde ve petek kısmı ise sadece tuğla örgülüdür. Kaidenin dörtkenarı beden duvarı içinde yer alan minare yaklaşık 20,52 m dir. Gövdede iç çap yaklaşık 135 cm olup, basamak yükseklikleri 28 cm dir. Basamaklar oluşturulurken basamağın en altında ve en üstünde tek parça yaklaşık 8 cm kalınlığında tabaka halinde doğal kaya, ara kısmında ise tuğla kullanılmıştır. Basamaklar birbirlerinin üzerine basmak ve dış duvarın içerisine eklemlenmek suretiyle, şerefe zeminine kadar helezonik biçimde yükselerek bir nevi minarenin omurgası görevini üstlenmişlerdir. Sekizgen kaideden dairesel kesitli gövdeye üçgen prizma geometrisine benzeyen bir sistemle geçilmiştir. Petekte merdiven devam etmediğinden bu bölümün bir bütün olarak çalışmasını sağlamak için karşılıklı duvarları birbirlerine bağlayan, her iki doğrultuda ahşap hatıl sistemi kullanılmıştır (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. Bedrettin Camiinin geometrik özellikleri ve fotoğrafı

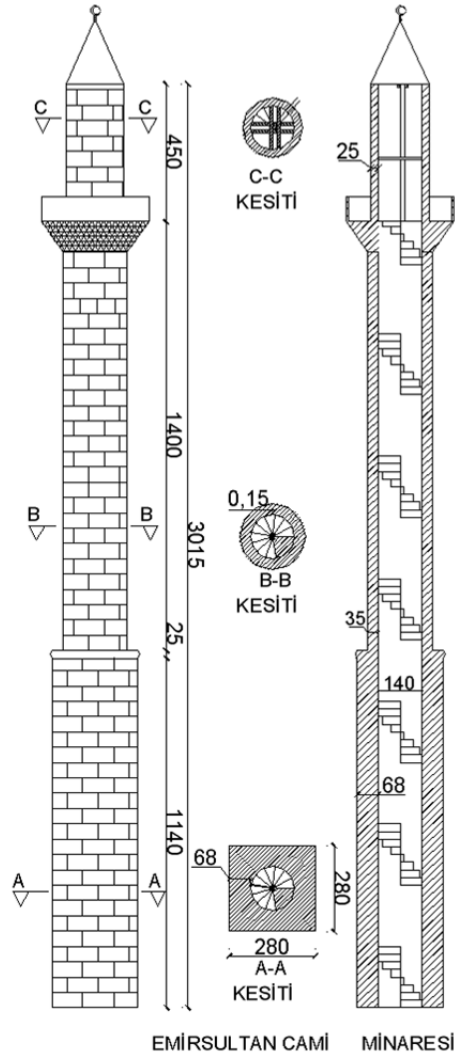
## 6.2. Emir Sultan Camii

Cami Yıldırım ilçesinde Emir Sultan Mahallesiinde yer almaktadır (Şekil 6.3). Yazılı kaynaklardan Yıldırım Beyazıd'ın kızı, Emir Sultanın eşi Hundi Fatma Sultan tarafından 15. Yüzyıl başlarında yaptırıldığı anlaşılmaktadır. Kaynaklardan, Caminin 1795 yılında tamamen harap olduğu, 1804-1805 yıllarında Sultan III selim döneminde bugünkü haliyle inşa edildiği, 1855 depreminde hasar gören yapının 19. Yüzyıl'da Sultan Abdülaziz tarafından onarıldığı anlaşılmaktadır. İyi bir taşıyıcı sistem kurgusu olan yapının taşıyıcı sistemi oluşturan malzemelerinde önemli derecede bozulma görülmemiştir.



**Şekil 6.3.** Emir Sultan Camiinin konumu

Caminin her iki köşesinde de birbirinin aynı özelliklere sahip minareler yer almaktadır. Bursa’da yer alan diğer tarihi minareler incelendiğinde Emir Sultan Cami minaresinin yükseklik olarak ortalamanın üzerinde olduğu göze çarpmaktadır. Minarenin inşasında bölgede sık kullanılan küfeki taşı kullanılmıştır. Yaklaşık 30 m yüksekliğindeki minarenin gövde iç çapı 140 cm olup, duvar kalınlıkları kaidede 68 cm, gövdede 35 cm ve petekte 25 cm dir. Merdiven oluşturulurken, her bir basamak taşı yay açısı yaklaşık 170° olan yekpare doğal taştan oluşturulmuştur. Bu açının küpten yukarıya doğru çıktıkça azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca gövdede taşlar, şaşırtmalı olarak metal parçalarla birbirlerine bağlanmışlardır (Şekil 6.4).



**Şekil 6.4.** Emir Sultan Camii minaresinin geometrik özellikleri ve fotoğrafı

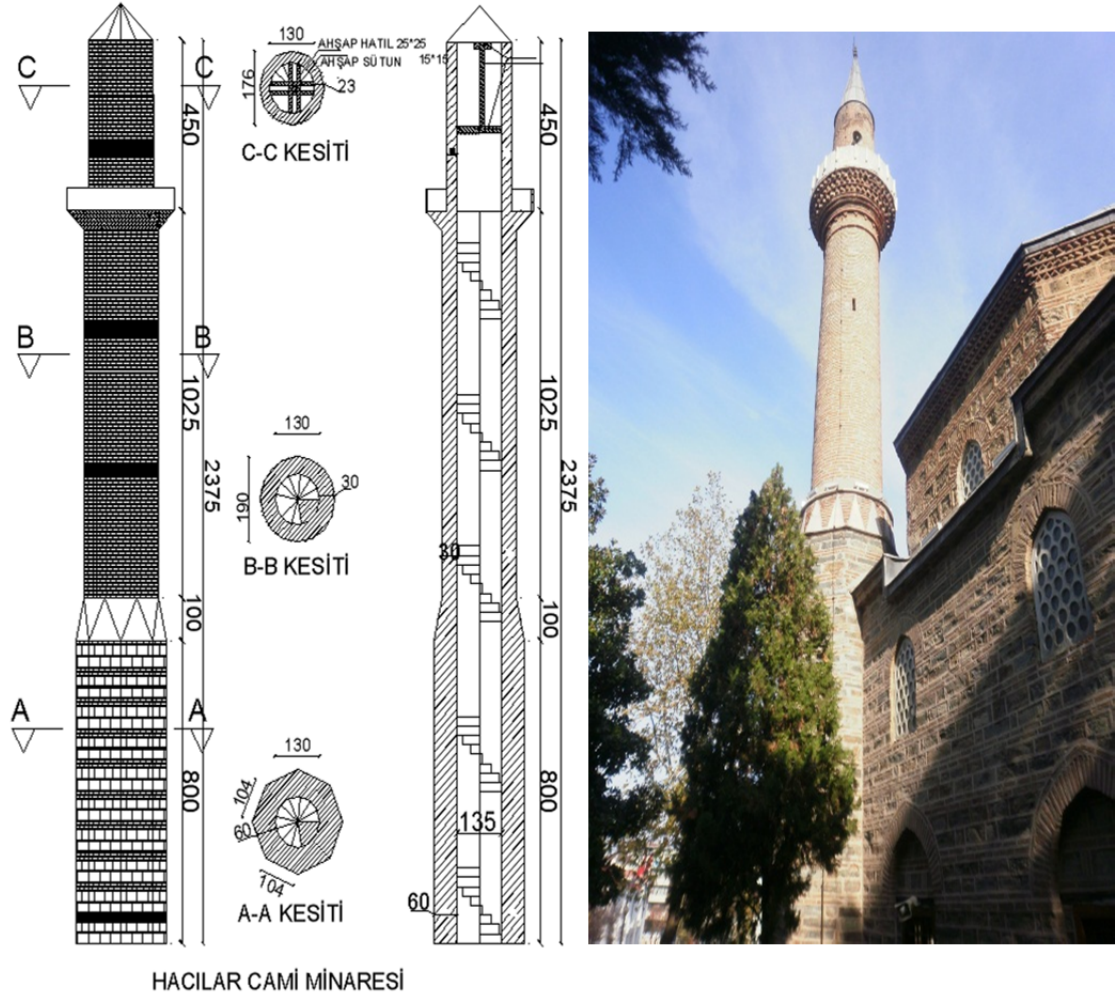
### 6.3. Hacılar Camii

Şehir merkezinde yer alan Caminin 1466-1467 yıllarında yaptırıldığı kitabesinden anlaşılmaktadır (Şekil 6.5). Tipik Bursa camilerinin özelliklerini taşıyan caminin minaresinde malzeme olarak küfeki taşı ve tuğla kullanılmıştır. Sekizgen olan kaide, iki sıra taş iki sıra tuğla olacak şekilde inşa edilmiştir. Gövde ve petek ise sadece tuğla örgüyle oluşturulmuştur. Yüksekliği yaklaşık olarak 23 m olan minarenin yükseklik boyunca iç çapı sabit olup 130cm dir. Kaidede duvar kalınlığı 60 cm, gövdede 30 cm ve petekte 23 cm olarak ölçülmüştür. Kaideden gövdeye geçişte üçgen prizma geometrisine benzeyen bir sistem kullanılmıştır (Şekil 6.6).





Şekil 6.5. Hacilar Camiinin konumu



Şekil 6.6. Hacilar Camii minaresinin geometrik özellikleri ve fotoğrafı

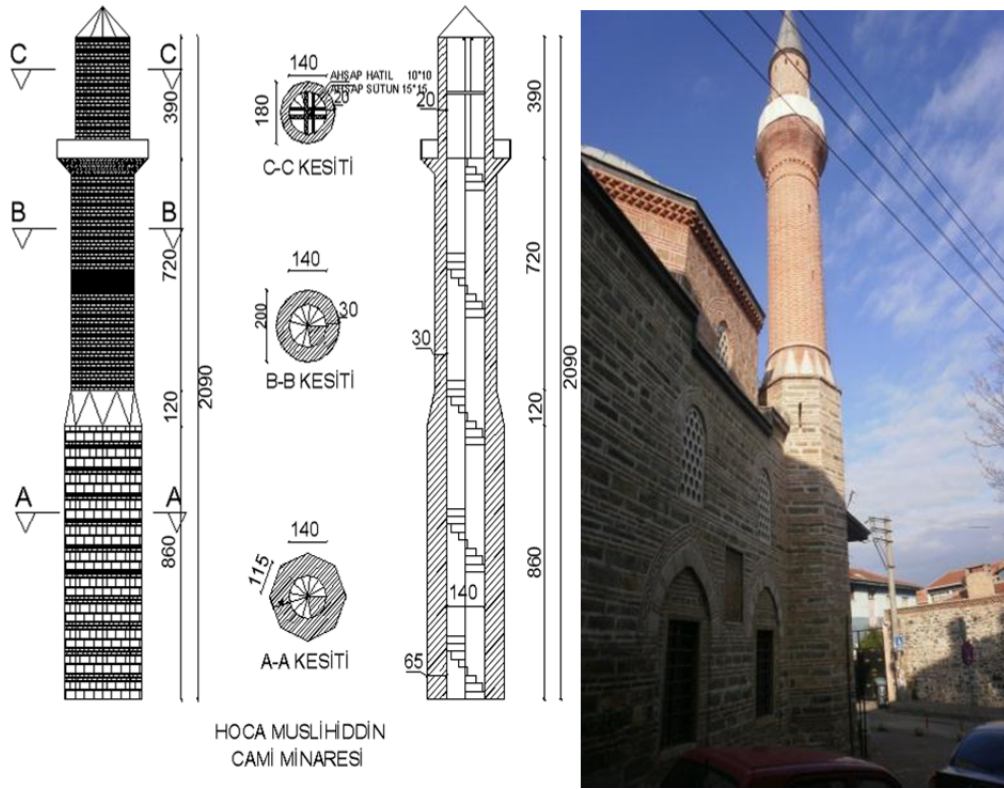
#### 6.4. Hoca Muslihiddin Camii

Mahkeme cami olarak bilinen cami, İbrahim Paşa Mahallesinde Mahkeme Hamamının karşı köşesinde yer almaktadır (Şekil 6.7). Sekizgen kaide kesme küfeki taşı ve tuğladan oluşturulmuştur. Kaideden külaha kadar olan kısımda ise tuğla kullanılmıştır. Kaideden gövdeye geçişte (küp) üçgen prizma geometrisine benzeyen bir sistem kullanılmıştır. Yüksekliği yaklaşık olarak 21,6 m olan caminin iç çapı minare boyunca sabit ve 1,40 m, dış çapı ise gövdede 2,00m petekte ise 1,80 m dir. Tuğladan oluşturulan merdiven basamak yükseklikleri ortalama 27 cm dir. Yazılı kaynaklardan caminin ilk olarak mescit olarak inşa edildiği, 1615 yılında minber eklenerek camiye dönüştürüldüğü bilgisi yer almaktadır. Kaidesi beden duvarı içerisinde yer alan minarede son yıllarda restorasyon çalışmaları yapılmış olduğundan günümüzde gayet iyi durumdadır(Şekil 6.8).



Şekil 6.7. Hoca Muslihiddin (Mahkeme) Camiinin konumu





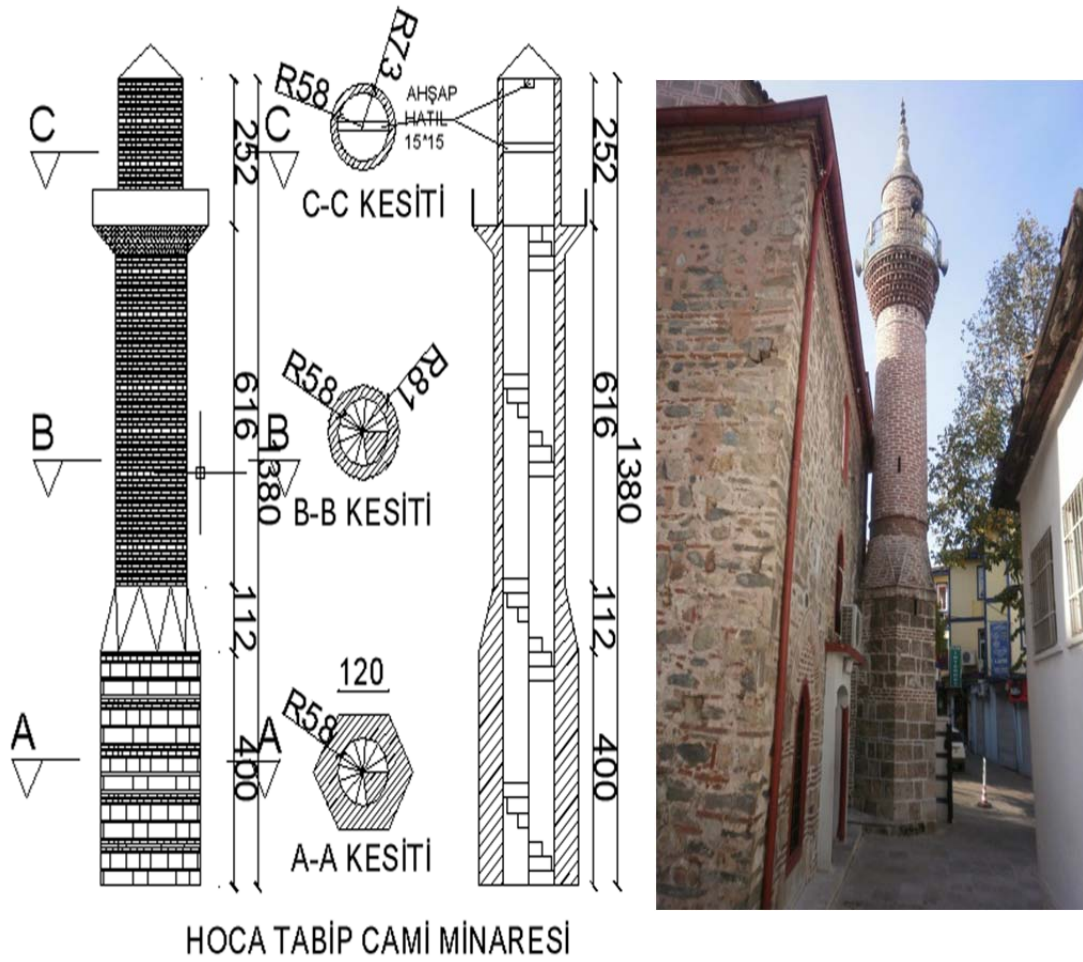
**Şekil 6.8.** Hoca Muslihiddin Camii geometrik özellikleri ve fotoğrafı

### 6.5. Hoca Tabip Camii

Hoca Tabip Camii merkezi konumda olup, tarihi dokunun yoğun olduğu bir bölgededir (Şekil 6.9). Hoca Tayyip Camii veya minare şerefesinin altına sıralanmış aynalar nedeniyle Aynalı Camii olarak da anılmaktadır. Kaynaklardan Hoca Tabip Hüsnü Efendi tarafından XV. Yüzyılın ilk yarısında yaptırıldığı anlaşılmaktadır. İlk zamanlarda mescit olarak kullanılan yapıya daha sonra minber eklenerek camiye çevrilmiştir. İncelenen minareler içerisinde yüksekliği en az olan minaredir. Minare yüksekliği yaklaşık olarak 14,3 m dir. Altıgen kaide kesme küfeki taşından ve tuğladan oluşturulmuştur. Gövde ve petek ise sadece tuğla kullanılarak inşa edilmiştir. Gövde iç çapı 1,16 m olan minarede duvar kalınlıkları da yüksekliğe bağlı olarak daha azdır. Duvar kalınlığı kaidede 40 cm, gövdede 23 cm ve petekte 15 cm olarak ölçülmüştür. Yakın zamanda tamirat görmüş olduğu anlaşılan yapının taşıyıcı sistemini oluşturan tuğla malzemelerinde bozulmalar olduğu gözlenmiştir (Şekil 6.10).



Şekil 6.9. Hoca Tabip Caminin konumu



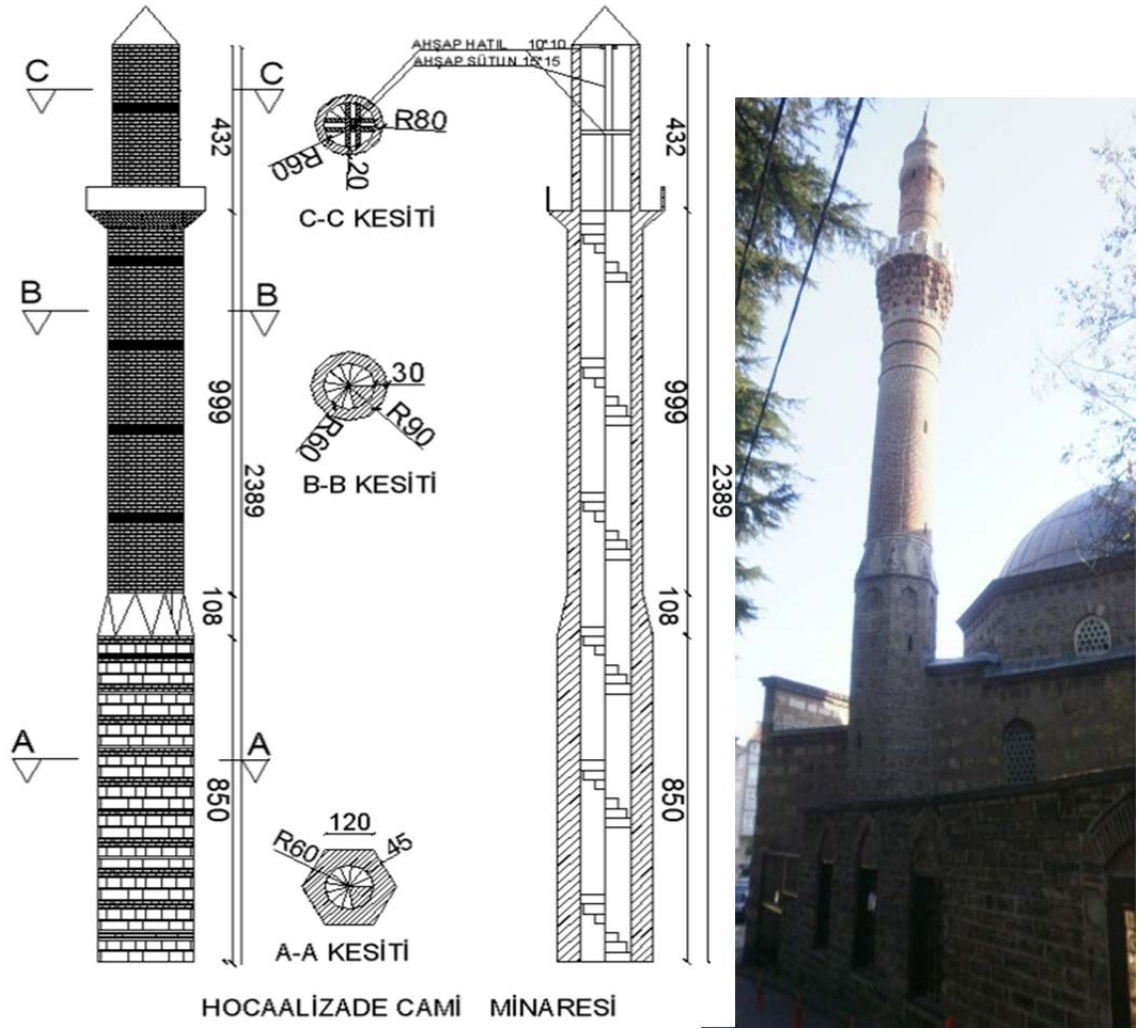
Şekil 6.10. Hoca Tabip Camii minaresinin geometrik özellikleri ve fotoğrafı

## 6.6. Hocaalızade Camii

Hocaalızade mahallesinde yer alan caminin kitabesinden Hacı Ömer oğlu Hoca Ali tarafından 1439 yılında yaptırıldığı anlaşılmaktadır (Şekil 6.11). Minarenin yapımında kesme küfeki taşı ve tuğla kullanılmıştır. Bursadaki tarihi minareler göz önünde bulundurulduğunda, minarenin ortalamanın üstünde bir yüksekliğe sahip olduğu görülmektedir. Minare yaklaşık olarak 24,59 m yüksekliğindedir. Minare bu yükseklikte olmasına rağmen duvar kalınlıkları gövdede 30 cm ve petekte 20 cm olarak ölçülmüştür. Minare boyunca iç çap sabit olup 1,20 m, dış çap ise gövdede 1,80 m ve petekte 1,60 m dir. Değişik mimari tekniklerle süslenen minarenin yapısal olarak iyi durumda olduğu gözlenmiştir (Şekil 6.12).



Şekil 6.11. Hocaalızade Camiinin konumu



**Şekil 6.12.** Hocaalızade Camii minaresinin geometrik özellikleri ve fotoğrafı

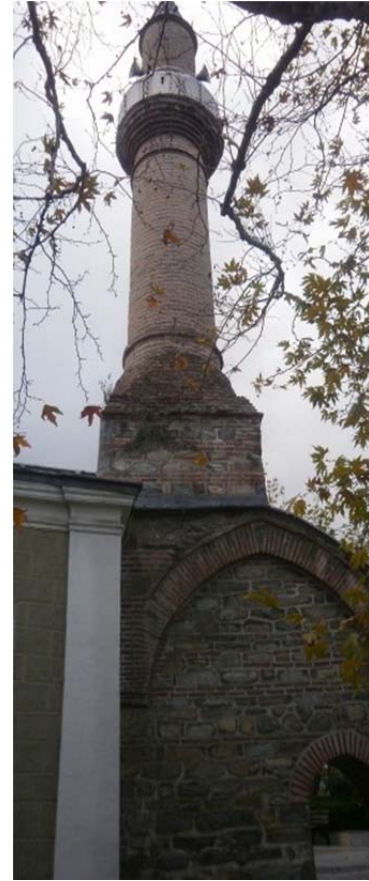
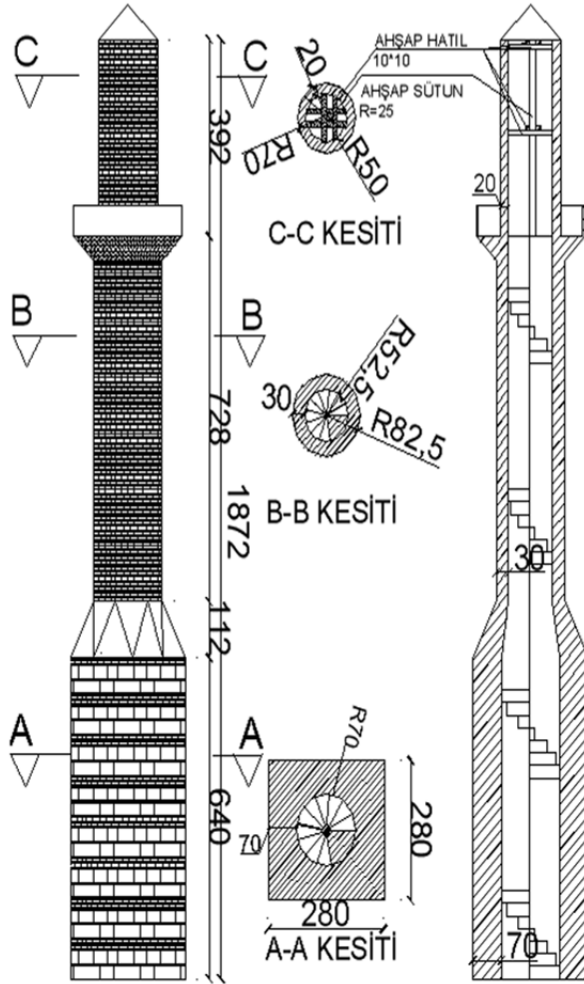
### 6.7. Kayhan Camii

Kayhan Mahallesinde yer alan camiye ait kitabeden Kaygan Musa oğlu Mehmet tarafından 1497 yılında yaptırıldığı anlaşılmaktadır (Şekil 6.13). Kaynaklarda yapının 1855 depreminde yıkıldığı ve 1870 yılında yandığı, daha sonra 1873 yılında yeniden inşa edildiği, mevcut yapının özgün mimarisini yitirdiği bilgisi yer almaktadır. Mevcut haliyle yapı malzemelerinde gözle görülür bozulmalar (tuğlada yumuşama ve aşınma) mevcuttur (Şekil 6.14). Şerefe seviyesinde petekten külaha kadar uzanan ahşap sütunda yer yer çürümeler ve böceklenmeler gözlenmiştir.





Şekil 6.13. Kayhan Camiinin konumu



KAYHAN CAMİ MİNARESİ

Şekil 6.14. Kayhan Camii minaresinin geometrik özellikleri ve fotoğrafı

Moloz taştan inşa edilen dikdörtgen geometrili kaidesi bir yandan yine aynı malzemeyle oluşturulan payandayla desteklenmiştir. Yüksekliği yaklaşık olarak 19,42 m olan minarenin iç çapı kaideden itibaren kademeli olarak azalmaktadır. Kaidede 1,40m olan iç çap gövdede 1,05 m ve petekte 1,00 m olarak ölçülmüştür. Duvar kalınlıkları ise kaidede 70 cm, gövdede 30 cm ve petekte 20 cm dir. Basamaklar, alt ve üst kısımda 8-10 cm kalınlığında yekpare kaya plak, arasında ise tuğla olacak şekilde oluşturulmuştur (Şekil 6.14).

## 7. BULGULAR VE İRDELEMELER

Çalışma kapsamında konu edilen toplam yedi farklı minare, yapılan çalışmalar kapsamında yerinde çevresel titreşimler etkisinde modal analiz teknikleri ile incelenmiştir. Yine yerinde yapı sistemleri üzerinden alınan ölçümler yardımıyla minarelerin rölöveleri çıkartılmış, bu rölöveler daha önceki başlıklarda her bir minare için sunulmuştur. Yerinde yapılan bu ölçümler vasıtasıyla elde edilen verilerden faydalanılarak her bir minarenin sayısal modeli ABAQUS programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Gerek yerinde arazide yapılan ölçüm sonuçları, gerekse elde edilen yapısal boyutlar ve teknikler göz önüne alınarak elde edilen sayısal model bulguları takip eden başlıklarda sunulmakta ve bu bulgular karşılaştırmalı olarak irdelenmektedir.

Çevresel etkiler kullanılarak yapılan modal analiz testlerinin gerçekleştirilmesi için kullanılan yöntem ve metodlar daha önce de ilgili başlıklarda verilmişti. Burada söz konusu yöntem ve metodlar kullanılarak çalışmaya konu edilen her minarede 5 Hz-50 Hz aralığında dört farklı frekans aralığı için ölçümler tekrarlanmıştır. Deney düzeneği ile alınan ölçümlerin değerlendirilmesi için, frekans aralığı 5 Hz, 10 Hz, 25 ve 50 Hz gibi dört farklı frekans aralığında elde edilen ivmeler için, 5 Hz lik ölçümlerde 160 sn lik, 10 Hz lik ölçümler için 80 sn lik, 25 Hz lik ölçümler için 16 sn ve 50 Hz lik ölçümler için ise 8 sn lik ivme verileri işlenmiştir. Zaman ortamında alınan bu ivme değerlerinin zamanla değişimleri her bir kanal için FFT analizi yardımıyla frekans ortamına çevrilerek güç spektrumları elde edilmiştir.

Yapılan ölçümlerin sonuçları irdelendiğinde aynı doğrultuda içeride ve dışarıda konumlandırılan ivme ölçerlerin konumlandırılmalarının ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır. Şöyle ki içeride konumlandırılan ivme ölçerlerin gürültüden daha az etkilenmesi nedeniyle daha temiz verilerin elde edildiği görülmüştür. Dışarıda yer alan ivme ölçerlerin ise küçük frekanslarda gürültünün etkisini spektruma yansıttığı gözlenmiştir.

### 7.1. Minarelere İlişkin Bulgular ve İrdelemeler

Her bir minare için elde edilen tüm veriler bu başlık altında sunulmaktadır. Bu minarelerin yerinde elde edilen ölçümlerine nazaran çizilen rölemleri ve yerinde

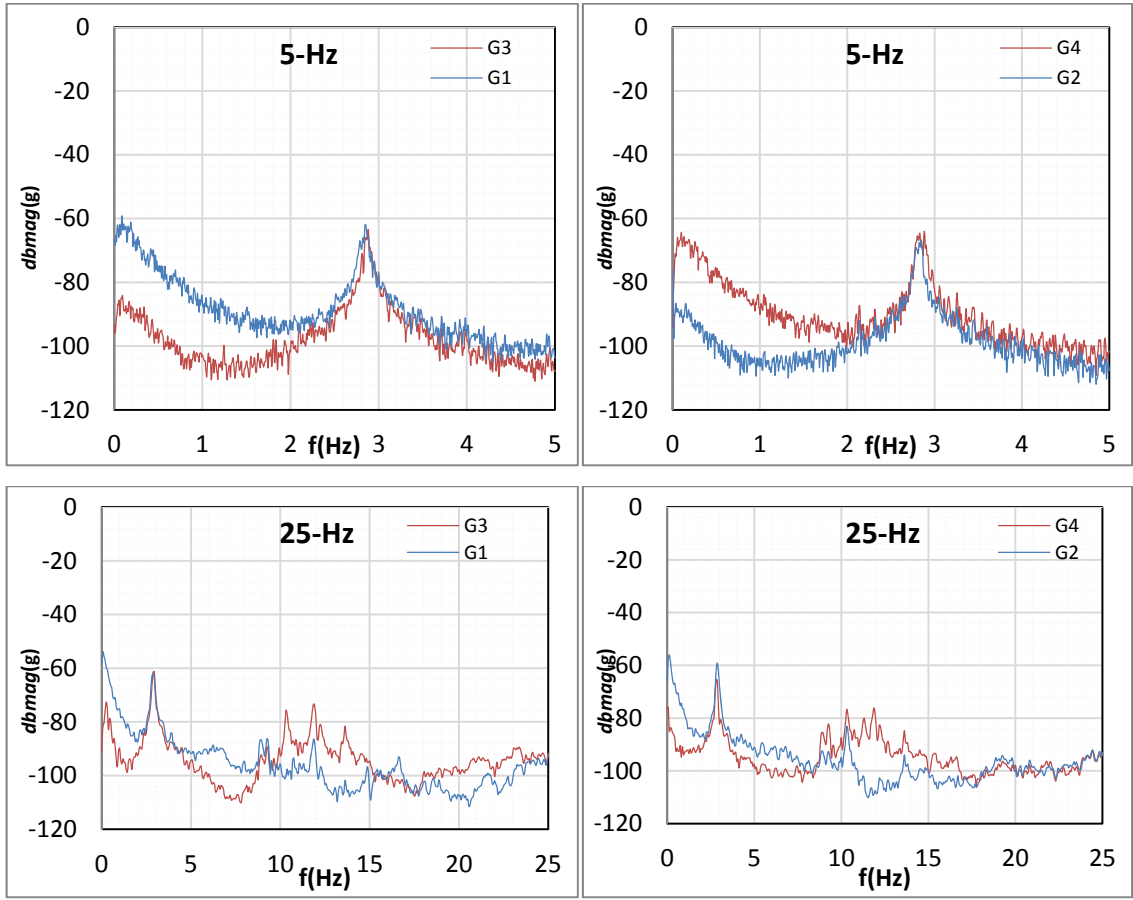
gerçekleştirilen testlere ilişkin sonuçlar takip eden başlıklarda sunulmaktadır. Yine her bir minare için testlerden elde edilen veriler ve bunların güç spektrumlarından tespit edilen modlar ile sayısal modellemeler ile elde edilen sonuçlar her bir minare için karşılaştırmalı olarak takip eden başlıklarda verilmektedir.

### **7.1.1. Bedrettin Camii**

Bedrettin Camii'ne ilişkin yapısal geçmiş ve geometrik özellikleri madde 6.1'de verilmiş idi. Burada söz konusu camiye ait minarelerin dinamik karakteristiklerin tespit edildiği deney sonuçları ile bu deney sonuçlarının yine yerinde alınmış ölçümlere göre gerçekleştirilen sayısal modellerle karşılaştırılmasından elde edilen bulgular sunulmaktadır.

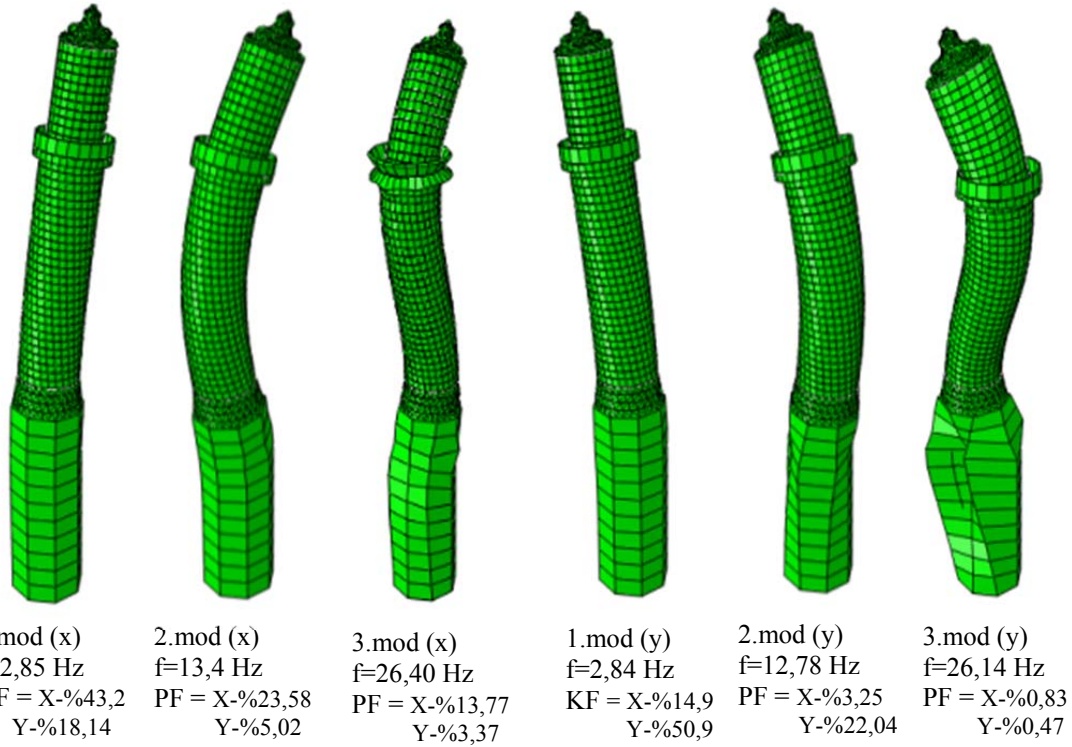
Minarenin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik yerinde dört farklı frekans aralığında ölçüm alınmış ancak karışıklığa neden olmamak için burada 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında alınan veriler ışığında elde edilen bulgular verilmiştir. 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1, G2, G3 ve G4 ivme ölçerlerinden alınan ölçümlere ilişkin güç yoğunluk spektrumları Şekil 7.1'de gösterilmiştir. Buna göre G1 ve G3 doğrultusunda sırasıyla ilk üç modda 2,85 Hz, 11,88 Hz ve 25,75 Hz frekanslar elde edilmiştir. Aynı şekilde G1 ve G3'e dik konumlandırılmış G2 ve G4 doğrultusunda ilk üç modda sırasıyla 2,83 Hz, 10,31 Hz, ve 25,63 Hz frekanslar elde edilmiştir. Çevresel titreşimlerin ölçümüne dayalı olarak elde edilen frekanslar sonlu eleman çözümlemesiyle elde edilen frekanslarla karşılaştırılmış, sonlu eleman modelinde malzeme özellikleri, sınır koşulları ve/veya mesnetlenme koşullarının kalibrasyonu yapılarak sonuçların birbirine yakınlığı sağlanmıştır. Sonlu eleman modeli üzerinde yapılan kalibrasyon işlemi neticesinde malzeme elastisite modülü 5500 MPa, yoğunluğu 2400kg/m<sup>3</sup> ve Poisson oranı 0,3 olarak tahmin edilmiştir. Kalibrasyon sonrası yapılan sonlu eleman analizinden elde edilen sonuçlarla yerinde yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, frekanslar arasında G1-G3 doğrultusunda sırasıyla ilk üç modda %0,00, %12,59 ve % 2,54 ve G2-G4 doğrultusunda ilk üç modda %0,35, %23,91 ve % 1,97 farklar hesaplanmıştır. Özellikle her iki doğrultuda da kütle katılımının fazla olduğu ilk modlarda frekans değerleri arasındaki farkın küçük olduğu görülmüştür. Frekanslar arasında oluşan farkların süreksizliğin olduğu bu tür yapılarda makul seviyede olduğu düşünülmektedir.





**Şekil 7.1.** Bedrettin Cami - 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1,G2,G3 ve G4 doğrultularında güç yoğunluk spektrumları

Minarenin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan modeline ait X ve Y doğrultularında ilk üç moda ait mod şekilleri gösterilmektedir. Özellikle kütle katılımının fazla olduğu ilk modda ölçülen ve analiz sonucu elde edilen frekansların birbirine çok yakın olduğu, aradaki farkın X doğrultusunda %0 ve Y doğrultusunda %0,35 olduğu görülmektedir.



**Şekil 7.2.** Bedrettin Cami minaresine ait birbirine dik doğrultularda ilk üç moda ait mod şekilleri

Çizelge 7.1’ de verilen oranlara göre X ve Y doğrultularında kütle katılımı ilk üç modda % 90’ların üzerindedir. Dolayısıyla her iki doğrultuda da ilk üç mod sistemi temsil eder niteliktedir. Her iki doğrultuda da ilk modlarda kütle katılımının yüksek olduğu görülmektedir.

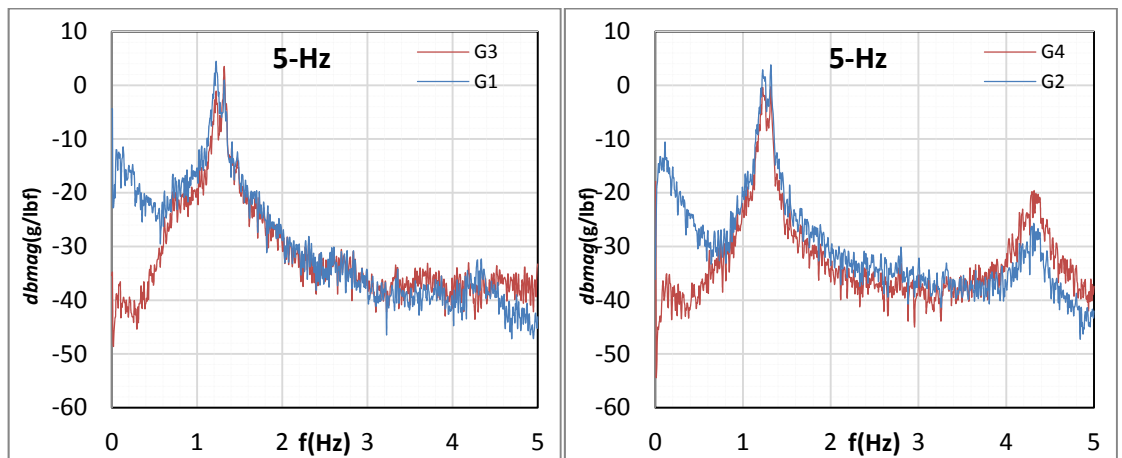
**Çizelge 7.1.** Bedrettin Cami minaresine ait frekans değerleri

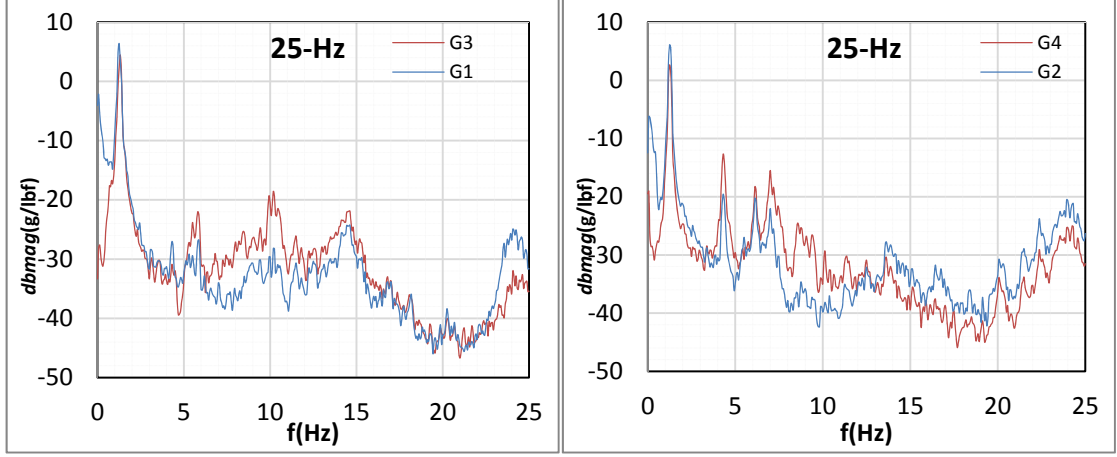
Mod	Sonlu Elemanlar Yöntemi (Hz)	Kütle Katılım Oranı %		Çevresel Titreşim Testi (Hz)	Fark (%)	
		X	Y			
X mod	1	2,85	43,23	18,14	2,85	0
	2	13,376	23,85	5,02	11,88	12,59
	3	26,404	13,77	3,37	25,75	2,54
Y mod	1	2,84	14,92	50,93	2,83	0,35
	2	12,78	3,25	22,04	10,31	23,91
	3	26,14	0,83	0,47	25,63	1,97

### 7.1.2. Emir Sultan Camii

Emir Sultan Camii'ne ilişkin yapısal sistem, malzeme özellikleri ve geometrik özellikler Madde 6.2'de verildiğinden burada tekrar edilmemektedir. Bu kısımda söz konusu caminin minaresinin dinamik karakterisitiklerin tespit edildiği deney sonuçları ile bu deney sonuçlarının yine yerinde alınmış ölçümlere göre gerçekleştirilen sayısal modellerle karşılaştırılmasından elde edilen bulgular karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

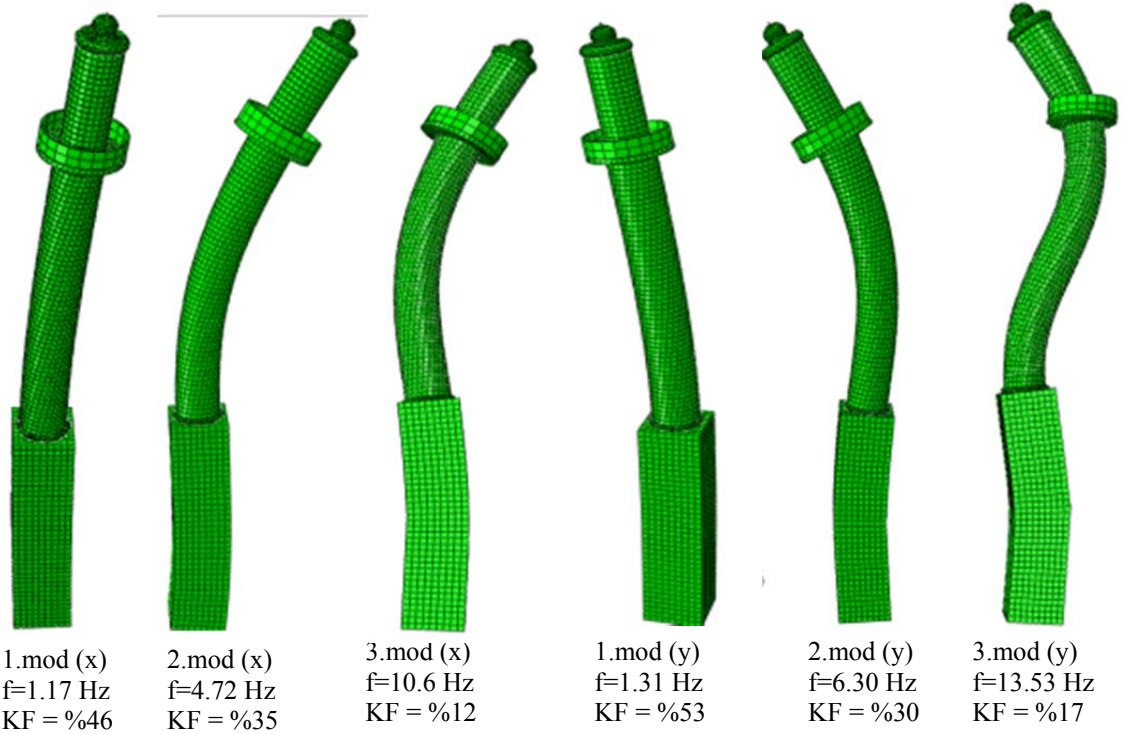
Yerinde yapılan ölçümlerde 5 Hz, 10 Hz, 25 Hz ve 50 Hz frekans aralığında ölçümler alınmış olup bu kısımda ilk üç modun frekans aralığını kapsayan 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1,G2,G3 ve G4 ivme ölçerlerinden alınan ölçümler sunulmuştur (Şekil 7.3). Buna göre G1 ve G3 doğrultusunda sırasıyla ilk üç modda 1,21 Hz, 4,36 Hz ve 10,2 Hz frekanslar elde edilmiştir. Aynı şekilde G1 ve G3'e dik konumlandırılmış G2 ve G4 doğrultusunda ilk üç modda sırasıyla 1,31 Hz, 6,21 Hz ve 13,63 Hz frekanslar elde edilmiştir. Yerinde yapılan titreşim deneyleri sonucu elde edilen frekanslar sayısal modelin çözümüyle elde edilen frekanslarla karşılaştırılmış, sonlu eleman modelinde malzeme özellikleri, sınır koşulları ve/veya mesnetlenme koşullarının kalibrasyonu yapılarak sonuçların birbirine yakınlığı sağlanmıştır. Sonlu eleman modeli üzerinde yapılan kalibrasyon işlemi neticesinde malzeme elastisite modülü 9000 MPa, yoğunluğu 2500 kg/m<sup>3</sup> ve poisson oranı 0,25 alınarak yapılan sonlu eleman analizinde, G1-G3 doğrultusunda sırasıyla ilk üç modda %3,31, %-8,26 ve % -3,92 ve G2-G4 doğrultusunda ilk üç modda % 0,00, %-1,61 ve % 0,73 farklar hesaplanmıştır.





**Şekil 7.3.** Emirsultan Cami - 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1,G2,G3 ve G4 doğrultularında güç yoğunluk spektrumları

Şekil 7.4’de minarenin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan modeline ait X ve Y doğrultularında ilk üç moda ait mod şekilleri gösterilmektedir. Özellikle kütle katılımının fazla olduğu ilk modda ölçülen ve analiz sonucu elde edilen frekansların birbirine çok yakın olduğu, aradaki farkın X doğrultusunda %3,31 ve Y doğrultusunda %0,00 olduğu görülmektedir.



**Şekil 7.4.** Emir Sultan Cami minaresine ait birbirine dik doğrultularda ilk üç moda ait mod şekilleri

Çizelge 7.2’den anlaşılacağı üzere sayısal modellemeyle elde edilen verilere göre X ve Y doğrultularında kütle katılımı (KF) ilk üç modda X doğrultusunda % 93, Y doğrultusunda ise %100 oranındadır. Dolayısıyla her iki doğrultudada ilk üç mod sistemi temsil eder niteliktedir.

**Çizelge 7.2.** Emir Sultan Cami minaresine ait frekans değerleri

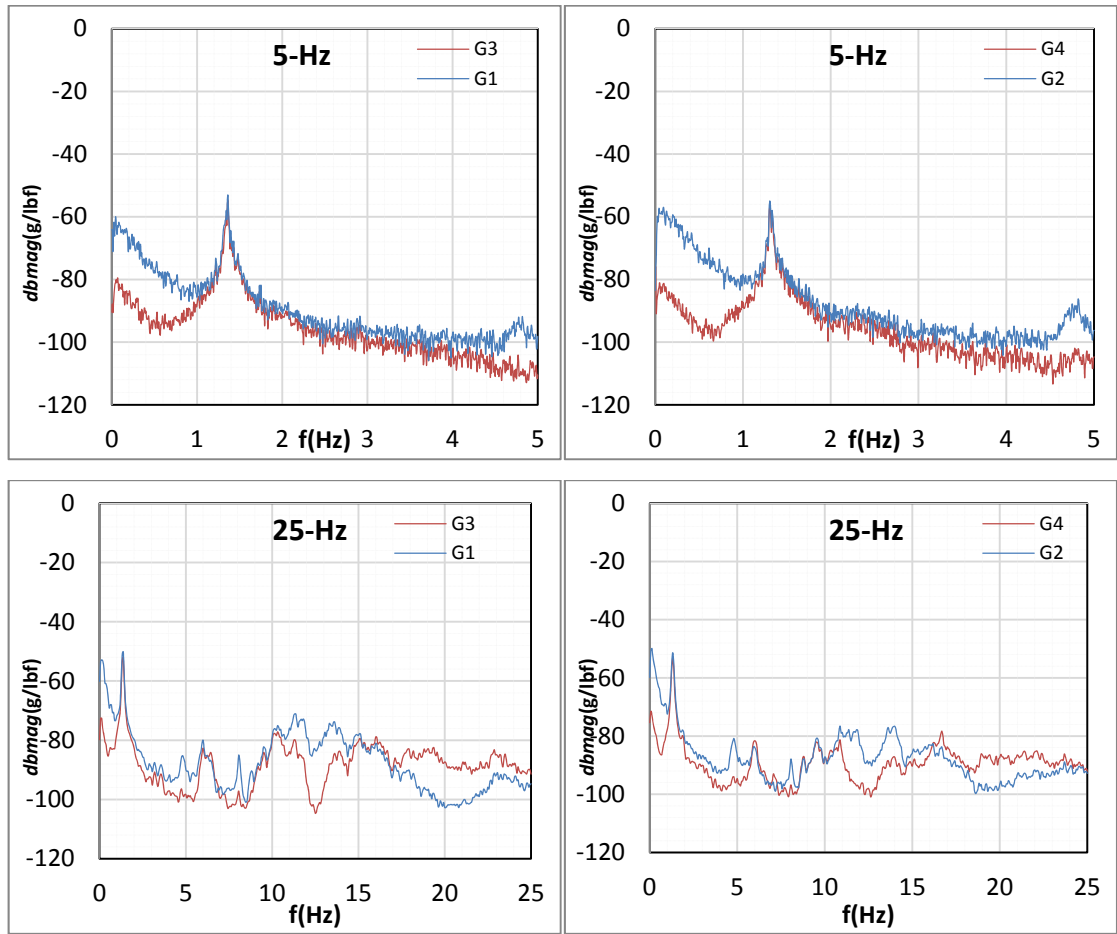
	Mod	Sonlu Elemanlar Yöntemi (Hz)	KF %	Çevresel Titreşim Testi (Hz)	Fark (%)
X mod	1	1.17	46	1.21	3.31
	2	4.72	35	4.36	-8.26
	3	10.6	12	10.2	-3.92
Y mod	1	1.31	53	1.31	0.00
	2	6.31	30	6.21	-1.61
	3	13.53	17	13.63	0.73

### 7.1.3. Hacılar Camii

Hacılar Camii’ne ilişkin malzeme, yükseklik, her bir bölüme ait geometrik özellikler Madde 6.3’de verilmiş idi. Dolayısıyla bu kısımda söz konusu caminin minaresinin yapısal karakteristiklerin tespit edildiği çevresel titreşim testlerinin sonuçları ile bu deney sonuçlarının yine yerinde alınmış ölçümlere göre oluşturulan sonlu eleman modeli sonuçlarının karşılaştırılmasından elde edilen bulgular sunulmaktadır.

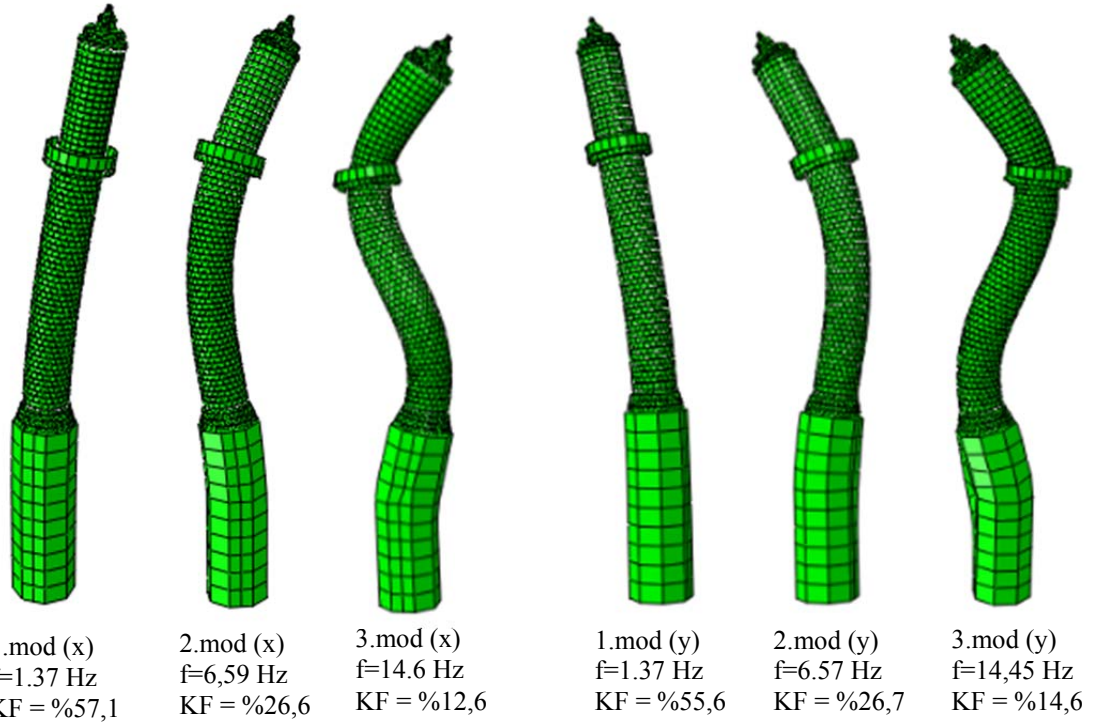
Minarenin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik yerinde 5 Hz, 10 Hz, 25 Hz, 50 Hz olmak üzere dört farklı frekans aralığında ölçüm alınmış ancak ilk üç modda belirlenen frekanslar 25 Hz den düşük olduğundan, burada 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında alınan veriler ışığında elde edilen bulgular verilmiştir. Buna göre 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1, G2, G3 ve G4 ivme ölçerlerinden alınan ölçümlere ilişkin güç yoğunluk spektrumları Şekil 7.5’de gösterilmiştir. Yapılan ölçümlerde G1 ve G3 doğrultusunda sırasıyla ilk üç modda 1,36 Hz, 6,2 Hz ve 13,63 Hz frekanslar elde edilmiştir. Aynı şekilde G1 ve G3’e dik konumlandırılmış G2 ve G4 doğrultusunda ilk üç modda sırasıyla 1,31 Hz, 6 Hz ve 14 Hz frekanslar elde edilmiştir. Çevresel titreşimlerin ölçümüne dayalı yöntemle elde edilen frekanslar sonlu eleman

çözümlemesiyle elde edilen frekanslarla karşılaştırılmış, sonlu eleman modelinde malzeme özellikleri, sınır koşulları ve/veya mesnetlenme koşullarının kalibrasyonu yapılarak sonuçların birbirine yakınlığı sağlanmıştır. Sonlu eleman modeli üzerinde yapılan kalibrasyon işlemi neticesinde malzeme elastisite modülü 3950 MPa, yoğunluğu 2500 kg/m<sup>3</sup> ve Poisson oranı 0,30 alınarak yapılan sonlu eleman analizinde, deneysel yolla elde edilen verilerle sayısal yaklaşımla elde edilen veriler arasında, G1-G3 doğrultusunda sırasıyla ilk üç modda %0,74, %-6,29 ve % -7,12 ve G2-G4 doğrultusunda ilk üç modda % 4,58, % -9,5 ve % -3,21 farklar hesaplanmıştır.



**Şekil 7.5.** Hacılar Cami - 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1,G2,G3 ve G4 doğrultularında güç yoğunluk spektrumları

Şekil 7.6'da minarenin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan modeline ait X ve Y doğrultularında ilk üç modun mod şekilleri gösterilmektedir. Özellikle kütle katılımının fazla olduğu ilk modda ölçülen ve analiz sonucu elde edilen frekansların birbirine çok yakın olduğu, aradaki farkın X doğrultusunda % 0,74 ve Y doğrultusunda % -4,58 olduğu görülmektedir.



**Şekil 7.6.** Hacılar Cami minaresine ait birbirine dik doğrultularda ilk üç moda ait mod şekilleri

Çizelge 7.3'den anlaşılacağı üzere sayısal modellemeyle elde edilen verilere göre X ve Y doğrultularında kütle katılımı (KF) ilk üç modda X doğrultusunda % 96,3, Y doğrultusunda ise %96,9 oranındadır. Dolayısıyla her iki doğrultudada ilk üç mod sistemi temsil eder niteliktedir.

**Çizelge 7.3.** Hacılar Cami minaresine ait frekans değerleri

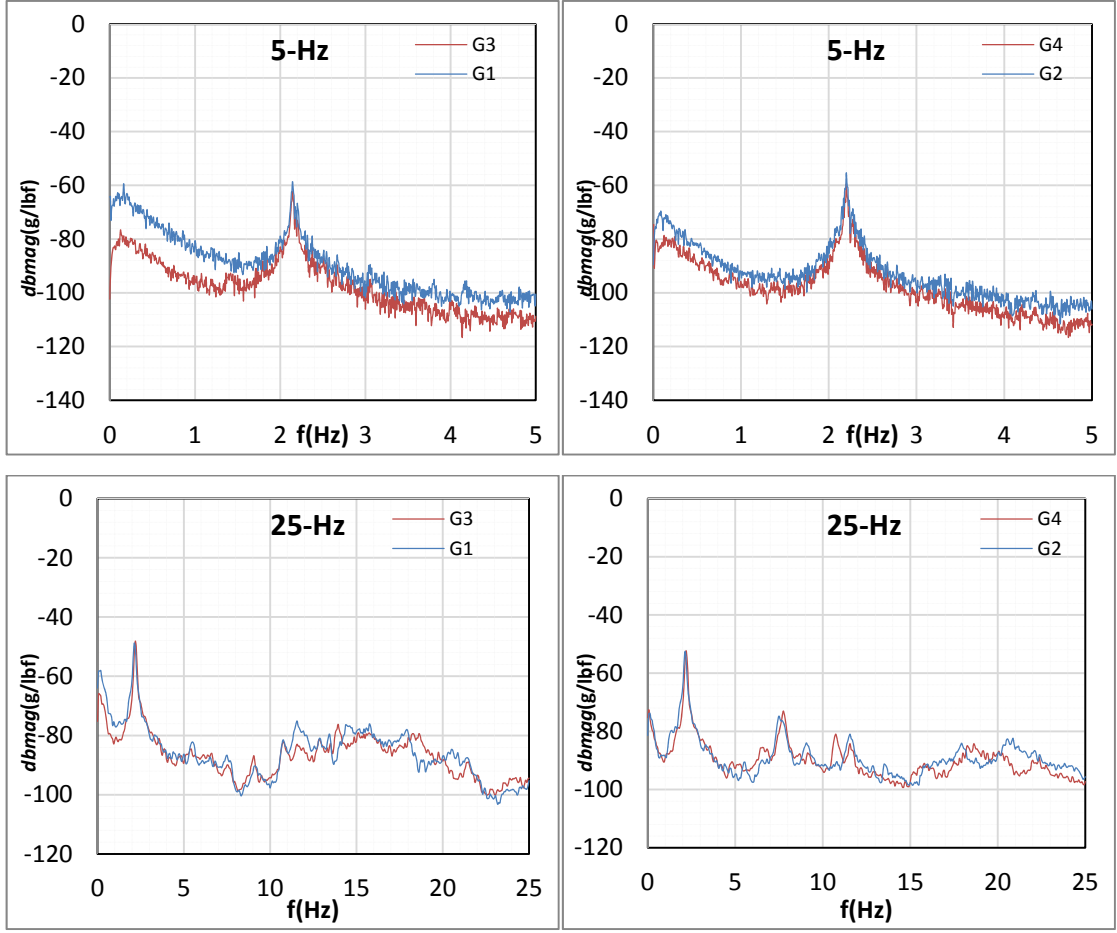
	Mod	Sonlu Elemanlar Yöntemi (Hz)	KF %	Çevresel Titreşim Testi (Hz)	Fark (%)
X mod	1	1,37	57,1	1,36	-0,74
	2	6,59	26,6	6,2	-6,29
	3	14,6	12,6	13,63	-7,12
Y mod	1	1,37	55,6	1,31	-4,58
	2	6,57	26,7	6	-9,50
	3	14,45	14,6	14	-3,21

#### 7.1.4. Hoca Muslihiddin Camii

Hoca Muslihiddin Camii'ne ilişkin yapısal ve geometrik özellikler Madde 6.4'de detaylı olarak verildiğinden bu bölümde geometrik özelliklerle ilgili ayrıntıya girilmeyecektir. Bu kısımda ölçüm yapılan minarenin yapısal karakteristiklerinin tespit edildiği çevresel titreşim testlerinin sonuçları ile bu deney sonuçlarının yine yerinde yapılan ölçümlere göre oluşturulan sonlu eleman modelinin çözümünden elde edilen bulgular ile karşılaştırılması sunulmaktadır.

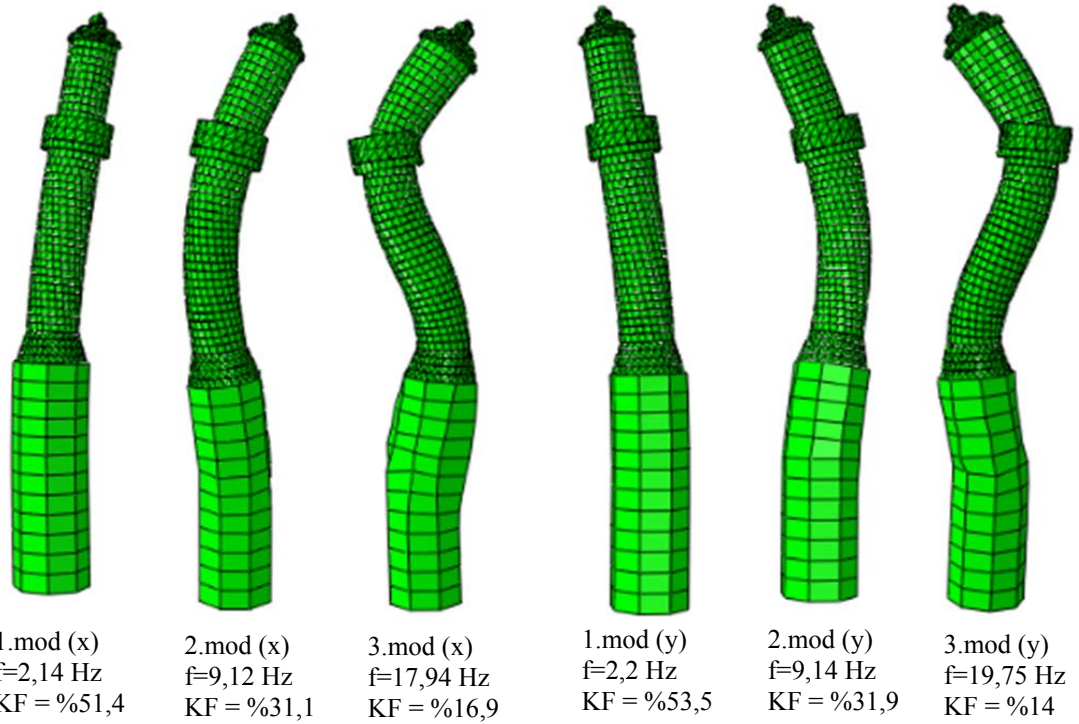
Minarenin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik yerinde dört farklı frekans aralığında ölçüm alınmış ancak karışıklığa neden olmamak için burada 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında alınan veriler ışığında elde edilen bulgular verilmiştir. Yerinde yapılan titreşim testlerinde, 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1,G2,G3 ve G4 ivme ölçerlerinden alınan ölçümlere ilişkin güç yoğunluk spektrumları Şekil 7.7'de gösterilmiştir. Buna göre G1 ve G3 doğrultusunda sırasıyla ilk üç modda 2,29 Hz, 9,3 Hz ve 19,02 Hz frekanslar elde edilmiştir. Aynı şekilde G1 ve G3'e dik konumlandırılmış G2 ve G4 doğrultusunda ilk üç modda sırasıyla 2,24 Hz, 9,00 Hz, ve 18,73 Hz frekanslar elde edilmiştir. Sonlu eleman çözümlemesiyle elde edilen frekansların çevresel titreşimlerin ölçümüne dayalı yöntemle elde edilen frekanslara yakınlığının sağlanması için malzemenin özellikleri kalibre edilmiş, mesnetlenme koşulları değiştirilmiş ve sonuçların birbirleriyle uyumlu olması sağlanmıştır. Yapılan kalibrasyon işlemi neticesinde malzeme elastisite modülü 3800 MPa, yoğunluğu 2500 kg/m<sup>3</sup> ve Poisson oranı 0,30 alınarak yapılan sonlu eleman analizinde, G1-G3 doğrultusunda sırasıyla ilk üç modda % 6,55, % 1,94, % 5,68 ve G2-G4 doğrultusunda ilk üç modda % 1,79, %-1,56, % -5,45 farklar hesaplanmıştır.





**Şekil 7.7.** Hoca Muslihiddin Cami - 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1,G2,G3 ve G4 doğrultularında güç yoğunluk spektrumları

Şekil 7.8’de minarenin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan modeline ait X ve Y doğrultularında ilk üç moda ait mod şekilleri gösterilmektedir. Özellikle kütle katılımının fazla olduğu ilk modda ölçülen ve analiz sonucu elde edilen frekansların arasında kabul edilebilir fark olduğu, aradaki farkın X doğrultusunda % 6,55 ve Y doğrultusunda % 1,79 olduğu görülmektedir.



**Şekil 7.8.** Hoca Muslihiddin (Mahkeme) Cami minaresine ait birbirine dik doğrultularda ilk üç moda ait mod şekilleri

Çizelge 7.4’den anlaşılacağı üzere sayısal modellemeyle elde edilen verilere göre X ve Y doğrultularında kütle katılımı (KF) ilk üç modda X doğrultusunda % 99,4, Y doğrultusunda ise %99,4 oranındadır. Dolayısıyla her iki doğrultudada ilk üç mod sistemi temsil eder niteliktedir.

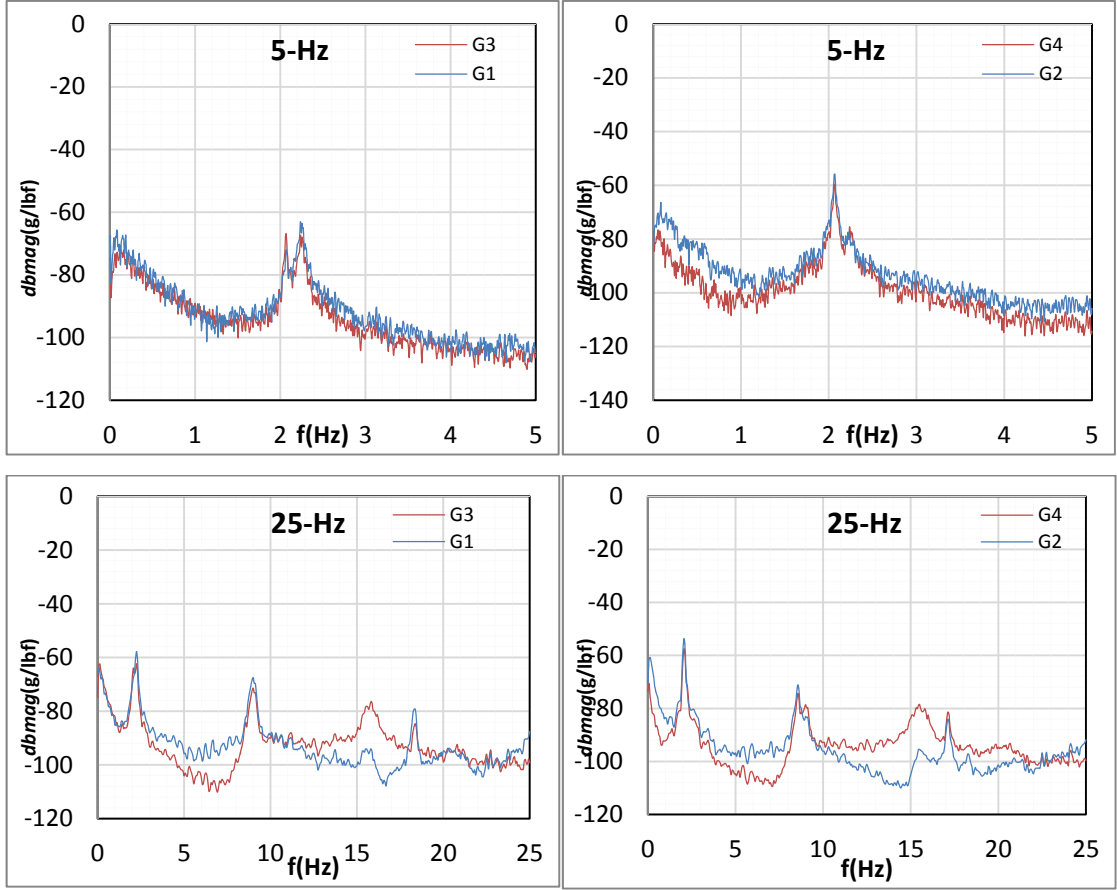
**Çizelge 7.4.** Hoca Muslihiddin Cami minaresine ait frekans değerleri

Mod	Sonlu Elemanlar Yöntemi (Hz)	KF %	Çevresel Titreşim Testi (Hz)	Fark (%)	
X mod	1	2,14	51,4	2,29	6,55
	2	9,12	31,1	9,3	1,94
	3	17,94	16,9	19,02	5,68
Y mod	1	2,2	53,5	2,24	1,79
	2	9,14	31,9	9	-1,56
	3	19,75	14	18,73	-5,45

### 7.1.5. Hoca Tabip Camii

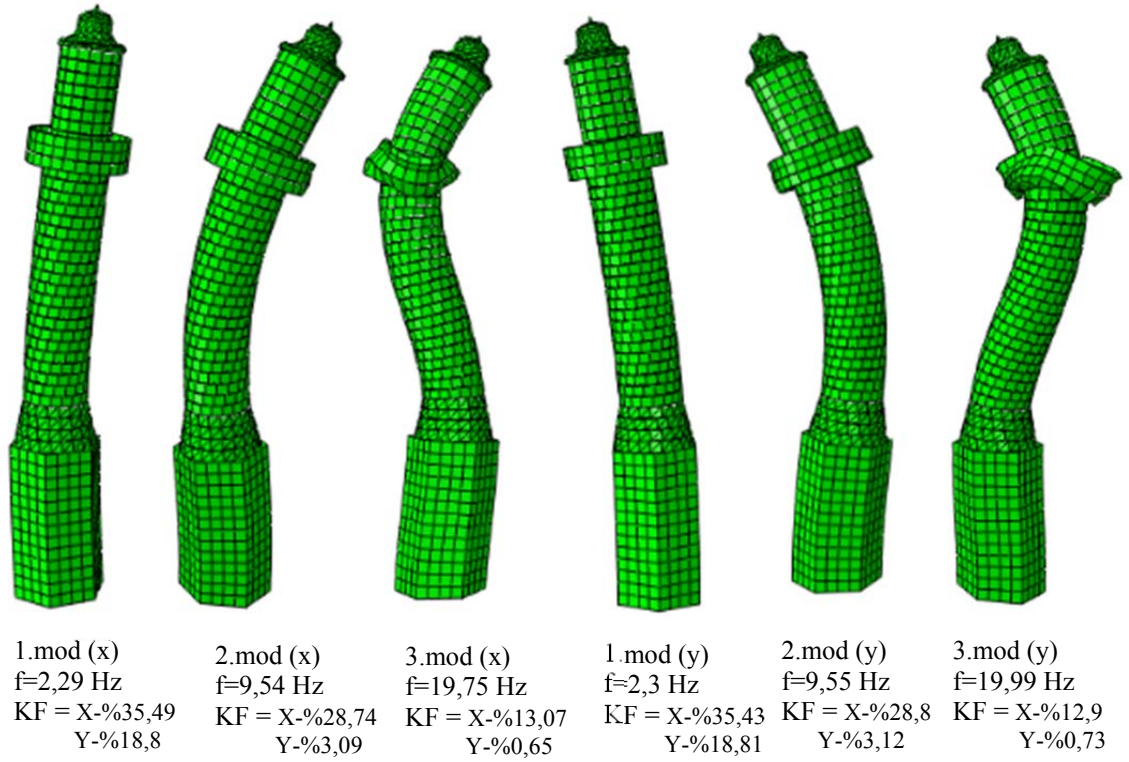
Hoca Tabip Camii'ne ilişkin yapısal ve geometrik özellikler Madde 6.5'de detaylı olarak verildiğinden burada tekrar edilmeyecektir. Bu bölümde incelenen minarede yapısal karakterisitiklerin tespit edildiği çevresel titreşim testlerinin sonuçları ile bu deney sonuçlarının oluşturulan sonlu eleman modelinin çözümünden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması sunulmaktadır.

Minarenin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik yerinde dört farklı frekans aralığında ölçüm alınmış ancak değerlendirme yapmak için yeterli görülen 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında alınan verilerle elde edilen bulgular sunulmuştur. Bu doğrultuda 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1,G2,G3 ve G4 ivme ölçerlerinden alınan ölçümlere ilişkin güç yoğunluk spektrumları Şekil 7.9'da gösterilmiştir. Buna göre G1 ve G3 doğrultusunda sırasıyla ilk üç modda 2,25 Hz, 9,08 Hz ve 18,38 Hz frekanslar elde edilmiştir. Aynı şekilde G1 ve G3'e dik konumlandırılmış G2 ve G4 doğrultusunda ilk üç modda sırasıyla 2,07 Hz, 8,6 Hz, ve 17,13 Hz frekanslar elde edilmiştir. Çevresel titreşimlerin ölçümüne dayalı yaklaşımla elde edilen frekanslar ile sonlu eleman çözümlemesiyle elde edilen frekanslar karşılaştırılmış, sonlu eleman modelinde malzeme ve mesnetlenme koşullarının kalibrasyonu yapılarak sonuçların deneysel yolla bulunan sonuçlara yakınlığı sağlanmaya çalışılmıştır. Bu doğrultuda malzeme elastisite modülü 3000 MPa, yoğunluğu 2500 kg/m<sup>3</sup> ve Poisson oranı 0,30 alınarak yapılan sonlu eleman analizinde, G1-G3 doğrultusunda sırasıyla ilk üç modda % -1,78, % -5,07 ve % -7,45; G2-G4 doğrultusunda ilk üç modda % -11,11, %-11,05 ve % -16,70 farklar hesaplanmıştır. Burada malzeme özellikleri incelendiğinde elastisite modülünün 3000MPa olarak alınması ile sistemin kalibrasyonunun gerçekleştirildiği görülmektedir. Tuğla örgülü minarelerde elastisite modülünün 3000MPa civarında olduğu, Emir Sultan Cami minaresi gibi taş örgülü minarelerde ise elastisite modülünün 9000 MPa seviyelerinde olduğu gözlenmiştir.



**Şekil 7.9.** Hoca Tabip - 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1,G2,G3 ve G4 doğrultularında güç yoğunluk spektrumları

Şekil 7.10 de minarenin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan modeline ait X ve Y doğrultularında ilk üç moda ait mod şekilleri gösterilmektedir. Özellikle kütle katılımının fazla olduğu ilk modda ölçülen ve analiz sonucu elde edilen frekansların arasındaki farkın kabuledilebilir sınırlarda olduğu, farkın X doğrultusunda % 1,78 ve Y doğrultusunda % -11,11 olduğu görülmektedir.



**Şekil 7.10.** Hoca Tabip Cami minaresine ait birbirine dik doğrultularda ilk üç moda ait mod şekilleri

Çizelge 7.5’den anlaşılacağı üzere sayısal modellemeyle elde edilen verilere göre X ve Y doğrultularında kütle katılımı (KF) ilk üç modda % 90 oranının üzerindedir. Dolayısıyla her iki doğrultudada ilk üç mod sistemi temsil eder niteliktedir.

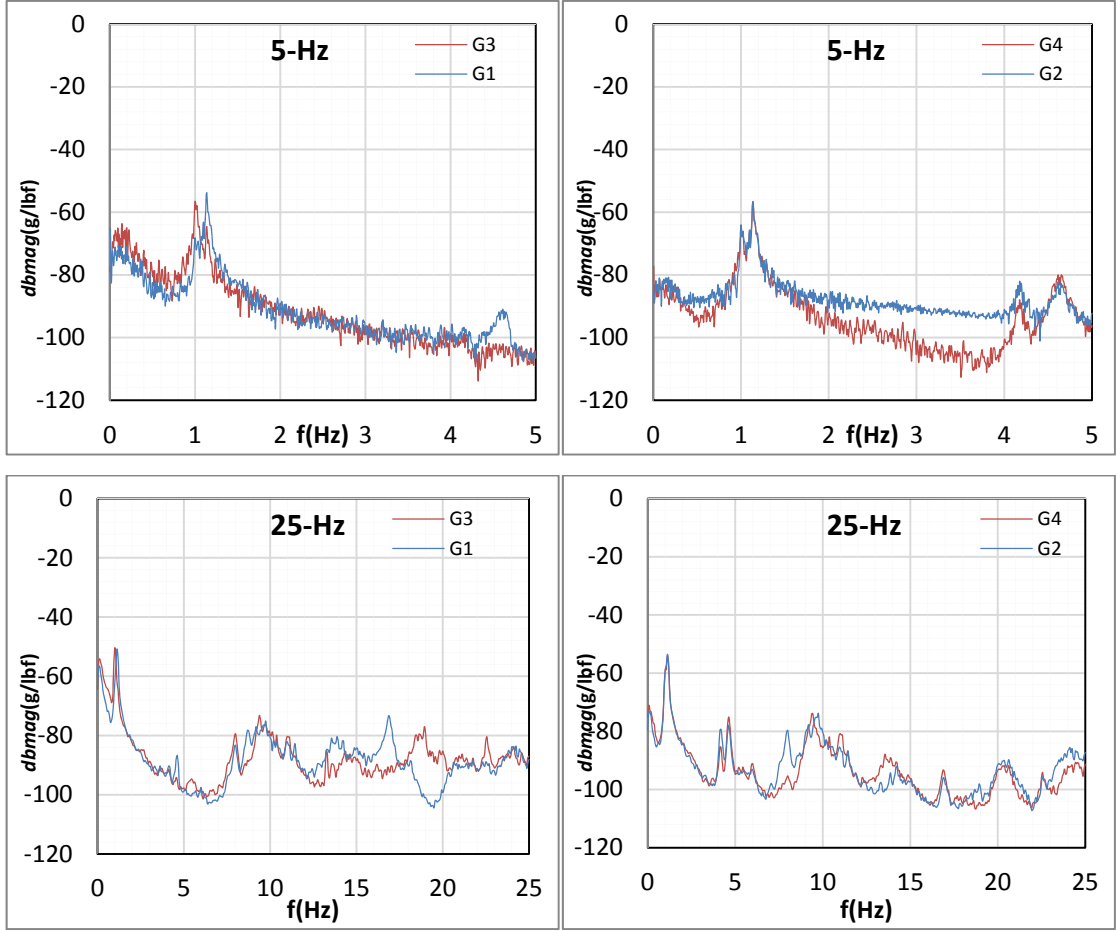
**Çizelge 7.5.** Hoca Tabip Cami minaresine ait frekans değerleri

Mod	Sonlu Elemanlar Yöntemi (Hz)	Kütle Katılım Oranı %		Çevresel Titreşim Testi (Hz)	Fark (%)	
		X	Y			
X mod	1	2,29	35,49	18,8	2,25	-1,78
	2	9,54	28,74	3,09	9,08	-5,07
	3	19,75	13,07	0,65	18,38	-7,45
Y mod	1	2,3	35,43	18,81	2,07	-11,11
	2	9,55	28,8	3,12	8,6	-11,05
	3	19,99	12,9	0,73	17,13	-16,70

### 7.1.6. Hocaalizde Camii

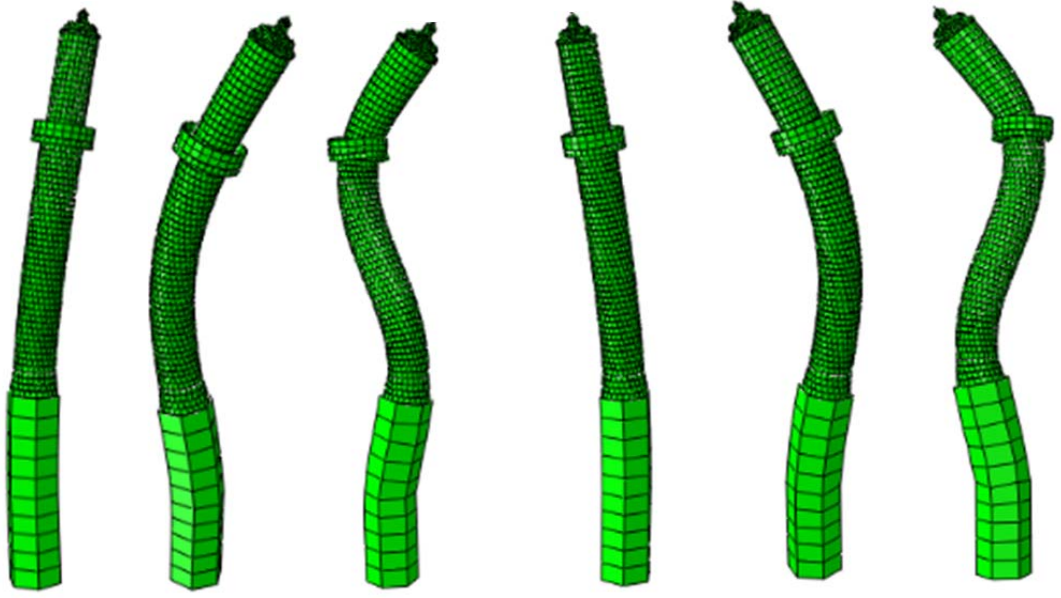
Hocaalizde Camii'nin yapım sistemine, geometrik özelliklerine, geçirdiği onarımlara ilişkin bilgiler Madde 6.6'da detaylı olarak verildiğinden burada yinelenmesine gerek görülmemiştir. Bu bölümde incelenen minarede, yapısal karakterisitiklerin tespit edildiği çevresel titreşim testlerinin sonuçları ile bu deney sonuçlarının, oluşturulan sonlu eleman modelinin çözümünden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması sunulmaktadır.

Yapısal karakteristiklerin belirlenmesine yönelik yerinde dört farklı frekans aralığında ölçüm yapılmış olmasına rağmen burada sadece 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında elde edilen sonuçların verilmesi yeterli görülmüştür. Buna göre değerlendirmenin daha kolay yapılabilmesi için G1,G2,G3 ve G4 ivme ölçerlerinden alınan ölçümlere ilişkin verilerin güç yoğunluk spektrumları Şekil 7.23 de gösterilmiştir. Yapılan ölçümler neticesinde G1 ve G3 doğrultusunda sırasıyla ilk üç modda 1,00 Hz, 4,2 Hz ve 9,75 Hz frekanslar elde edilmiştir. Aynı şekilde G1 ve G3'e dik konumlandırılmış G2 ve G4 doğrultusunda ilk üç modda sırasıyla 1,13 Hz, 4,65 Hz ve 11,44 Hz frekanslar elde edilmiştir. Sayısal modelin çözümüyle elde edilen sonuçlar deneysel yaklaşımla elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış, malzeme ve mesnetlenme koşullarında değişiklikler yapılarak sonuçların birbirine yakınlığı sağlanmaya çalışılmıştır. Bu doğrultuda malzeme elastisite modülü 2900 MPa, malzeme yoğunluğu 2500 kg/m<sup>3</sup> ve Poisson oranı 0,30 alınarak yapılan sonlu eleman analizinde, G1-G3 doğrultusunda sırasıyla ilk üç modda % 0,00, % -13,57 ve % -11,08 ve G2-G4 doğrultusunda ilk üç modda % 9,73, % -5,38 ve % 3,06 farklar hesaplanmıştır. Bu tür süreksiz yapılar için bu farkların kabul edilebilir olduğu, sayısal modelin yeterli temsil kabiliyetine sahip olduğu kabul edilmektedir.



**Şekil 7.11.** Hocaalizade Cami - 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1,G2,G3 ve G4 doğrultularında güç yoğunluk spektrumları

Şekil 7.12’de minarenin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan modeline ait x ve y doğrultularında ilk üç moda ait mod şekilleri gösterilmektedir. Özellikle kütle katılımının fazla olduğu ilk modda ölçülen ve analiz sonucu elde edilen frekansların birbirine çok yakın olduğu, farkın X doğrultusunda % 0,00 ve Y doğrultusunda % 9,73 olduğu görülmektedir.



1.mod (x) f=1 Hz KF = X-%45,55 Y-%13,61	2.mod (x) f=4,77 Hz KF = X-%19,36 Y-%6,11	3.mod (x) f=10,83 Hz KF = X-%8,15 Y-%2,21	1.mod (y) f=1,02 Hz KF = X-%13,21 Y-%44,98	2.mod (y) f=4,9 Hz KF = X-%18,99 Y-%4,65	3.mod (y) f=11,09 Hz KF = X-%2,27 Y-%8,39
--	--	--	---	---	--

**Şekil 7.12.** Hocaalizde Cami minaresine ait birbirine dik doğrultularda ilk üç moda ait mod şekilleri

Çizelge 7.6'dan anlaşılacağı üzere sayısal modellemeyle elde edilen verilere göre X ve Y doğrultularında kütle katılımı (KF) ilk üç modda % 90 oranının üstünde hesaplanmıştır. Dolayısıyla her iki doğrultudada ilk üç mod sistemi temsil eder niteliktedir.

**Çizelge 7.6.** Hocaalizde Cami minaresine ait frekans değerleri

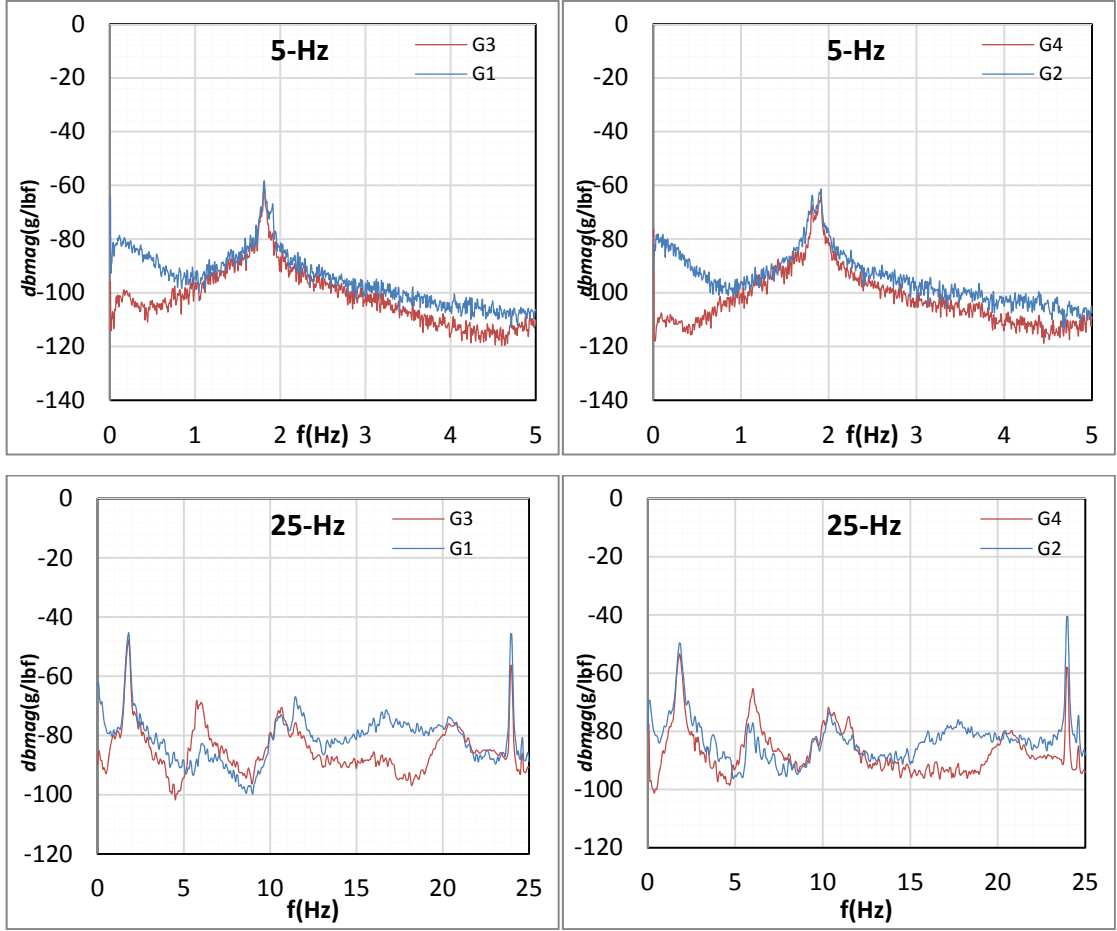
Mod	Sonlu Elemanlar Yöntemi (Hz)	Kütle Katılım Oranı %		Çevresel Titreşim Testi (Hz)	Fark (%)
		X	Y		
X mod	1	45,55	13,61	1	0,00
	2	19,36	6,11	4,2	-13,57
	3	10,83	8,15	9,75	-11,08
Y mod	1	13,21	44,98	1,13	9,73
	2	5,89	18,99	4,65	-5,38
	3	2,27	8,39	11,44	3,06



### 7.1.7. Kayhan Camii

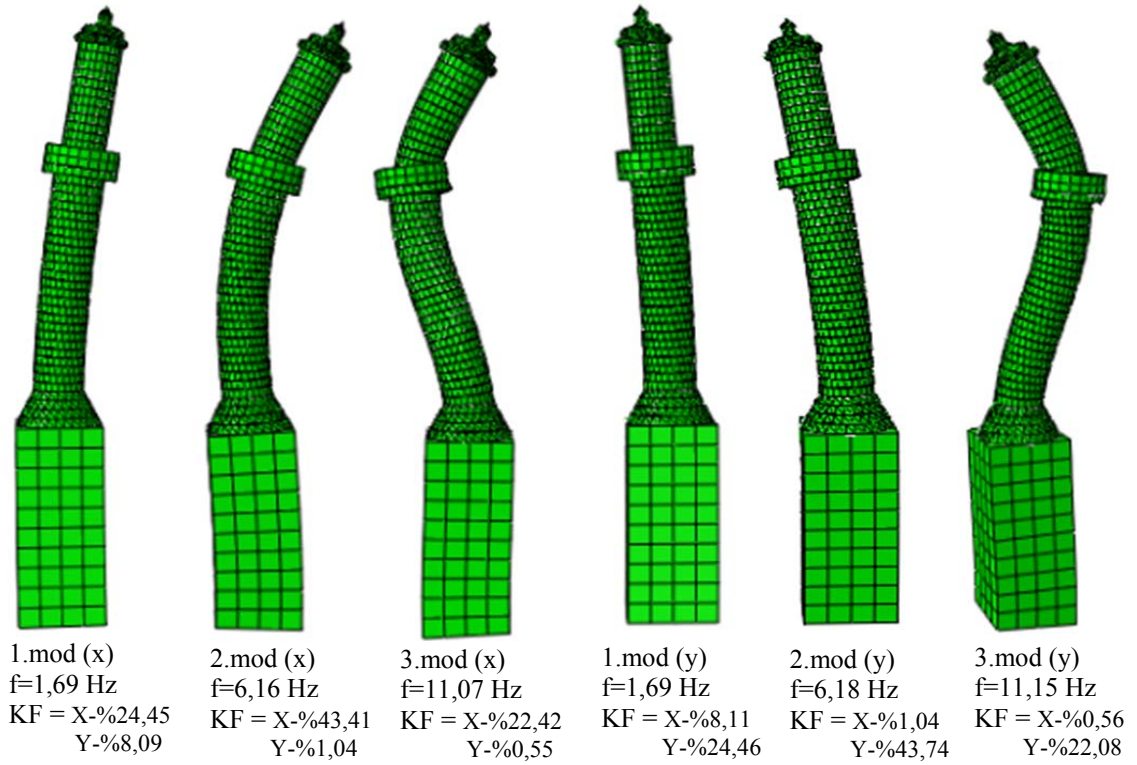
Kayhan Camii'nin malzemesine, geometrik özelliklerine ve geçirdiği onarımlara ilişkin bilgiler Madde 6.7'de detaylı olarak verildiğinden burada tekrar edilmeyecektir. Bu bölümde incelenen minarede, yapısal karakterisitiklerin tespit edildiği çevresel titreşim testlerinin sonuçları ile bu deney sonuçlarının, oluşturulan sonlu eleman modelinin çözümünden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması sunulmaktadır.

Yerinde yapılan ölçümlerde 5 Hz, 10 Hz, 25 Hz ve 50 Hz frekans aralığında ölçümler alınmış olup bu kısımda ilk üç modun frekans aralığını kapsayan 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1,G2,G3 ve G4 ivme ölçerlerinden alınan ölçümler sunulmuştur. 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1,G2,G3 ve G4 ivme ölçerlerinden alınan ölçümlere ilişkin güç yoğunluk spektrumları Şekil 7.13'de gösterilmiştir. Buna göre G1 ve G3 doğrultusunda sırasıyla ilk üç modda 1,81 Hz, 6,00 Hz ve 11,50 Hz frekanslar elde edilmiştir. Aynı şekilde G1 ve G3'e dik konumlandırılmış G2 ve G4 doğrultusunda ilk üç modda sırasıyla 1,91 Hz, 6,00 Hz, ve 10,38 Hz frekanslar elde edilmiştir. Yapının sayısal modeli oluşturularak çözümlenmiş, elde edilen sonuçlar deneysel yaklaşımlarla bulunan sonuçlarla karşılaştırılmış, arada oluşan farkın giderilebilmesi için malzeme özelliklerinde ve mesnetlenme koşullarında değişiklik yapılarak sayısal modelin uygunluğu sağlanmaya çalışılmıştır. Sonuçların birbirine en yakın olduğu durumda malzeme elastisite modülü 2250 MPa, yoğunluğu 2300 kg/m<sup>3</sup> ve Poisson oranı 0,30 alınarak yapılan sonlu eleman analizinde, G1-G3 doğrultusunda sırasıyla ilk üç modda % 6,63, % -2,67 ve % 3,74; G2-G4 doğrultusunda ilk üç modda % 11,52, % -3,00 ve % -7,42 farklar hesaplanmıştır. Yerinde yapılan incelemelerde yapıyı oluşturan malzemelerde bozulmalar olduğu gözlenmiş olduğu altıncı bölümde verilmişti. Yapı malzemesi olarak tuğla kullanılan inceleme kapsamındaki diğer minarelerde malzeme elastisite modülü 3 GPa civarındayken, Kayhan Camii minaresinde 2250 MPa olması malzemede bozulmaların olduğu yönündeki değerlendirmeyi destekler niteliktedir. Yapının hem süreksizliği hem de malzemedeki bozulmalar sayısal modelin oluşturulmasını zorlaştırmıştır. Dolayısıyla çalışma kapsamındaki diğer minarelere nazaran bu minarede her iki yöntemle elde edilen sonuçlar arasındaki fark daha büyüktür.



**Şekil 7.13.** Kayhan Cami - 5 Hz ve 25 Hz frekans aralığında G1,G2,G3 ve G4 doğrultularında güç yoğunluk spektrumları

Şekil 7.14'de minarenin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan modeline ait X ve Y doğrultularında ilk üç moda ait mod şekilleri gösterilmektedir. Özellikle kütle katılımının fazla olduğu ilk modda ölçülen ve analiz sonucu elde edilen frekansların arasındaki farkın kabuledilebilir sınırlarda olduğu, farkın X doğrultusunda % 6,63 ve Y doğrultusunda %11,52 olduğu görülmektedir



**Şekil 7.14.** Kayhan Cami minaresine ait birbirine dik doğrultularda ilk üç moda ait mod şekilleri

Çizelge 7.7’den anlaşılacağı üzere Sayısal modellemeyle elde edilen verilere göre X ve Y doğrultularında kütle katılımı (KF) ilk üç modda %90 oranının üzerindedir. Dolayısıyla her iki doğrultudada ilk üç mod sistemi temsil eder niteliktedir.

**Çizelge 7.7.** Kayhan Cami minaresine ait frekans değerleri

Mod	Sonlu Elemanlar Yöntemi (Hz)	Kütle Katılım Oranı %		Çevresel Titreşim Testi (Hz)	Fark (%)	
		X	Y			
X mod	1	1,69	24,45	8,09	1,81	6,63
	2	6,16	43,41	1,04	6	-2,67
	3	11,07	22,42	0,55	11,5	3,74
Y mod	1	1,69	24,46	8,11	1,91	11,52
	2	6,18	43,74	1,04	6	-3,00
	3	11,15	22,08	0,56	10,38	-7,42

## 7.2. Kütle Katılım Faktörü

Kütle katılım faktörü sistemin toplam hareketi üzerinde o modun şeklinin ne denli etkin olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Teorik olarak toplam tepkideki

moda ait katılımları kontrol eden parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir genelleme yapılacak olunursa düzenli yapılarda birinci modlarda kütle katılımının fazla olduğu söylenebilir. Aşağıda verilen çizelgeden de anlaşılacağı üzere incelenen minarelerde birinci modlarda katılımı Kayhan Cami minaresi hariç %50 dolaylarında gerçekleşmektedir. Dolayısıyla kütle katılımının fazla olduğu ilk modda yerinde ölçümler neticesinde elde edilen frekanslarla sonlu elemanlar analiz sonucu elde edilen frekansların arasındaki farkın düşük olması modelin temsil oranını da artırmaktadır. Elbette bu tür yapı sistemlerinde yapının davranışını üç modla temsil edebilmenin mümkün olduğunu ifade etmiştik. Burdan hareketle 2'nci ve 3'üncü modlarında doğru şekilde tahmin edilebilmesi önemli bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır. Tüm bu karşılaştırmalar önceki başlıklarda yapılmış ve yeterli hassasiyetin bu modlar için de sağlandığı ifade edilmişti.

Diğer tüm minare değerlendirmelerinden farklı olarak Kayhan Camiinde yukarıda yapılan genellemenin aksine ikinci modda kütle katılımının birinci moddan daha yüksek olduğu tespit edilmiş idi. Bu durumun sebebi araştırıldığında, söz konusu hadisenin nedeninin yapının geometrik özelliklerinden kaynaklandığı görülmüştür. Şöyle ki Kayhan Cami minaresinin kaidesi gövdeye oranla oldukça büyüktür. Mod şekilleri incelendiğinde, kaidenin kütlelerinin birinci modda daha fazla, ikinci moda katıldığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla kütlesi fazla olan kaidenin ikinci moda katılması kütle katılımının ikinci modda yüksek olmasına neden olmuştur.

**Çizelge 7.8.** Minarelerin birinci modlarına ait kütle katılım oranları

Minare	X yönü		Y yönü	
	x	y	x	y
<b>Bedrettin Camii</b>	43,23	18,14	14,92	50,93
<b>Emirsultan Camii</b>	46		53	
<b>Hacılar Camii</b>	57,1		55,6	
<b>Hoca Muslihiddin Camii</b>	51,4		53,5	
<b>Hoca Tabip Camii</b>	35,49	18,8	35,43	18,81
<b>Hocaalizade Camii</b>	45,55	13,61	13,21	44,98
<b>Kayhan Camii</b>	24,45	8,09	24,61	8,11

Çizelge 7.8'den de anlaşılacağı üzere dört adet minarede bir yöndeki kütle katılımına hem X hem Y yönünde katılım olmuştur. Örneğin Bedrettin Cami Minaresinde X

yönündeki kütle katılımında %43,23 X yönü, %18,14 Y yönünün katılımı görülmektedir. Bu durumun nedeni silindirik geometriye sahip minare gibi yapılarda ölçüm yapılırken X ve Y yönlerinin tam olarak belirlenememesidir. Diğer minareler ile bu şekilde farklılaşmasının nedeni olarak ise kaide formu gösterilebilir. Küpün geometrik formu kaide ile silindirik gövde arasındaki geçişler ve kaidenin sekizgen veyahut altıgen form alması bu davranışın ortaya çıkmasına neden olabilmektedir.

Çalışma kapsamında ilk üç moda ait frekans değerleri incelenmiş ve değerlendirmeler bu yönde yapılmıştır. 7.9'dan anlaşılacağı üzere ilk üç modda kütle katılımı % 90 oranının üzerindedir. Dolayısıyla böyle yüksek kütle katılım oranının olduğu ilk üç modun sistemi temsil ettiği kabul edilerek değerlendirme yapılması yanlış olmayacaktır.

**Çizelge 7.9.** Minarelerin ilk üç moduna ait toplam kütle katılım oranları

Minare	X yönü		Y yönü	
	x	y	x	y
<b>Bedrettin Camii</b>	80,85	19	19	73,44
<b>Emirsultan Camii</b>	93		100	
<b>Hacılar Camii</b>	96,3		96,9	
<b>Hoca Muslihiddin Camii</b>	99,4		99,4	
<b>Hoca Tabip Camii</b>	77,3	22,54	22,66	77,13
<b>Hocaalizade Camii</b>	73,06	21,93	21,37	72,36
<b>Kayhan Camii</b>	90,28	9,68	9,71	90,28

### 7.3. Mesnetlenme Koşullarının Dinamik Karakter Üzerinde Etkisi

Yapıların dinamik karakterlerinin belirlenmesinde kütle ve rijitlik faktörlerinin etkin olduğu daha önceki bölümlerde vurgulanmıştır. Yapının rijitliğini etkileyen önemli faktörlerden birisi de serbest yüksekliğidir. Yapıların sayısal modelleri oluşturulurken yerinde yapılan gözlemlere dayalı mesnet tanımlamaları yapılmıştır. Çevresel titreşim testlerinden elde edilen bulgularla sayısal modelden elde edilen verilerin yakınsaklığını sağlamak amacıyla malzeme özelliklerinin yanında mesnet koşullarında da revizyon yapılmıştır. Sonuçların arasındaki farkın kabuledilebilir oranda olduğu durumda Hoca Tabip ve Kayhan Cami minarelerinde kaidelerin yan kenarlardan mesnetlenmediği sayısal modellerin uygun olduğu kabul edilmiştir. Yerinde yapılan gözlemler neticesinde Hoca Tabip Caminin minaresinin camiye bitişik görünmesine rağmen

minare duvar örgüsü ile ana yapı duvar örgüsünün aynı sistemle oluşturulmadığından minarenin ana yapıdan ayrı çalıştığı kanaatine varılmıştır. Kayhan Cami minaresinde ise kaidenin değişik yerlerden mesnetlenmiş olduğu görülmüştür. Minareye ait altıncı bölümde verilen görsellerde bu durum kolayca görülebilmektedir. Oysa uygun bulunan sayısal modelde minarenin yan taraflardan mesnetlenmediği durumda sonuçların yakınsaklığı sağlanmıştır. Bu duruma kaidenin gövdeye göre oldukça masif olmasının, gövdenin sanki kaidenin üstünden mesnetlenmiş gibi çalışmasının neden olduğu düşünülmektedir.

Mesnetlenme koşullarının dinamik harekete etkisini değerlendirebilmek için inceleme konusu minarelerden Emir Sultan Cami minaresinin dört bir yandan mesnetlendiği durum ile yanlardan mesnetsiz olduğu durumda dinamik karakteristikleri belirlenmiş ve mesnetlenmenin dinamik özellikleri ne şekilde etkilediği incelenmiştir. Buna göre Emir Sultan Cami minaresinin mesnetli ve mesnetsiz durumda ilk üç moda ait elde edilen frekansları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

**Çizelge 7.10.** Emir Sultan Cami Minaresinde kaidenin yan taraflarından mesnetli ve mesnetsiz durumda elde edilen frekanslar

	Mod	Kaide Mesnetli (Hz)	Kaide Mesnetsiz (Hz)	Fark (%)
X mod	1	1,55	1,17	24,52
	2	8,43	4,7	44,25
	3	12,03	10,59	11,97
Y mod	1	1,55	1,17	24,52
	2	8,43	4,7	44,25
	3	12,34	10,59	14,18

Çizelge 7.10'dan da açıkça görülebileceği üzere mesnetlenme koşullarının dinamik karakteristikler üzerinde oldukça önemli bir etkisi olduğu açıkça görülebilmektedir. Buradan hareketle tarihi eserlerde kimi zaman ana gövdeye bitişik yapılmasına karşın örgünün ayrı olması nedeniyle minare, ana gövde davranışından hiç etkilenemebilmektedir. Bu durumda her iki farklı modelleme arasında önemli farklılıklar doğacağından söz konusu durumun modal testler yardımıyla bu çalışmada olduğu gibi belirlenerek karar verilmesi gerekliliği önem arz etmektedir.

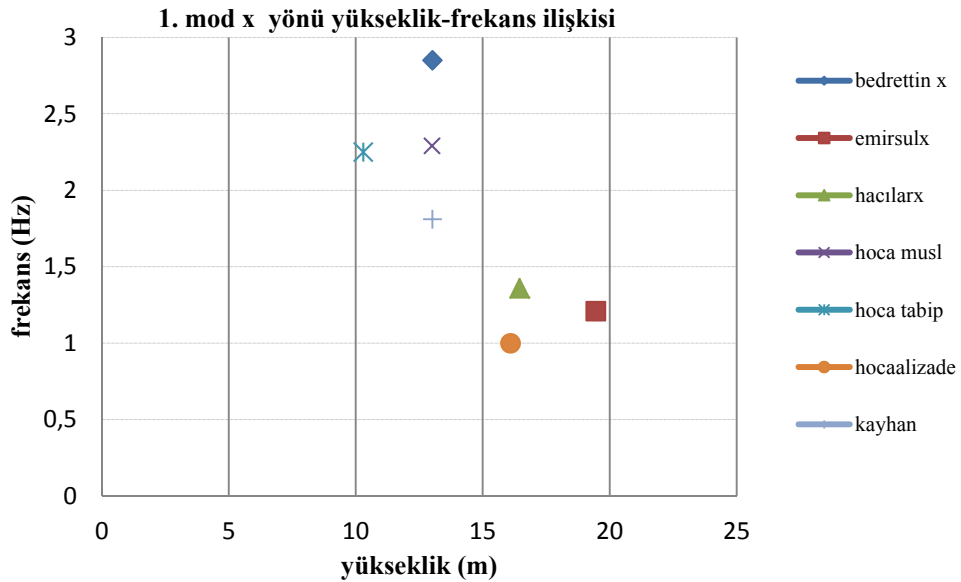
#### 7.4. Geometrik Özelliklerin Dinamik Davranışa Etkisi

Yapıların dinamik karakteristikleri kütesine ve rijitliğine bağlı olup dış yüklerden bağımsızdır. Yapının rijitliği malzeme ve geometrik özellikleri ile doğrudan ilişkili olduğundan, geometrik özelliklerin dinamik davranışa etkisi bu bölümde sunulmuştur. Minareler yapıları itibarı ile uzun ve narin yapılardır. Minare bölümlerinden kaidenin dikdörtgen, altıgen, sekizgen veya silindirik formlarına rastlamak mümkündür. Gövde ise Osmanlı mimarisinde silindirik formda karşımıza çıkmaktadır. İncelenen minarelerin tamamının gövde formu silindirik olmakla beraber kaideleri dikdörtgen, altıgen ve sekizgen formda değişiklik göstermektedir. Yerinde yapılan ölçümlerde minarelerin rölöveleri de çıkarıldığından, çevresel titreşim testi sonucu elde edilen frekans değerleri ile yükseklikler arasında değerlendirme yapılması mümkündür. Minarelerin farklı doğrultulardaki ilk üç moduna ve toplam minare yüksekliğine ilişkin bilgiler Çizelge 7.10'da sunulmuştur. Bu çizelge incelendiğinde yüksekliği fazla olan minarelerde frekans değerlerinin düşük olduğu dolayısıyla periyotun yüksek beklenildiği gibi gerçekleşmiştir. Burada Bedrettin Cami minaresinin frekansının yüksekliğine oranla oldukça büyük olduğu görülmektedir. Bu minarenin geometrik özellikleri incelendiğinde gövde duvar kalınlığının diğer minarelerden farklı olarak 45 cm olduğu görülmüştür. Bu nedenle yapının rijitliğinin arttığı frekansın yükseldiği sonucuna ulaşmak mümkündür. Dikkat edilirse duvarın kalın olması, Bedrettin Cami minaresinin yüksekliği 20,52 m olmasına rağmen frekansı, yüksekliği 14,3 m olan Hoca Tabip Cami minaresinin frekansından daha büyük seviyelere taşımaktadır.

Minarelerin bir doğrultudaki birinci mod frekansları ile gövde yükseklikleri arasındaki ilişki Şekil 7.15'de verilmiştir. Yukarıda bahsi edilen yükseklikle frekans ilişkisi bu grafikten de açıkça görülmektedir. Burada yaklaşık aynı gövde yüksekliğine sahip Bedrettin Camii, Hoca Muslihiddin Camii, Kayhan Caminin 1. Modlarının frekansları farklıdır. Bu sonuç malzeme özelliklerinin ve yapı rijitliklerinin farklı olduğunu akla getirmektedir. Aynı şekilde Hocaalizade Cami gövde yüksekliği Emir Sultan Camiinden az olmasına rağmen Emir Sultan Caminin birinci mod frekansının daha yüksek olması, yapımında malzeme olarak taş kullanılan Emir Sultan Cami minaresinin daha rijit olmasından kaynaklanmaktadır.

**Çizelge 7.11.** Minarelerin yükseklikleri ile ilk üç moda ait frekanslar

	Bedrettin Cami	Emirsultan Cami	Hacılar Cami	Hoca Muslihiddin Cami	Hoca Tabip Cami	Hocaalizade Cami	Kayhan Cami
<b>Minare yüksekliği (m)</b>	20,52	30,85	24,45	21,6	14,3	24,59	19,42
<b>Frekanslar (Hz)</b>	1. mod x	2,85	1,21	1,36	2,29	2,25	1,81
	1. mod y	2,83	1,31	1,31	2,24	2,07	1,91
	2. mod x	11,88	4,36	6,2	9,3	9,08	4,2
	2. mod y	10,31	6,21	6	9	8,6	4,65
	3. mod x	25,75	10,2	13,63	19,02	18,38	9,75
	3. mod y	25,63	13,63	14	18,73	17,13	11,44



**Şekil 7.15.** Gövde yüksekliği ile bir doğrultuda 1. Mod frekansları

Minarelerin kaide duvar kalınlıkları gövdelerine oranla daha büyük olduğundan kaide daha rijit bir davranış sergiler. Dolayısıyla dinamik davranışta gövde bölümü daha fazla önem kazanmaktadır. Minarelerde, rijitlikteki ani değişiminin önüne geçilebilmesi için kademeli geçişi sağlayan değişik geometrilerde küp bölümü oluşturulmuştur. Aşağıdaki çizelgede kaide yüksekliği ile küp-gövde ve petek yükseklikleri toplamı arasındaki oran gösterilmiştir. Çizelgeden de anlaşılacağı üzere bu oran 0,41 ile 0,70 bandı arasındadır. Burada kütle katılım faktöründe de değinilen Kayhan Cami minaresinin kaidesine ilişkin hususta açıklama yapmak faydalı olacaktır. Kayhan Cami minaresinin kaidesi 2,80 m genişliğinde dikdörtgen geometrili, 0,70 m duvar kalınlığı olan 6,40 m



yükseklindedir. Küp, gövde petek yükseklikleri toplamı ise 12,32 m dir. Kaide boyutları ve 30 cm kalınlığındaki gövde boyutları dikkate alındığında kaidenin gövdeye oranla oldukça rijit olduğu açıktır. Bu özellik minarenin kütle katılım faktöründe ve mod şekillerinin oluşumunda kendini göstermiş, ikinci modda kaidenin harekete katılımı ile birinci moddan daha büyük kütle katılımı hesaplanmıştır.

**Çizelge 7.12.** Kaide yüksekliği ile küp-gövde- petek yükseklikleri oranı

		Bedrettin Cami	Emirsultan Cami	Hacılar Cami	Hoca Muslihiddin Cami	Hoca Tabip Cami	Hocaalizade Cami	Kayhan Cami
<b>Minare yüksekliği (m)</b>		20,52	30,85	24,45	21,6	14,3	24,59	19,42
<b>minare bölüm yüksekliği (m)</b>	<b>kaide</b>	7,5	11,4	8	8,6	4	8,5	6,4
	<b>küp gövde petek</b>	12,32	18,75	15,75	12,3	9,8	15,39	12,32
<b>Oran Kaide/(küp+gövde+petek)</b>		0,61	0,61	0,51	0,70	0,41	0,55	0,52

Minarelerin mod şekilleri konsol gibi çalışan bu tür yapılardan beklenen şekilde elde edilmiştir. İncelenen minarelerde birinci ve ikinci modlarda birbirine dik doğrultularda tek eğrilikli benzer mod şekilleri görülmüştür. Altıncı bölümde incelenen tüm minarelere ilişkin verilen mod şekilleri incelendiğinde mod şekillerinin benzer şekilde olduğu açıkça görülmektedir. Örneğin taşıyıcı sistemi taş ile oluşturulan yaklaşık 30 m yüksekliğindeki Emir Sultan Cami minaresi ile yapı malzemesi olarak tuğla kullanılan yaklaşık 14,3 m lik Hoca Tabip Cami minaresinin mod şekilleri karşılaştırıldığında benzer şekilde olduğu görülmüştür.

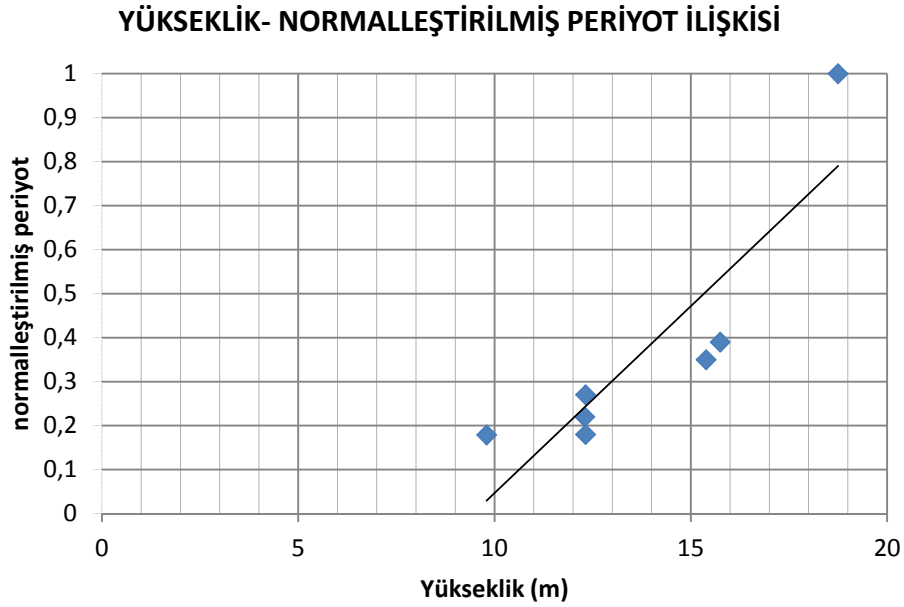
Minarelerin yüksekliklerinin periyotlara etkisini daha net görebilmek maksadıyla frekans üzerinde etkisi bilinen diğer parametrelere (Yükseklik, Elastisite Modülü, Kütle, Kesit alanı vb.) göre normalleştirme ve bu yolla sonuçları irdelemek eğilimi daha net ortaya koymaktadır. Bu kapsamda  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$  eşitliğinden yararlanılmış,  $k=3EI/L^3$ ,  $m= A*\rho*L$ ,  $I = \pi(R_1^2 - R_2^2)/64$  olarak alınarak normalleştirme yapılmıştır. Burada  $R_1$  ve  $R_2$  sırasıyla dış çapı ve iç çapı,  $A$  kesit alanını ve  $\rho$  malzeme yoğunluğunu ifade etmektedir. Dolayısıyla bu ifadeye göre periyot üzerinde bilinen değerlerin etkisi kaldırılarak istenilen parametreye göre normalleştirme yapmak mümkün olabilecektir.

Yükseklikle normalleştirilmiş periyodun değişimine ilişkin grafik şekil 7.16'da gösterilmiştir. Şekil 7.16'dan da anlaşılacağı üzere yükseklik arttıkça periyotun önemli mertebede arttığı, ve artan yükseklikle periyot arasında tarihi minareler için bir ilişki kurulabileceği görülmektedir. Burada kaidenin oldukça rijit olduğu düşünülerek ve işlem karmaşasının önüne geçebilmek için minare yüksekliği olarak gövde ve petek yükseklikleri ile değerlendirme yapılmıştır. Burada örneklerden üçünün hemen hemen aynı yüksekliğe sahip olmalarına rağmen normalleştirilmiş periyotlarında küçük farklar olduğu görülmektedir. Normalleştirme eldeki verilere göre yapıldığından yapının mesnetlenme koşulları her bir örnekte aynı kabul edilmiş, kaidenin boyut ve konumu değerlendirmeye yansıtılmamıştır. Dolayısıyla mesnetlenme koşulları ve kaidenin geometrik özelliklerinin ihmal edilmesi nedeniyle aynı yükseklik değerlerinde farklı periyotlar görülmüştür. Dikkat edildiğinde normalleştirme yapmadan oluşturulan yükseklik periyot ilişkisine ait grafik Şekil 7.15 deki grafik birbirine eğilim olarak benzerdir. Ancak Şekil 7.16 ile yüksekliğin etkisi daha net bir şekilde ortaya

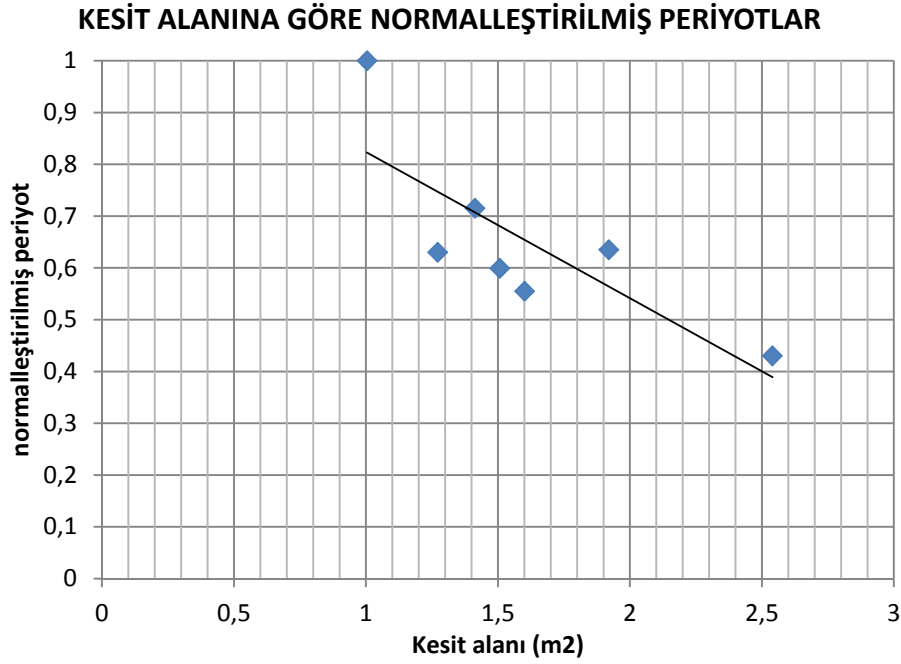
konmaktadır. Dolayısıyla normalleştirilmiş periyotlarda aynı yükseklikli minareler için periyotlar arasındaki farkın azaldığı görmek mümkündür Regresyon analizi neticesinde grafiğe eğim çizgisi eklenmiş ve görülmüştür ki periyot değerleri anlamlı bir şekilde değişim göstermektedir. Yükseklik-normalleştirilmiş periyot için yapılan regresyon analizinde regresyon katsayısı 0,09 olarak, kesit alanı- normalleştirilmiş periyot için yapılan regresyon analizinde ise regresyon katsayısı 0,28 olarak hesap edilmiştir.

Bilindiği üzere minare yüksekliği kadar minare kesit alanının da dinamik karakteristik üzerinde önemli mertebede etkisi bulunmaktadır. Kesit alanının, dinamik karakteristiği etkileyen diğer birçok parametre üzerinde etkili olduğu, bunlardan başlıcalarının kütle ve atalet olduğu rahatlıkla düşünülebilir. Kesit alanının etkisinin görülebilmesi için tüm bu parametreler üzerindeki kesit alanı etkileri de hesaba katılarak normalleştirme gerçekleştirilmiştir. Diğer bir ifadeyle normalleştirilmiş periyot ile kesit alanı arasındaki ilişkinin değerlendirmesinde hem kütle hem de atalet momenti için de kesit alanının etkisi de göz önünde bulundurulmuştur. Kütle bileşenlerine ayrılarak kesit alanına göre yapılan normalleştirme Şekil 7.17 de verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere kesit alanının artmasıyla normalleştirilmiş periyotlarda da azalış eğilimi görülmektedir. Belirlenen noktaların tam bir doğru üzerine düşmemesi, hesaplara dahil edilmeyen

kaidenin geometrisinin her bir örnekte farklı olması ve mesnetlenme koşullarının etkisi nedeniyle olduğunu düşündürmektedir. Aslında yüksekliğin karşılaştırılması kısmında periyota ait eşitlikten anlaşılacağı üzere kesit alanının kütleyle ilişkisi nedeniyle periyodu artıracığı, atalet momenti ile ilişkisi nedeniyle de periyodu azaltacağı anlaşılmaktadır. Bu örnek göstermiştir ki kesit alanının atalet momenti üzerindeki etkisi kütleyle oranla daha fazla olmasından artan kesit alanı periyotun azalmasına neden olmuştur. Kaldı ki bunun nedeni sürekli bir taşıyıcı sisteme sahip olan yayılı kütlelerin tüm karşılaştırmaya konu minarelerde aynı oranda artıyor olması olarak da gösterilebilir. Bu nedenle söz konusu karşılaştırmada kesit alanının rijitlik üzerindeki etkisi daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır.



**Şekil 7.16.** Gövde-petek yüksekliği ile minare hakim periyotları arasındaki değişim



**Şekil 7.17.** Gövde kesit alanı ile minare hakim periyotları arasındaki değişim

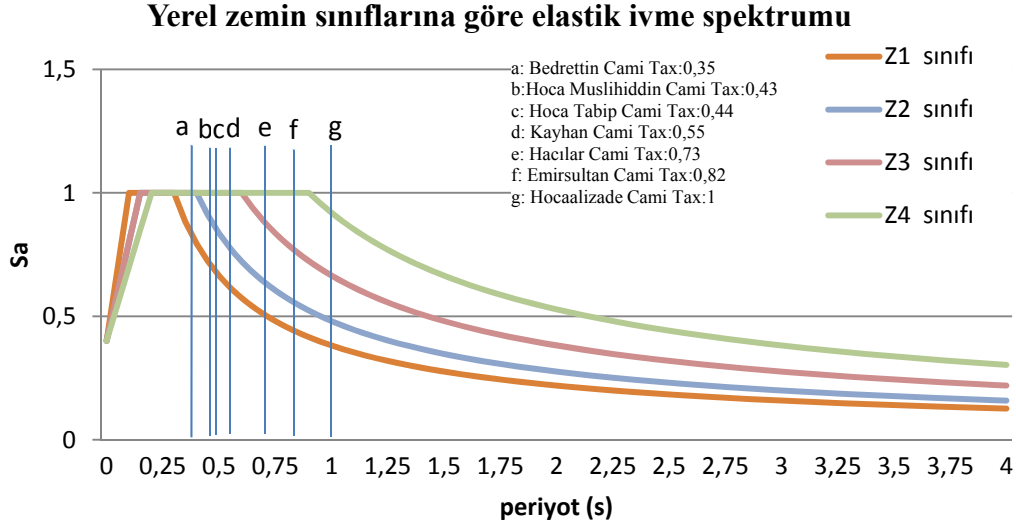
### 7.5. Minarelerin Deprem Davranışlarının İrdelenmesi

Bu bölümde minarelerin frekansları dikkate alınarak, frekansın yapının deprem davranışında nasıl bir etkisi olduğu üzerinde durulmuştur. Bu etkinin belirlenebilmesi için deprem yönetmeliğinde tanımlanan elastik ivme spektrumundan yararlanılmış, değerlendirme bu doğrultuda yapılmıştır.

Buna göre Türk Deprem Yönetmeliği (TDY 2007) yerel zemin sınıflarına göre elastik ivme spektrumu aşağıdaki şekilde tanımlamaktadır.

Şekilde gösterilen elastik ivme spektrumuna göre Z1 sınıfına giren zeminlerin  $T_A$  ve  $T_B$  arasında kalan ivme duyarlı bölgesinin kısa olduğu, zemin kötüleştikçe bu bölgenin uzadığı, Z4 türü zeminlerde ivme duyarlılığının diğerlerine oranla çok fazla olduğu görülmektedir. Buna göre yüksek frekanslı veya düşük periyotlu yapılar ivme spektrumunda ivme duyarlı bölge olan  $T_A$  ve  $T_B$  arasında kalacak ve yer hareketi nedeniyle oluşacak etkilerden maksimum oranda etkilenecektir. Yerel zemin koşulları da dikkate alındığında özellikle kötü zeminlerde yapının doğal titreşim periyodunun  $T_A$  ve  $T_B$  arasında kalması durumunda yapının talebi önemli miktarda artacak ve önemli mertebede büyük etkilere maruz kalacaktır. Doğal titreşim periyodunun ivme duyarlı bu bölgeden uzaklaştırılması yer hareketinden dolayı yapının üzerine gelen yükü azaltacak

ancak bu seferde yatay deplasmanlar önem kazanacaktır. Dolayısıyla her iki hususta dikkate alınarak yapılacak değerlendirme daha sağlıklı olacaktır.



**Şekil 7.18.** Yerel zemin sınıflarına göre elastik ivme spektrumu ve incelenen minarelerin talep değerleri

İncelenen minarelere ilişkin farklı doğrultularda birinci modlara ait doğal titreşim periyotları aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir.

**Çizelge 7.13.** Minarelerin birinci modlarına ait periyotları

Minare Adı	Periyot (x) sn	Periyot (y) sn
<b>Bedrettin Camii</b>	0,35	0,35
<b>Emirsultan Camii</b>	0,82	0,76
<b>Hacılar Camii</b>	0,73	0,76
<b>Hocamuslihiddin Camii</b>	0,43	0,44
<b>Hoca Tabip Camii</b>	0,44	0,48
<b>Hocaalizade Camii</b>	1	0,88
<b>Kayhan Camii</b>	0,55	0,52

Yukarıda verilen bilgiler ışığında minarelerin hangi zeminlerden daha fazla etkileneceği ile ilgili bir değerlendirme yapılabilecektir. Buna göre minarelerin Z1 türü zemin üzerinde yer almaları durumunda en büyük etki düşük periyotlu olduğu için Bedrettin Camii minaresinde görülecektir. Böyle bir zeminde Emirsultan Camii ve Bedrettin Camii yüksek periyotları nedeniyle yer ivmesinden daha az etkilenecek ancak bu minarelerde yatay deplasmanlar önem kazanacaktır. Minarelerin Z4 türü zeminde yer

almaları durumunda ise tüm minarelerin doğal titreşim periyotları TA ve TB arasında kalacak ve minareler yer hareketinden oldukça fazla etkilenecektir. Çalışma kapsamında incelenen minarelerin yakın çevresinde yapılan zemin etüdü raporlarına ulaşılmış, bu doğrultuda incelenen minarelerin buldukları yerlerde zemin özelliklerinin Z1 ve Z2 düzeylerinde olduğu kanaatine varılmıştır. Dolayısıyla TA ve TB arasında kalan bölgenin kısa olduğu ve bu bölgeye düşme riskinin azaldığı değerlendirilebilir.

## 8. SONUÇLAR

Bu çalışmada Bursa’da yer alan yedi adet tarihi minare üzerinde yerinde modal testler gerçekleştirilmiş, yine aynı minarelerden alınan yapısal ölçüler göz önüne alınarak sayısal modellemeler gerçekleştirilmiştir. Farklı malzeme, yükseklik, çap ve duvar kalınlığı gibi yapısal özelliklere sahip bu minareler, cami ana gövdesi veya beden duvarı ile mesnetlenmeleri açısından da farklı karakteristiklere sahiptirler. Bu farklılıklar incelemeye konu edilen minarelerin sınır koşullarını değiştirmektedir. Tüm bu veriler dikkate alınarak gerçekleştirilen sayısal modeller, yerinde yapılan test sonuçları ile karşılaştırmalı olarak irdelenmiş ve gerçekçi sayısal modeller elde edilmeye çalışılmıştır. Tüm bu karşılaştırmalar ile elde edilen sonuçlar ile kalibre edilmiş model sonuçları ve bunların yükseklik, çap ve malzeme gibi parametrelere nazaran davranışlarının değişimleri yine bu çalışmada karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Tüm bu çözümlenmeler ve irdelenmelerden elde edilen sonuçlar aşağıda başlıklar halinde sunulmaktadır.

Dikkate alınan tüm minareler için mesnetlenme şekilleri her iki doğrultuda farklı olsa dahi ilk üç modun dinamik davranışı temsil etmekte yeterli olduğu anlaşılmaktadır. Keza inceleme konusu tüm minarelerin çözümlenmeleri göstermiştir ki ilk üç modda küte katılım oranı %90 nın üzerinde gerçekleşmektedir.

Aksisimetrik yapıları nedeniyle minareler geleneksel yapı sistemlerine göre oldukça farklı bir davranış sergileyebilmektedirler. Burada davranışını kontrol eden yükseklik, çap, duvar kalınlığı, kullanılan malzemenin mekanik özellikleri ve yapım tekniğine ek olarak kaide formunun da etkisi ortaya çıkmaktadır. Küp formunda tasarlanmış kaideler minarelere genelde geleneksele yakın bir karakter kazandırırken, formun sekizgen gibi dairesele yakın bir formda tasarlanmış olması minare davranışını küp kaideli sistemlere göre oldukça değiştirebilmektedir. Bu durumda herhangi bir doğrultu için hesap yapılırken ortogonal bir doğrultudan bahsetmek ve bu şekilde tasarım yapmak mümkün görülmemektedir. Bu nedenle dinamik hesaplamalarda her iki doğrultu için de elde edilen etkiler birleştirilerek kullanılmalıdır.

Tarihi minarelerde, yapısal estetiği sağlayabilmek adına, kaide, küp ve ana gövde arasındaki geometrik oranların hemen her durumda belirli ölçülerde sağlanmaya

çalışıldığını görmekteyiz. Daha sonraları bu oranların gerek deprem nedeniyle küçülen minare boyları gerekse de kullanılan malzeme nedeniyle ve yapıya önemli bir gösteriş verdiğini düşünerek uzatılmaları yoluyla bozulduğu görülmektedir. Diğer tüm minare değerlendirmelerinden farklı olarak Kayhan Camii minaresinin bu nedenle genel minare dinamik karakteri dışında bir davranış sergilediği görülmektedir. Kaidesinin gövdeye oranla oldukça büyük olması nedeniyle rijit olan kaidenin kütlesi birinci moddan daha fazla ikinci moda katkı koymakta, ve davranış üzerinde en önemli modu ikinci mod haline getirmektedir. Hemen her durumda birinci modun en etkin mod olduğu savı minarelerde benzeri düzenlemeler ile geçersiz hale getirilebilir. Bu tür oransal ilişkiler dışına çıkılmakla yalnızca estetik açıdan değil yapı dinamik davranışı açısından da önemli bozulmalara neden olunabilmektedir.

İnceleme konusu minarelerde olduğu gibi bu tür tarihi eserlerde kimi zaman ana gövdeye bitişik veya ana gövde ile ortak örgüsü olduğu izlenimi vermesine karşın örgünün ayrı olması nedeniyle minare ana gövdeden hiç etkilenmeyebilmektedir. Bu tür bir mesnetlenmenin doğru şekilde tespit edilmesi modelleme açısından dolayısıyla da performans tespiti açısından hayati öneme sahiptir. Söz konusu veya benzeri durumlarda, mesnetlenme durumunun tahmin edilebilmesi için modal testlerden istifade edilmesi ve bu yolla nihai kararın verilmesi sonuç değerlendirmelerin gerçekçiliği üzerinde önem arz etmektedir.

Bilindiği üzere yapı sistemin dinamik davranışını etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bunların en başlıcaları elbette malzeme, kesit özellikleri, kütle yoğunluğu ve dağılımı ile mesnetlenme koşullarıdır. Burada incelemeye konu olan minareler özelde önemli farklılıklara sahip olmasına karşın minare kültürü açısından benzer karakterde inşa edilmiş bulunmaktadır. Tüm bu minareler için gerçekleştirilen sayısal modellerin sonuçlarının test sonuçları ile hemen üst üste düşen sonuçları, söz konusu minareler için bu çalışmada gerçekleştirilen modellerin yapı dinamik davranışlarını yüksek hassasiyetle temsil kabiliyetinin olduğunu göstermektedir.

Tüm ivme ölçüm yerleşimlerinde bir set duvar dışına bir set ise aynı doğrultuda duvar içine yerleştirilmiştir. Alınan kayıtlardan ve bu kayıtların işlenmesinden aynı doğrultudaki ivme ölçerler hemen aynı sonuçlar vermiş olmakla birlikte dış tarafda



bulunanlarda gürültü etkisi rahatlıkla görülebilmektedir. Ancak uygulamalarda sonucu değiştirir nitelikte bir gürültü ile karşılaşılmamıştır.

Yerinde çevresel titreşim testleri yapılarak, yine yerinde alınan ölçümlere göre sayısal model oluşturulmuş ve dinamik karakteristiklerin yakınsaklığını sağlamak için malzeme özelliklerini ve mesnetlenme koşullarını değiştirmek suretiyle bir dizi işlem yapılmıştır. Kütle katılımının %90 oranının üstünde olduğu farklı doğrultulardaki modlar için yapılan irdelemeler neticesinde görülmüştür ki, yerinde yapılan çevresel titreşim testlerinden elde edilen veriler ile sayısal model çözümünden elde edilen sonuçlar birbirleriyle uyumaktadır. Bahsi edilen iki farklı yaklaşımda frekanslar arasındaki farklar kabuledilebilir sınırlarda olduğundan sayısal modelin yapıyı temsil etme yeterliliğinde olduğundan bahsedilebilir. Böylece sayısal model üzerinde değişik yükleme durumları için minarenin tepkisi ölçülebilecektir.

Beklenildiği üzere artan yükseklikle minareler için elde edilen periyot değerleri uzamaktadır. Normalleştirilmiş periyodun değişimine ilişkin karşılaştırmalardan da görülebileceği gibi bu çalışmada tarihi minareler için söz konusu iki parametre arasında anlamlı bir ilişki ortaya koyabilmek mümkün olmuştur. Buradan hareketle konuyla ilgili verilerin arttırılmasıyla bu ilişkinin daha gerçekçi bir şekilde ortaya konabileceği ampirik bağıntılar yardımıyla yüksekliğin periyot üzerindeki arttırıcı etkisinde bu yolla hesaba dahil edilebileceği anlaşılmaktadır.

Bilindiği üzere minare yüksekliği kadar minare kesit alanının da dinamik karakteristik üzerinde önemli mertebede etkisi bulunmaktadır. Kesit alanının, dinamik karakteristiği etkileyen diğer birçok parametre üzerinde etkili olduğu, bunlardan başlıcalarının kütle ve atalet olduğu rahatlıkla düşünülebilir. Kesit alanının kütleyle ilişkisi nedeniyle periyodu arttıracığı, atalet momenti ile ilişkisi nedeniyle de periyodu azaltacağı düşünülebilir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlardan da anlaşılacağı üzere kesit alanının atalet momenti üzerindeki etkisi kütleyle oranla çok daha fazla olacağından artan kesit alanı periyodun azalmasına neden olacaktır. Kaldı ki bunun nedeni sürekli bir taşıyıcı sisteme sahip olan yayılı kütlelerin tüm karşılaştırmaya konu minarelerde aynı oranda artıyor olması olarak da gösterilebilir. Bu nedenle söz konusu karşılaştırmada kesit alanının rijitlik üzerindeki etkisi daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

## KAYNAKLAR

**Acar, R., Doğangün, A.,Livođu, R., Tuluk, Ö.İ. 2006.** Mimari ve Taşıyıcı Sistem özellikleri Bağlamında Türk Minare Geleneği.Yapı Dünyası Dergisi, (122):41-49.

**Aliyazığu, C. 2004.** Bir Sentez Çalışması Işığında Betonarme Sanayi Bacalarının Farklı Yöntemlerle Çözömlenmeleri ve Tasarımları. Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Trabzon

**Ariođu, N. ve Ariođu, E. 1997.**14. Mimar Sinanın seçtiği taş:küfeki ve çekme dayanımı.Türkiye inşaat mühendisliği teknik kongresi, Ekim 1997, İzmir.

**Aş, E.F. 2007.**Tarihi tuğlalar ile örölen duvarların güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul.

**Atalı, Ö. 2012.**Türkiye'de Yerkađu hareketlerinin Jeodezik Yönden İncelenmesi, Nevşehir Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü Dergisi, (1):11-23.

**Bayraktar, A., Altunışık, A.C.,Türker, T., Sevim, B., 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.

**Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C., 2010.**Operasyonel modal analiz yöntemi kullanılarak Berke Barajı'nın deprem performansının belirlenmesi.Dsi Teknik Bülten DSİ Teknik Bülteni 108 :13-29.

**Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C.,Sevim, B., Şahin, A.,Özcan, D.M. 2010.** Binaların dinamik parametrelerinin operasyonel modal analiz yöntemiyle belirlenmesi.İMO Teknik Dergi, Yazı 337:5185-5205.

**Bendat, J.S., Piersol, A.G. 2010.** Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 4th Edition. John Wiley and Sons, USA, 599s.

**Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P. 2000.** Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition. 18th International Modal Analysis Conference, 2000, San Antonio, USA.

**Canbaz, M., Karanfil, H., Topçu, İ.B. 2005.** Horasan harç ve betonunun özellikleri.Yapı mekaniği semineri, Temmuz 2005,Eskişehir.

**Coşkun, C., Turk A.M. 2012.** Sesimic Behaviour and Retrofit of Historical Masonry Minaret.Gradevinar, (64):39-45.

**Çamlıbel, N. 2000.** Yapıların taşıma gücünün iyileştirilmesi. Birsen Yayınevi, İstanbul, 258s.

**Doğangün, A., Acar, R.,Livođu, R.,Tuluk, İ. 2006.** Performance of Masonry Minarets against Earthquakes and Winds in Turkey.1st International Conference on Restoration of Heritage Masonry Structures, 24-27 April, 2006, Cairo, Egypt.

**El-Attar, A.G., Saleh, A.M., Osman, A. 2001.** Seismic response of a historical Mamluk style minaret. *Transactions on the Built Environment*, (57):745-754.

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

**Frishman, M. ve Khan, H. U., 1994.** *The Mosque*. Thames and Hudson, London

**Güleç, E. 2006.** Kayseri Minareleri (Cumhuriyet dönemine kadar). Yüksek Lisans Tezi, EÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sanat Tarihi Ana Bilim Dalı, Kayseri.

**Heylen, W., Lammens, S., Sas, P. 2007.** *Modal Analysis Theory and Testing*. Leuven Katholieke Universtiy, Department of Mechanical Engineering, Leuven, Belgium, 340s.  
II. Uluslararası Türk-İslam Bilim ve Teknoloji Tarihi Kongresi, İ.T.Ü. 28 Nisan-2 Mayıs 1986, İstanbul, pp. 3-14.

**Jacobsen, N.J., Andersen, P., Brincker, R. 2006.** Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis. *Proceedings of ISMA2006: International Conference on Noise & Vibration Engineering*, Leuven, Belgium.

**Kaya, T., İnce, M.C. 2010.** Pencere Fonksiyonu Aileleri ve Uygulama Alanları. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 26 (3): 291-306

**Kılıç, İ. 2007.** Horasan harç ve sıvaları. Tarihi eserlerin güçlendirilmesi ve geleceğe güvenle devredilmesi sempozyumu -1, 27-28-29 Eylül 2007, Ankara.

**Kuşüzümü, H.K. Ve Tokay H., 2011.** İstanbul Minareleri. *Vakıf Restorasyon Yıllığı*, (2):52-63

**Mahrebel, H.A. 2006.** Tarihi yapılarda taşıyıcı sistem özellikleri, hasarlar, onarım ve güçlendirme teknikleri. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul.

**Nuhoğlu, A., Şahin, S. 2005.** Sanayi bacalarının ve minarelerin dinamik davranışlarının incelenmesi. *Deprem Sempozyumu*, 23-25 Mart 2005, Kocaeli.

**Oliveira C. S., Çaktı, E., Stengel, D., Branco, M. 2012.** Minaret behavior under earthquake loading: The case of historical İstanbul. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; (41):19–39.

**Özcan, B. 1999.** Bursa Depremleri (2 Mart, 12 Nisan 1855). *Atatürk Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü Dergisi*, sayı 5: 73-118.

**Peeters, B., Roeck, G.D. 1999.** Reference Based Stochastic Subspace Identification for output only modal analysis. *Mechanical systems and Signal Processing* 13(6):855-878.

**Sabbioni, C., Zappia, G. 1997.** Sulphur and carbon compounds on damaged mortars in ancient masonry. 4th symposium on the conservation of monuments in the mediterranean C-1, Rodos

**Sayar, Z. 1977.** Minare görevini yitiriyor mu? . *Arkitekt*, (368):154-157.

**Sevim, B. 2010.** Kemer barajların dinamik davranışlarının sonlu eleman ve deneysel modal analiz yöntemleriyle belirlenmesi. Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.

**Temüz, H.T. 2007.** Minarelerin Rüzgar Yükleri Altında Davranışlarının İncelenmesi ve Bunların Rüzgara Göre Hesabı. Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Trabzon.

**Ünay, A.İ. 2002.** Tarihi yapıların depreme dayanımı. Odtü Mimarlık Fakültesi Yayınları, Ankara, 172 s.

**Yu, DJ., Ren, WX. 2005.** EMD- Based Stochastic Subspace Identification of Structures From Operational Vibration Measurements. Engineering Structures, (27): 1741-1751.

## EK 1 MİNARELERİN GEOMETRİK VE MALZEME ÖZELLİKLERİ

BEDRETTİN CAMİ		kaide	küp	gövde	petek	külâh
	Yükseklik (20,52 m)	7,5 m	1,12 m	7,84 m	3,36 m	0,7 m
	Duvar kalınlığı	0,60 m		0,45 m	0,30 m	
	İç çap	1,35 m		1,35 m	1,35 m	
	Dış çap	Sekizgen (l=1,05 m)		2,25 m	1,95 m	
	Malzeme	taş+tuğla		tuğla		
Konum	Beden duvarı içinde					



HACILAR CAMİ		kaide	küp	gövde	petek	külâh
	Yükseklik (24,45 m)	8 m	1 m	10,25 m	4,5 m	0,7 m
	Duvar kalınlığı	0,60 m		0,30 m	0,23 m	
	İç çap	1,30 m		1,30 m	1,30 m	
	Dış çap	Sekizgen (l=1,04 m)		1,90 m	1,76 m	
	Malzeme	taş+tuğla		tuğla		
Konum	Beden duvarı içinde					



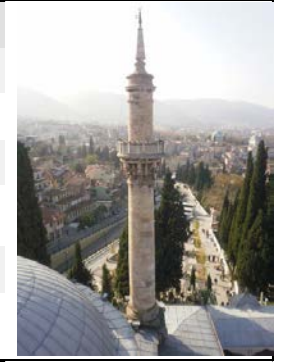
HOCA TABİP CAMİ		kaide	küp	gövde	petek	külâh
	Yükseklik (14,3 m)	4 m	1,12 m	6,16 m	2,52 m	0,5 m
	Duvar kalınlığı	0,40 m		0,23 m	0,15 m	
	İç çap	1,16 m		1,16 m	1,16 m	
	Dış çap	altıgen (l=1,20 m)		1,62 m	1,46 m	
	Malzeme	taş+tuğla		tuğla		
Konum	Ana yapıdan ayrı					



KAYHAN CAMİ		kaide	küp	gövde	petek	külâh
	Yükseklik (19,42 m)	6,4 m	1,12 m	7,28 m	3,92 m	0,7 m
	Duvar kalınlığı	0,70 m		0,30 m	0,20 m	
	İç çap	1,40 m		1,05 m	1,00 m	
	Dış çap	kare (l=2,80 m)		1,65 m	1,45 m	
	Malzeme	taş+tuğla		tuğla		
Konum	Ana yapıdan ayrı					



EMİR SULTAN CAMİ		kaide	küp	gövde	petek	külâh
	Yükseklik (30,85 m)	11,4 m	0,25 m	14 m	4,5 m	0,7 m
	Duvar kalınlığı	0,68 m		0,35 m	0,25 m	
	İç çap	1,40 m		1,40 m	1,40 m	
	Dış çap	kare (l=2,80 m)		2,10 m	1,90 m	
	Malzeme	taş		taş		
Konum	Ana yapıya bitişik					



HOCA MUSLİHİDDİN CAMİ		kaide	küp	gövde	petek	külâh
	Yükseklik (21,6 m)	8,6 m	1,2 m	7,20 m	3,90 m	0,7 m
	Duvar kalınlığı	0,65 m		0,30 m	0,20 m	
	İç çap	1,40 m		1,40 m	1,40 m	
	Dış çap	Sekizgen (l=1,15 m)		2,00 m	1,80 m	
	Malzeme	taş+tuğla		tuğla		
Konum	Beden duvarı içinde					



HOCAALİZADE CAMİ		kaide	küp	gövde	petek	külâh
	Yükseklik (24,59 m)	8,5 m	1,08 m	9,99 m	4,32 m	0,7 m
	Duvar kalınlığı	0,45 m		0,30 m	0,20 m	
	İç çap	1,20 m		1,20 m	1,20 m	
	Dış çap	altıgen (l=1,20 m)		1,80 m	1,60 m	
	Malzeme	taş+tuğla		tuğla		
Konum	Beden duvarı içinde					



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: Mehmet Hüdai BAŞTÜRK
Doğum Yeri ve Tarihi	: Erzincan/ 1982
Yabancı Dili	: İngilizce
Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)	
Lise	: Bayburt Anadolu Lisesi
Lisans	: Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	: Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl	: TSE/2013 (halen) : Kültür ve Turizm Bakanlığı (2006-2013)
İletişim (e-posta)	: m.hudai@hotmail.com