



**BURSA TARİHİ MİNARELERİNİN DİNAMİK  
DAVRANIŞLARININ VE PERFORMANSLARININ  
İNCELEMESİ**

**Cavit SERHATOĞLU**



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BURSA TARİHİ MİNARELERİNİN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ VE  
PERFORMANSLARININ İNCELEMESİ

**Cavit SERHATOĞLU**

Doç. Dr. Ramazan LİVAOĞLU  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2015

## TEZ ONAYI

Cavit SERHATOĞLU tarafından hazırlanan “Bursa Tarihi Minarelerinin Dinamik Davranışlarının ve Performanslarının İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

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

**Başkan:** Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN  
Uludağ Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye :** Doç. Dr. Ramazan LİVAOĞLU  
Uludağ Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye :** Doç. Dr. Beyhan BAYHAN  
Bursa Teknik Üniversitesi  
Doğa Bilimleri, Mim. ve Müh. Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Ali Osman DEMİR**  
**Enstitü Müdürü**

.././....

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

- 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 yararlanması 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.**

**29/06/2015**

**Cavit SERHATOĞLU**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### BURSA TARİHİ MİNARELERİNİN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ VE PERFORMANSLARININ İNCELEMESİ

**Cavit SERHATOĞLU**

Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

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

Geçmişte defalarca insanoğluna ve inşa ettikleri yapılara zarar veren deprem, gelecekte de çok kez tekrar edecek en yıkıcı doğal afetlerin başında gelmektedir. Bu yüzden depremlere rağmen ayakta kalabilmiş tarihi yapılarımızı geleceğe güvenle aktarmak inşaat mühendisliğinin başlıca görevleri arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, geçmişte birçok medeniyetin hüküm sürdüğü ve Osmanlı Devletine yıllarca başkentlik yapmış Bursa'daki 15 adet tarihi minare incelemeye alınmıştır. Tüm bu gerekliliklerin yanında tarihi minarelerin alışlagelmiş yapı tarzından farklı olarak uzun, narin, yığma yapı karakterleri ve bundan dolayı yatay yük taşıma kapasitelerinin düşük olması yapısal davranışlarının tespitinde inşaat mühendislerinin işini oldukça zorlaştırmaktadır.

Tarihi minarelerin yapısal sağlık takibi ve performans değerlendirmesi için dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi oldukça zahmetli olmasına karşın önemli bir gerekliliktir. Tarihi minarelerin rijitliğinin tespitindeki zorluklar, heterojen malzeme özellikleri, gözlemsel olarak belirlenmesi oldukça güç olan ana yapıyla ilişkisi ve buna bağlı mesnet koşulları durumu daha da zorlaştırmaktadır. Bu amaçla, çalışmada minarelerin dinamik karakteristiklerini belirlemek için minarelere çevresel titreşim testi uygulanmış ve yukarıda ifade edilmeye çalışılan tüm zorluklar lineer sınırlar içerisinde tespit edilmeye çalışılmıştır. Söz konusu bu testler sırasında modal parametrelerin belirlenebilmesi için klasik frekans alanlı yöntem kullanılmıştır. Tarihi minarelerin inşa edildiği malzemelerin mekanik özellikleri yerinde ultrases testi, laboratuvarında ise birim hacim ağırlık ve özgül ağırlık testleri yapılarak elde edilmiştir. Tarihi minarelerin yapısal davranışını temsil edecek matematiksel modeller, üç boyutlu sonlu elemanlar yaklaşımıyla oluşturulmuş ve modal testten elde edilen veriler sayesinde kalibrasyonları gerçekleştirilebilmiştir. Kalibrasyon neticesinde sayısal modellerin modal analiz sonuçları ile modal test arasındaki hata oranı çoğunlukla %10'un altında tutularak, incelenen tarihi minarelerin dinamik davranışları mümkün olduğunca mevcut yapı davranışına yakın temsil edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalara ek olarak, incelenen tarihi minarelerin birinci mod periyotları ile periyota etkileyen parametreler arasında ilişki kurularak regresyon analizi yapılmıştır. Bahsedilen ilişkilere idealleştirmeler yapılarak tarihi minarelerin birinci mod periyotlarının, tespiti veya tahmini kolay olabilecek bazı parametreler sayesinde, ampirik bir formülle tahmin edilebileceği kanaatine varılmıştır. Son olarak incelenen beş minareye doğrusal olmayan itme analizi uygulanarak talep ve kapasite diyagramları elde edilmiş ve deprem performansları değerlendirilmiştir. Bunun sonucunda tarihi minarelerdeki deprem hasarlarının çoğunlukla minare elemanlarının birleşim bölgelerinde oluştuğu görülmüştür. En çok hasarın ise en kesit ve malzeme değişiminden dolayı geçiş elemanı ile gövde arasındaki birleşim bölgesinde meydana geldiği tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Tarihi minareler, çevresel titreşim testi, modal analiz, performans değerlendirmesi

2015, xiii+186 sayfa

## ABSTRACT

MSc Thesis

### NUMERICAL AND EMPRICAL INVESTIGATION OF DYNAMIC PERFORMANCE OF HISTORICAL MASONRY MINARETS IN BURSA

**Cavit SERHATOĞLU**

Uludağ University  
Graduate School of Natural Science and Applied Science  
Department of Civil Engineering

**Supervisor: Associate Professor Ramazan LİVAOĞLU**

In the past, many historical masonry constructions were damaged by earthquakes. This historical heritage should be preserved and transferred to our posterity so that they can realisingly take its benefits like us. It is very significant because of its link to important periods in the past. Therefore, the scope of this work is selected as dynamic performance of historical minarets are investigated in Bursa, where many civilizations lived in the past. Furthermore, this city was the capital of Ottoman Empire for long time. Unlike classical structures; minarets are tall, slender and masonry structures. So, they are quite sensitive structures against lateral loads. Identification of dynamic characteristics of historical masonry minarets are so difficult via Structural Health Monitoring and evaluation of the performances too. Because the historical masonry minarets have complex stiffness, heterogenic material properties and shadowy boundary conditions as observational. Thus, ambient vibration test were performed with aim of defining modal parameters of the minarets. The test is focused on output-only modal identification. In order to achieve the modal analysis-frequency domain, peak-picking method was employed in derivation of modal data. The relationships between the first mode period of the minarets and the structural properties such as height, young's modulus, cross section were examined and regression analyzes were performed. In the further research, it is thought that the empirical formula can be derived from the relationships for the first period of the minarets.

Since the structural behavior of historical minarets were represented with mathematical models, three dimensional (solid) models were implemented by using the finite element technique. Model updating was performed in order to match the natural frequencies arising from the experimental investigation with those from numerical results. The study area is located very close to the western macro-seismic zones of north Anatolian fault. Thus, non-linear static pushover analysis were carried out considering displacement distribution of the first mode on the model of the minarets. As a result of analyzes, demand-and capacity curves of the minarets were computed and damage mechanism of the structures were investigated. The result showed that most critical sections of the historical minarets are in the region between transient segment and body component. Therefore, the tensile stress value and plasticization level of the region are very important for evaluation of seismic performance.

**Key Words:** Historical minarets, ambient vibration test, modal analysis, seismic performance

**2015, xiii+186 pages**

## ÖNSÖZ

“Bursa İlindeki Tarihi Minare Türü Yığma Yapıların Dinamik Davranışları Tespit Edilerek Deprem ve Rüzgâr Performanslarının İncelenmesi” adlı tez çalışması Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat mühendisliği yapı bilim dalı kapsamında hazırlanmıştır. Bu çalışma, yardımcı araştırmacısı olduğum KUAP(MH) 2014/48 nolu “Narin Yığma Yapıların dinamik davranışlarının deprem ve rüzgâra karşı performansının incelenmesi” proje başlığı altında Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından desteklenmiştir.

Tez çalışmamın her aşamasında, geniş bilgi birikimiyle yol gösteren ve bilimsel çalışmalarına farklı bakış açıları kazandıran değerli Hocam ve tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Ramazan LİVAOĞLU’na en kalbi teşekkürlerimi arz eder saygılarımı sunarım.

Bölümde bize karşı hoşgörüsüyle ve birçok alanda olduğu gibi tarihi yapılar üzerindeki akademik çalışmalarıyla bana ışık tutan Bölüm Başkanımız Sayın Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN Hocam başta olmak üzere değerli vaktini harcayıp çalışmamı inceleme nezaketi gösteren Sayın Doç. Dr. Beyhan BAYHAN Hocama, çalışma kapsamındaki malzeme deneylerinde bana yardımcı olan Sayın Doç. Dr. Bilal BAĞBANCI Hocama, mühendislik bilgimin gelişmesinde rol alan ismini saymadığım tüm hocalarıma ve mesai arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Yerinde yapılacak ölçümlere müsaade ederek çalışmanın yürütülmesi sırasında her türlü kolaylığı sağlayan Bursa Vakıflar Genel Müdürlüğüne ve Bursa İl Müftülüğüne saygılarımı sunar teşekkür ederim.

Hayatım her alanında tüm kararlarımın arkasında olan ve çalışmam sırasında beni sabırla karşılayıp hiçbir fedakârlık kaçınmayan aileme sonsuz şükranlarımı sunar, bu çalışmanın ülkemize ve bilime yararlı olmasını dilerim.

**Cavit SERHATOĞLU**

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
ÖNSÖZ .....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİL DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGE DİZİNİ .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Minareler .....	3
1.1.1. Minarelerde taşıyıcı sistem seçimi, konumlandırma ve yapım teknikleri.....	17
1.1.2. Malzeme .....	22
1.1.2.1. Taşıyıcı olarak kullanılan malzeme .....	23
1.1.2.2. Bağlayıcı olarak kullanılan malzeme .....	28
2. YAPILARIN DİNAMİK ÖZELLİKLERİ VE DİNAMİK YÜKLER .....	33
2.1. Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesinde Teorik Yaklaşımlar .....	33
2.1.1. Tek serbestlik dereceli sistemler .....	33
2.1.1.1. Serbest titreşim.....	34
2.1.1.2. Zorlanmış titreşim .....	38
2.1.2. Dinamik tepkilerin sayısal değerlendirilmesi.....	42
2.1.2.1. Fourier serileri yardımıyla periyodik kuvvet ve tepkisi.....	42
2.1.2.2. Duhamel integrali yardımıyla rastgele dinamik kuvvetler ve tepkileri.....	44
2.1.2.3. Yüklemenin enterpolasyonuna dayalı olarak dinamik kuvvetler ve tepkileri....	45
2.1.2.4. Merkezi Farklar yöntemi kullanılarak dinamik tepkilerin elde edilmesi .....	46
2.1.2.4. Newmark yöntemi kullanılarak dinamik tepkilerin elde edilmesi .....	48
2.1.2. Çok serbetlik dereceli sistemler .....	48
2.2. Modal Analiz.....	48
2.2.1. Tek serbestlik dereceli sistemlerde modal analiz teorileri .....	48
2.2.2. Çok serbestlik dereceli sistemlerde modal analiz .....	50
2.2.2.1. Sönümsüz sistemlerde modal analiz .....	50
2.2.2. Sönümlü sistemlerde modal analiz.....	53
2.3. Modal Test .....	55
2.3.1. Deneysel modal analiz .....	56
2.3.2. Çevresel titreşim testi .....	58
2.3.2.1 Peak-Picking metodu .....	60
2.3.2.2. Frekans ortamında ayrıştırma metodu (FOA) ve geliştirilmiş frekans ortamında analiz metodu (GFOA).....	62
2.3. Deprem .....	66
2.3.1. Deprem oluşumu .....	66
2.3.2. Türkiye ve Bursa'nın depremselliği.....	68
2.3.3. Yapı performansının doğrusal olmayan yöntemlerle belirlenmesi .....	70
3. KAYNAK ÖZETLERİ .....	76
4. METARYAL ve YÖNTEM.....	84
5. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR ve İRDELEMELER .....	88
5.1. Çalışmada İncelenen Malzeme Özellikleri .....	88
5.2. İncelenen Minareler ve Modal Parametreleri.....	91
5.2.1. Ali Paşa Cami.....	91



5.2.2. Altıparmak Cami.....	95
5.2.3. İsmail Hakkı Cami .....	99
5.2.4. Molla Arap Cami.....	103
5.2.5. Muradiye Cami Batı Minaresi.....	107
5.2.6. Muradiye Cami Doğu Minaresi .....	111
5.2.7. Şehadet Cami .....	114
5.2.8. Sultan Alaaddin Cami .....	118
5.2.9. Timurtaş Paşa Cami Minaresi .....	122
5.2.10. Ulucami Batı Minaresi .....	127
5.2.11. Ulucami Doğu Minaresi.....	131
5.2.12. Üftade Cami .....	135
5.2.13. Yeşil Cami Batı Minaresi.....	138
5.2.14. Yıldırım Beyazıt Cami batı minaresi .....	142
5.2.15. 1. Murat Hüdavendigâr Cami.....	146
5.3. Minarelerin Modal Parametrelerinin Değerlendirilmesi.....	150
5.3.1. Mesnetlenme koşullarının dinamik davranış üzerindeki etkisi.....	150
5.3.2. Geometrik özelliklerin dinamik davranış üzerindeki etkisi .....	152
5.3.3. Doğal titreşim periyodunu etkileyen parametrelerin normalleştirilmesi .....	153
5.4. İncelenen Beş Minarenin Deprem Performansı .....	157
5.4.1. Muradiye Cami batı minaresi performans değerlendirmesi.....	158
5.4.2. Muradiye Cami doğu minaresi performans değerlendirmesi.....	161
5.4.3. Ulucami batı minaresi performans değerlendirmesi .....	164
5.4.4. Ulucami doğu minaresi performans değerlendirmesi .....	167
5.4.5. Timurtaşpaşa cami minaresi performans değerlendirmesi.....	170
6. SONUÇLAR .....	174
KAYNAKLAR .....	178
EK 1.....	182
ÖZGEÇMİŞ .....	186

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$a_0$	: Fourier katsayısı başlangıç katsayısı
$A_0$	: Etkin yer ivmesi katsayısı
$a_n$	: Çift fonksiyonlar için Fourier katsayısı
$\alpha_1^{(i)}$	: i'inci adımdaki modal ivme
$a_{y1}$	: Birinci moda ait eşdeğer akma ivmesi
$A_k$	: Artık matrisi
$A(T)$	: spektral ivme katsayısı
$b_n$	: Tek fonksiyonlar için Fourier katsayısı
$c$	: Sönüm katsayısı
$c_{kr}$	: Kritik sönüm katsayısı
$C_{RI}$	: Spektral yerdeğiştirme oranıdır
$d_k$	: k'inci modun ölçek faktörü
$d_1^{(i)}$	: i'inci itme adımında birinci (hâkim) moda ait modal yerdeğiştirme
$e$	: Porozite
$E$	: Elastisite Modülü
$f$	: Sistemin frekansı
$F_0$	: Dinamik kuvvetin zamandan bağımsız başlangıç genliği
$f(t)$	: Kuvvet fonksiyonu
$G_{xx}(\omega)$	: Etki güç spektrum matrisi
$G_{yy}(\omega)$	: Tepki güç spektrum matrisi
$H$	: Yapısal sönüm matrisi
$H(\omega)$	: Frekans tepki fonksiyonu
$I$	: Bina önem katsayısı,
$k$	: Rijitlik ve komposite
$l$	: Etki vektörü
$L_{x1}$	: Birinci (deprem doğrultusunda hâkim) moda ait katılım çarpanı
$m$	: Kütle
$m_j$	: j serbestliğine atanan kütle
$M_n$	: n'inci moda ait genelleştirilmiş (modal) kütle
$M_1$	: Birinci (hâkim) moda ait genelleştirilmiş (modal) kütle
$M^*_{x1}$	: x doğrultusunda 1. mod etkin kütesidir.
$r$	: Dinamik açılmalık frekansının sistem açılmalık frekansına oranı
$R_k$	: Artık değer
$R_{y1}$	: Birinci moda ait dayanım azaltma katsayısı
$S_{ae}(T)$	: Elastik spektral ivmeler
$S_{dil}$	: Doğrusal elastik olmayan (nonlinear) spektral yerdeğiştirme
$S_{del}$	: Doğrusal elastik (linear) spektral yerdeğiştirme
$t$	: süre (s)
$T$	: Sistemin doğal titreşim periyodu
$T_0$	: Periyodik kuvvetler için hareketin tekrar süresi
$T_1$	: Başlangıç periyodu
$U_0$	: Dinamik kuvvetten dolayı sistemde oluşan statik yer değiştirme genliği
$u^t$	: Yapının mutlak yer değiştirme fonksiyonu
$u(t)$	: Yer değiştirme fonksiyonu

$u_h$	: Homojen bölümün yer değiştirmesi fonksiyonu
$u_p$	: Zorlanan kuvvetten dolayı oluşan yer değiştirme
$\ddot{u}_g$	: Yer hareketinin ivme fonksiyonu
$V_{xI}^{(i)}$	: i'inci adımdaki taban kesme kuvveti
$\nu$	: Poisson oranı
$\omega_d$	: Sistemin sönümlü açısal frekansı
$\omega_n$	: Sistemin sönümsüz açısal frekansı
$\Omega$	: Dinamik kuvvetin açısal frekansı
$\xi$	: Sönüm oranı
$\delta$	: Logaritmik azalım
$\Phi$	: Yer değiştirme denkleminde homojen kısım için sistemin başlangıç koşullarına bağlı faz açısı
$\phi$	: Mod Şekil vektörü
$\phi_{jn}$	: n vektörünün j bileşeni
$\Psi$	: Yer değiştirme denkleminin kararlı kısmı için r oranına bağlı faz açısı
$\tau$	: Anlık kuvvetin sisteme etkimeye başladığı an
$\lambda_k$	: k'inci modun öz değeri veya kutup değeri
$\eta_k$	: Sönüm azaltım faktörü
$\sigma_k$	: Modal sönüm
$\gamma_k$	: Modal katılımvektörü
$\gamma_s$	: Özgül ağırlık
$\beta_h$	: Birim hacim ağırlık
$\Gamma_{x1}$	: Birinci (deprem doğrultusunda hâkim) moda ait modal katkı çarpanı

### **Kısaltma Açıklama**

AFD	: Ayrıştırılmış Fourier Dönüşümü
DAF	: Dinamik Artırım Faktörü
DBYBHY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
FOA	: Frekans Ortamında Ayrıştırma
FTF	: Frekans Tepki Fonksiyonu
GFOA	: Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma
GSY	: Güç Spektral Yoğunluk Fonksiyonu
HFD	: Hızlı Fourier Dönüşümü
KAF	: Kuzey Anadolu Fayı
MDK	: Modal Doğrulama Kriteri
PP	: Peak Peaking Metodu
TSDS	: Tek Serbestlik Dereceli Sistem

## ŞEKİL DİZİNİ

### Sayfa

<b>Şekil 1.1.</b> Bursa tarihi camilerinden örnekler (a) Yıldırım Beyazıt Cami (b) Ulucami (c) Yeşil Cami (d) Emir Sultan Cami .....	2
<b>Şekil 1.2.</b> Dünyadan bazı minareler: (a) II. Hassan Cami, Kazablanka/Fas,1988 (b) Mashkhur Jusup Merkez Cami, Pavlodar/Kazakistan (c) Ahmed İbn Tulun Cami, Kahire/Mısır, 876-879 (d) Kul Şerif Cami, Kazan/Tataristan, 2005 (e) Kutluğ Timur Minaresi Ürgenç/Özbekistan, 14. yy. (f) Burana Kulesi Balasagun/Kırgızistan, 11. yy. (g) Samarra Cami-i Kebiri Bağdat/İrak, 847-852 (h) Kutup Minar Delhi/ Hindistan, 1199.....	4
<b>Şekil 1.3.</b> Selçuklu minareleri: (a) Ebul Manucehr Cami Kars/Türkiye, 1072 (b) Gök Medrese Sivas/Türkiye, 1271 (c) Yivli Minare, Antalya/Türkiye, 1225 (d) Âlî Minare, İsfahan/İran, 12. yy. ....	6
<b>Şekil 1.4.</b> Osmanlı minareleri: (a) Firuz Ağa Cami, İstanbul/Türkiye, 1491 (b) Süleymaniye Cami, İstanbul/Türkiye,1551-1558 (c) Ortaköy Cami, İstanbul/Türkiye, 1853.....	7
<b>Şekil 1.5.</b> Cumhuriyet sonrası minareler: (a) Ahmet Hamdi Akseki Camii Ankara/Türkiye, 2013 (b) Mültezem Cami, İstanbul/Türkiye, 2013 (c) Gaziemir Yeni Cami, İzmir/Türkiye, 2014.....	7
<b>Şekil 1.6.</b> Minareler için, a) Tipik bölümler b) Düşey kesit (Baştürk 2013).....	9
<b>Şekil 1.7.</b> Kaide örnekleri: (a) Bursa Ulucami (b) Erzurum Yivli Minare (c) Bursa Üftade Cami (d) Siirt Ulucami.....	10
<b>Şekil 1.8.</b> Osmanlı dönemine ait farklı tipteki küp örnekleri (Tokay ve Kuşüzümü 2011).....	11
<b>Şekil 1.9.</b> Şekil 1.9. Minare Gövdeleri: (a) Antalya Yivli Minare (b) Amasya Burmalı Minare (c) Edirne Selimiye Cami (d) Buhara Kalon Minare.....	12
<b>Şekil 1.10.</b> Şerefe üstünün özelliğine göre minareler (Tokay ve Kuşüzümü 2011) .....	13
<b>Şekil 1.11.</b> Şerefe sayısına göre minareler (Tokay ve Kuşüzümü 2011).....	13
<b>Şekil 1.12.</b> Şerefe altı özelliğine göre minareler (Tokay ve Kuşüzümü 2011).....	14
<b>Şekil 1.13.</b> Petek içi ahşap bağlantı elemanları (Baştürk 2013) .....	15
<b>Şekil 1.14.</b> Külâh örnekleri: (a) Bursa Ulucami (b)Kahramanmaraş Ulucami (c) Bursa Emir Sultan Cami (d) İznik Yeşil Cami (e) Darende Tahir Zaimoğlu Cami .....	16
<b>Şekil 1.15.</b> Alem örnekleri .....	17
<b>Şekil 1.16.</b> Minarelerin sınıflandırılması .....	17
<b>Şekil 1.17.</b> Karkas Minare Çeşitleri: (a) Minar-e-Pakistan (b) Selçuk Üniversitesi Kampus Cami (c) Brick Lane Cami (d) Afyon Kocatepe Üniversitesi Cami (e) Sinop Dere Cuma Cami.....	19
<b>Şekil 1.18.</b> Minarede oluşturulan bir Kurun inşa aşamaları (Doğangün ve ark. 2007) ..	21
<b>Şekil 1.19.</b> El ile yapılıp güneşte bekletilen tuğla imalatı (Özen 2006) .....	27
<b>Şekil 1.20.</b> Örnek bir horasan harcı numunesi (Böke ve ark 2004).....	29
<b>Şekil 1.21.</b> Zivana ve kenet örneği .....	32
<b>Şekil 2.1.</b> İdealize edilmiş tek serbestlik dereceli sistemler (a) sönümsüz sistemler (b) sönümlü sistemler .....	34
<b>Şekil 2.2.</b> Kritik altı, kritik ve kritik üstü sönümlü sistemlerin serbest titreşimi (Chopra, 1995).....	37
<b>Şekil 2.3.</b> Sönümün doğal titreşim değerlerine etkileri (Chopra, 1995) .....	37

Şekil 2.4. Dört farklı sönüm oranı için serbest titreşim eğriler.....	38
Şekil 2.5. Zorlanmış titreşimde sistemi etkileyen faktörler .....	38
Şekil 2.6. Frekans oranının sistem yer değiştirmelerine etkisi( Chopra, 1995).....	40
Şekil 2.7. Harmonik zorlanan sönümlü sistem için DAF ve faz açısı (Chopra, 1995)..	41
Şekil 2.8. Yer ivmesi etkisindeki sistemin yer değiştirmeleri .....	42
Şekil 2.9. Periyodik kuvvet zorlaması .....	43
Şekil 2.10. Rastgele kuvvetin adımlayarak itki kuvveti halinde gösterilmesi .....	44
Şekil 2.11. Yüklemenin doğrusal ara değerlendirilmesi.....	45
Şekil 2.12. Modal test çeşitleri.....	56
Şekil 2.13. Modal Test Akış Diyagramı (Avitabile,2002).....	57
Şekil 2.14. (a) Hammer Test (b) Shaker Test (Avitabile,2002).....	58
Şekil 2.15. Sistemin sönümünün Peak-Picking metodu belirlenmesi .....	62
Şekil 2.16. Deprem oluşumu ve dalga yayılımı.....	67
Şekil 2.17. Elastik ortamda dalga türleri ve yayılma özellikleri (Livoğlu 2001).....	67
Şekil 2.18. Türkiye deprem bölgeleri haritası.....	68
Şekil 2.19. Kuzey Anadolu Fay hattı (Bektaş ve Eyüboğlu).....	69
Şekil 2.20. Bursa deprem haritası .....	70
Şekil 2.21. Talep (İstem) diyagramı .....	75
Şekil 4.1. Çalışma planı .....	84
Şekil 4.2. KB12VD Piezoelektrik ivme ölçer (a) ve Quattro dört kanallı veri toplama ünitesi (b).....	85
Şekil 4.3. Arazide ultrases testi ve laboratuvar deneylerinden görünümeler .....	86
Şekil 4.4. Örnek bir minareye ait sonlu eleman modeli.....	87
Şekil 5.1. Ali Paşa camii minaresi ve konumu .....	92
Şekil 5.2. Ali Paşa Camii G1 ve G3 ivmeölçerler verilerine ait güç spektrumu .....	92
Şekil 5.3. Ali Paşa Camii G2 ve G4 ivmeölçerler verilerine ait güç spektrumu .....	93
Şekil 5.4. Ali Paşa Camii minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı.....	94
Şekil 5.5. Altıparmak Camii minaresi ve konumu.....	95
Şekil 5.6. Altıparmak Camii G1 ve G3 ivmeölçerler verilerine ait güç spektrumu.....	96
Şekil 5.7. Altıparmak Camii G2 ve G4 ivmeölçerler verilerine ait güç spektrumu.....	97
Şekil 5.8. Altıparmak Camii minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı .....	98
Şekil 5.9. İsmail Hakkı Camii minaresi ve konumu .....	99
Şekil 5.10. İsmail Hakkı Camii minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu.....	100
Şekil 5.11. İsmail Hakkı Camii minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu.....	101
Şekil 5.12. İsmail Hakkı camii minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı .....	102
Şekil 5.13. Molla Arap Camii minaresi ve konumu .....	103
Şekil 5.14. Molla Arap Camii minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu.....	104
Şekil 5.15. Molla Arap Camii minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu.....	105
Şekil 5.16. Molla Arap Camii minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı.....	106
Şekil 5.17. Muradiye Camii batı minaresi ve konumu .....	107
Şekil 5.18. Muradiye Camii Batı minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu .....	108
Şekil 5.19. Muradiye Camii Batı minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu .....	109

Şekil 5.20. Muradiye Cami batı minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı.....	110
Şekil 5.21. Muradiye Cami Doğu minaresi .....	111
Şekil 5.22. Muradiye Cami doğu minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu .....	112
Şekil 5.23. Muradiye Cami doğu minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu .....	113
Şekil 5.24. Muradiye Cami doğu minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı.....	114
Şekil 5.25. Şehadet Cami minaresi ve konumu .....	115
Şekil 5.26. Şehadet Cami minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu	116
Şekil 5.27. Şehadet Cami minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu	116
Şekil 5.28. Şehadet Cami minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı.....	117
Şekil 5.29. Sultan Alaaddin Cami minaresi ve konumu .....	118
Şekil 5.30. Sultan Alaaddin Cami minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu .....	119
Şekil 5.31. Sultan Alaaddin Cami minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu .....	120
Şekil 5.32. Sultan Alaaddin Cami minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı .....	121
Şekil 5.33. Timurtaş Paşa Cami minaresi ve konumu .....	122
Şekil 5.34. Timurtaş Paşa Cami minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu .....	124
Şekil 5.35. Timurtaş Paşa Cami minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu .....	124
Şekil 5.36. Timurtaş Paşa Cami minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı.....	126
Şekil 5.37. Ulucami Batı Minaresi ve konumu.....	127
Şekil 5.38. Ulucami Batı minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu .	128
Şekil 5.39. Ulucami Batı minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu .	129
Şekil 5.40. Ulucami batı minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı .....	130
Şekil 5.41. Ulucami doğu minaresi.....	131
Şekil 5.42. Ulucami doğu minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu	132
Şekil 5.43. Ulucami doğu minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu	133
Şekil 5.44. Ulucami doğu minaresinin ilk dokuz mod şekli ve frekansı .....	134
Şekil 5.45. Üftade Cami minaresi ve konumu .....	135
Şekil 5.46. Üftade Cami minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu .	136
Şekil 5.47. Üftade Cami minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu .	136
Şekil 5.48. Üftade Cami minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı .....	138
Şekil 5.49. Yeşil Cami ve konumu .....	139
Şekil 5.50. Yeşil Cami batı minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu.	140
Şekil 5.51. Yeşil Cami batı minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu.	140
Şekil 5.52. Yeşil Cami batı minaresinin ilk dokuz mod şekli ve frekansı .....	142
Şekil 5.53. Yıldırım Beyazıt Cami ve konumu .....	143
Şekil 5.54. Yıldırım Beyazıt Cami batı minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu.....	144
Şekil 5.55. Yıldırım Beyazıt Cami batı minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu.....	144
Şekil 5.56. Yıldırım Beyazıt Cami batı minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı ....	146
Şekil 5.57. 1.Murat Hüdavendigâr Cami ve konumu .....	147
Şekil 5.58. 1.Murat Hüdavendigâr Cami minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu .....	148

<b>Şekil 5.59.</b> 1.Murat Hüdavendigâr Cami minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu .....	148
<b>Şekil 5.60.</b> 1.Murat Hüdavendigâr Cami minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı.....	149
<b>Şekil 5.61.</b> Tarihi minarelerde eşdeğer yükseklik-periyot ilişkisi .....	153
<b>Şekil 5.62.</b> Eşdeğer yükseklik-Normalleştirilmiş periyot ilişkisi .....	154
<b>Şekil 5.63.</b> Elastisite modülü-Normalleştirilmiş periyot ilişkisi.....	155
<b>Şekil 5.64.</b> En kesit-Normalleştirilmiş periyot ilişkisi.....	155
<b>Şekil 5.65.</b> Muradiye batı minaresi talep ve kapasite diyagramları.....	158
<b>Şekil 5.66.</b> Muradiye batı minare Von-mises ve S33 gerilme grafikleri .....	159
<b>Şekil 5.67.</b> Muradiye batı minare aktif akma ve plastik birim şekil değiştirmeleri.....	160
<b>Şekil 5.68.</b> Muradiye Cami doğu minaresi talep ve kapasite diyagramları .....	161
<b>Şekil 5.69.</b> Muradiye doğu minare Von-mises ve S33 gerilme grafikleri .....	162
<b>Şekil 5.70.</b> Muradiye doğu minare aktif akma ve plastik birim şekil değiştirmeleri....	163
<b>Şekil 5.71.</b> Ulucami batı minaresi talep ve kapasite diyagramları.....	164
<b>Şekil 5.72.</b> Ulucami batı minare Von-mises ve S33 gerilme grafikleri.....	165
<b>Şekil 5.73.</b> Ulucami batı minare aktif akma ve plastik birim şekil değiştirmeleri .....	166
<b>Şekil 5.74.</b> Ulucami doğu minaresi talep ve kapasite diyagramları.....	167
<b>Şekil 5.75.</b> Ulucami doğu minare Von-mises ve S33 gerilme grafikleri.....	168
<b>Şekil 5.76.</b> Ulucami doğu minare aktif akma ve plastik birim şekil değiştirmeleri.....	169
<b>Şekil 5.77.</b> Timurtaşpaşa Cami minaresi talep ve kapasite diyagramları .....	171
<b>Şekil 5.78.</b> Timurtaşpaşa Cami minaresi Von-mises ve S33 gerilme grafikleri.....	172
<b>Şekil 5.79.</b> Timurtaşpaşa Cami minaresi aktif akma ve plastik şekil değiştirmeleri ....	173

## ÇİZELGE DİZİNİ

### Sayfa

<b>Çizelge 1.1.</b> Doğal yapı taşlarının ortalama mekanik özellikleri (Çamlıbel 2000).....	24
<b>Çizelge 1.2.</b> Laboratuvar koşullarında kür edilen küfeki taşına ait deneysel sonuçlar (Arioğlu 1997).....	25
<b>Çizelge 1.3.</b> Küfeki taşının mekanik özellikleri (Coşkun ve Türk 2012).....	25
<b>Çizelge 1.4.</b> Farklı araştırmacılara göre tuğlanın mekanik özellikleri .....	28
<b>Çizelge 1.5.</b> Ağırlıkça karışım oranlarına göre horasan harcının mekanik özellikleri (Canbaz ve ark. 2005) .....	31
<b>Çizelge 1.6.</b> Kür sürelerine göre horasan harcı mekanik özelliklerinin değişimi (Güral ve ark. 2006) .....	32
<b>Çizelge 4.1.</b> Kullanılan ivmeölçerlerin teknik özellikleri.....	85
<b>Çizelge 5.1.</b> İncelenen malzemelerin özellikleri.....	90
<b>Çizelge 5.1.</b> Ali Paşa Cami Minaresi malzeme ve geometrik özellikleri .....	92
<b>Çizelge 5.2.</b> Ali Paşa Cami Minaresi malzeme özellikleri .....	93
<b>Çizelge 5.3.</b> Ali Paşa Cami Minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı .....	94
<b>Çizelge 5.4.</b> Altıparmak Cami minaresi malzeme ve geometrik özellikleri .....	96
<b>Çizelge 5.5.</b> Altı Parmak Cami Minaresi malzeme özellikleri .....	97
<b>Çizelge 5.6.</b> Altıparmak Cami minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı..	98
<b>Çizelge 5.7.</b> İsmail Hakkı Cami minaresi malzeme ve geometrik özellikleri .....	100
<b>Çizelge 5.8.</b> İsmail Hakkı Cami Minaresi malzeme özellikleri.....	101
<b>Çizelge 5.9.</b> İsmail Hakkı Cami Minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı.....	102
<b>Çizelge 5.10.</b> Molla Arap Cami minaresi malzeme ve geometrik özellikleri.....	104
<b>Çizelge 5.11.</b> Molla Arap Cami Minaresi malzeme özellikleri .....	105
<b>Çizelge 5.12.</b> Molla Arap Cami Minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı.....	106
<b>Çizelge 5.13.</b> Muradiye Cami Batı minaresi malzeme ve geometrik özellikleri.....	108
<b>Çizelge 5.14.</b> Muradiye Cami batı minaresi malzeme özellikleri.....	109
<b>Çizelge 5.15.</b> Muradiye Cami batı minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı.....	109
<b>Çizelge 5.16.</b> Muradiye Cami doğu minaresi malzeme ve geometrik özellikleri.....	112
<b>Çizelge 5.17.</b> Muradiye Cami doğu minaresi malzeme özellikleri.....	112
<b>Çizelge 5.18.</b> Muradiye Cami doğu minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı.....	113
<b>Çizelge 5.19.</b> Şehadet Cami minaresi malzeme ve geometrik özellikleri.....	115
<b>Çizelge 5.20.</b> Şehadet Cami minaresi malzeme özellikleri.....	116
<b>Çizelge 5.21.</b> Şehadet Cami minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı ...	117
<b>Çizelge 5.22.</b> Sultan Alaaddin Cami minaresi malzeme ve geometrik özellikleri .....	119
<b>Çizelge 5.23.</b> Sultan Alaaddin Cami minaresi malzeme özellikleri .....	120
<b>Çizelge 5.24.</b> Sultan Alaaddin Cami minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı.....	121
<b>Çizelge 5.25.</b> Timurtaş Paşa Cami minaresi malzeme ve geometrik özellikleri .....	123
<b>Çizelge 5.26.</b> Timurtaş Paşa Cami minaresi malzeme özellikleri .....	125
<b>Çizelge 5.27.</b> Timurtaş Paşa Cami minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı.....	125



<b>Çizelge 5.28.</b> Ulucam Batı minaresi malzeme ve geometrik özellikleri.....	128
<b>Çizelge 5.29.</b> Ulucami batı minaresi malzeme özellikleri .....	129
<b>Çizelge 5.30.</b> Ulucami batı minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı.....	130
<b>Çizelge 5.31.</b> Ulucami doğu minaresi malzeme ve geometrik özellikleri .....	131
<b>Çizelge 5.32.</b> Ulucami batı minaresi malzeme özellikleri .....	133
<b>Çizelge 5.33.</b> Ulucami doğu minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı...	134
<b>Çizelge 5.34.</b> Üftade Cami minaresi malzeme ve geometrik özellikleri .....	136
<b>Çizelge 5.35.</b> Üftade Cami minaresi malzeme özellikleri .....	137
<b>Çizelge 5.36.</b> Üftade Cami minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı .....	137
<b>Çizelge 5.37.</b> Yeşil Cami batı minaresi malzeme ve geometrik özellikleri.....	139
<b>Çizelge 5.38.</b> Yeşil Cami batı minaresi malzeme özellikleri.....	141
<b>Çizelge 5.39.</b> Yeşil Cami batı minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı	141
<b>Çizelge 5.40.</b> Yıldırım Beyazıt Cami batı minaresi malzeme ve geometrik özellikleri	144
<b>Çizelge 5.41.</b> Yıldırım Beyazıt Cami batı minaresi malzeme özellikleri .....	145
<b>Çizelge 5.42.</b> Yıldırım Beyazıt Cami batı minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı.....	145
<b>Çizelge 5.43.1.</b> Murat Hüdavendigâr Cami minaresi malzeme ve geometrik özellikleri .....	147
<b>Çizelge 5.44.</b> 1. Murat Hüdavendigâr Cami minaresi malzeme özellikleri.....	147
<b>Çizelge 5.45.</b> 1. Murat Hudavendigâr Cami minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı .....	149
<b>Çizelge 5.46.</b> Üftade Cami minaresinin ilk üç modu için mesnet katkısının değerlendirilmesi .....	151

## 1. GİRİŞ

Bursa İli ve çevresinin yerleşim alanı olarak seçilmesi M.Ö. 5200 yıllarına dayanmaktadır. Eski adıyla Prousa olarak kurulan Bursa şehri ise M.Ö. 232-192 yıllarında Kartaca kralı Hannibal tarafından Britanya kralı I. Prusias onuruna kurulmuştur. Daha sonra M.Ö. 74 yılında şehir Romalıların egemenliğine geçmiştir. 955 yılında Hamedanlılar Bursa'yı ele geçirerek 23 sene hüküm sürmüşlerdir. Bursa'nın Türklerin hâkimiyetine geçmesi ise Osmanlı Devleti döneminde Sultan Orhangazi tarafından 1326 yılında gerçekleştirilmiştir.

Osmanlı devleti şehri kan dökmeden vire metoduyla almıştır. Bu yüzden şehir fethedilmeden şehir çevresine külliye, hamam ve mahalleler inşa edilmiştir. Fetihden sonra da bu mahalleler etrafına ve şehir merkezine birçok medrese, cami, imarethane, hamam, darüşşifa ve birçok eser yapılmıştır. Bursa ili 1362 yılında Edirne fethedilinceye kadar Osmanlı Devletinin başkentliğini yapmış olması nedeniyle Türk tarihinde önemli bir yere sahiptir. Günümüzdeki Bursa şehri ise geçmişteki önemini koruyarak Türkiye'nin önemli metropol kentlerinin içinde yer almaktadır.

Osmanlı Devleti hükümdarlığı boyunca çok büyük topraklara egemen olmuş ve çok farklı dilde, dinde, ırkta olan milletleri yönetmiştir. İnsanların dini inanışlarını serbest bırakarak hoşgörüyü karşılamıştır. Ancak devlet anlayışındaki İslam'ın koruyuculuğu ve halifelik vazifesinden dolayı cami ve mescit gibi yapıların inşasına çok önem vermiştir. Dönemin en sağlam ve ihtişamlı yapıları devlet tarafından yaptırılan bu yapılardır. Bursa ili uzun yıllar Osmanlı Devletinin başkenti olmasından dolayı, birçok hükümdar söz konusu anıtsal nitelikteki yapıların inşası için burayı tercih etmiştir.

Günümüzde tarihi bir silüete sahip hem Asya hem de Avrupa kültürlerinden etkilenen bu şehir, yedi asırlık dönem boyunca Osmanlı Devletine beşiklik etmesinden dolayı farklı mimari ve yapı tekniklerinin uygulandığı cami ve minarelere sahiptir (Şekil 1.1). Kanatlı veya "Ters T" planlı camiler Bursa ile özdeşleşmiştir (Baştürk 2013).

Bursa ilindeki kültür mirası olan bu minareler, yüzyıllardır ayakta kalmayı başarmıştır. Ancak çeşitli dönemlerde rüzgâr ve deprem etkisiyle minarelerin gördükleri hasarlar,

onarılmalarına ya da yeniden yapılmalarına neden olmuştur. Tarihi kayıtlara göre Bursa şehri en büyük hasarı ve buna bağlı olarak can ve mal kaybını 1855 Bursa depreminde yaşamıştır. Güncel araştırmalar da söz konusu bölgenin deprem riski açısından tehlikesini gözler önüne sermektedir. Bursa ili 1. Derece Deprem bölgesi olup aktif faylar üzerinde yer almaktadır. Kaçınılmaz olan bu gerçek tarihi eser niteliğindeki bu yapıtların korunması için yapılacak araştırmaların her aşamasının değerinin ne denli önemli olacağını göstermektedir.

Bu çalışmada Bursa ilindeki minarelerin dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Osmanlı Minarelerinin doğal titreşim periyodları için ampirik bir formülün temeli oluşturulmaya çalışılmıştır. Çalışmanın devamında seçilen bazı minarelerin deprem performansı irdelenmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Şekil 1.1.** Bursa tarihi camilerinden örnekler (a) Yıldırım Beyazıt Camii (b) Ulucami (c) Yeşil Camii (d) Emir Sultan Camii

## 1.1. Minareler

Geçmişten günümüze kadar insanoğlu din ve inanışları için ibadet edecekleri özel mekânlar inşa etmişlerdir. Yahudiler sinagogları, Hristiyanlar kiliseleri, Puta tapanlar çeşitli tapınakları, Müslümanlar ise camileri ibadet yerleri olarak benimsemişlerdir.

Dünyada cami denilince akla gelen ilk yapı elemanı minaredir. İslam mimarisinin önemli elemanı olan minare "camilere bitişik ya da ayrı yapılan, ezan okumak ve sesi çevreye yayabilmek için bir ya da birden fazla balkonu (şerefesi) bulunan kule tipi yüksek yapı" olarak tanımlanmaktadır (Doğangün ve ark. 2006). Minareler, ezan okuyarak namaza davetin yanında artık şehrin ve İslam medeniyetinin sembolü haline gelmiştir. Bu yüzden tarih boyunca minare mimarisi gelişerek zarif ve ihtişamlı bir hal almıştır.

Hem betonarme hem de yığma minareler taşıyıcı özellikleri bakımından diğer yapı türlerinden farklıdır. Bu yüzden, her ne kadar bugüne kadar yaşanan örnekler tam tersini işaret ediyor olmasına rağmen, hizmet süreleri boyunca karşılaşmaları muhtemel deprem, rüzgâr gibi dinamik yükleri güvenle karşılayabilecek şekilde tasarlanmaları gerekmektedir.

Arap, İnan, Hint, Türk, Mısır minare şekilleri ve mimarileri farklıdır (Şekil 1.2). Cami ve minare geleneğinin gelişmesinde Anadolu bölgesinde yüzyıllarca hüküm süren Selçuklu ve Osmanlı Devleti oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Minarelerin yapım tekniğinin ve mimarisinin doruk noktasına çıktığı dönem ise 16.yy Mimar Sinan dönemidir. Bu dönemden sonra deprem ve rüzgâr yüklerine karşı tasarım önem kazanmıştır. Hatta bölgenin zemin durumu ve deprem bölgesi olup olmadığı detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Dahası malzeme ve yapım teknolojilerinde de önemli adımlar atılmıştır. Bu dönemde minareler camiyle bitişik yapılarak cami kubbesine payanda görevini üstlenmiştir.

Ancak bu minareler, mimarisindeki ölçü, oran, tasarım, yapım teknolojisi gibi gelişmelere rağmen yetersiz kalmış, şiddetli deprem ve rüzgârlara yenik düşmüşlerdir. Araştırmaya konu olan Bursa ilindeki minareler de küçük kıyamet diye adlandırılan 1855 Bursa depremine dayanamamış ve minarelerin birçoğu yıkılmıştır. Yıkılan bu minareler daha

büyük en kesitle yüksekliği azaltılarak yapıldığı bilgisi eserlere ait kitabelerden ve yazılı kaynaklardan anlaşılmaktadır.

Ülkemizde böylesine kule tipi yapıların hesap ve tasarımı için hazırlanmış hiçbir standart ve yönetmelik yoktur. Sadece 1999 Kocaeli depreminden hemen sonra Diyanet İşleri Başkanlığı'nın acilen hazırladığı "Minarelerin Yapımında Uygulanacak Esaslar" talimatı vardır. Söz konusu esasların ise yalnızca betonarme minareleri konu ediyor olması ise önemli sayıda tarihi yapının sahipsiz olduğu manasına gelmektedir. Hal böyle iken, önemli bir kültürel miras ve anıtsal değere sahip tarihi minareler hakkında bu türden bir yönergenin gerekliliğini ifade etme gerekliliği açıktır.



(a)



(b)



(c)



(d)



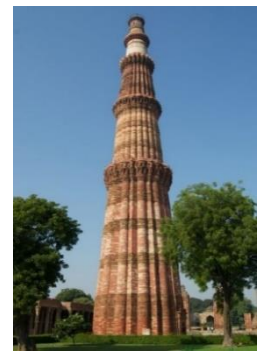
(e)



(f)



(g)



(h)

**Şekil 1.2.** Dünyadan bazı minareler: (a) II. Hassan Cami, Kazablanka/Fas,1988 (b) Mashkhor Jusup Merkez Cami, Pavlodar/Kazakistan (c) Ahmed İbn Tulun Cami, Kahire/Mısır, 876-879 (d) Kul Şerif Cami, Kazan/Tataristan, 2005 (e) Kutluğ Timur Minaresi Ürgenç/Özbekistan, 14. yy. (f) Burana Kulesi Balasagun/Kırgızistan, 11. yy. (g) Samarra Cami-i Kebiri Bağdat/İrak, 847-852 (h) Kutup Minar Delhi/ Hindistan, 1199

## ❖ **Minarelerin kısa tarihi**

İslam dininde namaz zamanlarının bildirilmesinde "EZAN" denilen "İnsan sesi ile sesleniş" benimsenmiştir. İslamiyet'in ilk yıllarında ezanın çevredeki bir yapının damına ya da yüksekçe bir yere çıkılarak okunduğu bilinmektedir (Sayar 1977). Daha sonraları ise ezan "Manar" ya da "minar" olarak bilinen gözetleme kuleleri üzerinde okunmuştur. Minarelerin şeklini almasında deniz fenerleri, gözetleme kuleleri ve kilise kuleleri örnek bir şekil oluşturmuştur. Hz. Muhammed ve dört halife zamanında minare olduğuna ve yapıldığına dair herhangi bir bilgi yoktur. İlk minare Mısır'ın başkenti Fustat yeni adıyla Kahire'deki Amr İbn Al As camisinde inşa edilmiştir. Minare camiye Emevi Meliki I. Muaviye zamanında Mısır Valisi Meslem bin Muhalled tarafından 678 yılında eklenmiştir.

Tunus, Fas, Cezayir, Mısır ve Suriye'de görülen minarelere genellikle batı minareleri denilmiştir. Bu minareler konut olarak kullanılmak amacıyla dört köşeli veya çok köşeli, az katlı olarak inşa edilmiştir. İran, Irak ve Anadolu'daki minareler ise doğu minareleri olarak adlandırılmaktadır. Bu minareler ise yalnızca ezan okumak amacıyla yapılmıştır (Ertek ve Fahjan 2007).

Mezopotamya'da ilk Abbasiler döneminde Ziguratlar benzeri silindirik yapılara dönüşmüştür. Karahanlıların İslamiyet'i kabulüyle Türkistan ve Horasan minare mimarisi oluşmuştur. Bu minareler silindirik köşeli ve yivli gövdeli bir hal almaya başlamıştır (Acar 2009). Selçukluların ise İran'da ve Anadolu'da yaptığı iki tip minare vardır (Şekil 1.3). İran'da yaptıkları minareler bölgede yaygın bulunan malzemeden dolayı tuğla olup gövdesi yıldız veya baklava motiflidir. Anadolu'da bulunan minareler ise kesme taştan olup daha kalın gövdeli ve kısadır. Anadolu'da Selçuklular, ilk Türk camisi olan Ebul Manucehr' i 1072 yılında Kars'ta inşa etmiştir.



(a)

(b)

(c)

(d)

**Şekil 1.3.** Selçuklu minareleri: (a) Ebul Manucehr Cami Kars/Türkiye, 1072 (b) Gök Medrese Sivas/Türkiye, 1271 (c) Yivli Minare, Antalya/Türkiye, 1225 (d) Âlî Minare, İsfahan/İran, 12. yy.

Osmanlı dönemindeki minareleri üç ayrı devirde inceleyebiliriz (Eyice 1963). Kuruluştan Mimar Sinan Devrine kadar, Mimar Sinan'dan Lale Devrine kadar, Lale Devrinden Cumhuriyetin kuruluşuna kadar tanımlanabilir (Şekil 1.4).

İlk devir minarelerinde, Mimar Sinan'ın Devrindeki gibi standarda kavuşmuş bir minare tipi yoktur. Bu dönemde minareler Selçukluların minare tipini andırmaktadır. Minarelerin gövdeleri kalın, kürsüleri sade ve küp bölümündeki geçişleri motiflidir. Bayezid, Murat Paşa, Koca Mustafa Paşa, Firuzzağa, Atik Ali Paşa camileri minareleri bu devir minarelerine örnek gösterilebilir. 2. Dönem Mimar Sinan ve etkisindeki mühendis/mimarlar tarafından inşa edilen minareler, klasik dönem minareleri olarak da adlandırılmıştır. Yapım tekniklerinin geliştiği, Osmanlı mimarisi olarak bir anlayışa kavuştuğu bir dönemdir. Bu dönem minareler daha ince ve zarif bir hal alarak tüm elemanlarıyla bir kompozisyon oluşturmaktadırlar. 16. yy. ortalarında Mimar Sinan ile başlayan bu devir, Mimar Davud, Mimar Dalgıç Ahmed, Mimar Mehmed Ağa ile devam etmiştir. Süleymaniye, Sultanahmet, Şehzade, Selimiye, Yeni, Ahmet Paşa, Sinan Paşa, Rüstem Paşa, Kılıç Ali Paşa, Şemsi Paşa, İskender Paşa camileri minarelerini bu devir minarelerine misal verilebiliriz.

3. ve son dönem olan Lale Devrinden Cumhuriyetin kuruluşuna kadar inşa edilen minareler ise 18. yy ortasından itibaren Türk Sanatı batı anlayışının etkisi altında

kaldığının işaretlerini taşımaktadır. Bu etkiyle 19. yy ortalarına kadar Barok ve Ampir üslupları etkili olmuş daha sonra ise eklektik üslubu etkili olmuştur. Bu devirde minareler bol süslemeli ve ince olup minarenin küp kısmı kürevi şekli almıştır.



(a)



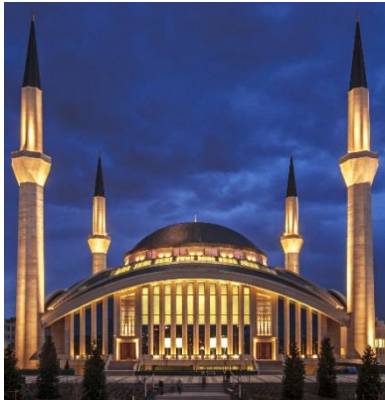
(b)



(c)

**Şekil 1.4.** Osmanlı minareleri: (a) Firuz Ağa Cami, İstanbul/Türkiye, 1491 (b) Süleymaniye Cami, İstanbul/Türkiye, 1551-1558 (c) Ortaköy Cami, İstanbul/Türkiye, 1853

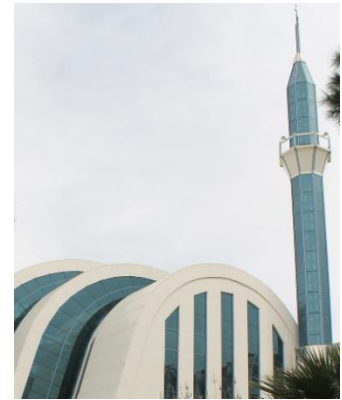
Günümüzde inşa edilen minareler çoğunlukla betonarme olup Osmanlı dönemi mimarisine benzemektedir. Ancak son 15-20 yılda yapılan bazı camilerin minareleri eski dönem mimariden farklı olarak modern mimariye geçiş olarak gösterilebilir (Şekil 1.5).



(a)



(b)



(c)

**Şekil 1.5.** Cumhuriyet sonrası minareler: (a) Ahmet Hamdi Akseki Camii Ankara/Türkiye, 2013 (b) Mültezem Cami, İstanbul/Türkiye, 2013 (c) Gaziemir Yeni Cami, İzmir/Türkiye, 2014

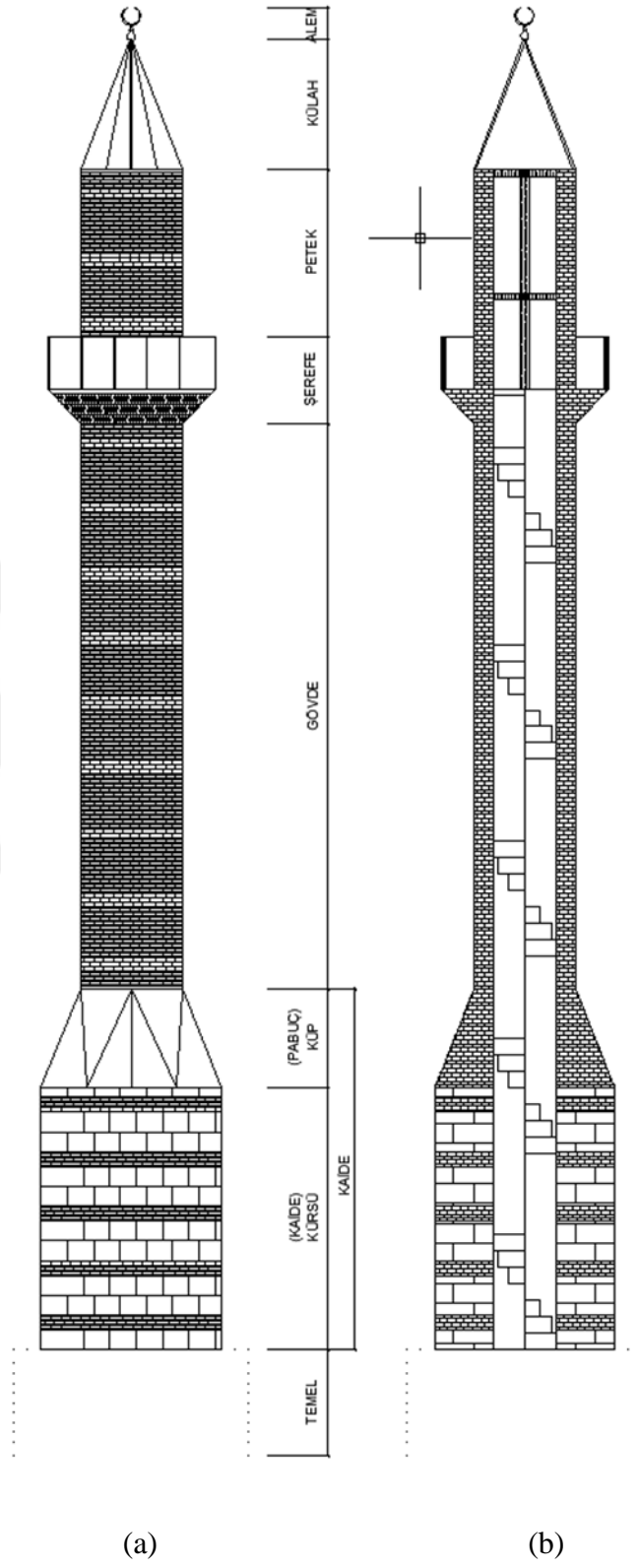


## ❖ Minarelerin bölümleri

Araştırmamıza konu olan ve görünümüyle İslamiyet'in temsilcisi Selçuklu ve Osmanlı minarelerini toplamda 3 ana bölüm olmakla birlikte 9 bölüme ayırabiliriz (Şekil 1.6). Ana bölümler; kaide bölümü, gövde bölümü, şerefe ve üstü bölümüdür.

- 1) Temel
- 2) Kaide(Kürsü)
- 3) Küp(Geçiş elemanı, Pabuç)
- 4) Gövde
- 5) Merdiven
- 6) Şerefe(Balkon)
- 7) Petek
- 8)Külâh
- 9)Alem

**Temel:** Üst yapıdan gelen yükleri zemine aktaran yapı elemanıdır. Toprak altında kaldığı için geometrisi, derinliği ve örgüsü hakkında bilgimiz sınırlıdır. Temeller, kaide geometrisine, zemin durumuna ve deprem bölgesine göre değişerek çoğunlukla 2 veya 3 ampatmanlı olarak genişleyerek inşa edilmiştir (Kuşüzümü 2010). Güncel minarelerde ise zemin durumuna bağlı olarak radye veya dairesel sürekli temel tipi kullanılmaktadır. Geçmişten günümüze kadar inşa edilen minarelerdeki hasarlar nadiren temellerde oluşmuştur. Oluşan hasarlar ise genellikle oturma veya taban dönmesi olarak meydana gelmiştir.



Şekil 1.6. Minareler için, a) Tipik bölümler b) Düşey kesit (Baştürk 2013)

**Kaide (Kürsü):** Temel ile küp arasında bulunan prizmatik biçimli en alt bölümüdür. Minarelerin ilk örneklerinde bu bölüm silindirik yapılmasına rağmen daha sonra kare, altıgen, sekizgen, ongen gibi geometrik formlarda inşa edilmiştir. Tarihi yapılarda bu bölüm daha mukavemetli olduğu için genellikle taştan yapıldığı gibi taş-tuğla olarak almalı sıralı formları da vardır. Hem taştan hem de almalı sıralı örgüye ve değişik geometriye sahip kaideler şekil 1.7 verilmiştir.

Minareye giriş, çoğunlukla kaideden olup minarenin kapı bölümü bu kısımdadır. Bazı kaynaklar küp ile kürsünün birleşimini kaide olarak tanımlamaktadır. Minarenin ana yapıya bitişik, birlikte veya ayrı yapıldığı kısım bu bölümleri kapsar. Ana yapıya bağlı planlanan minare taçkapı yanı, üstü ve kitlenin damında olabilir (Baştürk 2013).



(a)

(b)

(c)

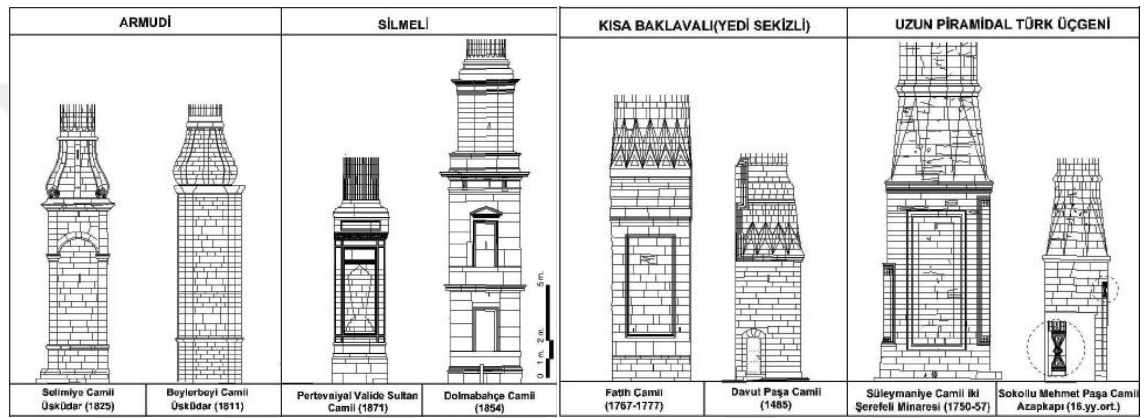
(d)

**Şekil 1.7.** Kaide örnekleri: (a) Bursa Ulucami (b) Erzurum Yivli Minare (c) Bursa Üftade Cami (d) Siirt Ulucami

**Küp (Geçiş elemanı, Pabuç, Yedi Sekiz):** Geometrisi ve boyutları farklı olan kaide ile gövde arasında geçişi sağlayan yapısal ve teknik anlamda minarenin en önemli bölümüdür. Osmanlı minarelerinde kaide bölümü genellikle kare veya çokgen gövde bölümü ise silindirik ve kaideye göre daha küçük boyutta inşa edildiği için bu iki bölümün arasında estetik bir geçiş elemanı kullanmak kaçınılmazdır. Küp bölümünün dış bükey aslan göğüslü, üçgen piramit, pahlı ( düz, profilli ve mukarnaslı) tiplerinin yanında kare, çokgen, basık soğan formuna da rastlanmaktadır (Baştürk 2013). Kullanılan malzeme kaidenin yapımında olduğu gibi taş veya taş-tuğla almalı sıralıdır. Kaide yapı elemanından küp (pabuç) yapılarak silindirik ve daha ince gövdeye geçiş Anadolu

Selçuklu Devleti ile olmuştur. Daha önceki Büyük Selçuklu, Gazneli ve Karahanlılar gövde ve kaideyi aynı boyutta tutarak küp gibi bir geçiş elemanına ihtiyaç duymamışlardır. Osmanlı mimarisinde ise gövde kısmı uzun ve daha ince olduğu için küp bölümü daha uzun tutulmuştur.

Deprem ve rüzgar gibi yatay yüklerden dolayı en yaygın hasar bu bölümde oluşmaktadır. Bunun sebebi kaideden sonra yapıdaki kesit ve rijitlik azalmasından dolayı oluşan gerilme yığılmalarıdır. Farklı küp örnekleri Şekil 1.8’ de verilmiştir.



Şekil 1.8. Osmanlı dönemine ait farklı tipteki küp örnekleri (Tokay ve Kuşüzümü 2011)

**Gövde:** Kaide ile şerefe arasındaki minarenin en uzun bölümüdür (Şekil 1.9). Anadolu Selçuklular döneminde onaltıgen örnekleri olmasına rağmen 15. yüzyıldan itibaren silindirik bir geometri tercih edilmiştir. Osmanlı döneminde yükseklik boyunca sabit en kesit seçilmesine karşın önceleri daralan en kesitli minareler inşa edilmiştir. Gövde duvarı içerisinden geçen merdiven taşları ile birlikte düşeyde şaşırtmalı olarak örülmektedir. Eski dönemlerde elektrik olmadığı için minarenin gövde bölümüne hem aydınlatmak hem de havalandırmak amacıyla belirli aralıklarda pencere koyulmuştur. Minare gövde malzemesi olarak taş ve tuğla kullanılmıştır (Baştürk 2013).

**Merdiven:** Kaideden başlayıp şerefe tabanına kadar çıkılmasını sağlayan minare elemanıdır. Helezonik bir şekilde inşa edilen bu eleman minareye etkiyen yatay yüklerle karşı minarenin rijitliğini önemli derecede artırmaktadır. Basamak yüksekliği (rıht) 25-30 cm arasında olup basamak genişliği ve uzunluğu minare en kesitine göre değişmektedir. Basamak taşının geniş olan kısmı gövde duvarında kur diye adlandırılan

bir sırayı tamamlarken, dar olan kısmı ise orta kısımda üst üste birleşerek şerefe kadar yükselir. Merdiven elemanın yapımda kullanılan malzeme, gövde ve kaidede kullanılan malzemeye göre taş, tuğla ve ahşap olabilir (Baştürk 2013).



(a)

(b)

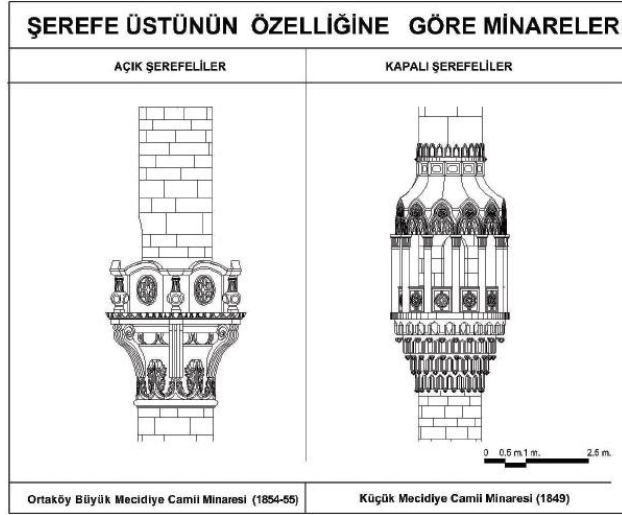
(c)

(d)

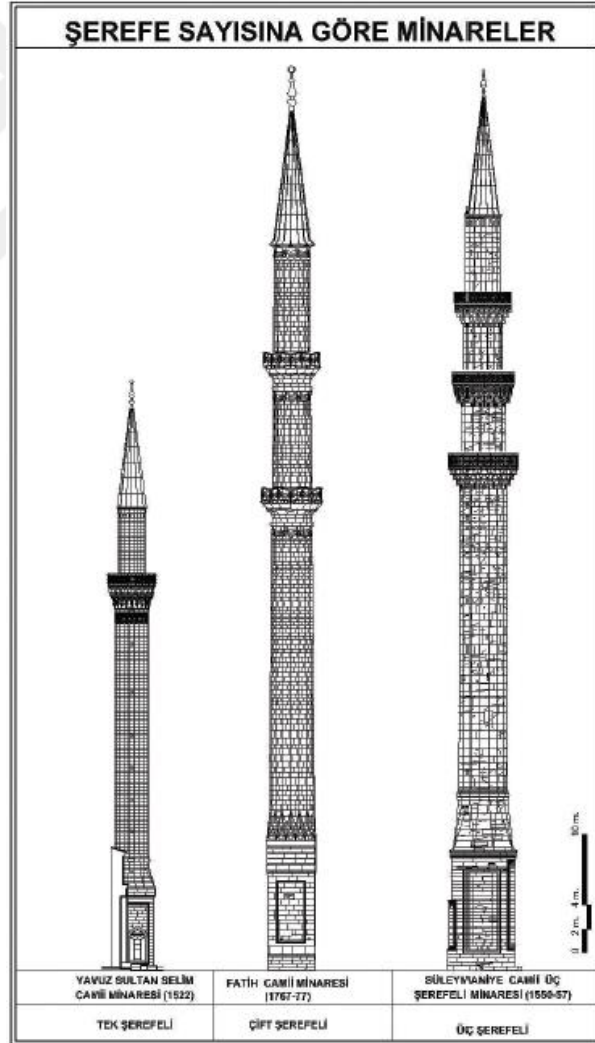
**Şekil 1.9.** Şekil 1.9. Minare Gövdeleri: (a) Antalya Yivli Minare (b) Amasya Burmalı Minare (c) Edirne Selimiye Cami (d) Buhara Kalon Minare

**Şerefe (Balkon):** Halkı namaza davet eden ezanın, müezzin tarafından etrafını dolaşarak okunduğu gövdeyi belirli yüksekliklerde çevreleyen konsol şeklindeki kapalı veya açık bölümdür. Uzak bölgelere ezanı duyurmak için yerleşim bölgesinin büyüklüğüne göre geçmişte üç şerefeye kadar minare inşa edilmiştir. Klasik Osmanlı döneminde şerefe altı kubbe alemini geçmemektedir. Şerefelerle ilgili bilinen bir diğer özellik ise kapılarının kible yönüne açılacak şekilde yerleştirilmesidir.



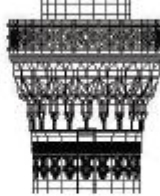



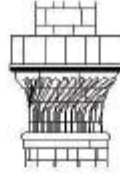
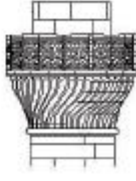
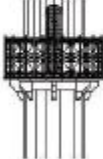

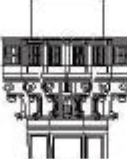


Şerefeler taban(döşeme), çıkma ve korkuluk olarak üç ana kısımdan oluşmaktadır. Taban döşemesi üzerinde müezzinin dolaşarak ezan okuduğu iç kısımdan dışa doğru genişleyen dilimli taştan yapı elemanıdır. Çıkma taban gövdesini alt kısımdan destekleyen, kademe kademe yukarıya doğru genişleyerek birbiri üstüne kenetlenen minarenin en süslü ve estetik elemanlarından biridir. Korkuluk, döşemeyi çevreleyen emniyet için inşa edilmiş taş, tuğla veya ahşap malzemeli elemandır. Minarelerin ışıklandırılması bu bölümde yapılmaktadır. Şerefeler üstü, altı ve sayısına göre sınıflandırılabilir (Şekil 10,11 ve12).



Şekil 1.10. Şerefe üstünün özelliğine göre minareler (Tokay ve Kuşüzümü 2011)



Şekil 1.11. Şerefe sayısına göre minareler (Tokay ve Kuşüzümü 2011)

ŞEREFİ ALTININ ÖZELLİĞİNE GÖRE MİNARELER				
SADE			STALAKTİTLİ (PÜSKÜLSÜZ)	
				
Ali Pertek Camii Minaresi (15.yy. sonu) ?	Aşık Paşa Camii Minaresi (1453-1479) ?		Yavuz Sultan Selim Camii Minaresi (1522)	Süleymaniye Camii Üç Şerefeli Minaresinin 1. Şerefesi (1550-57)
STALAKTİTLİ (PÜSKÜLLÜ)			BURMALI	
				
Yeni Valide Camii Minaresinin 1. Şerefesi (1708-10)	Nişanca Mehmet Paşa Camii Minaresi (1584-89)		Kürkübaşı Camii Minaresi (18.yy.)	Vasat Atik Ali Paşa Camii Minaresi (18.yy.)
TAŞ KONSOLLU			BİTKİSEL MOTİFLİ	
				
Malcı Mehmet Paşa Camii Minaresi (1688)	Bedrettin Camii Minaresi (1878)	Ertuğrul Tekke Camii Minaresi (1905)	Hamid-i Evvel Camii Minaresi (1781-82)	Dolmabahçe Camii Minaresi (1854)

Şekil 1.12. Şerife altı özelliğine göre minareler (Tokay ve Kuşüzümü 2011)

**Petek:** Minarenin şerife ile külah arasında kalan bölümüdür. Duvar kalınlığı genellikle gövde duvar kalınlığından ince olup iç çapı değişebilmektedir (Baştürk 2013). Gövde elemanı ile aynı yapı malzemesi kullanılmaktadır. Merdiven şerife tabanında bittiği için petek bölümünde dikkate değer rijitlik kaybı yaşanmakta ve karşılıklı duvarlar arasında bağlantı sağlanamamaktadır. Bu olumsuz durumu azaltmak için şerife tabanından başlamak üzere genellikle külah altı seviyesine kadar uzanan ahşap dikmeler ve buna

bağlı yatay ahşap bağlantı elemanları kullanılmaktadır. Böylece hem petek duvarları deprem, rüzgar gibi yatay yüklere karşı birlikte çalışmakta hem de külah minareye bağlantısı sağlanmaktadır. Petek içindeki bağlantı elemanlarına örnek Şekil 1.13 verilmektedir.



**Şekil 1.13.** Petek içi ahşap bağlantı elemanları (Baştürk 2013)

**Külah:** Peteğin üstüne inşa edilerek minareyi düşey yönde örten genellikle koni biçimindeki bölümdür. Bu bölüm taştan, tuğladan ya da ahşap karkas üzerine kurşun kaplama olarak oluşturulmaktadır (Baştürk 2013). Taş veya tuğla kullanarak inşa edilen külahların bağlantısı zayıf olmasına karşın ağır elemanlardır. Bu yüzden üzerine gelen yatay yüklerde külah zarar görmekte hatta şerefeye ve minare çevresindeki yapılara zarar vermektedir. Bu durumun farkına varan eski tasarımcılar külahın taşıyıcı sistemini ahşap tasarlayıp üzerini kurşunla kaplamışlardır. Böylece kolay bağlantı sağlanan ve istenilen şekle sokulabilen mimaride hafif ve yalıtımlı bir yapı elemanı tasarlamışlardır. Şekil 1.14’te farklı malzeme ve mimaride külah örnekleri verilmiştir.





(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

**Şekil 1.14.** Külâh örnekleri: (a) Bursa Ulucami (b)Kahramanmaraş Ulucami (c) Bursa Emir Sultan Cami (d) İznik Yeşil Cami (e) Darende Tahir Zaimoğlu Cami

**Alem:** Yol gösteren, işaret, toplulukların altında birleştiği alamet ve sancak anlamlarını taşımaktadır. Eski Türkler genellikle çadır ve binaların tepesine gerek süs olarak ve gerekse nazara karşı bir tılsım olarak moncuk veya boncuk denen tepelikler koyarlardı. Türkler İslamiyet'i kabul ettikten sonra bu tabire alem denilmiştir. Türkler alem olarak at kuyruğundan tuğları, boynuz ve hilal şekillerini kullanmışlardır. Bu simgeler Türk milleti için gücün simgesi haline gelmiştir. Geçmişten beri devam eden bu geleneğe diğer inşa ve estetik sebeplerin katılması, alemlerin bugüne kadar devam etmesine sebep olmuştur. Alem; Türk Dil Kurumu sözlüğünde ise minare, kubbe, sancak direği gibi yüksek şeylerin tepesinde bulunan, madenden yapılmış ay yıldız veya lâle olarak tanımlanmaktadır. Şekil 1.15' te alem örnekleri verilmiştir.

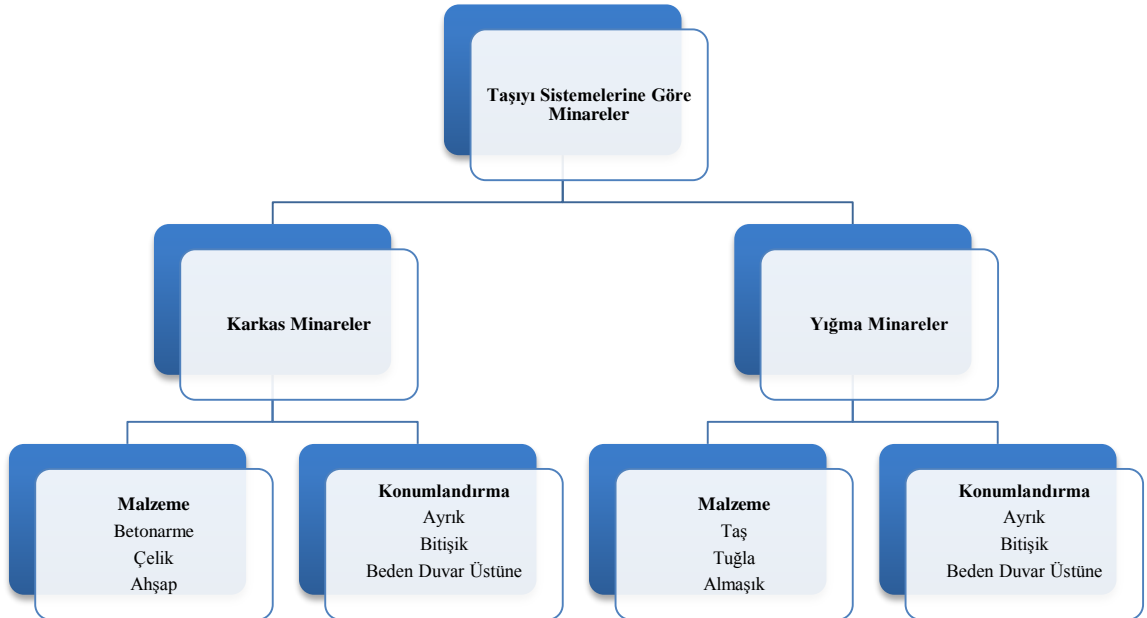
Bahsedilen inşa gerekliliği açıklanacak olursa; minare külâh bölümü üstüne kaplanan kurşunun uç kısımlarını birleştirmesidir. Bu sayede minareye yağmur ve kar suyu girmeyecek aynı zamanda rüzgârdan dolayı kaplama açılmayacaktır. Alemler çoğunlukla bakırdan yapılmasına karşın taş, seramik ve pirinçleri de mevcuttur.



**Şekil 1.15.** Alem örnekleri

### 1.1.1. Minarelerde taşıyıcı sistem seçimi, konumlandırma ve yapım teknikleri

Minareler kendi ağırlığının dışında herhangi bir zati yüke maruz kalmazlar. Ancak minareler tasarım alanına göre ağır ve yüksek yapılar oldukları için üzerine gelen yatay kuvvetler bu kriterlerle paralel olarak artmaktadır. Bu yüzden yapılacak minarenin taşıyıcı sistem seçimi, konumlandırılması ve yapım teknikleri oldukça önem kazanmaktadır. Minareleri taşıyıcı sistem olarak karkas ve yığma minareler olarak iki gruba ayırmak mümkündür (Şekil 1.16).



**Şekil 1.16.** Minarelerin sınıflandırılması

## ❖ Karkas taşıyıcı sistemli minareler

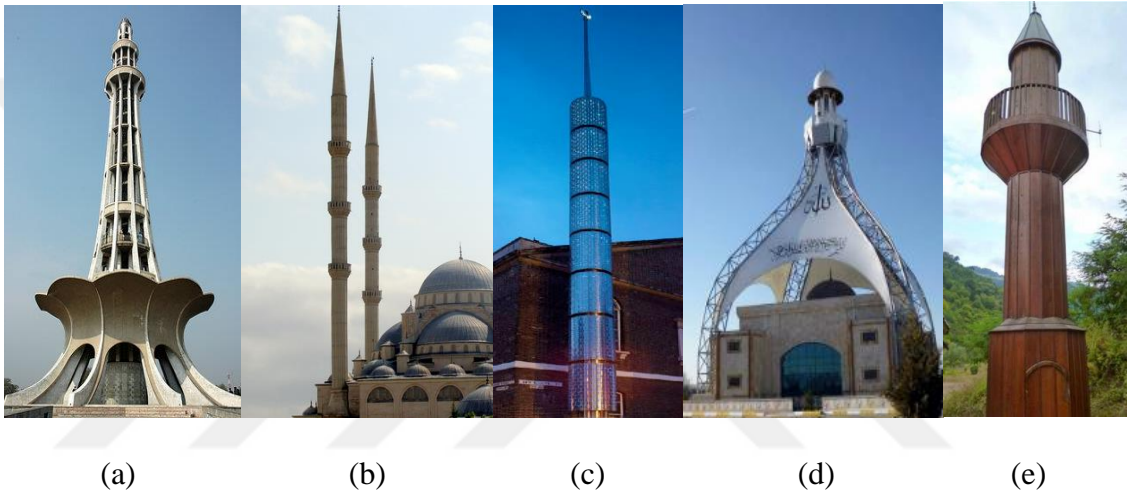
Karkas taşıyıcı sistem genellikle günümüz minarelerine uygulanan tasarım biçimidir (Şekil 1.17). Karkas yapı sistemlerini betonarme, ahşap ve çelik karkas olmak üzere üç bölümde inceleyebiliriz.

Günümüz yapı inşasında en yaygın olarak tercih edilen taşıyıcı sistem betonarme olduğu için minarelerde kullanılan taşıyıcı sistem de bu yönde gelişmiştir. Betonarme minarelerde ankastre temel kullanılmakta olup yapım tekniğinde kayar kalıp uygulaması tercih edilmektedir. Türkiye'de minare tasarımı ve yapımı ile ilgili ayrıntılı herhangi bir standart ve yönetmelik mevcut olmadığı daha önce de ifade edilmişti. Bu yüzden günümüz minareleri, rüzgâr yükünün belirlenmesi için TS498 ve deprem göre hesap için de " Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik" kısmen kullanılarak genellikle standart kalıp boyutlarında inşa edilmektedir. Son zamanlarda yapılan Ahmet Hamdi Akseki Cami minaresi gibi özel birkaç minare hariç; günümüz betonarme minare mimarisi Osmanlı döneminde yapılan minareleri taklitten öteye gidememiştir. Betonarme minareler ile camiler genellikle ayrı projelendirilmekte ve konumlandırılmaktadırlar.

İkinci karkas taşıyıcı sistem olarak çelik konstrüksiyonlu minareler tercih edilmektedir. Çelik taşıyıcı sisteme sahip minarelere talep hızla artmaktadır. Betonarme yapılara göre çelik yapılar hızlı inşaat, montaj kolaylığı, uzun hizmet ömrü, istenilen mimari tasarım ve yükseklikte inşaat, olası oluşacak hasarlarda kolay ve hızlı müdahale imkânı gibi artı özelliklere sahiptir. Bunların yanında depreme karşı dayanıklı yapılardır. Çelik konstrüksiyonlu minarelerin dış cephesi Siding Kaplama, Alüminyum Sac Kaplama, Fiberglass Kaplama, Poliüretan Kaplama ile örtülerek estetik bir görüntü oluşturulmaktadır. Betonarme veya çelik minareler arasındaki tercihte genellikle ekonomik olması ön plana çıkmaktadır. Çelik malzemeden yapılan minareler genellikle betonarme camilerle kullanılmaktadır. Bu yüzden çelik minareler genellikle cami beden duvarından ayrık ya da beden duvarının üzerinde konumlandırılmaktadır.

Ahşap karkas minarelere ise geçmişte ve günümüzde az rastlanmaktadır. Bu minareler tercih edilmemesine rüzgâr, yağmur, kar, ateşe karşı daha dayanıksız olması ve kısa

ömürlü olması sebep olarak gösterilebilir. Ahşap hafif malzeme olduğu için tasarımcılar bu minarelerin yüksekliklerini kısa tutmak zorunda kalmıştır. Geçmişte ahşap karkas minareler genellikle taşın çıkarılmasının ve nakliyesinin zor olduğu engebeli arazilerde inşa edilmiştir. Bu minarelere Karadeniz Bölgesinde daha sık rastlanır. Ahşap minarelere Sinop Dere Cuma Cami ve Konya Şazibey Cami minaresi örnek verilebilir. Ahşap minareler genellikle kâgir cami inşası ile birlikte kullanılmaktadır. Bu yüzden ahşap karkas minareler cami beden duvarından ayırık ya da beden duvarı üzerinde konumlandırılmaktadır.



**Şekil 1.17.** Karkas Minare Çeşitleri: (a) Minar-e-Pakistan (b) Selçuk Üniversitesi Kampus Cami (c) Brick Lane Cami (d) Afyon Kocatepe Üniversitesi Cami (e) Sinop Dere Cuma Cami

#### ❖ Yığma taşıyıcı sistemli minareler

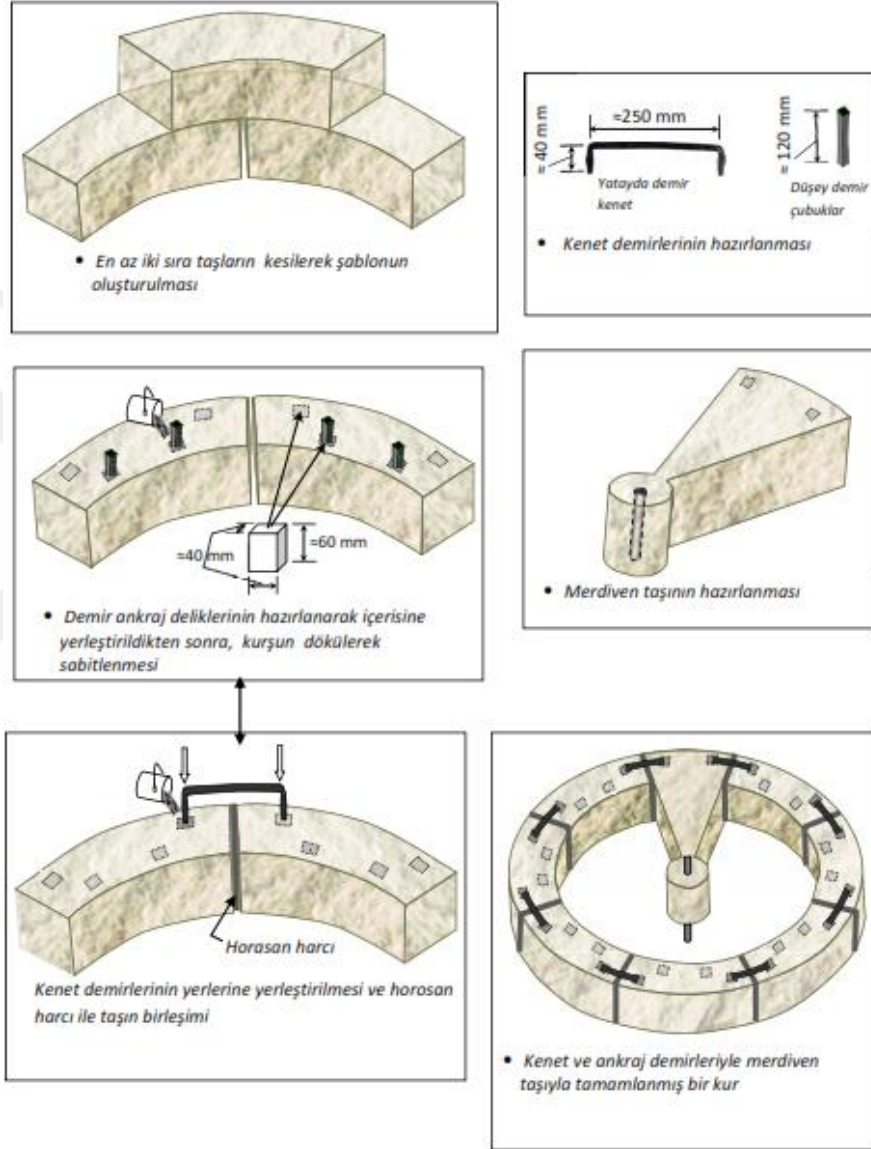
Minarelerde geçmişte yaygın olarak yığma taşıyıcı sistem tercih edilmiştir. Bu çalışmada Selçuklu ve Osmanlı Devletlerinin inşa ettikleri yığma minarelerden bahsedilmiştir. Tarihi eser değerindeki yığma minareler incelendiğinde taşıyıcı eleman olarak taş, tuğla veya taş-tuğla birlikte almalı olarak kullanıldığı görülmektedir. Yığma minarelerde taşıyıcı elemanlar arasında kullanılan harç dayanımın düşüktür. Bu yüzden deprem, rüzgâr ve benzeri aşırı zorlanmalar esnasında minarelerin kritik bölgelerinde eğilme ve bazı özel durumlarda kesmeden dolayı çatlaklar meydana gelmektedir. Osmanlı devleti 1509 yılında yıkıcı bir deprem yaşadığından sonra Mimar Sinan ile birlikte depreme dayanıklı ve tam anlamıyla yığma olmayan yeni bir taşıyıcı sistem geliştirmiştir. Bu

sistemde yatay ve düşey taşlar, ara malzeme olarak kullanılan harçlardan ziyade demir çubuklarla birbirine bağlanmıştır. Demir çubukların düşey elemanları ve yatay elemanları birbirine bağlayanlarına sırasıyla zıvana ve kenet denilmektedir. Bu teknik günümüz betonarme elemanları kadar olmasa da taşıyıcı elemanları bütün olarak çalıştıran ve yükleri birbirine düzgün aktarılmasını sağlayan dönemin en iyi yapım teknolojisidir. Bunun en güzel göstergesi asırlar önce yapılan minarelerin birçok doğal afete rağmen halen ayakta kalmasıdır.

Osmanlı döneminde cami ve minarelerin yapımda sistematik bir çalışma olduğu görülmektedir. Cami inşaatı henüz erken safhadayken minarelerin inşaatına başlanır. Çünkü caminin beden duvarları yükseldikçe minare merdivenleri kullanılarak kolaylıkla üst seviyelere insan ve malzeme çıkartılabilir (Baştürk 2013). Tarihi yığma minarelerin temeli toprak altında kaldığı için geometrisi, derinliği ve örgüsü hakkında bilgimiz sınırlıdır. Ancak özellikle taşıma gücü zayıf ve tabanı gevşek malzemelerden oluşan zeminlerdeki Selçuklu ve Osmanlı Dönemi çeşitli yapılarının temel sistemlerinde, ahşap kazıklar ve günümüz raylı sistem özelliğine sahip ahşap ızgaralar kullanılmıştır. Bu bilgilere göre tarihi yığma minare temellerinde de ahşap kazıklı ve ahşap ızgaralı sistem kullanıldığı bu sayede de minarelerin oturma ve yatay yüklerden daha az etkilendiği söylenebilir.

Minare yapımında kullanılacak taşlar, şantiyede önceden hazırlanır. Minare yapımı için iskele oluşturulur. Temelden sonra minarenin kürsü kısmında giriş kapısı boşluğu bırakılır ve üst yapı inşaatına başlanır. Merdivenlerin sağdan çıkması kural olarak uygulanmıştır ( Ertek ve ark. 2007). Yığma taşıyıcı duvar elemanları ile merdiven inşaatı birlikte ve iç içe devam eder. Yani merdivenler insanların yukarıya çıkıp-inmesini sağlamasının dışında minare taşıyıcı sistemine katılarak yatay yüklere karşı minarenin rijitliğini de artırmaktadır. Duvar örgüsünü oluşturan her bir taş taşıyıcı elemandır. Aynı hizadaki taşların oluşturduğu taş dizisine kur denir. Bir kur, bir basamak varsa yedek basamak ve çevresindeki dış duvardan oluşur. Aynı kurlardaki taşlar birbirine demir kenetlerle, üst ve alt kurdaki taşlar demir zıvanalar ile bağlanırlar. Zıvanaların ve kenetlerin yerleşeceği delik boyutları bu elemanlarla aynı olmalıdır. Taşlar çatlatılmadan ve zedelenmeden oyulmalı ve temizlenerek kurşun ile taş elemanın bağlantısı tam

sağlanmalıdır. Her kurda basamak iki merdiven taşının arası horasan harcı ile doldurularak oluşturulur. İki merdiven taşı ve horasan harcı ile oluşturulan geniş basamak yüzeyinin büyük kısmı üstteki basamağın altında kalır. Merdiven inşası, zıvana ve kenetlerin kullanımı, kurşun dökülmesi şekil 1.18’de sistematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 1.18.** Minarede oluşturulan bir Kurun inşa aşamaları (Doğangün ve ark. 2007)

Merdivenler gövdenin içine helezonik bir sistemde yerleştirilmiştir. Basamaklar bir merkez etrafında dolaşarak çekirdekli veya çekirdeksiz olarak inşa edilir. Çekirdekli basamaklar birbirlerine demir çubuklarla bağlanırlar. Merdivenler gövde ile birlikte minarenin şerefesine kadar veya petek bölümünde 4-5 basamak yükselerek biterler.

Şerefe bölümü, kendi tabanın 1-1,5 m aşağısında gövde örgüsü taşlarının konsol şeklinde ve kademeli olarak genişletilmesiyle oluşturulur. Şerefe taban alanı müezzinin ezan okurken minare etrafında rahatlıkla dönebileceği şekilde tasarlanmalıdır.

Tarihi minarelerde şerefe bölümünde sonra duvar örgüsünün kalınlığı değişken olup minarenin iç çapı genellikle sabit tutulmuştur. Yani petek bölümü duvar kalınlığı değişmektedir. Kûlah bölümünün mesnetlendiği ana taşıyıcı olan seren, son merdivenin merkezine sabitlenen genellikle ahşap bir direktir. Son aşamada kûlah kısmı genelde ahşaptan oluşturulur. Üstü kurşunla kaplanıp genellikle bakırdan yapılan alem bölümü yerleştirilir.

Klasik Osmanlı dönemine kadar camideki minarelerin sayısı ve konumlandırılması konusunda kesin bir karara varılmamıştır. Minareler, cami beden duvarıyla ayırık, bitişik ya da beden duvarı üzerinde inşa edilmekteydi. Klasik Osmanlı Döneminde Anadolu'da yaşanan depremlerden tecrübeler çıkartılmış ve minarenin konumlandırılması belli kalıba sokulmuştur. Bu yüzden minareler genellikle beden duvarına bitişik ya da beden duvarının üzerinde inşa edilmeye başlanmıştır. Beden duvarıyla beraber inşa edilen minarelerin küp ve kaide bölümünün beden duvarı içinde kaybolduğu minarelere de rastlanmak mümkündür. Beden duvarından ayrı konumlandırılan minareler çok az sayıdadır. Minarelerin beden duvarı ile ilişkili konumlandırılmasının hem minare için hem de cami kubbesi için faydası vardır. Minareler yüksek, narin ve ağır yapılardır. Bu şekildeki bir konumlandırma, minarelerin serbest boyunu azaltırken cami duvarının köşelerini tutarak adeta bir payanda şeklinde kubbenin açılmasını engellemektedir. Minareler cami beden duvar köşelerine simetrik ya da asimetrik olarak yerleştirilebilmektedir.

### **1.1.2. Malzeme**

Yapı malzemesi olan betonun bulunması 19. Yüzyıllara tekabül etmektedir. Daha öncesinde, yapı malzemesi olarak taş, tuğla ve ahşap kullanılmıştır. Bir yapıyı oluşturacak malzemenin seçimi yapının kullanım amacına, önemine, tasarım ve yapım tekniğine, hizmet alanı ve süresine, çevresel koşullara, mevcut zamanın malzeme teknolojisine ve ekonomik olanaklara bağlıdır. Tarihi yapıların yapımında günümüz imkânları olmadığı

için malzeme seçimde mevcut bölgede bulunabilmesi, işçilik, nakliye, dış etkenlere karşı dayanıklılık oldukça önemli kriterler arasında yer almaktadır. Günümüze kadar ayakta kalan tarihi yapılar genellikle o dönem devletleri tarafından halka hizmet adına yapılan cami, kilise, medrese, darüşşifa, köprü ve güvenlik için yapılan kale, sur gibi yapılardır. Bu yüzden dönem devletleri halka hizmet ve dış ülkelere gücünü göstermek için mali zenginliği ve inşaat bilimindeki tecrübesine bağlı olarak bu yapıları en iyi şekilde yapmayı hedeflemişlerdir. Bu doğrultuda malzeme ve yapım tekniği zamanla gelişmiştir.

Minarelerin yapımı, İslam inancının yaygın olduğu devletlerde önem kazanmıştır. Bu devletlerce kutsal bir yapı olan minarelerde yapı malzemesi olarak mevcut yörenin en iyi malzemesi kullanılmıştır. Kahire'de taştan; İran, Irak ve Afganistan'da tuğladan; Suriye ve Anadolu'da taş veya tuğladan yapılmıştır. Ancak Anadolu'da inşa edilen minareler diğer bölgeleri geride bırakmıştır. Bunun sebebi Anadolu topraklarının İslamiyet'ten önce birçok medeniyete beşiklik etmesinin yanında Anadolu Selçuklu ve Osmanlı gibi büyük devletlerin Anadolu'da asırlarca hüküm sürmesi ve bu toprakların teknik ve malzeme kültürü açısından zenginlikleridir. Anadolu'daki minarelerde yer alan doğal taş, tuğla ve bağlayıcı olarak kullanılan horasan harcı takip eden başlıklarda özetlenmeye çalışılmıştır.

#### **1.1.2.1. Taşıyıcı olarak kullanılan malzeme**

Minarelerin düşey ve yatay yüklere karşı ayakta kalmasını doğrudan etkileyen yapının ana taşıyıcı elemanlarını oluşturan malzemelerdir. Günümüz teknolojisinde taşıyıcı elemanlarda kullanılan malzeme görevini beton ve donatı sağlamaktadır. Geçmiş dönemlerde ise yığma taşıyıcı eleman olarak taş ve tuğlalar kullanılmıştır.

#### **❖ Doğal taş:**

Geçmişten beri doğada işlenmeye hazır halde bulunan yapı malzemesi doğal taşlardır. Betonarme tekniği bulunmadan önce uzun süre kalıcı olması istenen bir yapı ancak doğal taşların işlenmesi ile yığma olarak yapılmaktaydı. Doğal taşlar kendisini oluşturan bileşiklere ve boşluk oranına göre mekanik farklılık gösterirler. Bazı taşlar hafif ve boşluklu bir yapıya sahipken diğerleri ağır ve boşluksuz yapıya sahiptir. Boşluksuz taşların basınç mukavemeti boşlukluya göre daha yüksektir. Ancak betona benzer şekilde



bütün taşların çekme mukavemeti basınç mukavemetine oranla çok düşüktür. Tarihi yapılar genellikle çekme gerilmeleri oluşmayacak şekilde tasarlanmıştır. Bunun sebebi doğal taşın çekme mukavemetinin düşük olmasının yanında yapının yekpare olarak yapılamayıp malzemenin bağlayıcı harçlarla birleştirilerek inşa edilmesidir. Farklı bileşiklerden oluşan yapı taşlarının mekanik özellikleri ortalama değer olarak Çizelge 1.1' de gösterilmiştir.

**Çizelge 1.1.** Doğal yapı taşlarının ortalama mekanik özellikleri (Çamlıbel 2000)

<b>Taşın Cinsi</b>	<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>	<b>Kayma Dayanımı (MPa)</b>	<b>Çekme Dayanımı (MPa)</b>	<b>Elastisite Modülü (MPa)</b>
<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

Birleştirilecek malzemelerin kolay işlenebilirliği ve mukavemeti malzeme seçimde en önemli etkenlerin başında gelmektedir. Bunun için Anadolu'da özellikle Mimar Sinan'dan sonra yoğun bir şekilde kullanılan küfeki taşı ayrı bir şekilde incelenmiştir. Küfeki taşı yoğunlukla İstanbul ve çevresindeki illerde kullanılmıştır. Yapılarda küfeki taşının işlenişi ahşap hatıllı moloz taşı, düzenli yatay derzli kaba yonu, taş-tuğla almaşık ve kesme taş olarak kullanılmıştır. Açık bej, açık sarı, gri tonlarda, ince taneli ve kumlu görünümde, fosilli, boşluklu ve kristalli, kompakt bir taştır. Mimar Sinan'ın mekanik özelliklerini keşfettiği küfeki taşı taşıyıcı elemanlardaki kullanımının yanı sıra süsleme sanatında da kullanılmıştır.

Küfeki taşı hafif olmasına rağmen mukavemeti yüksek bir taştır. Bu özelliğinden dolayı minarenin üzerine gelen deprem kuvveti diğer taşlarla yapılan yapılara göre daha azdır. Küfeki taşı havadaki ve sudaki CO<sub>2</sub> ile tepkimeye girerek CaCO<sub>3</sub> kimyasal bileşiminden oluşmaktadır. Ocaktan çıkarılan taş kolay kesilebilir ve taşınabilir. Ancak mukavemeti düşüktür. Zamana bağlı olarak çekme ve basınç gerilmesi, elastisite modülü artmasına

karşın içinde bulunan boşluklar küçülmekte, su difüzyonu ve permabilitesi azalmaktadır. Tüm bu özellikleriyle küfeki taşından inşa edilmiş yapılar için istenilen yapı malzemesi olup günümüz beton davranışına benzer bir davranış sergilemektedir. Arioğlu (1997) küfeki taşının mekanik özelliklerini zamana ve kür şartlarına bağlı olarak çift zımbalama deneyi ve tek eksenli basınç deneyi yardımıyla incelemiştir (Çizelge 1.2).

**Çizelge 1.2.** Laboratuvar koşullarında kür edilen küfeki taşına ait deneysel sonuçlar (Arioğlu 1997)

Kür Süresi (Gün)	Birim Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	Yüzey Sertliği R	Ultra Ses Hızı (km/sn)	Kırılma Açısı $\gamma$ (°)	Çekme Dayanımı (kg/cm <sup>2</sup> )	Basınç Dayanımı (kg/cm <sup>2</sup> )	Çekme/Basınç Dayanım Oranı
3	2,385	44	3,65	21,9	21,2	200	0,106
	2,378	43	3,61	24,2	21,5	222	0,097
7	2,370	45	3,78	19,2	22,9	262	0,087
	2,360	46	3,78	22,9	24,3	267	0,091
14	2,365	48	3,9	20,8	24,5	280	0,088
	2,365	49	3,87	21,4	24,1	289	0,084
28	2,320	52	4,24	22,5	25,9	320	0,081
	2,310	51	4,27	22,9	26,7	338	0,079

Coşkun ve Türk (2012) Tarihi minarelerin dinamik davranışlarının belirlenmesine yönelik yaptıkları çalışmada, küfeki taşının mekanik özelliklerine yer vermişlerdir. Buna göre küfeki taşının mekanik özellikleri çizelge 1.3' te gösterilmiştir.

**Çizelge 1.3.** Küfeki taşının mekanik özellikleri (Coşkun ve Türk 2012)

Fiziksel özellikler	Maksimum	Minimum	Ortalama
Yoğunluk (kuru, kN/m <sup>3</sup> )	25	22,8	23,9
Yoğunluk (suya doymuş, 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 modülü (GPa)	7,36	4,3	5,84

Mevcut yapıda oluşan hasarın sebebi malzeme kaynaklı olduğu düşünülüyorsa yerinde ve laboratuvar ortamında mevcut malzeme için deneyler yapılır. Yerinde yapılan

araştırmalara yüzey sıcaklığı ve nemin belirlenmesi, ultrases aleti ile ses geçiş süresi ölçülmesi, yüzey sertliği ölçülmesi ve yapıdaki basınç-çekme gerilme seviyesi Flat-Jack ve sher-Jack aletleri ile belirlenmesini örnek verilebiliriz. Daha sonra ise yapıdan alınan numunelere su emme, basınç-çekme ve farklı türde deneyler uygulayarak malzemenin mekanik özellikleri olan birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, porozite, statik elastisite modülü ve sıcaklık-neme karşı tepkisini bulabiliriz. Bu tür deneyler çalışma kapsamında araştırılan minareleri temsil edecek şekilde dört minarenin hem tuğla hem taş malzemesine uygulanmıştır. Bununla ilgili veriler çalışmanın ilerleyen bölümlerinde sunulacaktır.

#### ❖ Tuğla:

Arkeolojik kanıtlara göre tuğla, imalatı yapılan en eski yapı malzemesidir. İlk yerleşim yerlerinin ve kültürlerinin tuğla yapımına uygun olan alüvyonlu toprakların yer aldığı geniş nehir havzalarında kurulduğu bilinmektedir. Tuğla sanatının da başlangıcı bu dönemlere rastlar. Bu bölgeler, Mezopotamya da yer alan Nil, Euprates/Tigris nehirlerinin aşağı bölgeleridir. Daha sonra tuğla yapımının Anadolu ve Avrupa'da yaygınlaştığı görölmektedir. Mezopotamya'da ise tuğla ve tuğla üretimi Asurlular, Persler, Sasaniler ve İslam kültürü ile gelişmiş ve değişik boyutlara taşınmıştır. Tuğla, doğu ve batı kültüründe hemen hemen ortak ilerleyerek günümüzde dahi vazgeçilmez bir yapı malzemesidir.

Tuğlanın ana malzemesi kildir. Tuğla imalatı hammadde hazırlanması, şekillendirme, kurutma, pişirme aşamalarından oluşur. Tuğlaların mukavemetini alması, yüksek sıcaklıklı fırınlarda ve güneş ışığında bekletilmesi olmak üzere iki şekilde sağlanır. Elle yapılan ve güneş bekletilen tuğlaların içine saman, hayvan kılı ve gübresi gibi malzemeler katılmıştır (Şekil 1.19). Bu tuğlalar genellikle evlerin inşasında kullanılmış olup mukavemeti düşüktür.



**Şekil 1.19.** El ile yapılıp güneşte bekletilen tuğla imalatı (Özen 2006)

Fırında pişirilen tuğlaların mukavemeti ise iyi pişirilmesine ve kullanılan malzeme kalitesine göre üç dört katlık bir oranda değişim göstermektedir. Genel olarak tuğlaların çekme dayanımı basınç dayanımının %10'u, kayma dayanımı ise basınç dayanımının %30'u mertebesindedir (Ünay 2002). Tuğlaların mekanik özellikleri hakkında kesin değerler vermek çok zordur. Çünkü yöreye, kullanan malzemeye ve pişirme tekniğine göre değişmektedir. Ancak mekanik özellikleri belirlemek için bugüne kadar çalışmalar yapılmış ve ortalama değerler öngörülmüştür. Bu malzemenin basınç dayanımı 100 Mpa kadar çıkabilmekte olup yaygın olarak 10 ile 40 Mpa arasında olduğu tespit edilmiştir. Elastisite modülü ise 100-10000 Mpa arasında değişmektedir. Mahrebel (2006) yaptığı çalışma sonucunda tuğlaların basınç dayanımını 10-30 Mpa, çekme dayanımı 2,5-5,0 Mpa ve kayma dayanımını 10-20 Mpa olarak belirlemiştir. Teomete ve Aktaş (2010) yaptıkları bir çalışmada tarihi eser bir yapının mevcut malzemesini incelemiştir (Çizelge 1.4). Çalışmasında tuğlanın mekanik özelliklerinin azalmış olduğunu tespit etmiştir. Aş (2007) yaptığı araştırma da tekli ve üçlü tuğla deneyleri yapmıştır. Deneyler sonucunda tuğlanın mekanik özelliklerini tekli tuğla deneyi için ortalama basınç dayanımını 5Mpa 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 sonuçlarında sargılama etkisi olduğundan dolayı gerçeği yansıtmadığını ve üçlü tuğla basınç deneyinin daha gerçekçi olduğunu öngörmüştür. Kurugöl ve ark.(2010) ise tarihi yapıların malzemeleri ile ilgili yaptığı deneysel araştırmalarda tuğlanın birim hacim ağırlığını  $1,350-1,700 \text{ kg/m}^3$ , basınç dayanımını 8,00-20,00 Mpa olarak tespit etmişleridir.

**Çizelge 1.4.** Farklı araştırmacılara göre tuğlanın mekanik özellikleri

<b>Pametreler</b>	<b>Teomete ve Aktaş (2010)</b>	<b>Mahrebel (2006)</b>	<b>Aş* (2007)</b>
<b>Elastisite modülü, E</b>	270 Mpa	-	118 Mpa
<b>Basın Mukavemeti fc</b>	4,25 Mpa	10-30 Mpa	5 Mpa
<b>Çekme Mukavemeti ft</b>	0,425 Mpa	2,5-5 Mpa	-
<b>Yoğunluk</b>	1,700 kg/m <sup>3</sup>	-	-
<b>Poisson oranı, v</b>	0,17	-	-

\*Bu değerler üçlü tuğla deneylerinden elde edilmiştir

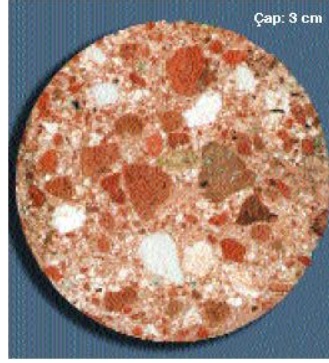
### **1.1.2.2. Bağlayıcı olarak kullanılan malzeme**

Tarihi yapılarda ve günümüzde yığma duvar taşıyıcı elemanlarının birbirine bağlanmasını ve etkileşim içinde olmasını sağlayan ara yüzey elemanıdır. Harçların temel amacı iki taşıyıcı malzeme arasında maksimum bir etkileşim sağlayarak yapının yekpare olarak davranmasını sağlamaktır. Bunun yanında bağlayıcı elemanın dış mekândan iç mekâna ısı, su, ışık ve zararlı olacak canlı veya cansız varlıkların girmesini engellemek de diğer ara amaçlardandır.

Günümüz taşıyıcı elemanlarını birbirine bağlamak için kullanılan harçlar; çimento, agrega, su esaslı malzemelerdir. Geçmişte kullanılan harçlar ise kireç, agrega, su ve katkı malzemesi esaslı malzemelerdir. Geçmişteki bu harçlara genel manada kireç harç ve sıvaları denilmektedir. Kullanılan malzeme kalitesi, oranlarına göre çok değişik mukavemet değerlerine sahiptir. Bu harçlar kullanılan bölgelere ve dönemlere göre farklı isimlerde anılmıştır. Anadolu'da Osmanlı döneminde "Horasan harcı", Roma döneminde "cociopesto", Hindistan'da "surkh" olarak adlandırılmaktadır (Böke ve ark. 2004). Arap ülkelerinde "homr", Yunanistan'da "korassani" adı ile bilinmektedir (Akıncı 1998).

#### **❖ Horasan Harcı**

Horasan, kırılmış ve öğütülerek toz haline getirilmiş tuğla, kiremit, çömlek vb. pişmiş kil olarak ifade edilmektedir. Horasanın belli oranlarda ve reaksiyonlarda kireç, su, agrega ve organik veya inorganik katkı maddelerinin karıştırılmasıyla elde edilen harç ise horasan harcı olarak tanımlanır (Şekil 1.20).



**Şekil 1.20.** Örnek bir horasan harcı numunesi (Böke ve ark 2004)

Horasan harcında bileşime giren maddelerin uygun özellikte olmaları sonuçlar üzerinde oldukça etkilidir. Bu yüzden horasan harcının içerdiği maddeler kısaca incelenmiştir.

**Bağlayıcılar:** Horasan harcı üretiminde kullanılan bağlayıcı madde kireçtir. Kireç erken dönemlerden itibaren kullanılan bir bağlayıcıdır. Babil, Mısır, Finikeliler, Hitit ve Persler tarafından yapılarda bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır (Eriç,1994). Kirecin hammaddesi kireçtaşı (kalker), kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) ve magnezyum karbonattan ( $\text{MgCO}_3$ ) oluşan bileşiktir. Eğer kireçtaşı %90  $\text{CaCO}_3$  içerirse "yüksek kalsiyumlu kireçtaşı" adını alırken, %10'dan çok  $\text{MgCO}_3$  içermesi halinde "magnezyumlu kireçtaşı" denir (Akman 1990). Birinci gruptan elde edilen kireç beyaz renkli, ikinciden elde edilen esmerdir ve dayanımı daha yüksektir. Kireç doğada horasan harcında doğrudan kullanılacak halde bulunmaz. Bu yüzden ocaktan çıkarılan kireç taşı iki aşamalı bir üretimden geçerek kullanılabilir duruma gelir. Birinci aşama kireçtaşının yakılması (kalsinasyon) işlemi ve ikinci aşama söndürme işlemidir. Kireç taşları  $900\text{ }^\circ\text{C}$  'de kalsine olup karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) gazından ayrılarak kalsiyum oksite ( $\text{CaO}$ ) dönüşür. Elde edilen bu ürüne sönmemiş kireç denir. Bu ürün su veya havadaki nem ile tepkime girerek kalsiyum hidroksite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) diğer adıyla sönmüş kirece dönüşmektedir. Eski kaynaklarda sönmüş kirecin kullanılmadan önce hava ile teması kesilerek senelerce bekletildiğine değinilmektedir. Kirecin bekletilme süreci uzadıkça, plastik özellikleri, işlenebilirliği ve su tutma kapasitesi artmaktadır.

**Agregalar:** Agregalar, harç yapımında bağlayıcı maddelerle birlikte dolgu maddesi olarak kullanılan, mineral kökenli, farklı yapı ve boyutlara sahip malzemelerdir.

Agregaları kireç ile kimyasal tepkimeye girenler ve girmeyenler olarak iki gruba ayırabiliriz. Kimyasal tepkimeye girmeyenlere dere veya taşocağı kumu ve çakılı örnek gösterilebilir. Bu agregalarla oluşturulan harçlar içerisinde daha çok hava boşlukları bulundurduğu için suya ve neme karşı daha az dayanıklıdırlar. Kimyasal tepkimeye giren puzolanlar ise doğal ve yapay yolla elde edilebilmektedir. Doğal yolla elde edilen puzolanlar tuf, tras gibi volkanik malzemelerdir. Yapay puzolanik malzemeler ise tuğla ve kiremit kırıkları gibi fırınlanmış kil esaslı malzemelerdir. Osmanlı döneminde horasan harcında kullanılan tuğlanın yeni ve iyi pişirilmiş olmasının önemi, dönemin şartnamelerine girmesinden anlaşılmaktadır. Kimyasal tepkimeye göre tuğla ve kiremitte bulunan silikatlı malzemeler, kalsiyum hidroksit ile kalsiyumlu sulu silikatlara dönüşmektedir. Bu yolla oluşturulan harçlar kimyasal tepkimeye girmeyenlere göre daha dayanıklıdırlar.

**Katkı maddeleri:** Kireç harçlarının kimyasal ve fiziksel özelliklerini geliştirmek için bağlayıcı ve agregalar ile birlikte organik veya inorganik olarak katılan malzemelerdir. Bunlardan bazıları; Puzolanik karakteri olan veya olmayan kil ve diğer silikatlı malzemeler, kan, yumurta, peynir, gübre, arap zamkı, hayvan tutkalı, bitki lifleri, kazein gibi malzemelerdir. (Sickels 1981). Puzolanik karakteri olan veya olmayan kil ve diğer silikatlı malzemeler suyun hidrolik özelliklerini artırmaktadır. Arap zamkı, hayvan tutkalı incirin sütlü suyu gibi doğal reçineler yapıştırıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Çavdar hamuru, kesik süt, kan ve yumurta beyazı kirecin daha çabuk sertleşmesini sağlamaktadır. Arpa ve hayvan tüyleri dayanıklılığı artırmaktadır. Şeker, suyun donma erime periyotlarında harçtaki bozulmaları yavaşlatmaktadır. Balmumu, harçtaki rötreyi engellemektedir. Yumurta akı, hayvan tutkalı, fleker, süt, mineral ve keten tohumu gibi malzemeler ise kirecin plastik özelliğini artırıp gevrek kırılmasını engellemektedir (Böke ve ark 2004).

Horasan harçları genellikle hidrolik özelliklere sahiptir. Suya ve neme karşı dayanıklı harçlardır. Bu yüzden Horasan harç ve sıvaları Anadolu'da Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı Devletleri genellikle hamamlar, dini yapılar, su kanalları ve su sarnıçlarında yaygın olarak kullanılmıştır. Hatta deniz suyuna karşı dayanıklı oldukları için sahil kentlerinde sıkça kullanılmıştır.

Günümüzde horasan harçları ile ilgili bazı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Canbaz ve ark. (2005) horasan harcı ve betonun mekanik özelliklerini karışım oranı ve ilave su miktarına göre deneysel olarak incelemiştir (Çizelge 1.5).

**Çizelge 1.5.** Ağırlıkça karışım oranlarına göre 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 Ağırlığı (kg/dm <sup>3</sup> )	Eğilme Day. (Mpa)	Basınç Day. (Mpa)
<b>C1H</b>	1	1,22	2,1	2,34	0,80	1,76	2,00	4,31
<b>C1D</b>						1,47	1,71	5,31
<b>M1H</b>	1	1,22	2,1	0	0,35	1,66	2,13	4,5
<b>M1D</b>						1,36	1,87	7,59
<b>C2H</b>	1	1,22	2,05	2,30	0,80	1,68	1,32	3,27
<b>C2D</b>						1,67	1,38	4,92

Çizelge 1.5'te numune tipinin ismini oluşturan simgeler "**C**" horasan betonunu, "**M**" horasan harcını, "**H**" nemli ortamı "**D**" de kuru ortamı ve sayılar tuğla kalitesini ifade etmektedir. Deneyler numune üretiminden 12 hafta sonra yapılmıştır. Camlaşmış iyice pişerek aktivite kazanmış tuğla yerine harman tuğlasından yararlanılmıştır. Bu durum malzemenin puzolonik etkilerini olumsuz yönde etkilemiş gibi algılansa da aslında geçmişteki gerçek tuğla kırıklarının davranışını sergilemektedir. Çünkü eski yapılarda kullanılan tuğla kırıkları 500-600 C civarında pişirilmesine rağmen günümüz tuğlaları bu değerlerden çok daha yüksek sıcaklıklarda pişirilmektedir. Nemli ortamda bulunan numunenin eğilme dayanımı daha yüksektir.

Gürdal ve ark. (2006) Anemas Zindanları ile Edirnekapı'daki Tekfur sarayından aldıkları örneklere göre numune hazırlamış ve farklı kür sürelerine göre basınç ve eğilmede çekme dayanımlarını incelemiştir (Çizelge 1.6).

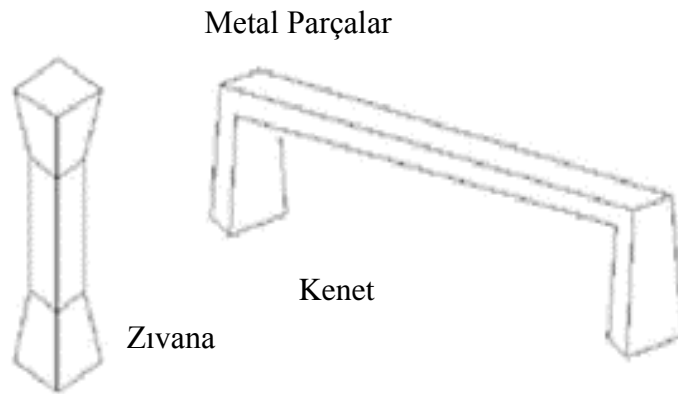


**Çizelge 1.6.** Kür sürelerine göre horasan harcı mekanik özelliklerinin değişimi (Güral ve ark. 2006)

Numune	Kür Süresi	Boyutlar ( mm)	Eğilmede Çekme Dayanımı (Mpa)	Ortalama Basınç Dayanımı (Mpa)
1	1 Hafta	42,68/39,87/160	2,9	10
2	1 Ay	40,57/39,93/159	1,8	13,75
3	2 Ay	40/40/160	2,1	11,25
4	3 Ay	40/40/160	2,13	12,8

#### ❖ Demir bağlantı elemanları

Tarihi yapılarda taşları birbirine bağlayarak yük aktarımını ve taşıyıcı duvar taşlarının birlikte çalışmasını sağlayan elemanlardır. Aynı kurlardaki taşları birbirine bağlayan demir çubuklara kenet veya ankraj demiri, üst ve alt kurdaki taşları birbirine bağlayanlara ise zıvana veya kol demiri denilmektedir. Kenetlerin uzunlukları 17-55 cm ve zıvanalar uzunlukları ise yaklaşık 12 cm'dir. Bu değerler inşa edilen minarenin büyüklüğüne göre değişmektedir. İmalatta kullanılan suyu alınmış dövme demir kenet ve zıvanaların taşta giren ağız kısmı içe doğru genişlemektedir (Şekil 1.21). Böylece kenet ve zıvananın taşın içine dökülen kurşundan sıyrılması zorlaşır. Mimar Sinan bu uygulamayı yalnızca minarelerde değil dönemin köprü, medrese, darüşşifa gibi birçok yapıda kullanmıştır.



**Şekil 1.21.** Zıvana ve kenet örneği

## 2. YAPILARIN DİNAMİK ÖZELLİKLERİ VE DİNAMİK YÜKLER

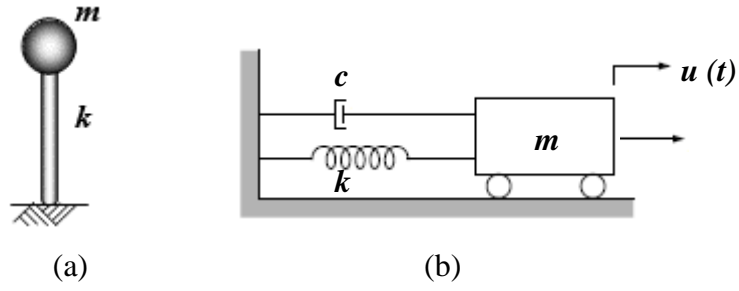
Her yapı veya sistemin kendisine ait dinamik karakteristik özellikleri vardır. Bu özellikler, mevcut yapı dinamik bir yüke maruz kaldığında yapının nasıl bir tepki vereceğini veya tasarım aşamasında olan yapıların muhtemel deprem, patlama ve rüzgâr gibi dinamik yüklerde nasıl davranacağı konusunda tasarımı etkileyen en önemli parametrelerin başında gelmektedirler. En temel dinamik özellikler, doğal frekanslar, mod şekilleri olarak ifade edilebilir. Bunlara ek olarak yapı sistemleri için ikincil etkiye sahip olmakla birlikte sönüm türü ve oranları da dinamik özellik veyahut dinamik davranışı etkileyen önemli parametreler arasında yer almaktadır. Mevcut yapıların dinamik özelliklerini teorik ve deneysel yöntemlerle bulmak mümkündür. Yöntemlerle ilgili bilgiler bölüm kapsamında ifade edilmeye çalışılacaktır.

### 2.1. Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesinde Teorik Yaklaşımlar

Yapıların dinamik özellikleri sistemin başta kütle ve rijitliği olmak üzere sönüm oranına da bağlıdır. Yapının kuvvete veya başlangıç koşullarına tepkisi ise yer değiştirme, hız ve ivmenin zamanla değişen fonksiyonu ile ifade edilmektedir. Yapılar dinamik serbestlik derecesine göre tek serbestlik dereceli ve çok serbestlik dereceli olarak ayrılmaktadır.

#### 2.1.1. Tek serbestlik dereceli sistemler

Teorik bölümün daha rahat anlaşılması için öncelikle tek serbestlik dereceli sistemler incelenecektir. Tek serbestlik dereceli sistemler en basit biçimde şekil 2.1’de gösterildiği gibi tek bir noktada toplanmış  $m$  kütle,  $k$  rijitlik ve  $c$  sönümle ifade edilebilir.  $u(t)$  sistemin sadece tek doğrultudaki yer değiştirme fonksiyonu,  $f(t)$  ise zamanla değişen kuvvet fonksiyonunu temsil etmektedir. Bu tür yapılara su tankı ve tek noktada toplanmış kütleyle sahip kule tipi yapılar örnek verilebilir. Yapıya uygulanan kuvvet veya başlangıç hızı ve yer değiştirmesine göre yapı hareketi, serbest ve zorlanmış titreşim olarak ikiye ayrılmaktadır.



**Şekil 2.1.** İdealize edilmiş tek serbestlik dereceli sistemler (a) sönümsüz sistemler (b) sönümlü sistemler

### 2.1.1.1. Serbest titreşim

Bir sistemin dinamik karakterini ve hareketini belirlemenin en temel yolu hareket denklemdir. Serbest titreşime maruz bırakılan sistemleri sönümlü ve sönümsüz sistemler olarak ayırmak mümkündür.

❖ **Sönümsüz serbest titreşim:** Sönümsüz sistemler için hareket denklemi,

$$m\ddot{u} + ku = 0 \quad (2.1)$$

şeklinde yazılabilir. Denklemden kullanılan  $u$  ve  $\ddot{u}$  sembolleri yer değiştirilirse  $u(t)$  ve ivme  $\ddot{u}(t)$  fonksiyonlarının kısaltılmış halidir. Rijitlik ise  $k$  simgesiyle gösterilmiştir. Rijitliğin tanımı kısaca sistemin birim yer değiştirme için gösterdiği direnç şeklinde ifade edilebilir. Hareket denkleminin her iki tarafını  $m$  kütlelerine bölünerek denklem,

$$\ddot{u} + \frac{k}{m}u = 0 \quad (2.2)$$

halini almaktadır. Burada  $\frac{k}{m} = \omega_n^2$  olduğu harmonik hareket için rahatlıkla elde edilebilmektedir. Bilindiği üzere  $\omega_n$  sistemin açısal frekansını temsil etmektedir. Hesaplanan açısal frekans sistemin harmonik yer değiştirme denkleminde bağımsız olarak yapının sadece kütle ve rijitliğine bağlı olarak hesaplanabildiği eşitlikten görülebilmektedir. Açısal frekansa bağlı olarak sistemin frekansı  $f$  ve doğal titreşim periyodu  $T$  de hesaplanmaktadır.

$$f = \frac{\omega_n}{2\pi} \rightarrow T = \frac{1}{f} \quad (2.3)$$

Dinamik hareketli bir sistemin yer değiştirme denklemi,

$$u(t)=A\sin\omega_n t + B\cos\omega_n t \quad (2.4)$$

veya

$$u(t)=a_1 e^{i\omega_n t} + a_2 e^{-i\omega_n t} \quad (2.5)$$

harmonik hareket olarak trigonometrik fonksiyonlar yardımıyla ifade edilebilir. Ancak serbest titreşim oluşturulacak bir yapıya dışarıdan bir kuvvet uygulanmamaktadır. Yapının harekete sadece başlangıç yer değiştirmesi ve/veya başlangıç hızıyla geçmesi mümkündür. Bu yüzden Denklem 2.4'te ifade edilen  $A$  ve  $B$  katsayıları frekans ve zamandan bağımsız olarak başlangıç koşullarını temsil ettiği söylenebilir. İlgili denklemin türevini alarak  $t=0$  anında başlangıç koşullarının  $u(0)=A$  ve  $\dot{u}(0)=\omega_n B$  olarak elde edilmiştir. Yani sönümsüz serbest titreşim için yer değiştirme denklemi,

$$u(t)=u(0)\sin\omega_n t + \frac{\dot{u}(0)}{\omega_n} \cos\omega_n t \quad (2.6)$$

olarak son halini almıştır.

❖ **Sönümlü serbest titreşim:** Sönüm bir sistemin enerji tüketme mekanizmasıdır. Gerçekte yapılarda histerik ve Coulumb sürtünme sönümü gibi birden çok sönüm tipi olmasına rağmen teorik olarak hareket denkleminde sadece viskoz sönüm esas alınarak işlem yapılmaktadır.

Sönümlü serbest titreşim hareket denklemi,

$$m\ddot{u}+k u+c\dot{u}=0 \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Denklemin her iki tarafı  $m$  kütesine bölünmesiyle,

$$\ddot{u}+\omega_n^2 u+2\xi\omega_n \dot{u}=0 \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir.

Burada  $\xi$  sönüm oranı,

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{c_{kr}} \quad (2.9)$$

sönüm oranı olarak tanımlanır.  $c_{kr}$  ise kritik sönüm oranıdır. Denklem 2.10'daki gibi tanımlanır.

$$c_{kr} = 2m\omega_n = 2\sqrt{km} \quad (2.10)$$

Sönüm oranının sayısal değerine göre sistemin hareket denkleminde üç durum oluşur.

1. Kritik üstü sönüm durumu:  $c < c_{kr}$  yani  $\xi < 1$  ise sistem giderek azalan genlikle denge konumunun çevresinde salınım yapar. Hareket denklemini ise başlangıç koşulları belirlenerek,

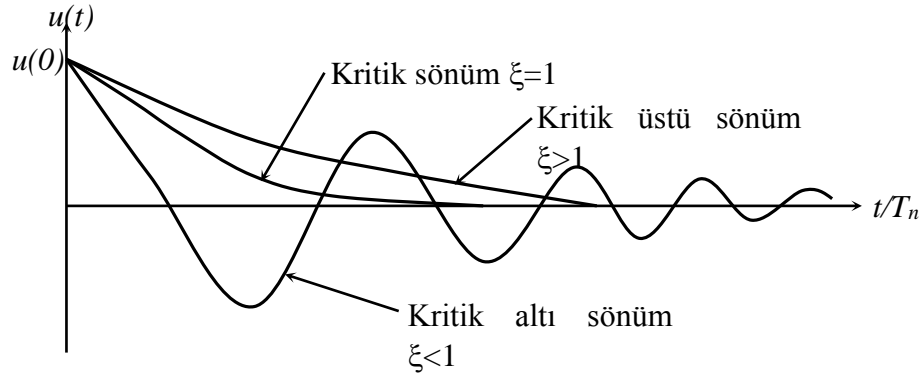
$$u(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left[ u(0) \sin\omega_D t + \frac{\dot{u}(0) + \xi\omega_n u(0)}{\omega_D} \cos\omega_D t \right] \quad (2.11)$$

şeklinde türetilir. Burada  $\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$  sistemin sönümlü frekansı olarak tanımlanır.

2. Kritik sönüm durumu:  $c = c_{kr}$  yani  $\xi = 1$  ise sistem salınım yapmadan denge konumuna geri döner. İlk hıza bağlı olarak 1 tur tersinir hareket yapabilir.

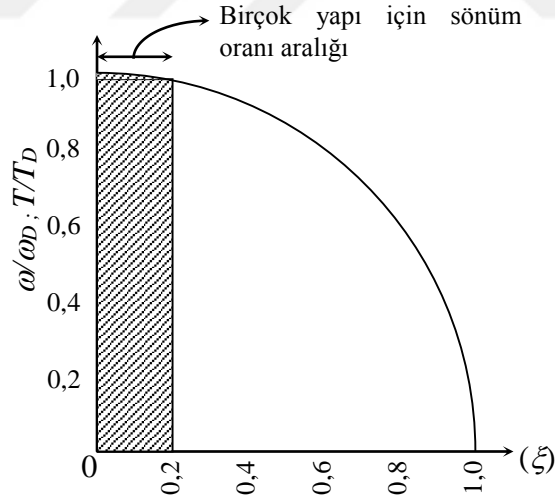
3. Kritik üstü sönüm durumu:  $c > c_{kr}$  yani  $\xi > 1$  ise sistem her durumda salınım yapmadan geri döner. Ancak geri dönüşü daha yavaş gerçekleşir.

Tüm üç durumun özeti şekil 2.2'deki grafikte ifade edilmiştir.



**Şekil 2.2.** Kritik altı, kritik ve kritik üstü sönümlü sistemlerin serbest titreşimi (Chopra, 1995)

Yapıların salınımlı veya salınımsız hareketini ayıran sönüm katsayısı  $c_{kr}$ 'dir. Yapıların sönüm oranlarının genellikle %10 değerinin altında olduğunu göz önüne aldığımızda yapı dinamiğinde mühendisleri ilgilendiren durumun kritik altı olduğu aşikârdır. İnşaat mühendisliğini ilgilendiren sönüm oranları çelik yapılarda %2, betonarme yapılarda %5 olduğu dikkate alınırsa sönümün doğal frekans üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir (Şekil 2.3).

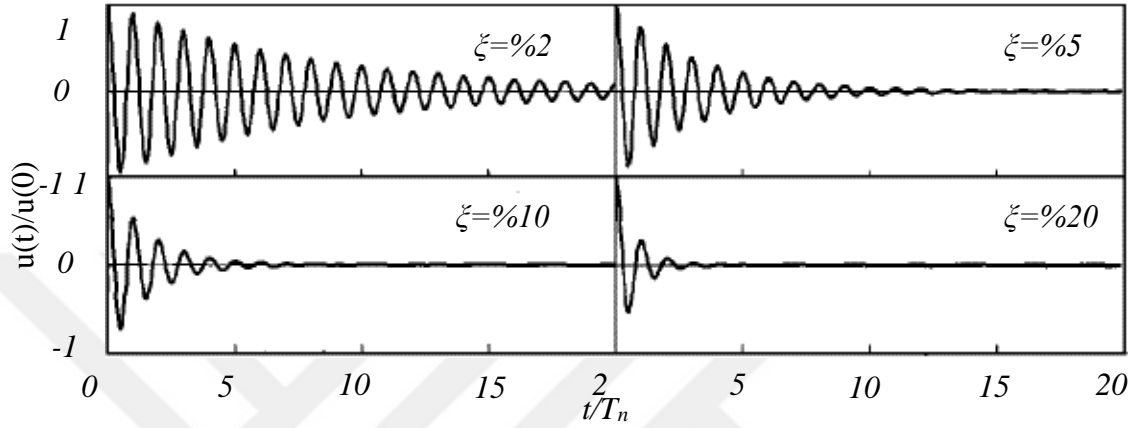


**Şekil 2.3.** Sönümün doğal titreşim değerlerine etkileri (Chopra, 1995)

Ancak sönümün daha önemli etkisi, serbest titreşim genliğinin azalım hızı üzerindedir. Sönüm oranı arttıkça yapı dinamik halden denge konumuna gelme süresi çok daha hızlı ve daha az salınım sayısı ile gerçekleşmektedir Şekil (2.4). Herhangi bir sistemdeki

sönüm oranı belirlemek için yer değiştirme-zaman grafiğindeki ardışık genliklerin logaritmik azalımını kullanmak yeterlidir.

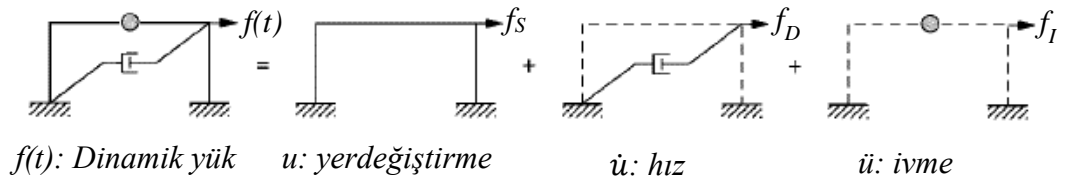
$$\delta = \ln \frac{u_i}{u_{i+1}} = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (2.12)$$



Şekil 2.4. Dört farklı sönüm oranı için serbest titreşim eğriler

### 2.1.1.2. Zorlanmış titreşim

Yapı sistemi dinamik bir dış kuvvete maruz kalarak harekete geçmesi zorlanmış titreşim olarak adlandırılabilir. Dinamik yükler periyodik veya periyodik olmayan yükler olarak sınıflandırılmaktadır. Periyodik yükler ise harmonik ve harmonik olmayan yükler olarak ikiye ayrılmaktadır. Periyodik yükler birbirini tekrarlayan benzer genliklerin birçok kez kendisini tekrarlamasıyla oluşur. Periyodik olmayan yükler ise kısa süreli patlama gibi darbe etkili ya da daha uzun süreli deprem gibi yer hareketleridir. Zorlanmış titreşim serbest titreşimden farklı olarak Şekil 2.5'deki gibi özetlenebilir.



Şekil 2.5. Zorlanmış titreşimde sistemi etkileyen faktörler

Zorlanmış titreşimde serbest titreşimden farklı olarak yer değiştirme denkleminin iki bileşeni vardır. Bunlardan birincisi sistemin başlangıç koşullarına bağlı olarak değişen geçici ya da homojen bileşen diğeri ise dinamik yükten dolayı oluşan kararlı bileşendir.

$$u(t) = u_h + u_p \quad (2.13)$$

❖ **Sönümsüz zorlanmış titreşim:** Sistemin hareket denklemi,

$$ku + m\ddot{u} = F(t) \quad (2.14)$$

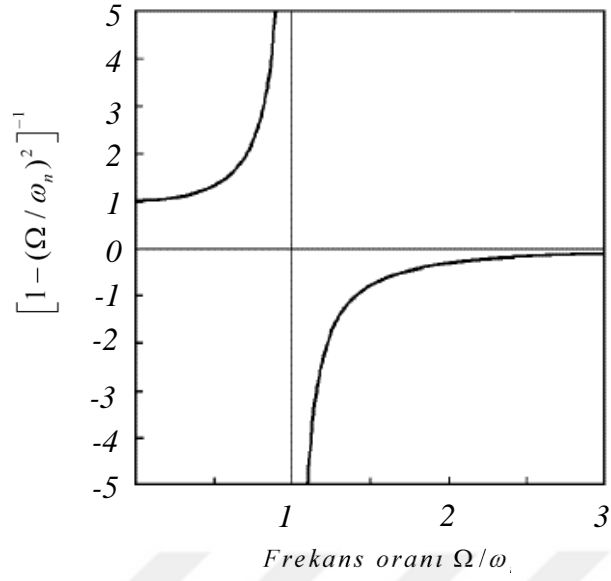
olarak ifade edilir. Yer değiştirme denklemi ise,

$$u(t) = \underbrace{A \cos \omega_n + B \sin \omega_n}_{\text{homojen}} + \underbrace{\frac{F_0/k}{1 - (\Omega/\omega_n)^2} \sin \Omega t}_{\text{kararlı}} \quad (2.15)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada  $F_0$  kuvvetin zamandan bağımsız genliği,  $\Omega$  ise dinamik yükün açısal frekansıdır. Yer değiştirme denkleminde kararlı durum yani dinamik yüklerden oluşan genlikler baskındır.

$r = \Omega / \omega_n$  ile ifade edilen dinamik yük açısal frekansının sistemin doğal açısal frekansına oranı sistemde oluşacak yer değiştirmeleri etkileyen en önemli faktörler arasında yer almaktadır. Denklem 2.15'de görüldüğü gibi  $r$  oranı 1 değerine yaklaştıkça yer değiştirmenin oldukça arttığı net bir şekilde ifade edilebilir. Hatta sönüm olmadığı taktirde  $r=1$  olması durumunda teorik olarak sistemdeki yer değiştirme sonsuza gider. Yapı dinamiğinde bu hadise rezonans olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.6). Bu çıkarım gerçek yapılar için doğru biçimde yorumlanmalıdır. Çünkü gerçek yapılarda sönüm mevcuttur. Yapı gevrekse sistem bir noktadan taşıyıcılığını yitirecek diğer yandan yapı sünekse sistemde akma meydana gelecektir. Bunun sonucunda yapının rijitliği azalıp doğal frekansı değişecek ve kuvvet frekansıyla eşitliği ortadan kalkacaktır. Ancak unutulmamalıdır ki bu hadiseler gerçekleşirken yapının yıkılması veya ağır hasarlar alması olasıdır.





**Şekil 2.6.** Frekans oranının sistem yer değiştirmelerine etkisi( Chopra, 1995)

❖ **Sönümlü zorlanmış titreşim:** Sönümlü sistemler için hareket denkleminde viskoz sönümlü bileşen eklenecektir.

$$m\ddot{u} + k\dot{u} + cu = F(t) \quad (2.16)$$

Sistemin yer değiştirme fonksiyonu ise,

$$u(t) = e^{-\xi\omega_n t} (A \sin \omega_D t + B \cos \omega_D t) + \frac{U_0}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \sin(\Omega t - \psi) \quad (2.17)$$

veya

$$u(t) = X e^{-\xi\omega_n t} (\sin \omega_D t + \phi) + \frac{U_0}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \sin(\Omega t - \psi) \quad (2.18)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\omega_D$ : sistemin sönümlü açısal frekansını,  $\Phi$ : Yer değiştirme denkleminde homojen kısım için sistemin başlangıç koşullarına bağlı faz açısını,  $U_0$ : Dinamik kuvvetten dolayı sistemde oluşan statik yer değiştirme genliği ve  $\Psi$ : Yer değiştirme denkleminin kararlı kısmı için r oranına bağlı faz açısını ifade etmektedir.

$$\psi = \tan^{-1} \left( \frac{2\xi r}{1-r^2} \right) \quad (2.19)$$

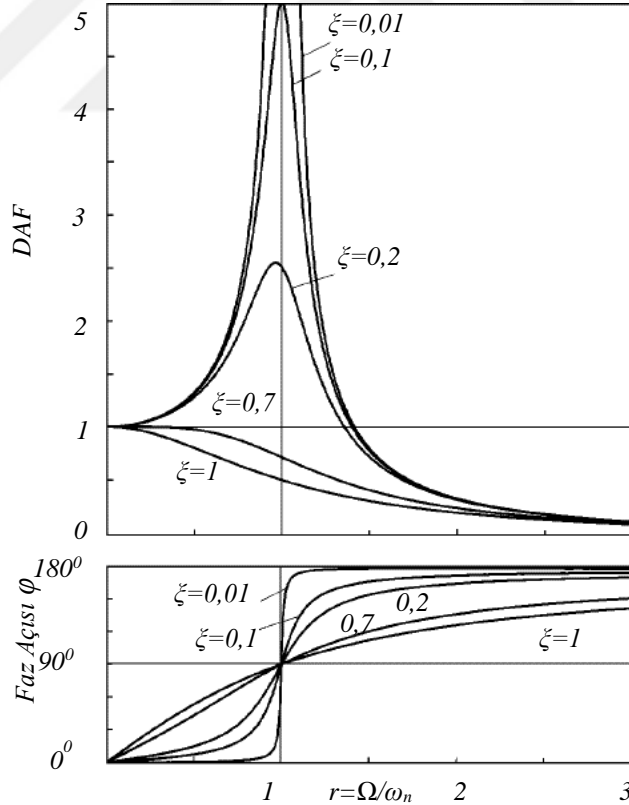
Yapı dinamiği kaynaklarında sıkça kullanılan bir başka ifade de DAF katsayısıdır. Bu katsayı, denklemin kararlı durum kısmı için dinamik yük nedeniyle oluşacak dinamik etkilerin yükün maksimum genliğinin statik etkisi ile elde edilecek yer değiştirmeye oranını ifade eden artım faktörüdür.

$$DAF = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \quad (2.20)$$

Başka bir ifadeyle yer değiştirme denkleminin kuvvetten dolayı oluşan dinamik yer değiştirme genliği,

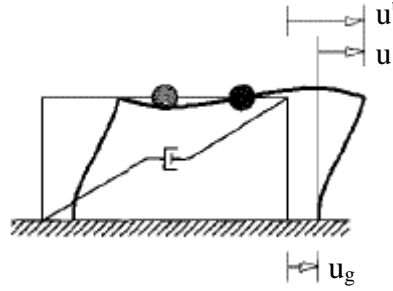
$$U_f = U_0 DAF \quad (2.21)$$

şeklinde ifade edilir. Sönümlü sistemde DAF ve faz açısı ilişkisi Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7. Harmonik zorlanan sönümlü sistem için DAF ve faz açısı (Chopra, 1995)

Zorlanmış titreşim hareket denkleminin sağ tarafı zamana bağlı  $F(t)$  kuvveti olarak temsil edilmiştir. Ancak yapıları etkileyen dinamik kuvvet her zaman dışarıdan etkileyen doğrudan bir yük değildir. Bu kuvvet yapının kütlesi ve yer ivmesi yani depreme dayalı oluşabilir. Bu durumda tek değişim kuvvetin yer hareketi nedeniyle meydana gelmesidir.



**Şekil 2.8.** Yer ivmesi etkisindeki sistemin yer değiştirmeleri

$$m\ddot{u} + ku + c\dot{u} = -m\ddot{u}_g \quad (2.22)$$

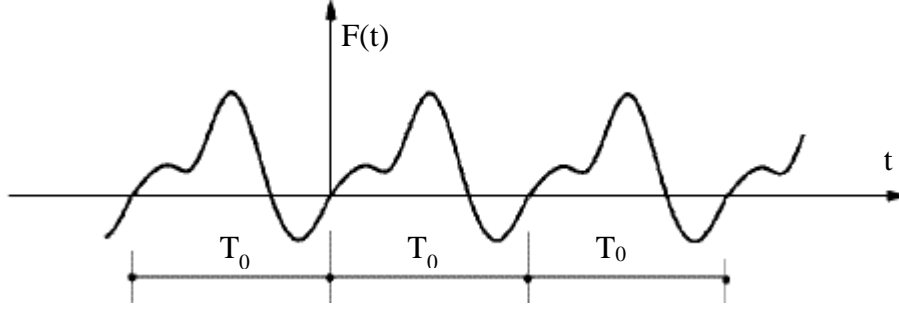
Denklemdaki  $\ddot{u}_g$  yer hareketi ivmesini simgelemektedir. Şekil 2.8’de simgelenen  $u^t$  ise sistemin mutlak yani toplam yer değiştirmesidir. ( $u^t = u + u_g$ )

### 2.1.2. Dinamik tepkilerin sayısal değerlendirilmesi

Zorlanmış titreşim bölümünde harmonik şekilde uygulanan kuvvetler üzerinde durulmuştur. Elbette ki harmonik yüklemeler makine ve dönel parçalı yapı elemanlarının çözümünde uygulanabilir. Ancak mühendislik problemlerinin çoğunda etkileyen kuvvetler çeşitli zaman aralıklarında olup harmonik değildirler. Örnek olarak yapılara etkileyen darbe, rüzgâr ve deprem gibi yükler verilebilir. Bu yüzden sayısal yöntemlerden yararlanarak bu yükleri ve yapıların tepkilerini temsil eden bir fonksiyon elde etmek gereklidir.

#### 2.1.2.1. Fourier serileri yardımıyla periyodik kuvvet ve tepkisi

Periyodik bir fonksiyonda  $T_0$  aralığında fonksiyon kendini tekrar eder (Şekil 2.9). periyodik yüklere gemilerdeki pervane yükleri, açık deniz dalga üzerindeki rüzgar yükleri, uzun ve narin yapılar üzerindeki rüzgar yükleri örnek verilebilir (Chopra, 1995).



**Şekil 2.9.** Periyodik kuvvet zorlaması

Periyodik kuvvet fonksiyonu  $F(t) = F(t+T_0)$  olarak tanımlanır. Burada  $T_0$ ,  $F(t)$  fonksiyonu için periyod veya tekrar için gereken minimum gereken süre olarak tanımlanır. Herhangi bir periyodik fonksiyon sinüs ve kosinüs terimlerinin sonlu seri yaklaşımlarını kullanan Fourier serileriyle ifade edilebilir. Periyodik zorlamaları incelenirken Fourier serilerini kullanmanın bir diğer sebebi elde edilecek sonuçların kesikli Fourier dönüşümü kullanarak gelişigüzel zorlamalara genişletilebilmesidir.

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t) \quad (2.23)$$

$$a_0 = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} F(t) dt \quad (2.24)$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} F(t) \cos(n\Omega t) dt \quad (2.25)$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} F(t) \sin(n\Omega t) dt \quad (2.26)$$

Fourier fonksiyonu denklemden de görüldüğü gibi hem çift hem tek fonksiyonları içerir. Eğer kuvvet fonksiyonu tek ise  $F(t) = -F(-t)$ ,  $a_0 = 0$  ve  $a_n = 0$  değerini alır. Eğer fonksiyon çift ise  $F(t) = F(-t)$ , sinüs fonksiyonu tek olduğu için  $b_n = 0$  değerini alır. Kuvvetin ne tek ne de çift olduğu anlaşılıyorsa tüm katsayılar hesaba katılmalıdır. Kuvveti temsil eden Fourier fonksiyonunu oluşturduktan sonra hareket denklemi,

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t) \quad (2.27)$$

şeklini alır.

Yer değiştirme denkleminde harmonik tepki sönümün etkisiyle zamanla azalır ve göz ardı edilecek seviyelere gelir. Bu yüzden yer değiştirme denklemi oluşturulurken sadece kararlı durum için hesap yapmak yeterli olabilir.

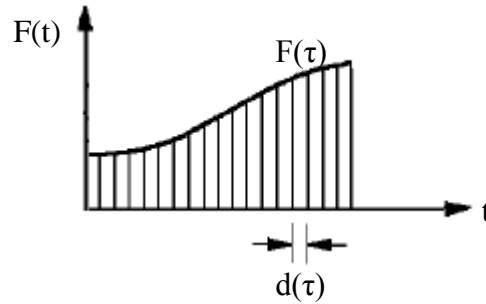
$$u(t) \cong u_p(t) = \frac{a_0}{2k} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n \cos(n\Omega t - \psi_n) + b_n \sin(n\Omega t - \psi_n)}{k\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi nr)^2}} \quad (2.28)$$

Denkleminde  $\psi_n$  faz açısını simgelemektedir.

$$\psi_n = \tan^{-1} \left( \frac{2\xi nr}{1-n^2r^2} \right) \quad (2.29)$$

### 2.1.2.2. Duhamel integrali yardımıyla rastgele dinamik kuvvetler ve tepkileri

Zaman içinde rastgele değişen  $F(t)$  dinamik kuvvetin etkisini ve tepkisini çok küçük zaman aralıklarında itki kuvveti ile adımlayarak çözmek mümkündür. Bunun için kullanılan fonksiyonlardan birisi Duhamel İntegralidir.



**Şekil 2.10.** Rastgele kuvvetin adımlayarak itki kuvveti halinde gösterilmesi

Burada anlık itki kuvveti,

$$\hat{F} = \int F(t)dt \quad (2.30)$$

olarak ifade edilir. Sistemin itki kuvveti çok kısa süreli etkidiği için hareket denklemi sadece değişim hızıyla (momentumla) temsil edilebilir.

Bu durumda sistemin kararlı durum ve toplam yer değiştirme denklemi,

$$u_p(t) = \frac{1}{m\omega_d} \int_0^t F(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_d(t-\tau) d\tau \quad (2.31)$$

$$u(t) = e^{-\xi\omega t} \left( u_0 \cos \omega_d t + \frac{\dot{u}_0 + \xi\omega u_0}{\omega_d} \sin \omega_d t \right) + \frac{1}{m\omega_d} \int_0^t F(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_d(t-\tau) d\tau \quad (2.32)$$

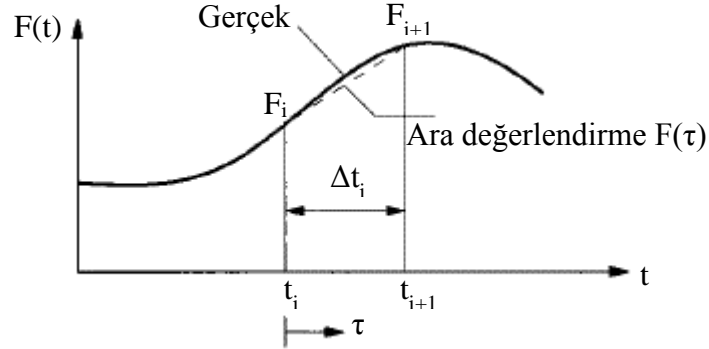
şeklinde ifade edilir.

### 2.1.2.3. Yüklemenin enterpolasyonuna dayalı olarak dinamik kuvvetler ve tepkileri

Her zaman aralığında yüklemeyi ara değerlendirip tepkiyi çözümlene yöntemidir. Zaman aralığı çok küçük alındığında sistemde doğrusal ara değerlendirme yeterli olacaktır ( Şekil 2.11). Burada anlık dinamik etkiler,

$$F(\tau) = F_i + \left( \frac{\Delta F_i}{\Delta t_i} \right) \tau \quad (2.33)$$

olarak ifade edilir.



**Şekil 2.11.** Yüklemenin doğrusal ara değerlendirilmesi

Sistemin hareket denklemi ve yer değiştirme denklemi,

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F_i + \frac{\Delta F_i}{\Delta t_i} \tau \quad (2.34)$$

şeklinde açıklanır.

Sistem sönümsüz kabul edilirse yer değiştirme denklemi 3 ana denkleminin toplamı haline gelmektedir.

$$u(\tau) = u_i \cos \omega_n \tau + \frac{\dot{u}_i}{\omega_n} \sin \omega_n \tau + \frac{F_i}{k} (1 - \cos \omega_n \tau) + \frac{\Delta F_i}{k} \left( \frac{\tau}{\Delta t_i} - \frac{\sin \omega_n \tau}{\omega_n \Delta t_i} \right) \quad (2.35)$$

Bu ifade ve türevine yani hız fonksiyonuna  $\tau = \Delta t_i$  anında yazılarak  $i+1$ 'deki yer değiştirme  $u_{i+1}$  ve hız değeri  $\dot{u}_{i+1}$  değerleri bulunur. Bu sonuçlar yinelenme denklemlerine dönüştürülebilir:

$$u_{i+1} = A u_i + B \dot{u}_i + C F_i + D F_{i+1} \quad (2.36)$$

$$\dot{u}_{i+1} = A' u_i + B' \dot{u}_i + C' F_i + D' F_{i+1} \quad (2.37)$$

Sönümsüz sistemler için yapılan bu hesaplar; sönüm eklenerek  $A, B, C, D$  katsayıları ve türevleri hesaplanarak sönümlü sistem yinelenme denklemlerine dönüştürülebilir.

#### 2.1.2.4. Merkezi Farklar yöntemi kullanılarak dinamik tepkilerin elde edilmesi

Yerdeğişiminin türevleri olan hız ve ivmenin sonlu farklar kullanılarak yaklaşık hesabına dayanır. Sabit zaman aralıkları  $\Delta t$  kullanılarak  $i$  anındaki hız ve ivme için elde edilecek merkezi fark ifadeleri aşağıdaki gibi yazılır (Chopra, 1995).

$$\dot{u}_i = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta t} \quad \ddot{u}_i = \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{(\Delta t)^2} \quad (2.38)$$

Bu ifadeleri doğrusal sistemler için hareket denkleminde yazarsak,

$$m \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{(\Delta t)^2} + c \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta t} + k u_i = F_i \quad (2.39)$$

Burada  $u_i$  ve  $u_{i-1}$  değerlerinin daha önceki hesap adımlarından bilindiği varsayılmaktadır. Tüm bilinenler sağ tarafa geçirilerek denklem 2.40'daki halini alır.

$$\left[ \frac{m}{(\Delta t)^2} + \frac{c}{2\Delta t} \right] u_{i+1} = F_i - \left[ \frac{m}{(\Delta t)^2} - \frac{c}{2\Delta t} \right] u_{i-1} - \left[ k - \frac{2m}{(\Delta t)^2} \right] u_i \quad (2.40)$$

Bu denklemin diğerk bir gösterimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\hat{k}u_{i+1} = \hat{F}_i \quad (2.41)$$

$$\hat{F}_i = F_i - \left[ \frac{m}{(\Delta t)^2} - \frac{c}{2\Delta t} \right] u_{i-1} - \left[ k - \frac{2m}{(\Delta t)^2} \right] u_i \quad (2.42)$$

$\hat{F}_i$  efektif kütle,  $\hat{k}$  ise efektif rijitliktir. Denklem 2.42'den anlaşılacağı üzere  $u_{i+1}$  hesaplanırken önceden bilinen yerdeğıştirmeler  $u_i$  ve  $u_{-1}$  kullanılır.  $u_{-1}$  yerdeğıştirmesi özel başlangıç durumunu ( $t=0$ ) kullanarak bulunmalıdır. Merkezi farklar yöntemindeki adımlamaları özetleyecek olursak:

Başlangıç hesaplamaları,

- Başlangı ivmesi  $\ddot{u}_0 = \frac{1}{m} [F(0) - c\dot{u}_0 - ku_0]$  (2.43)

- $t=0$  anında  $u_{-1}$   $u_{-1} = u_0 - \dot{u}_0\Delta t + \frac{\ddot{u}_0(\Delta t)^2}{2}$  (2.44)

- Efektif rijitlik  $\hat{k} = \left[ \frac{m}{(\Delta t)^2} + \frac{c}{2\Delta t} \right]$  (2.45)

$i$  anı için hesaplamalar,

- Efektif kuvvet  $\hat{F}_i = F_i - \left[ \frac{m}{(\Delta t)^2} - \frac{c}{2\Delta t} \right] u_{i-1} - \left[ k - \frac{2m}{(\Delta t)^2} \right] u_i$  (2.46)

- $t_{i+1}$  anındaki yer değıştirme  $u_{i+1} = \frac{\hat{F}_i}{\hat{k}}$  (2.47)

merkezi farklar metodunun hata oranı arttırmamak için  $\Delta t$  aralığının  $\frac{\Delta t}{T_n} < \frac{1}{\pi}$  koşulunu

sağlaması gerekir.



#### 2.1.2.4. Newmark yöntemi kullanılarak dinamik tepkilerin elde edilmesi

N.M. Newmark tarafından 1959 yılında geliştirilmiş zamanı adımlama yaklaşımıdır. Temeli aşağıdaki denklemlere dayanmaktadır.

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + [(1 - \gamma)\Delta t] + \ddot{u}_i + (\gamma\Delta t) \ddot{u}_{i+1} \quad (2.48)$$

$$u_{i+1} = u_i + (\Delta t) \dot{u}_i + [(0,5 - \beta)(\Delta t)^2] \ddot{u}_i + [\beta(\Delta t)^2] \ddot{u}_{i+1} \quad (2.49)$$

Burada  $\gamma$  ve  $\beta$  katsayıları ivmenin adım içindeki değişimini tanımlayarak yöntemin doğruluk ve kararlılık özelliklerini belirler.

#### 2.1.2. Çok serbestlik dereceli sistemler

Tek serbestlik dereceli sistemler için verilen hareket denklemi, yerdeğiştirme denklemi ve diğer parametreler çok serbestlik dereceli sistemler için de geçerlidir. Sistemin serbestlik derecesine göre oluşturulan hareket denklemlerinin sonuçlarının süperpozisyonuna dayalı çözüm mantığına dayanır. Çok serbestlik dereceli sistemlerin çözümüyle ilgili detaylı bilgiler modal analiz bölümünde açıkça anlatılacaktır.

### 2.2. Modal Analiz

Modal analiz, matematiksel bir model kullanarak bir yapının dinamik karakteristiği olan doğal frekans, mod şekli, sönüm oranlarını belirleme işlemidir. Modal analizde yapılan işlemleri, zaman içerisinde değişmeyen dinamik özellikler prensibine göre basit harmonik hareket modlarının lineer birleşimi olarak ifade edilebilir. Modal analiz genellikle çok serbestlik dereceli sistemlerin çözümüne dayalı olmakla birlikte matris teorileri analizde önemli rol oynamaktadır.

#### 2.2.1. Tek serbestlik dereceli sistemlerde modal analiz teorileri

Klasik titreşim teorilerinin aksine modal analiz yapının gerçek özellikleriyle ilgilenir. Modal analiz için kullanılan en etkili yol frekans tepki fonksiyonunun (FTF) elde

edilmesidir. Bu bölüm altında verilecek olan özellikler ileride anlatılacak olan deneysel modal analizin temellerini de oluşturacaktır. Tek serbestlik dereceli sisteme etkileyen harmonik kuvvet  $f(t) = F(\omega)e^{-j\omega t}$ , sistemin tepkisi ise  $x(t) = X(\omega)e^{-j\omega t}$  karmaşık genlik olsun. Burada  $X(\omega)$  sistemin karmaşık genliğidir.

Buna göre sistemin FTF fonksiyonu,

$$\text{Viskoz sönümlü yerdeğiştirme için, } \frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \alpha(\omega) = \frac{1}{k - \omega^2 m + j\omega c} \quad (2.50)$$

$$\text{Histerik sönümlü yerdeğiştirme için, } \frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \alpha(\omega) = \frac{1}{k - \omega^2 m + jh} \quad (2.51)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $h$  yapısal sönüm katsayısıdır. FTF fonksiyonu yerdeğiştirme için olduğu gibi benzer şekilde hız  $Y(\omega)$  ve ivme  $A(\omega)$  için de türetilebilir. Bunlar arasındaki ilişki yaklaşık olarak

$$|A(\omega)| = \omega |Y(\omega)| = \omega^2 |\alpha(\omega)| \quad (2.52)$$

şeklinde ifade edilir. FTF fonksiyonu farklı şekillerde ifade edilmesi mümkündür. Viskoz sönümlü bir sistem için,

$$\alpha(\omega) = \frac{R}{j\omega - \lambda} + \frac{R^*}{j\omega - \lambda^*} \quad (2.53)$$

$$R = \frac{1}{2m\omega_0 j} \quad (2.54)$$

$$\lambda = (-\xi + \sqrt{1 - \xi^2} j)\omega_0 \quad (2.55)$$

halini alır. Burada  $j$  karmaşık sayı,  $R$  ve  $R^*$  artık değerler,  $\lambda$  ve  $\lambda^*$  karmaşık kutup değerleridir. Sistemin sinyal tepkisi ters Fourier dönüşümü kullanılarak gösterilirse FTF fonksiyonu denklem 2.56'daki gibi ifade edilebilir.

$$\alpha(\omega) = F^{-1}(h(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{j\omega t} dt \quad (2.56)$$

### 2.2.2. Çok serbestlik dereceli sistemlerde modal analiz

Çok serbestlik dereceli dinamik sistemlerin modal analizi tek serbestlik dereceli sistemlerin birleştirilmesiyle oluşmaktadır. Birçok yapı sistemini tanımlamak için birden çok koordinata ve serbestlik derecesine ihtiyaç duyulmaktadır. Böylesi sistemlerin karakterize edilmesi için matris metotların kullanılması gereklidir.

#### 2.2.2.1. Sönümsüz sistemlerde modal analiz

Serbest titreşimde hareket ve yerdeğiştirme denklemi,

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{0\} \quad (2.57)$$

$$\{U_i(t)\} = \{\phi^{(i)}\} u_i(t) \quad (2.58)$$

ifade etmektedir. Burada  $\phi^{(i)}$  mod şekil genliğini ve  $u_i(t)$  yer değiştirmenin zaman bağlı fonksiyonunu ifade etmektedir.

$$[[K] - \omega_i^2 [M]]\{\phi^{(i)}\} = \{0\} \quad (2.59)$$

$$\Delta = |[K] - \omega_i^2 [M]| = 0 \quad (2.60)$$

Çok serbestlik dereceli sistemlerin çözümü öz değer problemidir. Denklem 2.59' un mod şekilleri bölümü sıfır olamayacağı için denklemin rijitlik ve kütesine bağlı diğer kısmının determinanı sıfıra eşitlenir. Bu sayede sistemin serbestlik derecesi kadar açılal frekansının karesi elde edilir. Daha sonra bulunan  $\omega_i^2$  değerleri denklemlerde yerine koyularak sistemin öz vektörleri yani mod şekil genlikleri elde edilir.

$\{\phi^{(r)}\}$  değerleri sabit ve birimsiz katsayılarıdır. Bu genlikler değerleri modların ortogonalliği (dikliği) kullanılarak normalleştirilir. Mod dikliğinden elde edilecek çıkarım n'inci modun eylemsizlik kuvvetinin r'inci moda ait yerdeğiştirmeleri üzerinde yapacağı işin sıfır değerinde olacaktır. Farklı modların birleştirilmesiyle oluşan bu matrise  $[\Phi]$  modal matris denir. Başlangıç koşularına göre modların yerdeğiştirme ve ivme değerli elde edilir.

$$\{\phi^{(r)}\}^T \{\phi^{(r)}\} = 1 \quad (2.61)$$

$$\{\phi^{(r)}\}^T [M] \{\phi^{(r)}\} = 1 \quad (2.62)$$

$$[\Phi] = \left[ \begin{array}{c|c|c} \{\phi^1\} & \{\phi^2\} & \dots & \{\phi^n\} \end{array} \right] \quad (2.63)$$

❖ Eğer sönümsüz yapıyı etkileyen bir dış kuvvet varsa hareket denklemi,

$$[M] \{\ddot{U}\} + [K] \{U\} = \{f(t)\} \quad (2.64)$$

$$[[K] - \omega_i^2 [M]] \{U\} = \{F\} \quad (2.65)$$

şeklini alır.

$$[Z(\omega)] = [[K] - \omega_i^2 [M]] \quad (2.66)$$

$$\{U\} = [Z(\omega)]^{-1} \{F\} \quad (2.67)$$

$$[\alpha(\omega)] = ([K] - \omega^2 [M])^{-1} \quad (2.68)$$

$$= \left[ \begin{array}{ccc} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{array} \right]$$

Burada  $[Z(\omega)]$  matrisin dinamik rijitliğini  $[\alpha(\omega)]$  ise Frekans tepki fonksiyonunu (FTF) temsil etmektedir. FRF matrisi simetrik bir matristir. Bu yüzden j. koordinatta uygulanan kuvvete karşılık i. koordinatta oluşan tepki ile i. koordinatta uygulanan kuvvete karşılık

j. koordinatta oluşan tepki birbirine eşittir. Bu yüzden  $i=j$  olduğu durumda FRF fonksiyonu nokta FRF olarak, aksi taktirde transfer fonksiyonu olarak adlandırılmaktadır. Burada belirtmek gerekir ki elastik ve lineer sistemler için FRF fonksiyonu dış kuvvetlerden bağımsızdır. Sistemin dinamik davranışı nonlineer olduğunda söz konusu fonksiyon, yük bağımlı olarak değerlendirilmelidir.

FRF fonksiyonu fiziksel olarak yorumlayacak olursak çok serbestlik dereceli sistemin i. koordinatındaki yerdeğiştirme denklemi,

$$U_i = \alpha(\omega)_{i1} F_1 + \alpha(\omega)_{i2} F_2 + \dots + \alpha(\omega)_{in} F_n \quad (2.69)$$

şeklinde ifade edilebilir. FRF fonksiyonu sadece yerdeğiştirme için olmayıp ivme ve hız için de oluşturulması mümkündür.

FRF fonksiyonu log-log genlik ve ters FRF gibi birçok şekilde grafiksel olarak ifade edilebilir. FRF matrisi yukarıdaki şekilde tanımlanmasına rağmen aslında matrisin türetimi ve tersini almak oldukça vakit alıcıdır. Fakat çok serbestlik dereceli sistemlerin ortogonalite özelliği kullanıp doğal frekanslardan ve mod şekillerinden yararlanarak FRF matrisinin oluşturulması çok daha hızlı ve kolaydır (Jimin 2001).

$$[\Phi]^T [[K] - \omega_i^2 [M]] [\Phi] = [\Phi]^T [\alpha(\omega)]^{-1} [\Phi] \quad (2.70)$$

$$[\alpha(\omega)] = [\Phi] [(\omega_r^2 - \omega^2)]^{-1} [\Phi]^T \quad (2.71)$$

$$\alpha_{jk}(\omega) = \frac{\phi_{j1}\phi_{k1}}{\omega_1^2 - \omega^2} + \frac{\phi_{j2}\phi_{k2}}{\omega_2^2 - \omega^2} + \dots + \frac{\phi_{jn}\phi_{kn}}{\omega_n^2 - \omega^2} \quad (2.72)$$

$$\alpha_{jk}(\omega) = \{ {}_r A_{jk} \} \{ \omega_r^2 - \omega^2 \} \quad (2.73)$$

$\alpha_{jk}(\omega)$  tepki fonksiyonunda r serbestlik dereceli sistemin tüm modlar ayrıştırılarak bireysel olarak katkıları değerlendirilmiştir.  $\{ {}_r A_{jk} \}$  ise modal katsayı olarak tanımlanmaktadır.

### 2.2.2. Sönümlü sistemlerde modal analiz

Çok serbestlik dereceli sistemlerde sönümün varlığı önceki bölümde anlatılan modal analiz teorilerini değiştirmez. Ancak bu durumda daha kapsamlı matematiksel teorilere ihtiyaç duyulur.

Çok serbestlik dereceli sistemlerin modal analizinde viskoz ve yapısal sönüm olmak üzere iki ana sönüm modeli vardır. Modal analizde sönüm miktarının yanı sıra kütle ve rijitlik özelliklerinde olduğu gibi sönümün dağılımı önemlidir. Sönümsüz sistemlerde modların dikliği prensibini kullanarak hareket denklemini bireysel modlara ayırmak çözümü oldukça kolaylaştırmıştır. Ancak sönüm olduğunda bunu yapmak oldukça zordur. Bu nedenle literatürde geliştirilen çeşitli yöntemler ile bu problemin çözümü araştırılmıştır.

#### ❖ Oransal sönüm modeli

Çok serbestlik dereceli sistemlerin çözümünde kullanılan ilk sönüm modelidir. Rijitlik ve kütle aksine sönüm genellikle modellenemez. Bu durum sönümlü sistemlerin analizi için engeldir. Ancak oransal sönüm analizlerin yapılmasını mümkün kılmıştır. Oransal sönüm sonlu elemanlar analizinde önemli bir uygulamadır. Burada sönüm ihtiyacını karşılayarak daha anlamlı tepki analizi ve tahmin yapılması sağlanır.

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{0\} \quad (2.74)$$

Rayleigh viskoz sönümün kinetik ve potansiyel enerjisi ile ilişkili olduğunu düşünerek sistemin kütle ve rijitliğine bağlı olarak iki sabitle yazılabileceğini öngörmüştür.

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (2.75)$$

Bu sayede sönüm oranı mod şekilleri matrisi ile ayrıştırılarak her bir moddaki modal sönüm oranı,

$$\xi_r = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (2.76)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Eğer çok serbestlik dereceli sistemlerin modal analizinde yapısal (histerik) sönüm kullanılacaksa,

$$[M]\{\ddot{U}\} + j[H]\{U\} + [K]\{U\} = \{0\} \quad (2.77)$$

hareket denklemi şeklinde ifade edilir. Burada  $[H]$  yapısal sönüm matrisi,  $j$  ise sanal birimdir. Yapısal sönüm matrisi kütle ve rijitlikle orantılı olarak yazılacak olursa,

$$[H] = m[M] + v[K] \quad (2.78)$$

burada  $m$  ve  $v$  gerçek pozitif katsayılardır. Oransal viskoz sönümde olduğu gibi yapısal sönüm de mod şekilleri matrisi ile tanımlanacak olursa sistemin doğal frekansları,

$$\lambda_r^2 = \omega_r^2(1 + j\eta_r) \quad (2.79)$$

$$\eta_r = v + \frac{m}{\omega_r^2} \quad (2.80)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\eta_r$  sönüm azaltım faktörüdür.

#### ❖ Oransal olmayan yapısal sönüm modeli

Sönüm matrisi karmaşık rijitlik matrisinin sanal bölümü olarak tanımlanabilir.

$$[K]_c = [K] + j[H] \quad (2.81)$$

$$\{x(t)\} = \{X\} e^{j\lambda t} \quad (2.82)$$

$\lambda$  karmaşık frekans hem salınımı hem de serbest azalımı temsil etmektedir.  $\{X\}$  ise yerdeğiştirme genliği için karmaşık genliği temsil etmektedir. Buna göre karmaşık özdeğer problemi,

$$([K]_c - \lambda^2 [M])\{X\} = \{0\} \quad (2.83)$$

şeklinde çözülür.

Sönümsüz sistemlerde olduğu gibi modlar tekil değerlere ayrıştırılarak FTF fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\alpha_{jk}(\omega) = \frac{\phi_{j1}\phi_{k1}}{\lambda_1^2 - \omega^2} + \frac{\phi_{j2}\phi_{k2}}{\lambda_2^2 - \omega^2} + \dots + \frac{\phi_{jn}\phi_{kn}}{\lambda_n^2 - \omega^2} \quad (2.84)$$

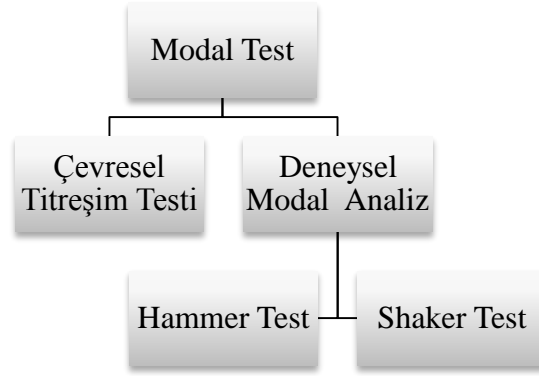
$$\alpha_{ik}(\omega) = \sum_{r=1}^n \frac{r A_{ik}}{\lambda_r^2 - \omega^2} \quad (2.85)$$

### 2.3. Modal Test

Son yıllarda bilgisayar ve yazılım teknolojisinin gelişmesine paralel olarak modal testin kullanım alanı da oldukça genişlemiştir. Yer kabuğunun hareketinden makine parçalarının dinamik davranışının tespitine kadar tüm bilim dallarında kullanılmaktadır.

İnşaat Mühendisliği alanında güçlü nümerik metotlarla yapıların dinamik ve statik analizleri ve yapı tasarım teknikleri gelişmiştir. Yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar metodu bilgisayar ortamında yapıların analizini yaparak yapısal davranışı tespit etmemizi sağlar. Ancak malzeme performansının gelişmesi artan karmaşık yapı tasarımları yapısal özelliklerin belirlenmesi ve nümerik modelin kalibrasyonu için mühendisleri deneysel metodlara yöneltmiştir. Bu yüzden mevcut yapıların dinamik davranışını belirleyebilmek ve yapısal sağlık takibi için modal testlere başvurulmaktadır. Modal test yapıdan alınan ivme, hız veya yer değiştirme ölçümlerinden FTF fonksiyonun elde edilmesine dayalıdır. FTF fonksiyonu elde edildikten sonra ise yapının mod frekansları ve sönüm oranları belirlenerek model doğrulanır. Modal test ölçümleri temelde ikiye ayrılmaktadır. Bunlar yapıyı belirli bir dış kuvvetle zorlayarak tepkinin ölçülmesi ve çevresel titreşimlerle tepkinin ölçülmesine dayalıdır (Şekil 2.12).





Şekil 2.12. Modal test çeşitleri

### 2.3.1. Deneysel modal analiz

Deneysel modal analiz üç ana aşamadan oluşur. Birinci aşama yapıya etkileyen kuvvetin üretimi ve yapıya uygulanmasıdır. Daha sonra yapıya etkileyen kuvvet ve tepki sinyallerinin toplanması. Son olarak ise etki tepki sinyallerinin işlenerek FTF fonksiyonunun türetilmesidir. Bu aşamalar şekil 2.13'te oldukça açık bir şekilde ifade edilmiştir. Yapının tepkisi yaygın olarak ivmeölçerlerle ölçülmektedir. Yapıya etkileyen kuvvet ise test çekiciyle ya da test süresince devam eden sarsıcıyla uygulanmaktadır. Her iki yöntemin uygulanma alanları, avantaj ve dezavantajları olmakla birlikte devamındaki aşamaların işleyiş mantığı aynıdır.

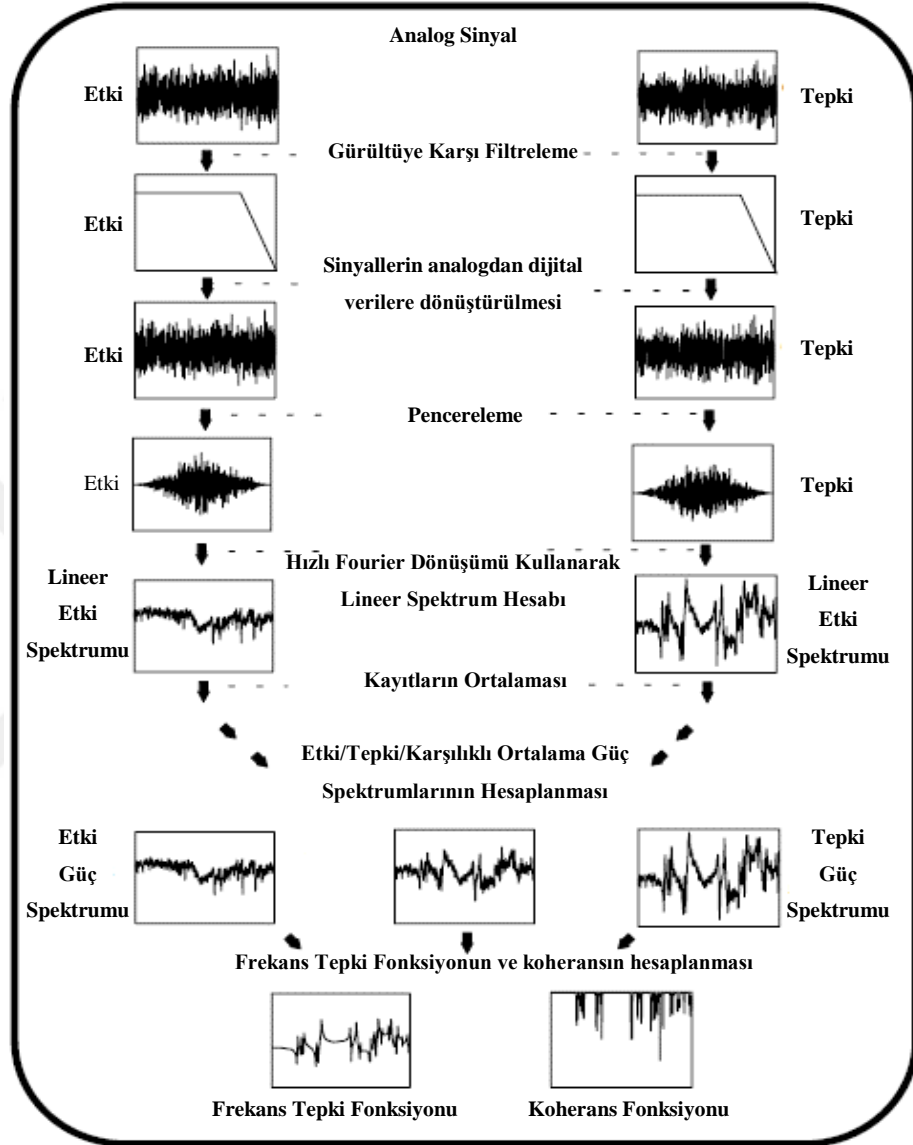
#### ❖ Hammer Testi:

- Seri veya paralel ölçümler yapılabilir.
- Etki yayılımı oldukça hızlıdır.
- Hızlı ve kolay uygulanır.
- Ölçümden ölçüme farklı kuvvetler uygulanabilir.

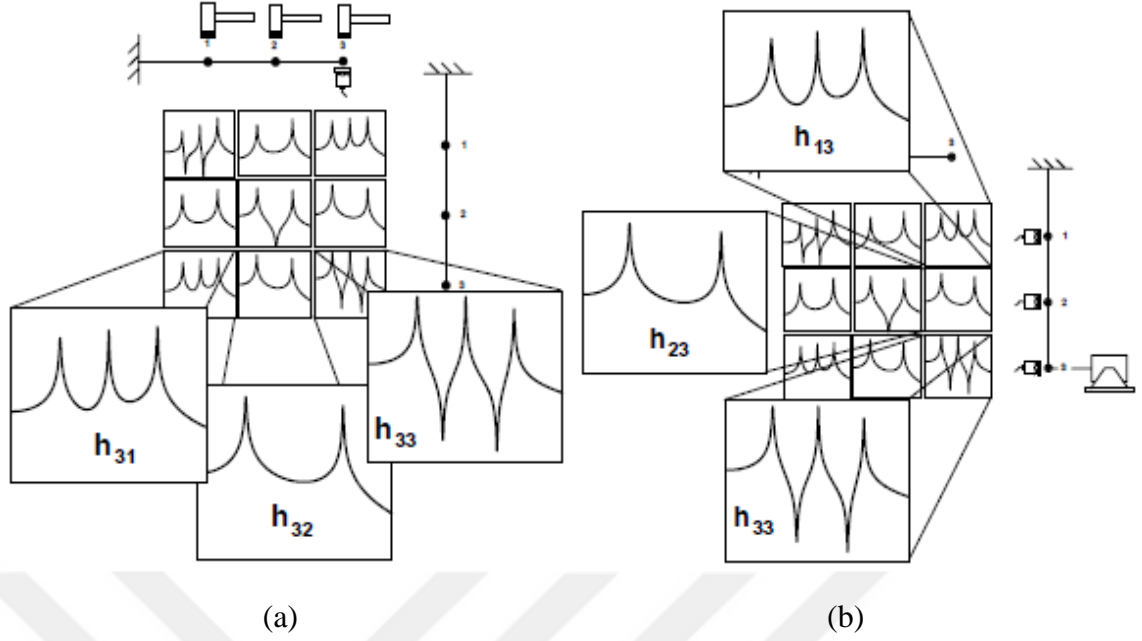
#### ❖ Shaker testi:

- Seri veya paralel ölçümler yapılabilir.
- Çok farklı tipte uygulanma tekniği vardır.
- Kompleks yapılarda uygulanır.
- Çoklu girdi/çıkış analizine uygundur.
- Hammer testine göre daha fazla tekrarlanabilir.

- Test kurulumu zordur. Daha fazla ekipman ve kanal gerektirir.
- Kullanıcı becerisine ihtiyaç vardır.



Şekil 2.13. Modal Test Akış Diyagramı (Avitabile,2002)



**Şekil 2.14.** (a) Hammer Test (b) Shaker Test (Avitabile,2002)

### 2.3.2. Çevresel titreşim testi

Çevresel titreşim testi deneysel modal analizden türetilmesine rağmen ikisi arasındaki ana fark etkinin temel formülasyonudur. Deneysel modal analizde girdiler (etki) belirlenebilir çerçevede olmasına karşı çevresel titreşim testi rastgele etkilere karşı skolastik bir yaklaşıma sahiptir. Çevresel titreşim testinde girdiler (etki) Gauss Beyaz Gürültü (sıfır anlamında) olarak varsayılır. Ölçülen tepkiler etki sistemi ve test altındaki yapı hakkında bilgiler içerir. Fakat etki sisteminin karakteri yapının modal parametrelerinin doğru tahmin edilmesini etkilemez. Yapı sistemi zamanla değişmeyen dar bantlı tepkilere sahip iken etki sistemi zamanla değişen ve değişmeyen geniş bantlı tepkilere sahip olduğu için yapısal modları ve etkinin özelliklerini ayırmak mümkündür. Girdiler (Gauss Beyaz Gürültü) frekans alanında düz bir spektrum kullanılarak karakterize edilir. Bu yüzden ilgili frekans aralığında bütün modlara eşit etki ettiği varsayılır. Bu varsayımdan dolayı test sonucundan modların kütle katılımları hesaplanamaz ve doğal frekansa yakın sahte harmonik bileşenlerden dolayı modal parametrelerin belirlenmesi zorlaşabilir. Girdilerin (etki) bu varsayımından dolayı oluşan diğer sonuçlar hesaplama metotlarının sınıflandırılmasına göre değişmektedir (Rainieri, 2008).

Zorlanmış titreşimle modal analiz genellikle laboratuvar testlerinde kullanılmaktadır. İnşaat mühendisliği alanında bu yöntem köprüler, barajlar ve yapılarda kullanılabilir. Ancak yapıların geniş boyutları bazı zorlukları da beraberinde getirir. Testin kontrolü ve ölçülebilir dinamik etki için çok ağır ve pahalı cihazlara gerek duyulur. Bu karşın yapılara etkiyen rüzgâr, tektonik hareketler ve trafik yükü etkilerine karşı sadece tepkilerin değerlendirilmesine dayalı çevresel titreşim testi oldukça hızlı ve ekonomiktir. Çevresel titreşim testi temel olarak iki varsayım üzerine geliştirilmiştir. Birincisi lineerlik olup girdi bileşenlerinin sistemde oluşturduğu tepki çıktılara eşit olmalıdır. İkinci ise yapının dinamik özelliklerinin zamanla değişmediği varsayımdır.

Çevresel titreşim testi inşaat mühendisliği alanında birçok amaçla kullanılabilir. Bunlardan başlıcaları;

1. Gerçek yapı davranışına yakın modal parametrelerin belirlenerek geliştirilen sonlu elemanlar modelinin kalibre edilmesinde kullanılmaktadır. Özellikle tarihi yapıların karmaşık yapısal sistemlerini ve belirlenemeyen malzeme özelliklerini belirlemek için oldukça uygundur.
2. Yapısal sağlık takibi ve hasar tespiti için titreşime dayalı yöntem oldukça başarılı ve yaygındır. Önemli yapıların kısa süreli deprem ve uzun süreli yorulma gibi zararlı etkilerde yapının performansının sürekli izlenilmesi gereklidir.
3. Performans değerlendirmesi için modal parametrelerin belirlenmesi,
4. Yapının tepki ölçümünden kuvvetin belirlenmesi,
5. Yapı-zemin etkileşimi sismik izolatör performansı,
6. Katlar arası öteleme ve burulma tespitidir.

Çevresel titreşim testinin arazide uygulanması için ivmeölçer, sayısal dönüştürücü ve bilgisayara ihtiyaç vardır. İvmeölçerler piezo, kuvvet dengeli, nitrojen sönümlmeli mems olarak sınıflandırılmaktadır. Son yıllarda gelişen teknolojiyle beraber ivmeölçer, sayısal dönüştürücü ve veri toplama ünitesi birlikte üretilmektedir. Hatta GPS bağlantısıyla senkronize olup üzerine kayıt alabilen ve Ethernet bağlantısıyla uzaktan erişime izin veren cihazlar üretilmeye başlanmıştır. Ancak sinyal işleme ve spektrumların elde edilmesi için işlem basamakları aynıdır.

Sinyal işleme süreci genel manada deneysel modal analizin bölümünde verilen akış diyagramına benzer olup sadece tepki kısmı dikkate alınmaktadır. İvmeölçerlerden alınan tepkiler sayısal dönüştürücüye aktarılır. Burada kaçak (sızıntı) etkisine karşı sinyallere alçak geçirgen analog filtreleme uygulanıp sinyal dijital verilere dönüştürülür. Dijital ortama aktarılan sinyal verilerine pencereleme uygulanıp Hızlı Fourier Dönüşümü sayesinde frekans ortamına dönüştürülür. Bu işlemlerden sonra spektrumların grafiksel gösterimi ve modal parametrelerin belirlenmesi için çeşitli metotlar geliştirilmiştir.

Çevresel titreşim testinde modal parametrelerin belirlenmesi için hem frekans alanında hem de zaman alanında birçok metot mevcuttur. Frekans alanında yaygın olarak Peak-picking metodu, Geliştirilmiş frekans ortamında ayrıştırma metodu; zaman alanında ise Next, ARMA ve skolastik alt alan metodu kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında frekans alanında çözümleme yapıldığı için sadece frekans alanındaki metotlar hakkında bilgi verilecektir.

### **2.3.2.1 Peak-Picking metodu**

Klasik frekans alanlı metot veya yarı-güç metodu da denilen metot modal parametrelerin belirlenmesi için kullanılan en temel yöntemdir. PP metodunda periodogram ve correlogram olarak iki alternatif çözüm yöntemi kullanılabilir. Ancak yaygın olarak kullanılan periogram (Welch) metodudur. Yöntemde spektrum direkt olarak ölçülen zaman verilerinden hesaplanır. İlk olarak kaydedilen kayıtlar belirli bir aşılma yüzdesiyle aynı zaman uzunluğunda bloklara bölünür. Her bir kayıta pencereleme uygulandıktan sonra Ayrıştırılmış Fourier Dönüşümü (AFD) gerçekleştirilir. Her blok için elde edilen değerlerin ortalamasına dayalı güç spektral yoğunluk matrisi elde edilir. Pencereleme, kaçak (sızıntı) veri etkisini minimize eder. Kaçak veriler doğru olan bir spektrumda komşu frekanslarını etkileyerek hata oranını artırır. Ancak pencereleme esnasında kayıtın başı ve sonu katılımlar azalır. Bu yüzden diğer kayıtlarla ilişkisi kurulurken %50 aşılma oranı kullanılması tavsiye edilir. İstenilen özelliklere paralel olarak genellikle Hanning pencereleme tekniği uygulanır. Her bir bloğun uzunluğu ve blok sayısı ile spektrumun düzensizliği ve frekans çözünürlüğü arasında ters orantı vardır. Seçilen blok uzunlukları artarsa çözünürlük artar ve sızıntı etkisi azalır. Ancak spektrumlardaki ortalama sayısı

azalır ve belirsizlikler yükselir. Bu yüzden ikisi arasındaki orantıyı dengeli tutmak gerekir.

Modlar ortalama güç spektral yoğunluk matrisinden piklerin direkt seçilmesiyle elde edilir. Yöntem başka bir ifadeyle sistemin tek serbestlik dereceli gibi düşünülüp her pikin bireysel olarak değerlendirilmesine dayalıdır. PP yöntemi rezonans etrafında yalnız baskın bir mod olduğunu kabul ederek işlem yapar. Bu yüzden yapının iki modu birbirine yakınsa modların belirlenmesi oldukça zorlaşır ya da yanlış belirlemeye yol açar. Sönüm tahmininde ise güç spektrumu veya FTF fonksiyonu kullanılır. Ancak modların yakın olması ve bunların tek bir mod olarak düşünülmesi yanlış hesaplara yol açabilir. Belirtilen dezavantajlara rağmen metodun basit ve hızlı olması metodun hala tercih edilme sebebidir. PP yönteminde girdi spektrumu bir katsayı sayılarak FTF fonksiyonu ve çıktı spektrum matrisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

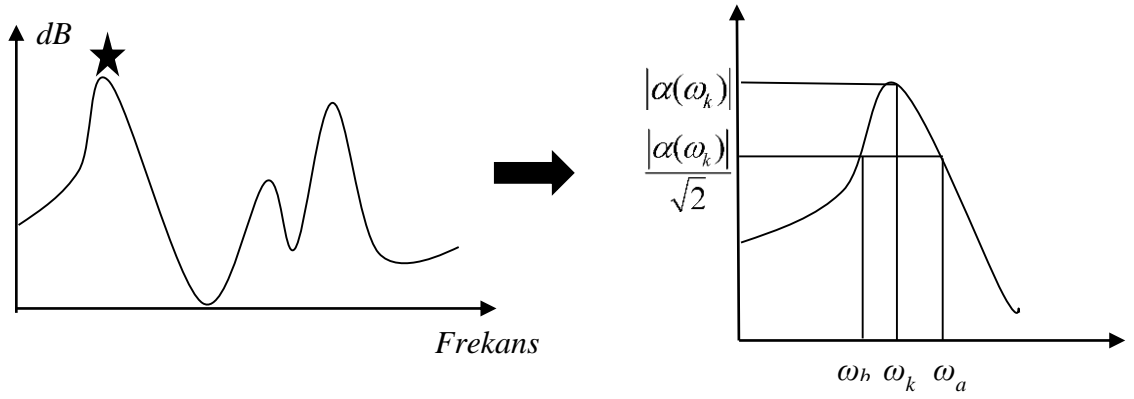
$$[H(\omega)] = \sum_{k=1}^n \left[ \frac{[R]_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{[R]_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] \quad (2.86)$$

Burada  $[H(\omega)]$  Frekans tepki fonksiyonu,  $[A]_k$  artık matris,  $\lambda_k$  k'nci modun öz değeri, \* ise karmaşık katsayı olarak ifade edilir.

$$[G_{yy}(\omega)] = [H(\omega)]^* [G_{xx}(\omega)] [H(\omega)]^T \quad (2.87)$$

$$[G_{yy}(\omega)] \approx \sum_{k=1}^n \left[ \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] \quad (2.88)$$

Frekans tepki fonksiyonundan veya güç spektrumundan seçilen k'nci mod frekans değeri  $\omega_k = \omega_{pik}$  ve frekansa karşılık gelen tepki  $|\alpha_k(\omega)|_{mak}$  olarak değerlendirilir. Sönüm oranı şekil 2.15'de verildiği gibi yarı güç noktasından ( $\alpha_{mak}/\sqrt{2}$ ) faydalanarak elde edilen frekanslar vasıtasıyla tespit edilir.



**Şekil 2.15.** Sistemin sönümünün Peak-Picking metodu belirlenmesi

$$\eta_k = \frac{\omega_b^2 - \omega_a^2}{2\omega_k^2} \approx \frac{\omega_b - \omega_a}{\omega_k} \quad (2.89)$$

$$\zeta_k = \frac{\omega_b^2 - \omega_a^2}{4\omega_k^2} \approx \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_k} \quad (2.90)$$

$$A_k = 2\alpha_{mak} \zeta_k \omega_k^2 \quad (2.91)$$

Burada  $\eta_k$  :sönüm azaltma faktörü,  $\zeta_k$  :sönüm oranı ve  $A_k$ :modal katsayıdır. Peak-Picking metodu düşük sönümlü sistemler için kullanılması uygundur.

### 2.3.2.2. Frekans ortamında ayrıştırma metodu (FOA) ve geliştirilmiş frekans ortamında analiz metodu (GFOA)

Frekans ortamında ayrıştırma metodu (FOA) PP metodunun uzantısı olarak geliştirilmiştir. FOA metodu PP metodunun dezavantajlarını kaldırarak modal parametrelerin belirlenmesini sağlar. Bu metod ilk önce Frekans tepki fonksiyonuna ve kompleks mod indikatör fonksiyonuna uygulanarak çoklu köklerin belirlenebilmesi için türetilmiştir. Daha sonra Brincker tarafından geliştirilerek tepki spektrum datalarına uygulanmıştır. Böylece girdi datalarıyla çıktı dataları arasındaki aşağıdaki ilişki kurulmuştur.

$$[G_{yy}(\omega)] = [H(\omega)]^* [G_{xx}(\omega)] [H(\omega)]^T \quad (2.92)$$

Burada  $[G_{xx}(\omega)]$  girdi sayısı  $k$  olan Güç spektrum matrisi ( $r \times r$ ),  $[G_{yy}(\omega)]$  çıktı sayısı  $l$  olan güç spektrum matrisi ( $l \times l$ ),  $[H(\omega)]$  matris boyutu  $l \times r$  olan frekans tepki fonksiyonu (FTF),  $*$  ve  $T$  üst indisler ise sırasıyla kompleks karmaşık ve transpozeyi ifade etmektedir. FTF fonksiyonu Peak-Peaking metodundaki gibi tipik kısmi kesir formunda yazılacak olursa,

$$[H(\omega)] = \sum_{k=1}^n \left[ \frac{[R]_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{[R]_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] \quad (2.93)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $n$  mod sayısını ifade etmektedir.

$$\lambda_k = -\sigma_k + j\omega_{dk} \quad (2.94)$$

$\lambda_k$   $k$ 'inci modun kutup değeri,  $\sigma_k$  ve  $\omega_{dk}$  ise sırasıyla  $k$ 'inci modun modal sönümünü ve sönümlü doğal frekansını ifade etmektedir.

$$[R_k] = \{\phi\}_k \{\gamma_k\}^T \quad (2.95)$$

$[R_k]$  artık değeri,  $\{\phi\}_k$  mod şekil vektörünü ve  $\{\gamma_k\}$  ise modal katılım vektörünü temsil etmektedir.

Denklem 2.92 ve 2.93 birleştirilip tepki (çıkıtı) güç spektrum matrisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Burada rastgele girdiler Gauss beyaz gürültü olarak sabit bir katsayı alırsa  $[G_{xx}(\omega)] = [C]$  şeklinde yazılabilir.

$$[G_{yy}(\omega)] = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[ \frac{[R]_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{[R]_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] [C] \left[ \frac{[R]_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{[R]_s^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right]^H \quad (2.96)$$

Polinom açılımları için Heaviside kısmi kesir teoremi kullanılarak denklem 2.97 elde edilebilir.



$$[G_{yy}(\omega)] = \sum_{k=1}^n \left[ \frac{[A]_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{[A]_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{[B]_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{[B]_k^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \right] \quad (2.97)$$

Bu denklem tepki GSY matrisinin kutup-artık formudur.  $[A_k]$  tepki GSY matrisinin artık matrisi şeklinde ifade edilir ve  $1 \times 1$  hermisyen matris aşağıdaki gibi ifade edilir. Hermisyen matris karmaşık eşleniğinin transpozesi kendisine eşit olan matrislere verilen genel addır.

$$[A_k] = [R_k][C] \left( \frac{[R_s^H]}{-\lambda_s - \lambda_k^*} + \frac{[R_s^T]}{-\lambda_k - \lambda_s} \right) \quad (2.98)$$

Eğer sadece  $k$ 'inci mod düşünülürse katkı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$[A_k] = \frac{[R_k][C][R_k]^H}{2\sigma_k} \quad (2.99)$$

Sistem hafif sönümlü ise artık değer aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$[A_k] \approx [R_k][C][R_k]^H = \{\phi\}_k \{\gamma_k\}^T [C] \{\gamma_k\} \{\phi\}_k^T = d_k \{\phi\}_k \{\phi\}_k^T \quad (2.100)$$

$d_k$ :  $k$ 'inci modun ölçek faktörüdür. Yapı hafif sönümlü sistem ve modların katkısı önemli frekanslarda sınırlı sayıda (genellikle 1 veya 2) olduğu düşünülürse denklem aşağıdaki son halini alır.

$$[G_{yy}(\omega)] = \sum_{k \in sub(\omega)} \frac{d_k \{\phi\}_k \{\phi\}_k^T}{j\omega - \lambda_k} + \frac{d_k^* \{\phi\}_k^* \{\phi\}_k^{*T}}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (2.101)$$

Burada  $k \in sub(\omega)$  ifadesi ilgili frekansa katkısı olan modları ifade etmektedir. Bundan sonraki aşama tekil değer ayrıştırma tekniğini kullanarak tepki GYS matrisinin ayrıştırılmış frekans ortamında tekil değer ve tekil vektörleri ayrıştırılmasıdır. Bu ayrıştırma problemin tek serbestlik dereceli sistem modelleri tanımlanarak gerçekleştirilmesine dayanır. Bu durumda  $\omega = \omega_i$  frekansındaki tepki GSY matrisinin tekil değer ayrıştırılması denklem 2.102'deki gibi ifade edilir (Rainieri, 2008).

$$\hat{G}_{yy}(j\omega_i) = [U]_i [S]_i [U]_i^H \quad (2.102)$$

Burada  $[U]_i$  tekil vektör  $\{u_{ij}\}$ 'lerin oluşturduğu matristir.  $[S]_i$  ise skaler tekil değerlerin  $s_{ij}$ 'lerin oluşturduğu matristir. Spektrumda pik etrafında k'ncı moda karşılık gelen mod baskın olacaktır. Eğer sadece bu k'ncı mod baskınsa denklem 2.101 sadece bir terimli olacaktır ve GSY matrisi aşağıdaki bir sıra matrisi olarak ifade edilecektir.

$$\hat{G}_{yy}(j\omega_i) = s_i \{u_{i1}\} \{u_{i1}\}^H \quad \omega_i \rightarrow \omega_k \quad (2.103)$$

Bu durumda ilk tekil değer vektörü  $\{u_{i1}\}$  mod şeklinin tahminidir ve ilgili tek serbestlik dereceli sistemin oto GSY fonksiyonuna ait tekil değerdir.

$$\{\hat{\phi}\} = \{u_{i1}\} \quad (2.104)$$

Tekrarlanan modların olması durumunda GSY matrisinin sırası çoklu modların sayısına eşittir. Oto GSY fonksiyonu, mod şekil tahmini ile pik etrafındaki frekans çizgileriyle ilişkili tekil vektörlerin karşılaştırılmasıyla tanımlanır. Her çizgi tekil vektörler kullanılarak karakterize edilir ve bunlar TSDS GSY fonksiyonuna ait kullanıcı tanımlı modal doğrulama kriteri (MDK) red seviyesinden daha yüksek MDK değeri ile modal şekil tahmini  $\{\hat{\phi}\}$  verir.

TSDS GSY fonksiyonu, geliştirilmiş frekans ortamında ayrıştırma algoritması uygulandığında da doğal frekansı ve sönümü tahmin etmek için HFD algoritması kullanılır. Aslında, TSDS GSY fonksiyonu ters HFD aracıyla zaman alanına geri dönüştürülür. Böylece eşdeğer TSDS'nin yaklaşık bir korelasyon fonksiyonu elde edilir. TSDS'nin serbest azalım fonksiyonundan logaritmik azalım tekniği kullanılarak sönüm oranı hesaplanır. Benzer prosedür korelasyon fonksiyonun sıfırdan geçiş süreleri üzerinde lineer regresyon gerçekleştirerek doğal frekansların elde edilmesi için kullanılır. Burada sönümlü ve sönümsüz sistem arasındaki ilişki dikkate alınmalıdır.

## 2.3. Deprem

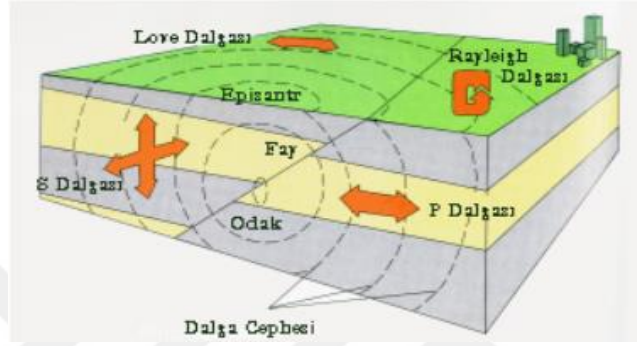
### 2.3.1. Deprem oluşumu

İnsanoğlunun beklemeksizin karşılaştığı ve en zarar verici doğal afetlerin başında yer hareketi diğer ifadeyle deprem gelmektedir. Deprem, yerküre içerisinde biriken elastik deformasyon enerjisinin plakaların kırılma direncini aşması sonucunda kırılması ve bu kırılmanın meydana getirdiği sismik dalgaların yeryüzünde oluşturduğu titreşim hareketidir. Maalesef depremler meydana geldikten sonra sadece yersarsıntısı değil beraberinde diğer doğal afetleri de getirirler. Bunlar heyelan, çığ, zemin sıvılaşması, tsunami ve volkanik hareketlerdir. Deprem oluş mekanizmaları ve yeryüzündeki etkileri deprem mühendisliğinin oluşmasına neden olmuştur. Yeni bir disiplin olan deprem mühendisliği jeoloji, sismoloji, geoteknik mühendisliği, yapı mühendisliği ve risk analizi bölümlerini içinde barındırmaktadır.

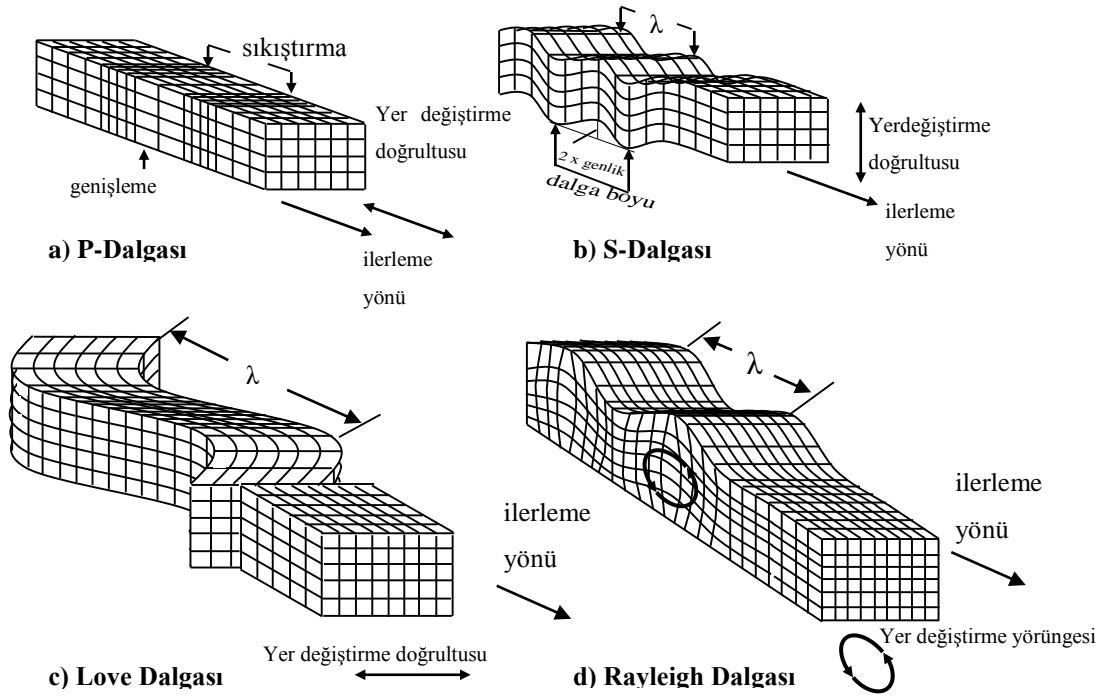
Depremlerin oluşum teorisi olarak Elastik Geri Sekme Kuramı yaygın olarak kabul görmektedir. Bu kuram 1911 yılında Amerikalı Reid tarafından ortaya atılmıştır. Bu kurama göre, herhangi bir noktada, zamana bağımlı olarak, yavaş yavaş oluşan birim deformasyon birikiminin elastik olarak depoladığı enerji, kritik bir değere eriştiğinde, fay düzlemi boyunca var olan sürtünme kuvvetini yenerek, fay çizgisinin her iki tarafındaki kayaç bloklarının birbirine göreli hareketlerini oluşturmaktadır. Bu olay ani yer değiştirme hareketidir. Bu ani yer değiştirmeler ise bir noktada biriken birim deformasyon enerjisinin açığa çıkması, boşalması, diğer bir deyişle mekanik enerjiye dönüşüp yer kabuğunun kırılmasıyla oluşmaktadır. Deprem esnasında oluşan faylar, elastik geri sekmeler (atım), çoğunlukla fayın her iki tarafında ve ters yönde oluşmaktadırlar.

Deprem meydana geldiğinde, cisim ve yüzey dalgaları olmak üzere farklı tipte dalgalar oluşur (Şekil 16 ve 17). Cisim dalgaları kendi içerisinde P ve S dalgalarından oluşmaktadır. P dalgaları birincil, basınç veya boyuna dalga olarak ifade edilir. P dalgaları ses dalgalarına benzetilmekte olup katı ve akışkan boyunca hareket edebilirler. S dalgaları ise ikincil, kesme veya enine dalgalar olarak ifade edilmekte olup yayıldıkları malzeme üzerinde kesme deformasyonu oluştururlar. S dalgalarının düşey ve yatay olmak üzere iki bileşeni vardır. S dalgaları kesme rijitliği olmadığı için sıvı ortamda yayılmazlar.

Yüzeysel dalgalar yeryüzünün yüzey tabakası ile cisim dalgalarının etkileşimi sonucunda oluşurlar. Bu dalgaların genlikleri yeryüzündeki hareketleri boyunca derinlikle azalır. Yüzeysel dalgalar cisim dalgalarına göre daha yavaş yayılırlar ancak genlikleri daha büyüktür. Hızı daha fazla olan Love ve genliği daha büyük olan Rayleigh dalgaları olarak ikiye ayrılırlar. Yüzeysel dalgalarının etkisi cisim dalgalarına göre çok daha fazladır.



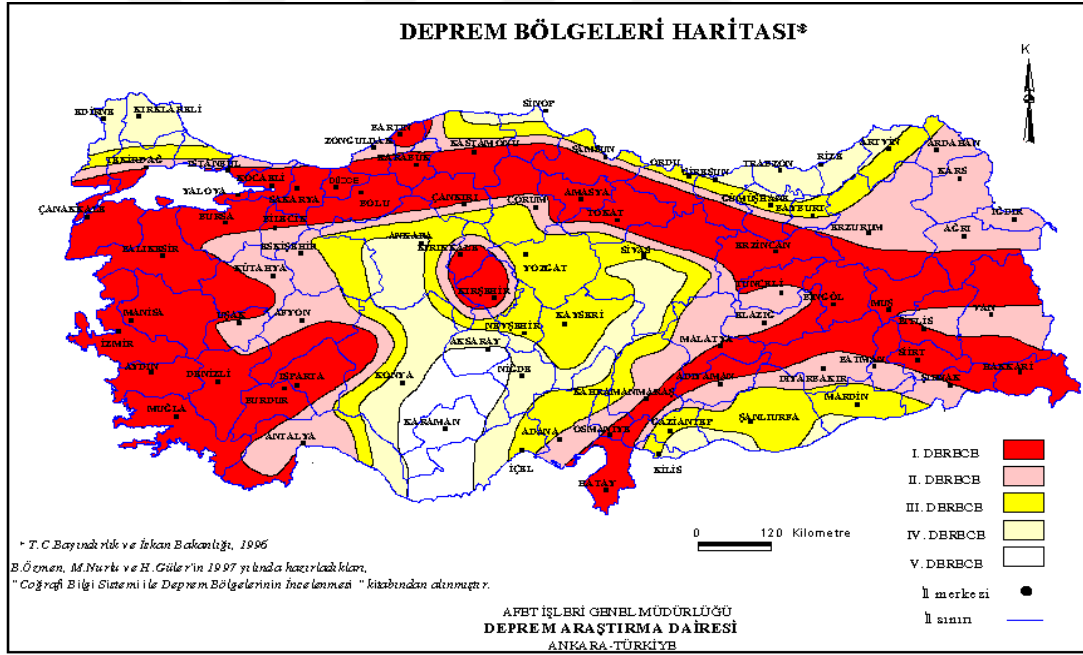
Şekil 2.16. Deprem oluşumu ve dalga yayılımı



Şekil 2.17. Elastik ortamda dalga türleri ve yayılma özellikleri (Livaoğlu 2001)

### 2.3.2. Türkiye ve Bursa'nın depremselliği

Ülkemizin depremselliğini inceleyecek olursak neredeyse tüm bölgeler aktif faylar üzerinde yer almaktadır. Alp-Himalaya deprem kuşağında yer alan ülkemizde olan depremler, Atlantik Okyanus ortası sırtının iki tarafa doğru yayılmasına bağlı olarak Afrika-Arabistan levhalarının kuzey doğuya doğru hareket etmeleriyle ilişkilidir. Ayrıca, Kızıldeniz'in uzun eksenini boyunca bugün de devam eden deniz tabanına yayılması nedeni ile Arabistan levhası kuzeye doğru itilmekte ve Avrasya levhasının altına doğru dalmaya zorlanmaktadır. Anadolu levhasının batıya hareketi ise Yunanistan-Ege coğrafyasındaki yer kabuğu tarafından engellenmeye çalışılmaktadır. Sonuç olarak Türkiye; Kuzey Anadolu (KAF), Güney Doğu Anadolu, Batı Anadolu fay hattı ve birçok aktif fay kırıkları üzerinde yer almaktadır. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğüne hazırlanan deprem bölgeleri haritası Şekil 2.18'de sunulmaktadır.



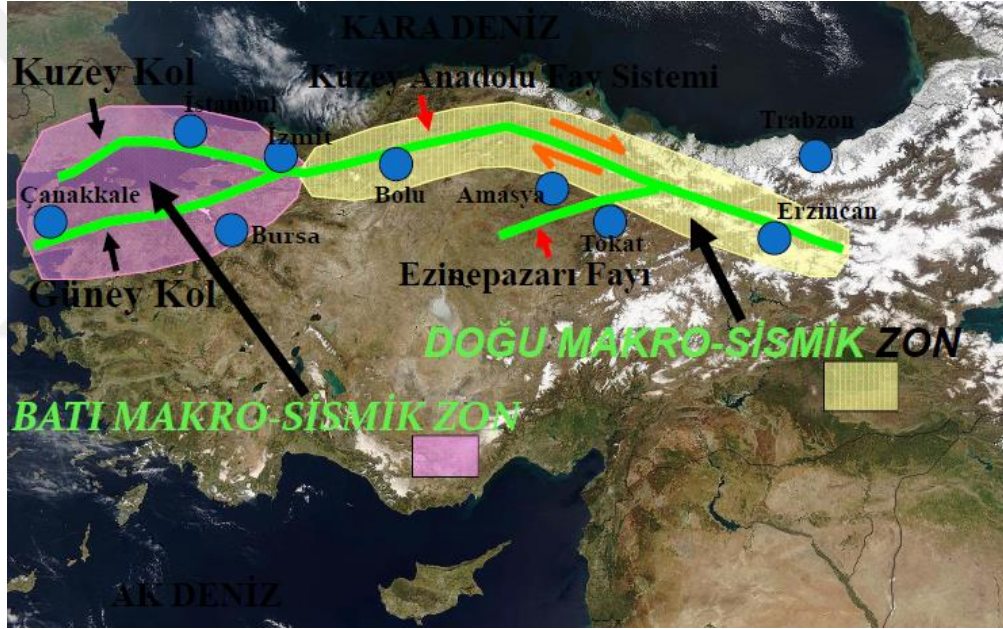
Şekil 2.18. Türkiye deprem bölgeleri haritası

Türkiye Deprem Bölgeleri, ivme değerlerine göre aşağıdaki şekilde derecelendirilmiştir.

1. Derece deprem bölgesi : beklenen ivme değeri 0.40 g 'den büyük
2. Derece deprem bölgesi : beklenen ivme değeri 0.40 g ile 0.30 g arasında
3. Derece deprem bölgesi : beklenen ivme değeri 0.30 g ile 0.20 g arasında

4. Derece deprem bölgesi : beklenen ivme değeri 0.20 g ile 0.10 g arasında  
5. Derece deprem bölgesi : beklenen ivme değeri 0.10 g 'den az  
g: yer çekimi (981 cm/s<sup>2</sup>).

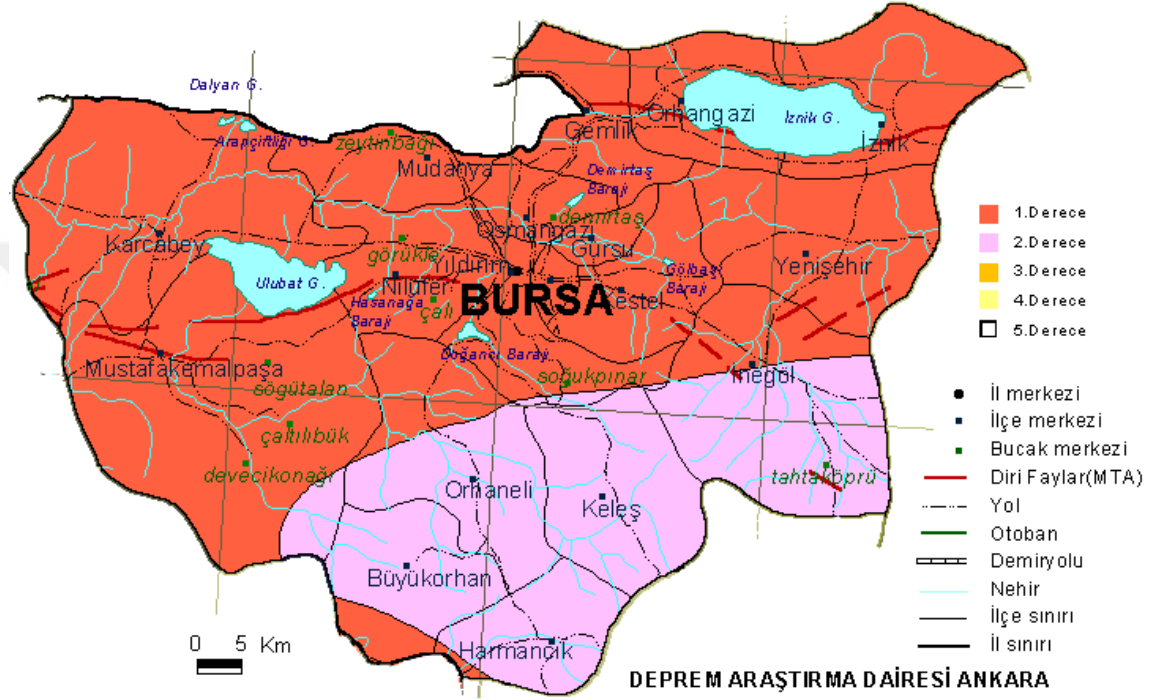
Çalışmaya konu olacak Bursa bölgesi Kuzey Anadolu Fay Hattının güney kolu üzerinde yer almaktadır. Kuzey Anadolu Fay Hattı (KAF), dünyanın en hızlı hareket eden ve en aktif sağ-yanal atımlı faylarından biridir. KAF sistemi, Anadolu bloğunun, güneyde Arap Plakası senede 25 mm'leri bulan hızlı sıkıştırma hareketi ve kuzeyde neredeyse hiç hareket etmeyen Avrasya Plakası'nın arasında kalması ve bu sebeple batıya doğru açılma şeklinde hızla hareket etmesi sebebiyle yüksek sismik aktivite göstermektedir (Karagöz).



**Şekil 2.19.** Kuzey Anadolu Fay hattı (Bektaş ve Eyüboğlu)

Bursa tarih boyunca birçok yıkıcı depremler geçirmiştir. Osmanlı Döneminde Bursa ve çevresini etkileyen depremler 1508, Mayıs 1556, Ağustos 1668, 1674, Ağustos 1705, Mayıs 1719, 1754, Mayıs-Ağustos 1766, 1794 ve son olarak 1855 depremleridir. Halk arasında Küçük Kıyamet olarak adlandırılan 1855 yılında meydana gelen iki şiddetli deprem, tarihi eserlerin yanı sıra birçok ev ve dükkân gibi binaların büyük ölçüde hasar görmesine ve bir kısmının da tamamen yıkılmasına sebep olmuştur. Birincisi 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). Ayrıca Yoğurt Hanı'nda bulunan ve depremden dolayı yıkılan kahvehane'de çıkan yangının lodos tesiriyle yayılması neticesinde, 500 kadar cami, han, hamam ve evin yansırı, 1.000 den fazla dükkânın yanıp yıkıldığı belirtilmektedir. Günümüzde de halen aktif faylar üzerinde yer alan Bursa ilinin birçok ilçesi ve merkezi 1. Derecede deprem bölgesindedir (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. Bursa deprem haritası

### 2.3.3. Yapı performansının doğrusal olmayan yöntemlerle belirlenmesi

Deprem etkisi altında mevcut yapıların performanslarının belirlenmesi ve güçlendirme analizleri için kullanılacak doğrusal olmayan hesap yöntemlerinin amacı, verilen bir deprem için sünek davranışa ilişkin plastik şekildeğiştirme istemleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet istemlerinin hesaplanmasıdır. Daha sonra bu istem büyüklükleri, tanımlanmış olan şekil değiştirme ve iç kuvvet kapasiteleri ile karşılaştırılarak, kesit ve yapı düzeyinde yapısal performans değerlendirilmesi yapılacaktır (DBYBHY-2007).

Ülkemizdeki DBYBHY-2007 yönetmeliğinde doğrusal olmayan analiz yöntemleri, Artımsal Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi, Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi ve Zaman

Tanım Alanında Hesap Yöntemidir. İlk iki yöntem, bu yönetmelikte doğrusal olmayan deprem performansının belirlenmesi ve güçlendirme hesapları için temel alınan Artımsal İtme Analizinde kullanılacak olan yöntemlerdir.

Zaman tanım alanında hesap yapay, kaydedilmiş veya benzeştirilmiş yer hareketlerinin taşıyıcı sistemdeki doğrusal olmayan davranış göz önüne alınarak sistemin hareket denkleminin adım adım entegre edilmesine dayalıdır. Analiz sırasında her bir zaman artımında yapıda meydana gelen yerdeğiştirme, plastik şekil değiştirme ve iç kuvvetler ile bu büyüklüklerin deprem istemine karşı gelen maksimum değerleri hesaplanır. Kaydedilmiş veya benzeştirilmiş yer hareketlerinin kullanılması durumunda en az üç deprem yer hareketi üretilmesi gereklidir.

Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi, taşıyıcı sistemin davranışını temsil eden yeteri sayıda doğal titreşim mod şekli ile orantılı olacak şekilde monotonik olarak adım adım arttırılan ve birbirleri ile uygun biçimde ölçeklendirilen modal yerdeğiştirmeler veya onlarla uyumlu modal deprem yükleri esas alınarak Mod Birleştirme Yönteminin artımsal olarak uygulanmasına dayalıdır.

Artımsal Eşdeğer Deprem Yüğü Yönteminin amacı, birinci (deprem doğrultusunda hakim) titreşim mod şekli ile orantılı olacak şekilde, deprem istem sınırına kadar monotonik olarak adım adım arttırılan eşdeğer deprem yüklerinin etkisi altında doğrusal olmayan itme analizinin yapılmasıdır. Düşey yük analizini izleyen itme analizinin her bir adımında taşıyıcı sistemde meydana gelen yerdeğiştirme, plastik şekildeğiştirme ve iç kuvvet artımları ile bunlara ait birikimli (kümülatif) değerler ve son adımda deprem istemine karşı gelen maksimum değerler hesaplanacaktır. Yapılan itme analizi ile, koordinatları “tepe yerdeğiştirmesi – taban kesme kuvveti” olan itme eğrisi elde edilecektir. İtme eğrisine uygulanan koordinat dönüşümü ile koordinatları “modal yerdeğiştirme – modal ivme” olan modal kapasite diyagramına dönüştürülecektir. Tez kapsamında yapılan performans analiz itme analizi olup bu yönteme benzetilmiştir.



❖ **İtme analizinde kullanılacak deprem istem sınırı için spektral yer değışiminin hesabı:**

İlk olarak yapıya etkiyecek elastik spektral ivmeler  $S_{ae}(T)$  tespit edilir.

$$A(T)=A_0 I S(T) \quad (2.105)$$

$$S_{ae}(T)=A(T)g \quad (2.106)$$

Burada  $A_0$  etkin yer ivmesi katsayısı,  $I$  bina önem katsayısı,  $A(T)$  spektral ivme katsayısıdır. Nonlineer spektral yerdeğıştirme,  $S_{di1}$ , itme analizinin ilk adımında, doğrusal elastik davranış esas alınarak hesaplanan birinci (hakim) moda ait  $T_1$  başlangıç periyoduna karşı gelen doğrusal elastik (lineer) spektral yerdeğıştirme  $S_{de1}$  'e bağılı olarak elde edilir.

$$S_{di1}=C_{R1} S_{de1} \quad (2.107)$$

$$S_{de1} = \frac{S_{ae1}}{(\omega_1^{(1)})^2} \quad (2.108)$$

Burada  $C_{R1}$  Spektral yerdeğıştirme oranıdır.  $T_1$  başlangıç periyodunun, ivme spektrumundaki karakteristik periyod  $T_B$ 'ye eşit veya daha uzun olması durumunda ( $T_1 \geq T_B$  veya  $(\omega_1)^2 \leq (\omega_B)^2$ , doğrusal elastik olmayan (nonlinear) spektral yerdeğıştirme  $S_{di1}$ , eşit yerdeğıştirme kuralı uyarınca doğal periyodu yine  $T_1$  olan eşlenik doğrusal elastik sisteme ait lineer elastik spektral yerdeğıştirme  $S_{de1}$  'e eşit alınacaktır. Eğer ( $T_1 < T_B$  veya  $(\omega_1)^2 > (\omega_B)^2$  ise spektral yerdeğıştirme oranındaki  $C_{R1}$  için ardışık yaklaşımla aşağıdaki hesapları yapmak gerekir.

-İtme analizi sonucunda elde edilen modal kapasite diyagramı, yaklaşık olarak iki doğrusal (bi-lineer) bir diyagrama dönüştürülür. Bu diyagramın başlangıç doğrusunun eğimi, itme analizinin ilk adımındaki ( $i=1$ ) doğrunun eğimi olan birinci moda ait öz değere eşit alınır.  
-Ardışık yaklaşımın ilk adımında  $C_{R1} = 1$  kabulü yapılarak, eşdeğer akma noktası'nın koordinatları eşit alanlar kuralı ile belirlenir.

$$C_{R1} = \frac{1 + (R_{y1} - 1)T_B / T_1^{(1)}}{R_{y1}} \geq 1 \quad (2.109)$$

Bu bağıntıda  $R_{y1}$  birinci moda ait *dayanım azaltma katsayısı*'nı göstermektedir

$$R_{y1} = \frac{S_{ae1}}{a_{y1}} \quad (2.110)$$

Aynı işlemler elde edilen grafiğe tekrar uygulanarak moda ait maksimum yer değiştirme tespit edilir.

❖ **İtme analizinde modal ivme ve modal yerdeğiştirmenin tespiti:**

İlk aşamada, sabit yük dağılımına göre yapılan itme analizinden koordinatları “tepe yerdeğiştirmesi – taban kesme kuvveti” olan itme eğrisi elde edilecektir. Daha sonra modal analizdeki mod çözümlenmesi esaslarına göre modal yerdeğiştirme ve modal ivme dönüşümü yapılır.

(a) (i)'inci itme adımında Modal ivme, hareket denkleminin ivme bileşeni olan  $F=ma$  temel denklemine göre elde edilecektir.

$$a_1^{(i)} = \frac{V_{x1}^{(i)}}{M_{x1}^*} \quad (2.111)$$

Burada  $a_1^{(i)}$  i'inci adımdaki modal ivme,  $V_{x1}^{(i)}$  i'inci adımdaki taban kesme kuvveti ve  $M_{x1}^*$  x doğrultusunda 1. mod etkin kütesidir.

(b) (i)'inci itme adımında birinci (deprem doğrultusunda hâkim) moda ait modal yerdeğiştirme  $d_1^{(i)}$  'nin hesabı için aşağıdaki bağıntıdan yararlanılır.

$$d_1^{(i)} = \frac{u_{x1}}{\phi_{x1} \Gamma_{x1}} \quad (2.112)$$

Birinci (deprem doğrultusunda hakim) moda ait modal katkı çarpanı  $\Gamma_{x1}$ , katılım çarpanının  $L_{x1}$ 'in genelleştirilmiş (modal) kütle  $M_1$ 'e bölünmesiyle elde edilir.

$$\Gamma_{x1} = \frac{L_{x1}}{M_1} \quad (2.113)$$

Burada  $L_n$  ve  $M_n$  aşağıdaki denklemlerden bulunur.

$$L_n = \phi_n^T m \iota \quad M_n = \phi_n^T m \phi_n \quad (2.114)$$

Eğer kütle belirli seviyelerde toplanır ve etki vektörü  $\iota=\gamma=1$  olursa denklem (2.115) aşağıdaki halini alır.

$$L_n = \sum_{j=1}^N m_j \phi_{jn} \quad M_n = \sum_{j=1}^N m_j \phi_{jn}^2 \quad (2.116)$$

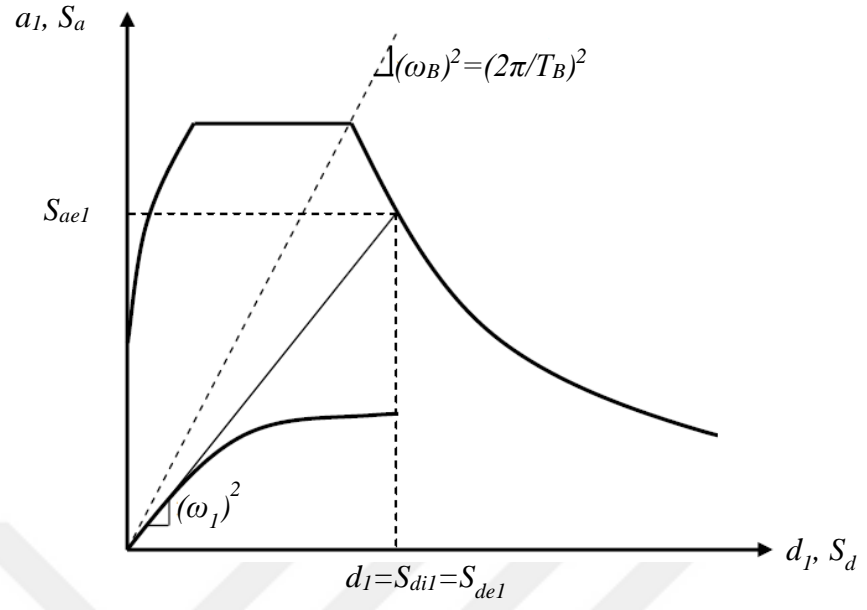
$\phi_{jn}$  n vektörünün j bileşenini,  $m_j$  ise j serbestliğine atanan kütleyle ifade eder. Tahmin edileceği gibi tüm modlardaki etkin kütlelerin toplamı ile binanın toplam kütlesi birbirine eşittir.

$$\sum_{n=1}^N M_n^* = \sum_{j=1}^N m_j \quad (2.117)$$

Burada ifade edilmesinin faydalı olacağı bir diğer denklem ise etkin kütle ve modal kütle arasındaki ilişkidir.

$$M_n^* = \Gamma_n L_n = \frac{(L_n)^2}{M_n} \quad (2.118)$$

Sonuç olarak gerekli denklemler kullanılarak elde edilen veriler istem diyagramında çizilerek ifade edilir (Şekil 2.21). Yapının deprem istemine karşı davranışı hem grafikten hem de kritik adımdaki analizden yorumlanarak yapının muhtemel depreme karşı performansı elde edilir.



Şekil 2.21. Talep (İstem) diyagramı

### 3. KAYNAK ÖZETLERİ

İnşaat mühendisliği kapsamında tarihi yapıların araştırılması son zamanlarda önem kazanan bir konudur. Ancak aşağıdaki literatür araştırmasının genelinde de görüleceği üzere daha önceleri tarihi bir yapının araştırılması, bu yapının doğal afetlerden veya insan kaynaklı etkilerden dolayı hasar görmesini gerektirmekteydi. Ancak tarihi yapıların korunması dünya genelinde önemli bir duruma geldiği için günümüz araştırmalarında yapıların hasar görmeden önce değerlendirilmesi ve gerekli tedbirlerin alınmasına yönelik çalışmalar yer almaktadır. Bu bölümde tarihi yığma yapı ve minarelerle ilgili araştırmalar özet şeklinde ifade edilmeye çalışılmıştır.

Arıoğlu (1997) Mimar Sinan'ın ve bu dönem birçok mimarın da kullandığı küfeki taşııı incelemişlerdir. Araştırmada üç eksenli deney ve çift zımbalama deneyi kullanılmıştır. Böylece küfeki taşıının mekanik özelliklerini tanımlayan amprik formüller geliştirmişlerdir.

Lourenço (1998) yığma yapılar üzerindeki boyut etkisini araştırmıştır. Çalışmasında tek noktadan yüklenen duvar, üst ucu mesnetlenmiş ve mesnetlenmemiş duvar olmak üzere üç farklı yapı sistemini üç farklı mekanizmayla incelemiştir. Birinci mekanizmada çekme hâkim, ikinci mekanizmada kesme, üçüncü de ise basınç hâkimdir. Bu sistemleri üç farklı sonlu elemanlar boyutunda incelemiştir. Çalışma sonucunda çekme kırılmasında boyut ekişinin önemli olduğunu, kesme kırılmasında ihmal edilebileceği, basınç kırılmasında da oldukça önemli olduğunu bulmuştur.

El-Attar ve ark. (2001) Dahshur-Mısır'da 1992 yılında meydana gelen depremin Memluk mimari stiline sahip minarelerde oluşturduğu hasar incelenmiştir. Minareler üzerindeki incelemeyi daha iyi anlamak için sonlu elemanlar programında geçmişe ait 3 deprem kaydı kullanılarak minareler üzerinde gerilme ve yer değiştirmeler araştırılmıştır.

Ünay (2006) çalışmasında tarihi yığma yapıların yapısal güvenliği üzerinde durmuştur. Tarihi yığma minareleri, geneli mukavemetin temel ilkeleri olan 9 maddelik kabul ile normal kuvvet ve eğilme momenti etkisi altındaki kolonlara benzetmiştir. Malzemeyi lineer elastik malzeme kabul ederek yapının normal kuvvet-eğilme momenti karşılıklı

etkileşim diyagramının çizileceğini ve bu sayede güvenlik faktörünün oluşturulacağını öngörmüştür. Ünay çalışmasına örnek vermek amacıyla Antalya İlinde olan Yivli Minareyi sonlu elemanlar metoduyla Sap2000 programında incelemiştir. Program çıktısında oluşan gerilme ve moment değerlerini etkileşim diyagramında kullanarak yapının güvenliğini kontrol etmiştir.

Özen (2006) tez çalışmasında Hasankeyf 'te yer alan yığma bir kapıyı dikkate almıştır. Bu kapıyı Sap2000 ve Ansys programlarında lineer ve nonlineer olarak iki farklı şekilde analiz yapmıştır. Bunun sonucun iki programdan da elde edilen frekans değerleri oldukça yakın çıkmıştır. Tezin sonucunda düşük yük seviyeleri için lineer ve nonlineer analiz sonuçlarının çok yakın çıktığını bularak, buna benzer düşük yük seviyelerinde olan tarihi yığma yapılar hakkında fikir sahibi olmak için lineer analizin yeterli olacağı kanısına varmıştır.

Temuz (2007) tez çalışmasında Türkiye'de betonarme minarelerle ilgili yönetmelik eksikliğine değinmiştir. Yüksekliği 42 m olan betonarme bir minarenin TS498 ve AC307/98 'e göre rüzgâr hesabının üzerinde durmuştur. Gerekli deprem analizini de yaptıktan sonra minarenin betonarme hesabını yaparak minare üzerinde oluşan maksimum gerilmeleri incelemiştir.

Ertek ve Fahjan (2007) Osmanlı Döneminde yapılan minareleri kendi içinde sınıflara ayırmışlar, yapım aşamaları ve kullanılan malzeme özelliklerinden bahsetmişlerdir. Bunlara ek olarak bir minare üzerinde sonlu elemanlar programı kullanarak kabuk eleman, solid eleman ve merdivenli, merdivensiz olarak dört modelin deprem performansını incelemişlerdir.

Doğangün ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışmada geleneksel Türk yığma minarelerin mimari ve yapısal özelliklerine değinilmiştir. Bu kapsamda yapım metotlarından ve malzeme özelliklerinden bahsedilmiştir. Buna ilaveten sismik hareketlere karşı minarelerin hasar tipleri anlatılmıştır.

Doğangün ve ark. (2008) 20 m, 25 m, 30 m yüksekliğinde ve diğer koşulların eşit olduğu üç farklı tarihi yığma minarenin dinamik davranışlarını araştırmışlardır. Çalışmanın devamında Düzce 1999 ve Kocaeli 1999 depremi ivme kayıtları bu minarelere uygulanmış ve yer değiştirme sonuçları TDY-2007' ye göre kontrol edilmiştir. İncelenen camilerde yatay yer değiştirmelerin yönetmelik şartlarını sağlamadığı görülmektedir. Ayrıyeten analizlerde maksimum gerilmeler camilerin hangi bölgesinde olduğu tespit edilerek malzeme kapasitesi ile karşılaştırma yapılmaktadır.

El-Attar ve ark. (2008) Mısırda bulunan Al-Sultaniye ve Qesun camilerinin minarelerinde oluşan sismik riski Shape memory alloy (SMA) sönümleyiciler ve minare alt kısımlarında oluşturulacak ön gerilmelerle azaltmaya çalışmışlardır. Bu çalışma için zemin ve malzeme araştırarak ansys programında nonlinear solid stone model yardımıyla minarelerin analizlerini yapmışlardır. Son olarak geçmiş deprem kayıtlarını kullanarak güçlendirme öncesi ve sonrası basınç, çekme ve ivme-zaman grafiklerini karşılaştırmışlardır. Güçlendirme sonrası bu grafiklerin oldukça azaldığını görmüşlerdir.

Acar (2009) Yüksek lisans tezinde anıtsal kule türü yapıların deprem davranışlarının araştırılması ve depremde meydana gelecek hasarları azaltmak için alternatif yöntemler geliştirilmesi üzerinde durmuştur. Çalışmada örnek bir minareyi eşdeğer deprem yükü yöntemi, mod birleştirme yöntemi, zaman tanım alanında hesap yöntemini kullanarak minareyi payandalı ve payandasız şekilde incelemiştir.

Bayraktar ve ark. (2009) Türk mimarisine sahip betonarme minarelerin deneysel ve analitik yöntemleri kullanarak yapısal özelliklerini tespit etmeye çalışmışlardır. Yapısal özelliklerden kastedilen minarenin doğal titreşim periyodu, ilk yedi mod şekli ve sönüm oranıdır. Bu çalışmada Trabzon İlinden seçilen bir minare esas alınmıştır. Deneysel yöntemde yapıya ivmeölçerler bağlayarak gerekli veriler toplanmıştır. İvmeölçerler tek yönlü ve 3 yönlü olarak iki farklı şekilde uygulanmıştır. Daha sonra bu veriler operasyonel modal analiz yönteminin Peak Picking (PP) ve Stochastic Subspace Identification (SSI) metotları yardımıyla kullanılabilir hale getirilmiştir. Sönüm oranının tespiti için SSI metodu kullanılmıştır. İvmeölçerler tek yönlü ve 3 yönlü olarak iki farklı şekilde uygulanmıştır. Numerik hesaplama kısmında ise Ansys 3D solid186 sonlu

elemanlar modeli kullanılmıştır. Sonuçlar bölümünde ise SSI, PP ve Ansys program sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bayraktar ve ark. (2010) Trabzon ilinde bulunan İskender Paşa Cami minaresinin modal parametrelerini Peak Picking (PP) ve Stochastic Subspace Identification (SSI) teknikleri ile çevresel titreşim testinden bulmuşlardır. Daha sonra sonlu elemanlar yöntemiyle Ansys Programında minareyi analitik olarak çözmüşlerdir. Deneysel ve analitik verileri karşılaştırarak analitik çözümde yer alan mesnet koşulları ve malzeme gibi parametreleri düzelterek modeldeki hata oranını %27 'den %5 'e kadar azaltmışlardır. Bu işlemlerden sonra minarenin dinamik deprem analizini gerçekleştirmişlerdir. Bunun için Erzincan deprem kaydının 12,5 saniyesi kullanılmıştır. Hareket denklemini çözümü Newmark metodu ile yapılmıştır. Deprem analiz sonucun minarenin küp ve gövde bölümün hasar olabileceği kanısına varılmıştır.

Kurugöl ve ark. (2010) araştırmalarında Anadolu'da Bizans dönemde yapılan kale yapılarında kullanılan tuğlaların fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Örnek numuneler için Amasra, İstanbul ve Kütahya illeri seçilmiştir. İnceleme yapılan iki şehrin Bursa'ya komşu iller olması tez çalışmasında elde edilen sonuçların değerlendirilmesi açısından artıdır.

Mortezaei ve ark. (2010) İran'ın Semman İlinde bulunan Masjed-e-Jam Camisini incelemişlerdir. Araştırmalarında yığma malzeme modeline oldukça fazla yer ayırmışlardır. Analizlerinde caminin kubbe ve minare kısmına yer vermişlerdir. Sonlu elemanlar modeli için Nonlams programı kullanılmış olup lineer statik, nonlinear statik, sismik ve modal analizleri gerçekleştirilmiştir. İlaveten mevcut çatlaklar için farklı güçlendirme teknikleri analizler sonucu karşılaştırılmıştır

Şahin ve ark. (2010) çalışmalarında Karadeniz Teknik Üniversite Kampüsü içindeki betonarme minarenin ilk yedi mod şeklini, sönüm oranını, doğal titreşim frekansını çevresel titreşim testi ve analitik yöntemlerle incelemişlerdir. Çevresel titreşim testinin yapıldığı signalcad programından aldıkları verileri modalcad yazılımına aktarmışlardır. Burada the operating vectors (OV) method, the complex exponential (CE) method ve the polyreference time domain (PTD) method olmak üzere üç farklı metotla mod şekillerini,



frekanslarını ve sönüm oranlarını bulmuşlardır. İlaveten Ansys Programında analiz yaparak tüm verileri birbirleri karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak frekanslar ve mod şekilleri çok benzer çıkmasına rağmen sönüm oranlarında farklı sonuçlar elde edilmiştir.

Hacıfendioğlu (2010) toprağın mevsime bağlı olarak donması durumunda deprem hareketini dikkate alarak yığma minare-zemin etkileşim durumuna bağlı olarak minarenin tepkisini incelemiştir. Bu çalışmada don derinliklerine, zemin türlerine ve zemin sıcaklığına bağlı olarak Kocaeli Depreminin minareye etkisi üzerinde durmuştur. Çalışmada Samsun ilinde yer alan Ulucami minaresi ve 40x30x40 m boyutlarında bir zemin Ansys programında oluşturulmuştur. Zemin-yapı arasına viskoz sönümleyiciler tanımlanmıştır. Analiz sonuçlarında don sıcaklığı düştükçe ve don derinliği arttıkça zeminden kaynaklı olarak minarenin geçiş bölgesinde oluşan gerilmeler azalmıştır. Zemin yumuşadıkça ise geçiş bölgesinde oluşan bu gerilmeler artmıştır.

Pena ve ark. (2010) Hindistan'ın Delhi şehrinde yer alan Qutb Minaresini incelemiştir. İnceleme kapsamında öncelikle modal test gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise üç boyutlu katı, üç boyutlu kiriş ve iki boyutlu düzlem olarak sonlu elemanlar programında modelleyip itme ve dinamik analizler yapılmıştır. İki analiz sonuçlarını her modellemeye göre yorumlanmıştır.

Hacıfendioğlu ve ark. (2011) rastgele bir patlama ve depreme karşı minarenin dinamik tepkisini araştırmışlardır. Çalışmada Samsun ilinde yer alan Ulucami minaresi ansys programındaki Solid186 üç boyutlu analiz tipiyle çözülmüştür. Patlama ile yapılan araştırmada patlayıcı olarak kullanılan TNT'nin uzaklığının ve miktarının minareye etkisini araştırmışlardır. İkinci olarak ise zemin durumunun Kocaeli deprem kayıtları kullanılarak minareye etkisi incelenmiştir. Sert ve orta zemin türlerinin stokastik dinamik tepkiye etkisinin az olduğu görülürken yumuşak zeminlerde bu değer oldukça artmıştır. En büyük hasarların geçiş bölgesinde ve balkon kapısının olduğu bölgede tespit edilmiştir.

Altunışık (2011) tarafından yapılan çalışmada yığma minarelerin fiber polimer (FRP) malzeme ile güçlendirilmesinden önce ve sonra dinamik davranışı incelenmiştir.

Çalışmada Erzincan 1992 depremi verileri kullanılarak Trabzon ili içinde bulunan İskender paşa Camii ele alınmıştır. Analizler sonlu elemanlar programı olan ansys üzerinde gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucu güçlendirme sonrası minarenin periyodunda ve oluşan gerilmelerde dikkate değer bir azalma görülmüş olup minarede oluşan yer değiştirmeler yaklaşık %60 oranında azalmıştır.

Örmecioğlu ve ark. (2011) araştırmalarında Yivli Minarenin yapısal özelliklerini yani geometrisini ve malzeme özelliklerini açıklamışlardır. Daha sonra sonlu elemanlar yöntemini kullanarak Sap2000 programında TDY2007'ye göre bu caminin sismik davranışını incelemişlerdir.

Parzysz (2011) Osmanlı Devleti döneminde inşa edilen Türkiye'deki minarelerin geometrik özelliklerini araştırmıştır. Çalışmasında özellikle kaide ile gövde arasında geçişi sağlayan küp bölümünün geometrik şekil tiplerine değinmiştir. Bağlantı elemanı görevini üstlenen bu bölümün deprem ve rüzgâr gibi yüklerin karşılanmasında önem taşıdığını bir kez daha vurgulamıştır.

Türk ve Coşkun (2012) çalışmalarında Dolmabahçe Cami minaresini esas alarak tarihi yığma minarelerin sismik davranışı ve güçlendirilmesi üzerinde durmuşlardır. Araştırmalarında tarihi yığma minarelerde kullanılan küfeki taşının özelliklerine geniş bir ayırmışlardır. Minarenin dinamik davranışının tespitini kullanılan malzemeyi lineer elastik kabul ederek sonlu elemanlar programında gerçekleştirilmiş olup deneysel test uygulanmamıştır. Minarenin ilk beş modunu hesaplandıktan sonra deprem performansı gerçekleştirilmiştir. Minarenin deprem sonrası hasar göreceği tespit edilmiştir. Bu yüzden minarenin geçiş bölgesine ve kritik gerilmelerin olduğu bölgelere FRP kullanılarak güçlendirme sonrası minarenin durumu incelenmiştir.

Oliveira ve ark. (2012) İstanbul 'da Ayasofya Cami minaresinin de içinde olduğu 11 adet minareyi çalışmalarına konu edinmişlerdir. Çalışmalarında bu minarelerin ilk sekiz modunu, frekansını ve sönüm oranını bulmuşlardır. Deneysel testlerle sonlu elemanlar modelini doğrulayarak minarelerin ilk periyotları için hata oranı %30 geçmeyecek ampirik bir formül geliştirmişlerdir. Üç minare için tepki spektrum analizi ve zaman

tanım alanında analiz yapılarak deprem risk durumu araştırılmıştır. Bu çalışmayı yaparken minarenin zemin durumu çevresindeki binaların zeminine göre belirlenmiştir. İleriki çalışmalarında nonlineer analiz ve güçlendirme tekniklerini araştırmayı düşünmektedirler. Bunun için malzeme ve zemin durumu araştırılması gereklidir. Bu sayede deneysel maketler yapılarak güçlendirme metotları daha iyi araştırılacaktır.

Baştürk (2013) Yüksek lisans tezinde yedi adet tarihi yığma minareyi yerinde inceleyip geometrik ve malzeme özelliklerini çıkartmıştır. Çevresel titreşim testi uygulayarak deneysel modal analiz yöntemiyle mod şekilleri ve frekansları elde edilmiştir. Çalışmanın devamında sonlu elemanlar programında minare modelleri oluşturularak değerler karşılaştırılmıştır.

Pekgökgöz ve ark. (2013) çalışmalarında yığma minarelerin düşey yöndeki çekme mukavemetinin az olduğunu ve bu yapılarda oluşan hasarların çoğunlukla bu yüzden gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Bu yüzden yığma minarelerde düşey ard çekme metodunun uygulanmasını önermişlerdir. Çalışma kapsamında normal ve ard çekmeli yığma minarelerin dinamik davranışlarını sonlu elemanlar programı yardımıyla karşılatırmışlardır. Daha sonra normal ve ard çekmeli yığma minarelerin Erzincan 1992, Kobe 1995, Vrancea 1977, Kocaeli 1999 ve Northridge 1999 deprem kayıtları kullanılarak deprem performansları incelenmiştir.

Resta ve ark. (2013) tarihi yığma bir kulenin damage plasticity constitutive modeli kullanarak lineer olmayan sonlu elemanlar analizlerini gerçekleştirmiştir. Çalışma kapsamında ilk olarak malzeme modeli parametrelerinden viskozite ve dilation angle parametrelerinin malzeme modeline etkisini deneysel sonuçlarla karşılaştırarak incelemiştir. Daha sonra kule yapısının modelini kabuk ve katı model olarak oluşturularak modal analiz ve statik non-lineer analiz yapmıştır.

Tao ve ark. yığma kemer bir köprünün sonlu elemanlar modeli analizlerini deneysel sonuçlarla karşılatırmışlardır. Sonlu elemanlar modelinde yapıyı oluşturan tuğla ve harcı tek bir malzeme gibi homojen, ara yüz tanımlayarak ve ayrı ayrı tanımlayarak analiz

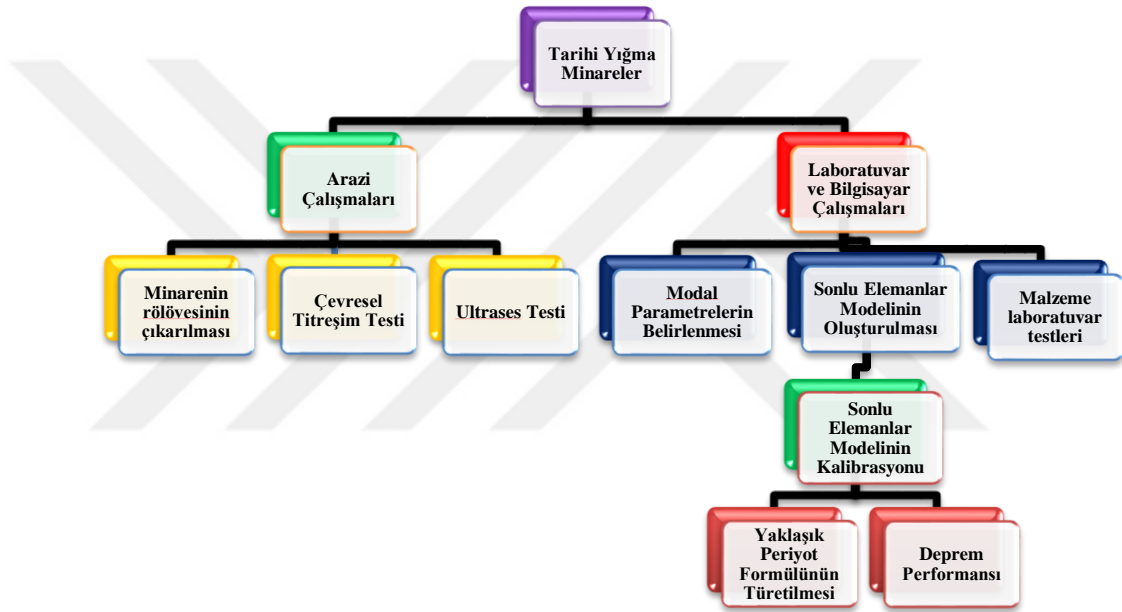
etmiştir. Homojen malzeme modelinde Seanz'in 1964 tarihinde türettiği plastik malzeme modelinden faydalanmıştır.

Hejazi va ark. (2015) İran'ın İsfahan ilinde bulunan 9 adet tarihi yığma minarenin yapısal davranışını incelemiştirler. Minare modelleri Ansys programında çekirdek ve merdivenler olmaksızın sadece dış duvarlar ve tüm elemanlar olmak üzere iki tip oluşturulmuştur. Modellerde William-Warnke kırılma ve Drucker-Prager akma modeli kullanılmıştır. Çalışmada dinamik karakterini belirlemek için modal analiz olmayıp malzeme araştırması yapılmıştır. Araştırmanın devamında sıcaklık, rüzgâr ve deprem yüklemeleri gerçekleştirilmiştir. Deprem yüklemesinde bölgede yer alan yaygın zemin kullanılarak Berkeley üniversitesinin kaydedilmiş 7 adet deprem ivme-zaman grafiği kullanılmıştır. Bazı depremlerde minareler zarar gördüğü için malzeme dayanımı ve sönüm oranının bunlarla ilgisi araştırılmıştır.

Literatürden de anlaşılabilceği üzere tarihi minareler konusunda bilimsel çalışmalar azdır. Gerek özel bir yapı tarzı olması ve gerekse bölgesel olarak belirli halklara hitap eden coğrafyalarda bulunuyor olması elbette ki bu azlığın açıklanması için yeterli olmayacaktır. Söz konusu yapıların kuvvetli bir rüzgâr etkisinde dahi hasar görebiliyor olması, diğer taraftan hemen bütün depremlerde önemli oranda göçmeler, bilimsel manada konunun ne denli çalışılma ihtiyacının olduğunun bir göstergesidir. Tüm bu gerekçeler ışığında bu çalışmada Osmanlı ve Selçuklu mimarisi örneklerinin sıklıkla kullanıldığı Bursa'da bulunan onlarca minarenin dinamik karakteristiklerinin tespiti, daha önce yapılmış benzer çalışmaların derlenmesi ve tüm bu sonuçların irdelenerek performanslarının değerlendirilmesi ve basit bir yaklaşım üretmek amaçlanmaktadır.

#### 4. METARYAL ve YÖNTEM

Çalışma kapsamında ilk olarak incelenecek minareler tespit edilmiştir. İnceleme neticesinde belirlenen minareler üzerinde araştırma yapmak için Bursa Vakıflar Genel Müdürlüğü ve Bursa Valiliği İl Müftülüğünden gerekli izinler alınmıştır. Çalışmaya başlamadan önce seçilen minarelere ilişkin literatür araştırması yapılmış ve minarelerin yapım tarihleri, gördükleri onarımlar hakkında fikir sahibi olunmuştur. Çalışma kapsamında kullanılan materyal ve yöntem şekil 4.1’de verilen işleyiş planına göre anlatılacaktır.



Şekil 4.1. Çalışma planı

Minarelerin geometrik özellikleri hakkında kayıtlı bir bilgi olmadığı için yerinde yapılan incelemeler sonucu minarelerin rölöveleri çıkartılmıştır. Bu aşamada dikkat edilen hususlar ileriki bölümde sunulmuştur. Geometrik özelliklerin belirlenmesi için lazer metre ve çelik şerit metreden faydalanılmıştır.

Yerinde yapılacak modal test olarak, çevresel titreşim testi seçilmiştir. Bu testin uygulanması için bölüm 2’de bahsedilen ivmeölçer, veri toplama ünitesi ve bilgisayara ihtiyaç vardır. İvmeölçerler belirli hassasiyet ve frekans aralıkları için tasarlandıklarından

çalışmada kullanılacak ivmeölçerin seçimi oldukça önemlidir. Çalışma kapsamına uygun olarak piezoelektrik hassas ivmeölçerler seçilmiştir ( Çizelge 4.1).

**Çizelge 4.1.** Kullanılan ivmeölçerlerin teknik özellikleri

İvmeölçer:	KB12VD -Piezoelektrik ivme ölçer		
Hassasiyet	10000 mV/g $\pm$ 5 %	Çalışma Sıcaklığı	-20 – 80 C
Lineer Frekan Aralığı	0.08 – 260 Hz	Ölçüler	R=50mm, H=37mm
Ölçüm Aralığı	-0.6 ~ 0.6 g	Toplam Kütle	150 gr

Çalışma kapsamında QUATTRO dört kanallı veri toplama ünitesi kullanılmıştır (Şekil 4.2). İvmeölçerlerden gelen sinyaller bu üniteye aktarılıp analog ortamdan dijital veri haline dönüştürülmüştür. Veri toplama ünitesinden aktarılan sinyaller Dataphysics tarafından hazırlanan SignalCalc 240 yazılımıyla işlenerek kullanılabilir hale getirilmiştir. Bu işleme süreci bölüm 2’de anlatılan tepki spektrumunun elde edilme sürecidir.



(a)



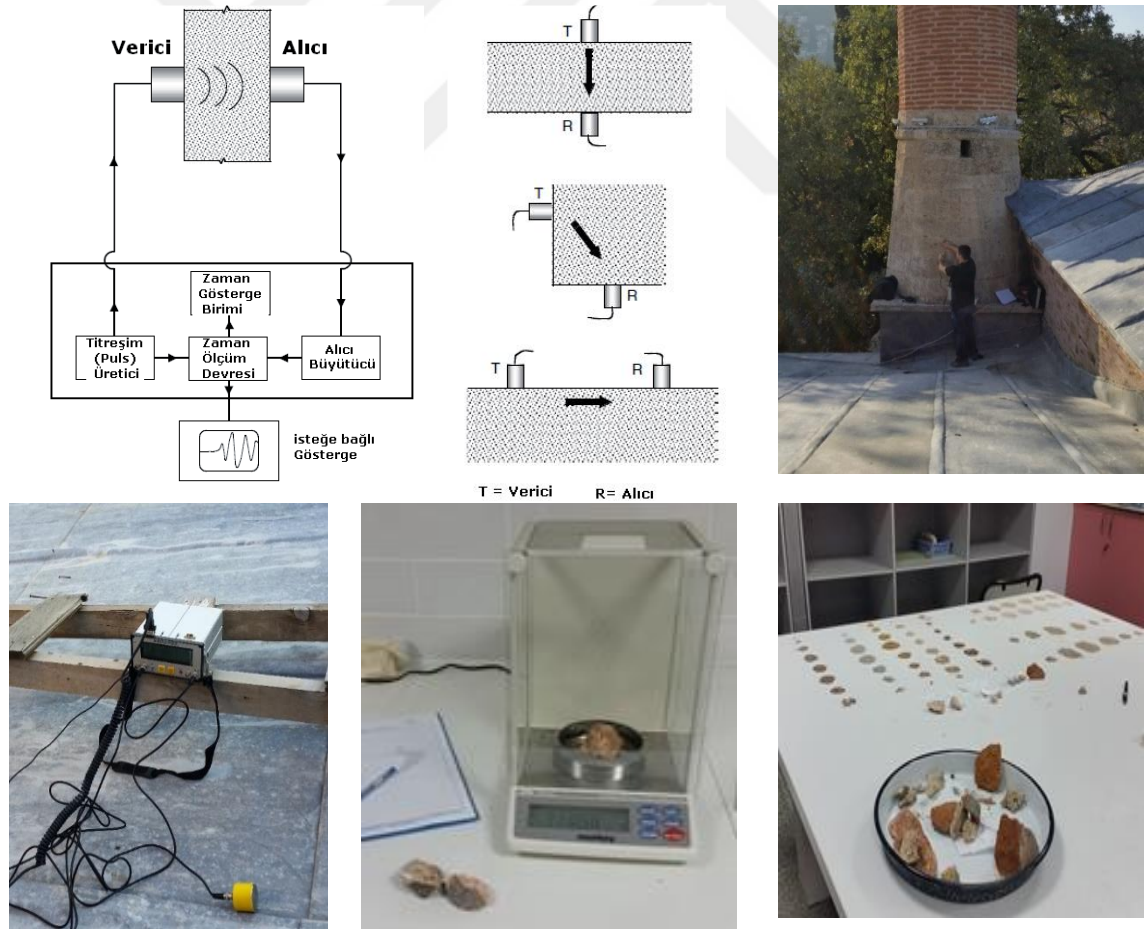
(b)

**Şekil 4.2.** KB12VD Piezoelektrik ivme ölçer (a) ve Quattro dört kanallı veri toplama ünitesi (b)

İncelemeye konu edilen tüm minarelerde ivmeölçerlerden iki tanesi petek dış duvarında (G3-G4), birbirine dik iki doğrultuda, şerefe taban seviyesinin 1,50-1,70 m üzerinde, diğer ikisi (G1-G2) ise iç kısımda yine birbirine dik doğrultuda, şerefe tabanından 0,50-1,00 m altında olacak şekilde çelik dübellerle yapıya sabitlenmiştir. İvmeölçerlerde tek numaralar kible yönünü çift numaralar ise kibleye dik yönde konumlandırılarak kayıt alınmıştır. İvmeölçerler uygun kablolar ile veri toplama ünitesine, veri toplama ünitesi de bilgisayara bağlanmıştır. Çalışmada 10 Hz, 25 Hz, 50 Hz ve 100 Hz olmak üzere 4 farklı

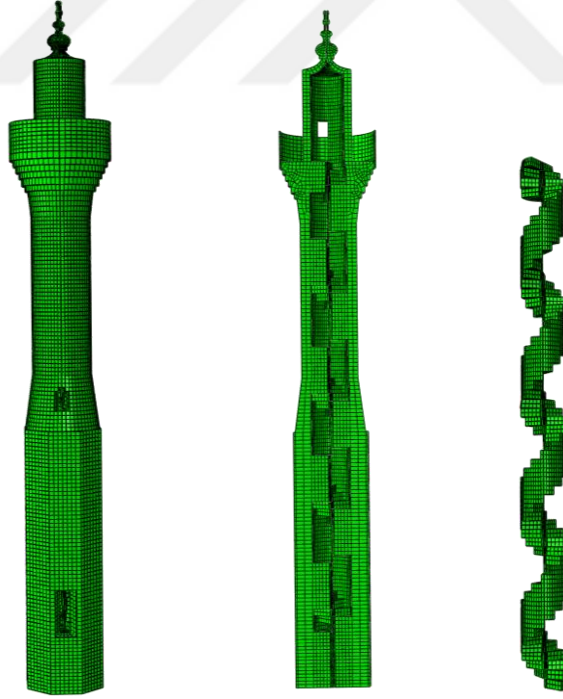
frekans aralığında ve yaklaşık 15 dakikalık ölçümler alınmıştır. Süre seçiminde yaklaşık 10 pencere kayıt alınmasına dikkat edilmiştir. Yukarıda ifade edilmeye çalışılan tüm bu uygulamalar bütün incelemeye konu edilen minareler için standart olarak uygulanmıştır. Ölçümlerden elde edilen veriler SignalCalc 240 tarafından işlenerek bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. İvmeölçerlerden alınan veriler gürültü gibi istenmeyen etkileri de içerdiğinden, bu etkilerin spektrumdan uzaklaştırılarak daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesi için filtreleme fonksiyonlarından Hamming pencereleme fonksiyonu kullanılmıştır. Daha sonra ivme kayıtları Peak-picking (klasik frekans alanlı yöntem) kullanılarak modal parametreler tespit edilmiştir. Yöntemle ilgili gerekli açıklamalar bölüm 2’de ifade edilmiştir.

Malzeme özelliklerinin tespiti için ultrases cihazı kullanılmıştır. Ultrases testinin uygulanması ve laboratuvar malzeme testleri şekil 4.3’te ifade edilmiştir.



Şekil 4.3. Arazide ultrases testi ve laboratuvar deneylerinden görünümeler

Tarihi yapıların geometrisi ve malzeme karmaşıklığı dikkate alındığında bu tür yapıların elle çözümü mümkün değildir. Bu yüzden böylesi yapıların bilgisayar ortamında nümerik yöntemlerle çözülmesi gereklidir. Çalışma kapsamında literatürde yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar metodu seçilmiştir. Sonlu elemanlar modelinin çözülmesi için Abaqus Cae (v13) programından faydalanılmıştır. Bu program, doğrusal ve doğrusal olmayan statik, dinamik, ısı transferi, akustik ve bağımlı mühendislik problemlerinin çözümünde araştırmacılara kolaylık sağlamaktadır. Minare elemanları modellenmesinde üç boyutlu katı (Solid) eleman tipi seçilmiş olup düzgün geometrili hexagonal mesh kullanılmıştır (Şekil 4.4). Sayısal modellemeler tamamlandıktan sonra modal parametrelerin belirlenmesi için frekans alanlı modal analiz uygulanmıştır. Daha sonra seçilen minare modellerine doğrusal olmayan itme analizi uygulanarak deprem performansı değerlendirilmiştir. Minareler modellenirken (G1-G3) ivmeölçerlerinin ölçüm aldığı yön x yönü, (G2-G4) ivmeölçerlerinin ölçüm aldığı yön y yönü olarak atanmıştır.



**Şekil 4.4.** Örnek bir minareye ait sonlu eleman modeli



## 5. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR ve İRDELEMELER

Çalışma kapsamında 15 adet tarihi yığma minare incelenmiştir. Araştırmalar iki ana safhadan oluşmaktadır. İlk olarak minarelerle ilgili arazi çalışması yapılmıştır. Arazi çalışmalarında minarelerin geometrik özellikleri, malzeme özellikleri, mesnetlenme koşulları belirlenmiş ve ivme kayıtları alınmıştır. Bursa genelinde tarihi yığma minarelerin yapımında tedariki kolay olmasından dolayı yaygın olarak dolu harman tuğlası ya da küfeki taşı kullanılmıştır. Tarihi yığma minareler üzerinde tahribatlı deney yapılmasına ve numune alınmasına izin verilmemektedir. Bu yüzden çalışma kapsamında tüm minareleri temsil edebilecek 4 adet minare seçilerek ultrases ve laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Arazi çalışmalarında son olarak minarelerde mevcut durumda bir hasar olup olmadığı belirlenmiştir.

Ofis çalışmalarında ise sonlu elemanlar programında minarelerin modelleri oluşturulmuş ve modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Arazide alınan ivme kayıtlarının güç spektrumları elde edilmiştir. Minare modellerinin modal analiz sonuçları ile spektrumlar karşılaştırılarak sonlu elemanlar modellerinin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyonu yapılmış seçilen minare modellerine itme analizi uygulayarak deprem performansına gerçekleştirilmiştir. Böylece muhtemel depremler için hasar bölgeleri ve düzeyleri belirlenmiştir. Diğer yandan 22 minarenin modal test ve modal analiz sonuçlarıyla geometrik özellikler arasında ilişki kurularak minarelerin doğal titreşim periyotları için ampirik bir denklemin temelleri oluşturulmuştur. Tüm bu bilgiler bu bölüm kapsamında sunulmaktadır.

### 5.1. Çalışmada İncelenen Malzeme Özellikleri

Çalışma kapsamında malzemenin mekanik özellikleri arazi ve laboratuvar deneyleri ile tespit edilmiştir. Arazi çalışmasında 4 farklı minareye ultrases testi uygulanmıştır. Bu minarelerin dört tanesinden küfeki numune örneği, iki tanesinden ise tuğla numune örneği alınmıştır. Bu numuneler üzerinde özgül ağırlık ve birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Birim hacim ağırlık ve ultrases deneyi sonuçları kullanılarak elastisite modülü elde edilmiştir.

Çizelge 5.1’de verilen:

**Birim hacim ağırlık ( $\beta_h$ )** : Bir cismin birim hacminin kütle miktarı olarak ifade edilir.

$$\beta_h = \frac{Kütle}{Hacim} = \frac{M}{V} = \frac{Etüv kurusu ağırlığı, G_k}{(Suya doygun ağırlık, G_d) - (Su içindeki ağırlık, G_{ds})} \quad (5.1)$$

**Özgül ağırlık ( $\gamma_s$ )** : Boşluksuz tane hacminin kütle miktarı olarak ifade edilir

$$\gamma_s = \frac{M_{tan e}}{V_{tan e}} = \frac{0,02 \text{ mm elekten geçen numune ağırlığı, } W}{(Suyun ilk hacmi, V_1) - (Suyun Son hacmi, V_2)} \quad (5.2)$$

**Komposite  $k$** : Bir cismin hacmindeki doluluk oranı olarak ifade edilir.

$$k = 100 \frac{\beta_h}{\gamma_s} \quad (5.3)$$

**Porozite,  $e$**  : Bir cisim hacimdeki boşluk olarak ifade edilir.

$$e = 100x(1 - k) \quad (5.4)$$

**Elastisite Modülü,  $E$** :

$$E = \beta_h \left( \frac{\text{Mesafe, mm}}{\text{Ses geçiş süresi, } \mu s} \right)^2 10^3 = Mpa \quad (5.5)$$

verilen veriler numunelerin şekli düzgün olmadığı için yukarıdaki denklemlerdeki gibi hesaplanmıştır.

**Çizelge 5.1. İncelenen malzemelerin özellikleri**

Minare Adı	Malzeme	Malzeme Rengi	Laboratuvar deneyleri					Arazi Sonuçları		Elastisite Modülü (N/mm <sup>2</sup> )
			Birim Hacim Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Kompozite	Porozite	Mesafe (mm)	Ses Geçiş Süresi (µsn)		
Şahadet	Küfeki 1	Krem	2,34	2,52	93,01	6,99	220,00	83,90	16109,00	
Şahadet	Küfeki 2	Krem	2,34	2,52	93,01	6,99	197,00	72,40	17346,12	
Şahadet	Küfeki 3	Krem	2,34	2,52	93,01	6,99	200,00	59,50	26471,17	
Muradiye (Doğu)	Tuğla 1	Koyu turuncu	1,39	2,78	48,51	51,49	200,00	120,00	3869,36	
Muradiye (Doğu)	Tuğla 2	Koyu turuncu	1,39	2,78	48,51	51,49	210,00	130,30	3618,19	
Muradiye (Doğu)	Tuğla 3	Koyu turuncu	1,39	2,78	48,51	51,49	200,00	139,00	2883,85	
Muradiye (Doğu)	Küfeki 1	Krem	2,20	2,45	89,69	10,31	200,00	78,40	14316,95	
Muradiye (Doğu)	Küfeki 2	Krem	2,20	2,45	89,69	10,31	200,00	85,30	12094,41	
Muradiye (Batı)	Küfeki 1	Krem	2,09	2,36	88,55	11,45	200,00	67,90	18133,64	
Muradiye (Batı)	Küfeki 4	Krem	2,09	2,36	88,55	11,45	200,00	77,40	13955,41	
Muradiye (Batı)	Küfeki 5	Krem	2,09	2,36	88,55	11,45	200,00	83,40	12019,67	
Muradiye (Batı)	Tuğla 1	Açık Turuncu	1,17	2,85	40,73	59,27	160,00	113,00	2345,68	
Muradiye (Batı)	Tuğla 2	Açık Turuncu	1,17	2,85	40,73	59,27	160,00	125,00	1916,93	
Emir Sultan (Batı)	Küfeki 1	Krem	1,77	2,64	67,04	32,96	250,00	84,60	15474,17	
Emir Sultan (Batı)	Küfeki 2	Krem	1,77	2,64	67,04	32,96	250,00	92,10	13056,56	
Emir Sultan (Batı)	Küfeki 3	Krem	1,77	2,64	67,04	32,96	250,00	82,80	16154,27	
Emir Sultan (Batı)	Küfeki 1	Kızıl	1,94	2,55	76,11	23,89	250,00	62,80	30796,52	
Emir Sultan (Batı)	Küfeki 2	Kızıl	1,94	2,55	76,11	23,89	250,00	61,00	32640,84	

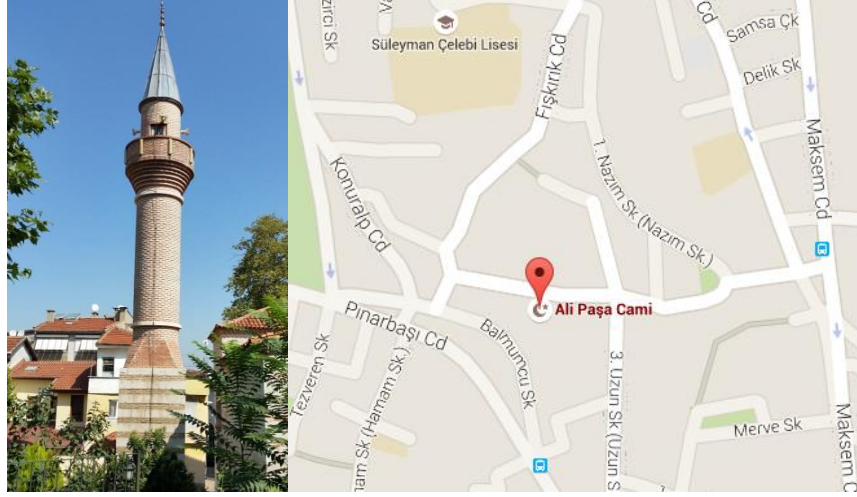
## 5.2. İncelenen Minareler ve Modal Parametreleri

### 5.2.1. Ali Paşa Cami

Ali Paşa Cami, Bursa Maksem'in batısındaki Ali Paşa Mahallesinde zaviye-cami, medrese, imaret ve hamamdan oluşan bir küllüye içinde yer almaktadır. Yıldırım Beyazıt'ın veziri Ali Paşa tarafından 1394 yılında Ters T biçimde mescit olarak yaptırılmıştır. 1551 yılında ise minber ilave edilerek cami halini almıştır. Cami birkaç defa yangın ve buna bağlı hasar görmüş ve tekrar yapılmıştır. En çok hasarı ise 1855 depreminde görmüş ve uzun yıllar ibadete kapalı kalmıştır. 2002 yılında cami ve minaresi onarıma girmiştir. Camiden ayrı olan minaresi bu esnada yeniden inşa edilmiştir (Şekil 5.1).

Minare kaidesi kare olup 1 küfeki taşı 3 tuğla almaşık düzende örülmüştür. Küp (yedizsekiz) bölümü kısa tutulup üçgen baklavali sistem aracılığıyla silindirik gövdeye geçiş sağlanmıştır. Şerefe altı stalaktitli (püskülsüz) inşa edilmiş olup minare açık şerefelidir. Şerefe korkulukları tuğla malzemesinde inşa edilmiştir. Şerefeye kadar çıkan merdivenler 1 taş 1 tuğla olarak 20 cm rıht yükseklikte ve 16 cm çapında çekirdek etrafında inşa edilmiştir. Petek duvarları tuğladan inşa edilmiş olup merdiven yaklaşık 5 basamak devam etmiştir.

Ali Paşa Cami minaresi için arazide alınan ivme kayıtlarından 4 farklı frekans aralığı için güç spektrumları elde edilmiştir. Ancak minarelerin x ve y yönündeki ilk üç mod, 25 Hz aralığında yer aldığı için çalışma kapsamında sadece bu aralıktaki spektrumlar verilmektedir (Şekil 5.2, Şekil 5.3). Arazide belirlenen geometrik özellikler yardımıyla minarenin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlarla sonlu elemanlar modeli karşılaştırılarak malzeme özelliklerinin ve mesnetlenme koşullarının kalibrasyonu sağlanmıştır. Kalibrasyon işleminin neticesinde elde edilen malzeme özellikleri çizelge 5.2'de verilmiş ve minare kaidesinin cami duvarından ayrık olduğu doğrulanmıştır.

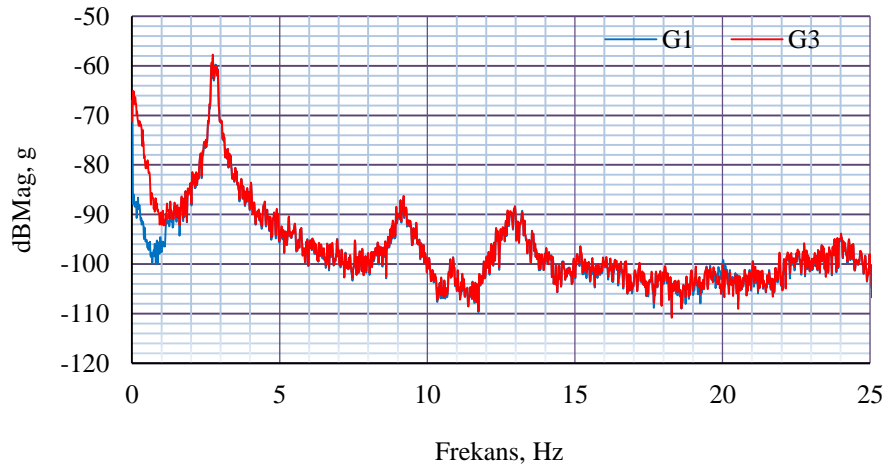


Şekil 5.1. Ali Paşa camii Minaresi ve konumu

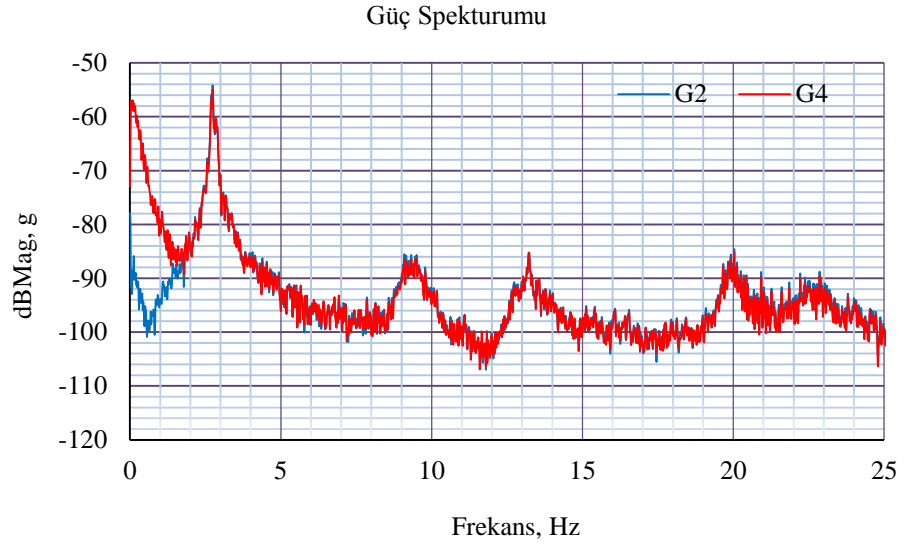
Çizelge 5.1. Ali Paşa Camii Minaresi malzeme ve geometrik özellikleri

Ali Paşa Camii Minaresi						
Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)	Merdiven Tipi
Kaide	Taş+Tuğla	Kare, L=2,520	R=1,330	0,595	6,380	Tek çıkış-iniş Çekirdekli
Küp	Tuğla+Harç	R=2,290	R=1,330	0,480-0,240	0,975	
Gövde	Tuğla+Harç	R=1,810	R=1,330	0,240	7,800	
Petek	Tuğla+Harç	R=1,810	R=1,330	0,240	2,925	
Külâh	Kurşun	-	-	-	2,000	
Minare Toplam Yüksekliği					20,080	

Güç Spekturumu



Şekil 5.2. Ali Paşa Camii G1 ve G3 ivmeölçerler verilerine ait güç spektrumu



**Şekil 5.3.** Ali Paşa Cami G2 ve G4 ivmeölçerler verilerine ait güç spektrumu

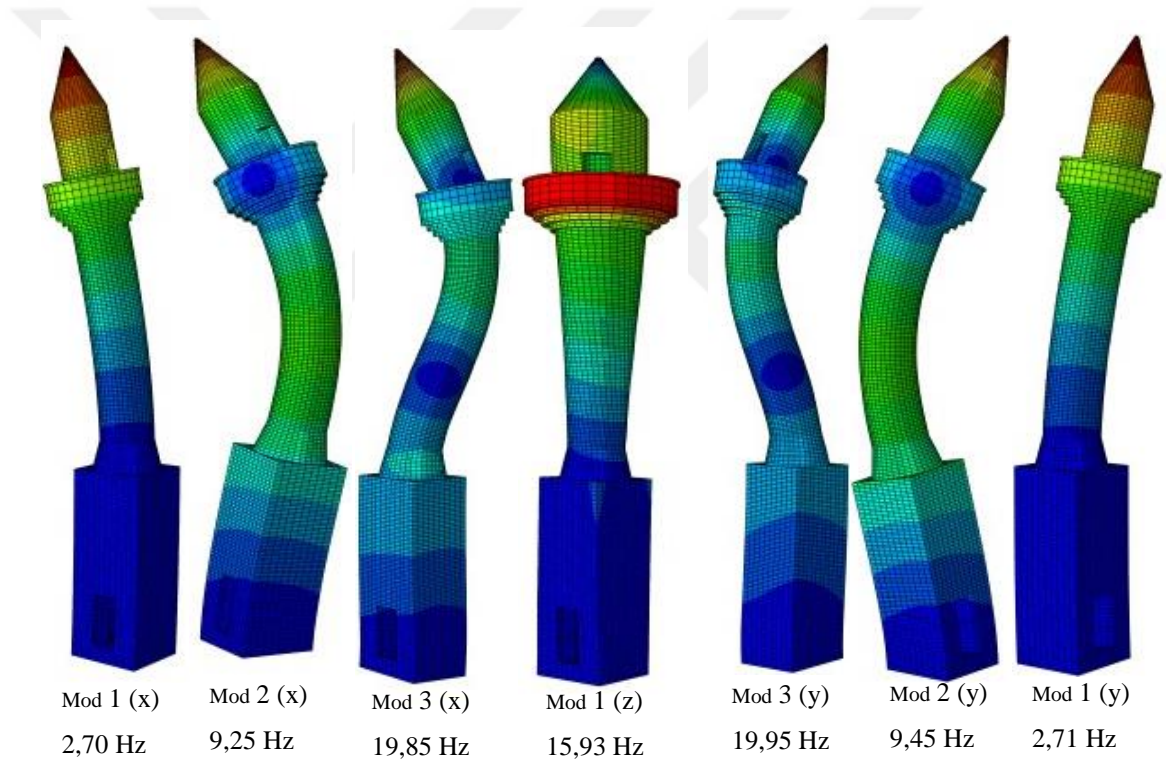
**Çizelge 5.2.** Ali Paşa Cami Minaresi malzeme özellikleri

Minare Bölümleri	Malzeme	Elastite Modulu (E) Mpa	Birim Hacim Ağırlık ( $\beta_h$ ), kg/m <sup>3</sup>	Poisson oranı ( $\nu$ )
Kaide	Taş+Tuğla	13000	2300	0,20
Küp	Tuğla+Harç	4500	1700	0,18
Gövde	Tuğla+Harç	4500	1700	0,18
Petek	Tuğla+Harç	4500	1700	0,18
Merdiven	Taş+Tuğla	4500	1700	0,18

Sonlu elemanlar modelinde x ve y yönleri için mod şekilleri, frekansları ve modlara ait kütle katılım oranları tespit edilmiştir (Çizelge 5.3, Şekil 5.4). Kütle katılım oranları her yöndeki üç mod için %90 mertebelerine ulaştığından dolayı sistemin hareketini ilk üç mod temsil edebilecek niteliktedir. Modal analiz sonuçlarıyla modal testten elde edilen frekans değerleri karşılaştırıldığında hata oranının maksimum 2. modda %16 olduğu görülmektedir. Bu hata oranı sistemin hareketinin büyük bir kısmını temsil eden 1. modda olmadığı ve %20'nin altında kaldığı için kabul edilebilir düzeydedir.

**Çizelge 5.3.** Ali Paşa Cami Minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı

İvme Kayıt Yönü	Mod	Kütle Katılım Oranı, %		Modal Analiz Frekansı, Hz	Modal Test Frekansı, Hz	Hata oranı, %
		X	Y			
X	1	18,56	13,75	2,52	2,70	6
	2	20,79	17,28	10,55	9,25	14
	3	10,86	3,41	20,80	19,85	4
Y	1	14,00	19,60	2,55	2,71	5
	2	17,68	20,75	11,04	9,45	16
	3	4,25	11,14	21,15	19,95	6



**Şekil 5.4.** Ali Paşa Cami minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı

### 5.2.2. Altıparmak Cami

Altıparmak semtinde yer alan cami Fatih Sultan Mehmed döneminde (1451-1481) Hoca Muhiddin Mehmed Altıparmak tarafından yaptırılmıştır. Cami kalkan duvarlı, tek kubbeli ve kare planlıdır. Cami ve minaresi 1967 yılında onarılmıştır (Şekil 5.5).



**Şekil 5.5.** Altıparmak Cami minaresi ve konumu

Minare kaidesi camiye bitişik sekizgen planlıdır. Kaide inşaatında 1 küfeki taşı 3 tuğla düzenle almaşık olarak inşa edilmiştir. Küp, gövde ve geçiş elemanı tuğladan yapılmış olup geçiş (küp) elemanında uzun piramidal Türk üçgeni motifi kullanılmıştır. Şerefe altı stalaktitli (püskülsüz) inşa edilmiş olup minare açık şerefelidir. Şerefe korkuluk malzemesi mermerdir. Minarenin merdivenleri ise yaygın düzen olan 2 tuğla 1 taş düzeninde duvara gömülü ve çekirdeksiz olarak inşa edilmiştir. Bu sayede minarenin rijitliği artmaktadır.

Altıparmak Cami minaresi için arazide alınan ivme kayıtlarından 4 farklı frekans aralığı için güç spektrumları elde edilmiştir. Ancak minarelerin x ve y yönündeki ilk üç mod, 25 Hz aralığın yer aldığı için çalışma kapsamında sadece bu aralıktaki spektrumlar verilmektedir (Şekil 5.6, Şekil 5.7). Yapının silindirik geometrisi ve rüzgârdan dolayı x veya y yönünde alınan kayıtlarda her iki yöne ait modların frekansları görülmektedir. Arazide belirlenen geometrik özellikler yardımıyla minarenin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlarla sonlu elemanlar modeli karşılaştırılarak malzeme özelliklerinin ve mesnetlenme koşullarının kalibrasyonu sağlanmıştır. Kalibrasyon

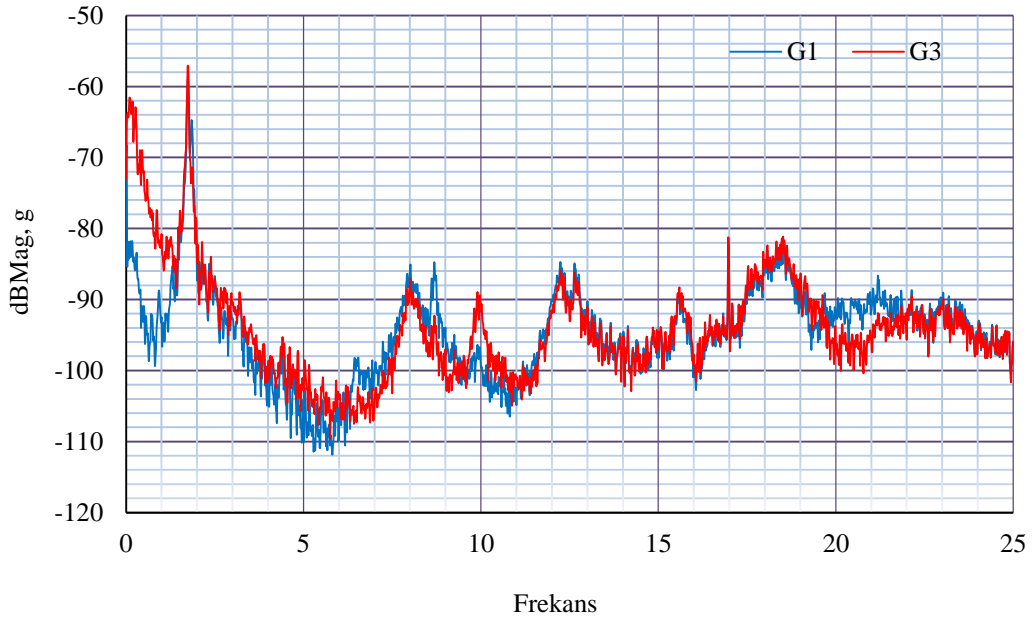


işleminin neticesinde elde edilen malzeme özellikleri çizelge 5.5’te verilmiştir. Minare kaidesi ise kibleye dik yönde yani modelde belirlenen y yönünde cami duvarına kısmi olarak mesnetli olduğu doğrulanmıştır.

**Çizelge 5.4.** Altıparmak Cami minaresi malzeme ve geometrik özellikleri

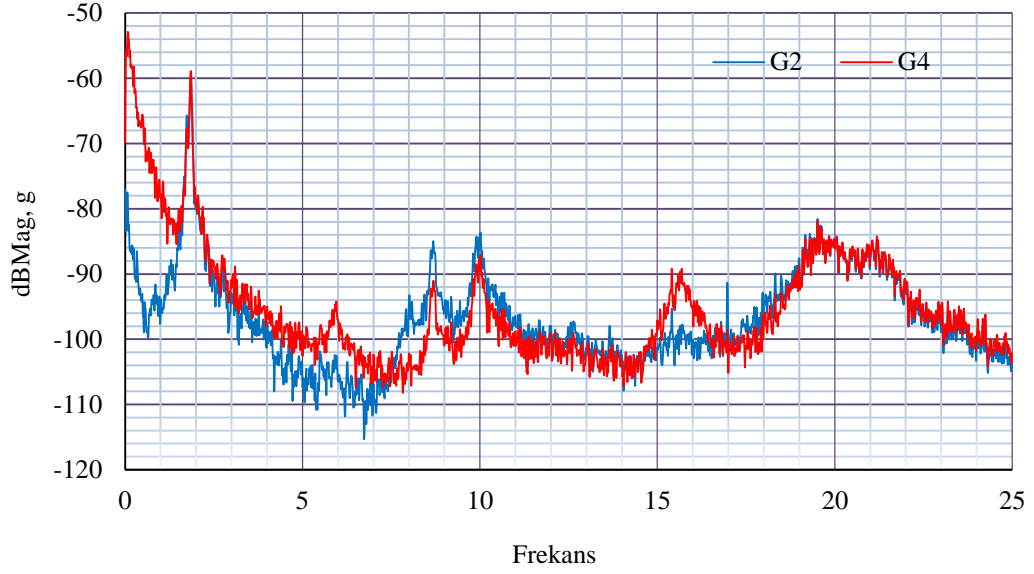
Altıparmak Cami Minaresi						
Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)	Merdiven Tipi
Kaide	Küfeki+Tuğla	Sekizgen L=1,21	R=1,32	0,80	7,40	Tek çıkış-iniş Çekirdeksiz
Küp	Tuğla+Harç	R=2,86-1,85	R=1,32-1,25	0,77-0,30	1,50	
Gövde	Tuğla+Harç	R=1,85	R=1,25	0,30	9,50	
Petek	Tuğla+Harç	R=1,71	R=1,25	0,23	4,00	
Külâh	Kurşun	-	-	-	3,25	
Minare Toplam Yüksekliği					25,650	

Güç Spektrumu



**Şekil 5.6.** Altıparmak Cami G1 ve G3 ivmeölçerler verilerine ait güç spektrumu

### Güç Spekturumu



Şekil 5.7. Altıparmak Cami G2 ve G4 ivmeölçerler verilerine ait güç spektrumu

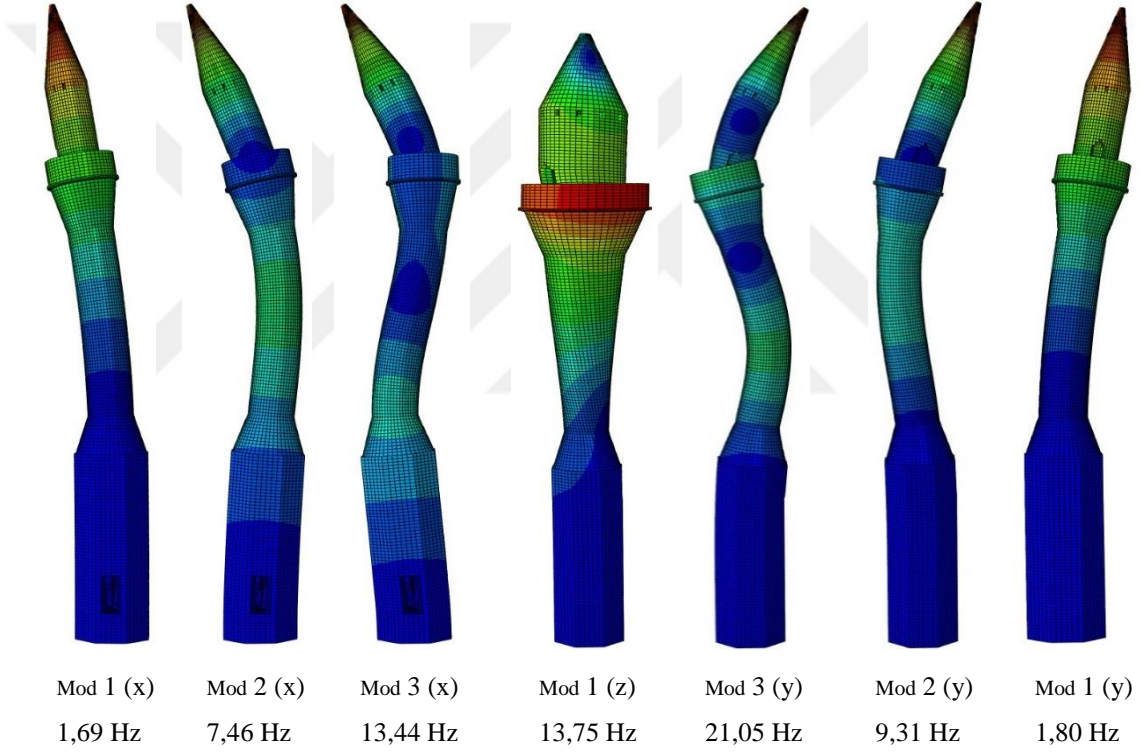
Çizelge 5.5. Altı Parmak Cami Minaresi malzeme özellikleri

Minare Bölümleri	Malzeme	Elastite Modulu (E) Mpa	Birim Hacim Ağırlık ( $\beta_h$ ), kg/m <sup>3</sup>	Poisson oranı ( $\nu$ )
Kaide	Küfeki+Tuğla	8000	2100	0,20
Küp	Tuğla+Harç	3600	1700	0,18
Gövde	Tuğla+Harç	3600	1700	0,18
Petek	Tuğla+Harç	3600	1700	0,18
Merdiven	Taş+Tuğla	3600	1750	0,20

Sonlu elemanlar modelinde x ve y yönleri için mod şekilleri, frekansları ve modlara ait kütle katılım oranları tespit edilmiştir (Çizelge 5.6, Şekil 5.8). Kütle katılım oranları her yöndeki üç mod için %82 mertebelerine ulaştığından dolayı sistemin hareketini ilk üç mod ile temsil edebilecek nitelikte olduğu anlaşılmaktadır. Modal analiz sonuçlarıyla modal testten elde edilen frekans değerleri karşılaştırıldığında hata oranının maksimum 3. modda % 9 olduğu görülmektedir. Bu hata oranı sistemin hareketinin büyük bir kısmını temsil eden 1. modda olmadığı ve %20'nin altında kaldığı için modelin gerçek yapı davranışını oldukça iyi temsil ettiği kabul edilebilir.

**Çizelge 5.6.** Altıparmak Cami minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı

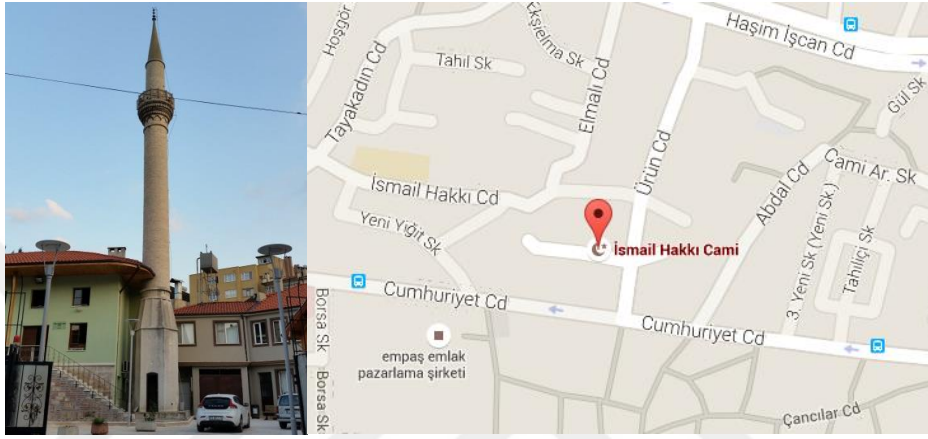
İvme Kayıt Yönü	Mod	Kütle Katılım Oranı, %	Modal Analiz Frekansı, Hz	Modal Test Frekansı, Hz	Hata oranı, %
X	1	30,00	1,69	1,73	2
	2	30,00	7,46	8,01	7
	3	22,00	13,44	12,27	9
Y	1	49,00	1,80	1,84	2
	2	17,00	9,31	9,89	6
	3	12,00	21,05	19,61	7



**Şekil 5.8.** Altıparmak Cami minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı

### 5.2.3. İsmail Hakkı Cami

1653-1725 yılları arasında yaşamış olan Osmanlı bilim adamı ve mutasavvıfı Şeyh İsmail Hakkı Bursevi tarafından 18. yüzyılda kurulan ve 1925'e kadar hizmet veren içinde semahane, çilehane, tekke ve müştemilattan oluşan bir yapı grubudur. 1964 yılında caminin batısına yapıdan ayrı olarak minare yapılmıştır. En son onarımını 2005 senesinde gören yapı aslına uygun olarak restore edilmiştir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9. İsmail Hakkı Cami minaresi ve konumu

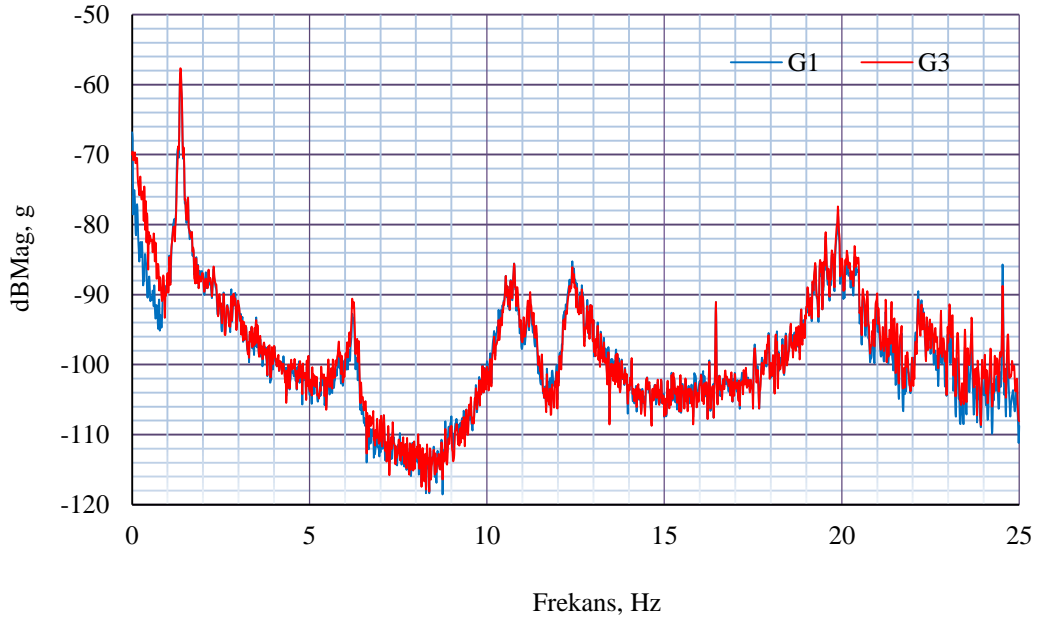
Minarede tüm bölümlerini briket tuğladan yapılmıştır. Kaidesi altıgen olup küp elemanı sadedir. Şerefe altı stalaktitli (püskülsüz) inşa edilmiş olup minare açık şerefelidir. Şerefe korkulukları taştır. Merdiven basamakları çekirdek etrafında dönerek helezonik bir biçimde şerefe seviyesine kadar ulaşmaktadır.

İsmail Hakkı Cami minaresi için arazide alınan ivme kayıtlarından 4 farklı frekans aralığı için güç spektrumları elde edilmiştir. Ancak minarelerin x ve y yönündeki ilk üç mod, 25 Hz aralığında yer aldığı için çalışma kapsamında sadece bu aralıktaki spektrumlar verilmektedir (Şekil 5.10, Şekil 5.11). Arazide belirlenen geometrik özellikler yardımıyla minarenin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlarla sonlu elemanlar modeli karşılaştırılarak malzeme özelliklerinin ve mesnetlenme koşullarının kalibrasyonu sağlanmıştır. Kalibrasyon işleminin neticesinde elde edilen malzeme özellikleri çizelge 5.8'de verilmiş ve minare kaidesinin cami duvarından ayrık olduğu doğrulanmıştır.

**Çizelge 5.7.** İsmail Hakkı Cami minaresi malzeme ve geometrik özellikleri

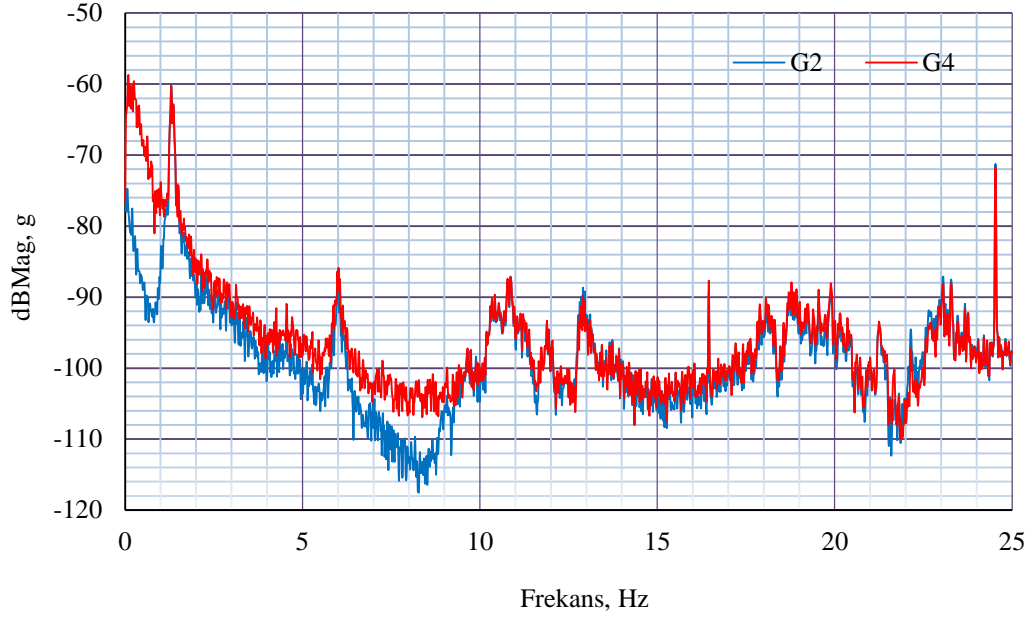
İsmail Hakkı Cami Minaresi						
Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)	Merdiven Tipi
Kaide	Taş+Harç	Altıgen L=1,28	R=1,25	0,48	4,10	Tek çıkış-iniş Çekirdekli
Küp	Tuğla+Harç	R=2,15-1,59	R=1,25-1,17	0,45-0,21	1,73	
Gövde	Tuğla+Harç	R=1,59	R=1,17	0,21	13,83	
Petek	Tuğla+Harç	R=1,36	R=1,02	0,17	3,80	
Külah	Tuğla+Harç	R=1,36-0,20	R=1,02-0,10	0,17-0,05	3,80	
Minare Toplam Yüksekliği					27,26	
Minarenin Zeminden İtibaren Yüksekliği					27,86	

Güç Spekturumu



**Şekil 5.10.** İsmail Hakkı Cami minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

### Güç Spekturumu



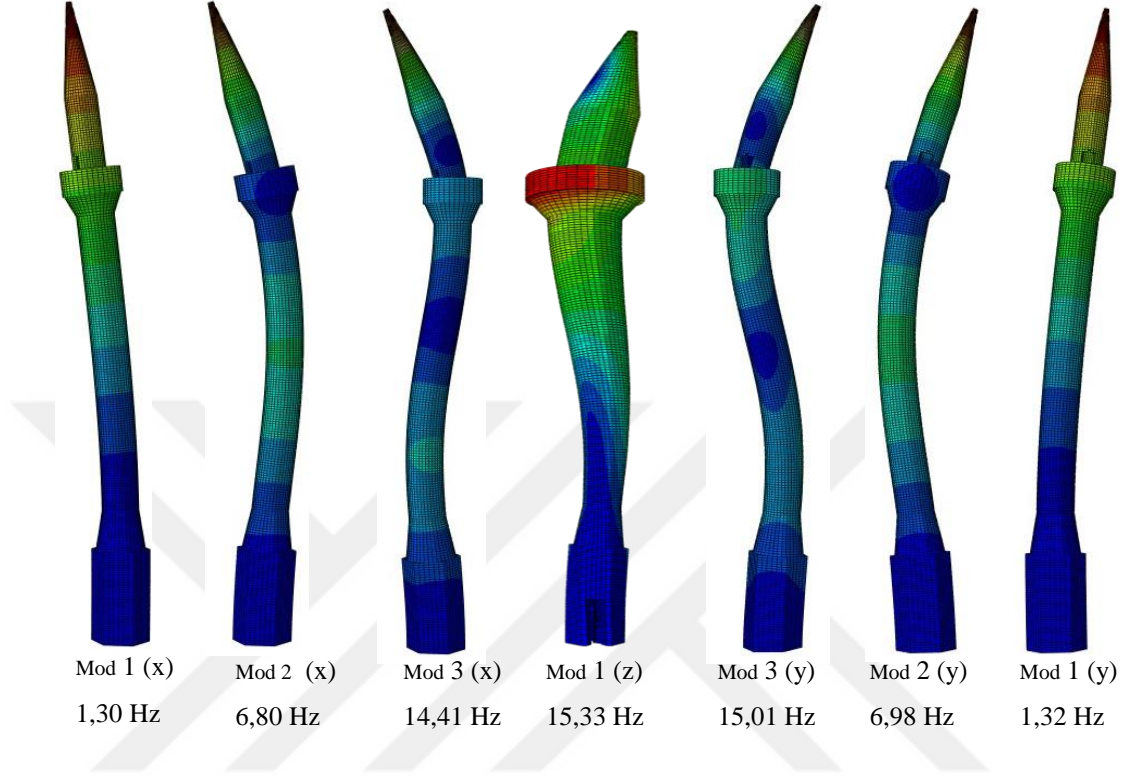
Şekil 5.11. İsmail Hakkı Cami minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

Çizelge 5.8. İsmail Hakkı Cami Minaresi malzeme özellikleri

Minare Bölümleri	Malzeme	Elastite Modulu (E) Mpa	Birim Hacim Ağırlık ( $\beta_h$ ), kg/m <sup>3</sup>	Poisson oranı ( $\nu$ )
Kaide	Taş+Harç	7500	2400	0,2
Küp	Tuğla+Harç	7500	1600	0,2
Gövde	Tuğla+Harç	7500	1600	0,2
Petek	Tuğla+Harç	7500	1600	0,2
Külah	Tuğla+Harç	7500	1600	0,2
Merdiven	Taş+Harç	10000	2400	0,2

Sonlu elemanlar modelinde x ve y yönleri için mod şekilleri, frekansları ve modlara ait kütle katılım oranları tespit edilmiştir (Çizelge 5.9, Şekil 5.12). Kütle katılım oranları her yöndeki üç mod için %80 mertebelerine ulaştığından dolayı sistemin hareketini ilk üç modun temsil edebilecek nitelikte olduğu anlaşılmaktadır. Modal analiz sonuçlarıyla modal testten elde edilen frekans değerleri karşılaştırıldığında hata oranının maksimum 3. modda %15 olduğu görülmektedir.

Bu hata oranı sistemin hareketinin büyük bir kısmını temsil eden 1. modda olmadığı ve %20'nin altında kaldığı için kabul edilebilir düzeydedir.



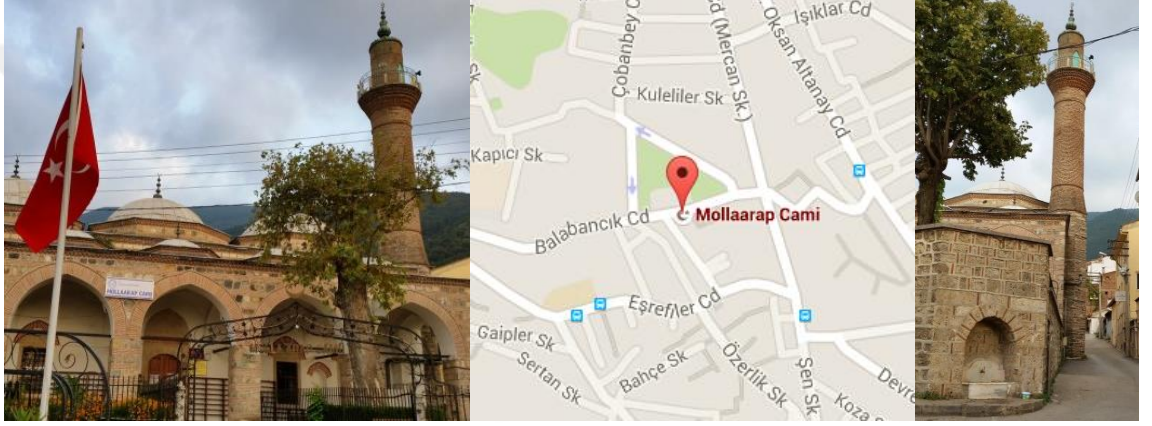
**Şekil 5.12.** İsmail Hakkı cami minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı

**Çizelge 5.9.** İsmail Hakkı Cami Minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı

İvme Kayıt Yönü	Mod	Kütle Katılım Oranı, %	Modal Analiz Frekansı, Hz	Modal Test Frekansı, Hz	Hata oranı, %
X	1	44,00	1,30	1,37	5
	2	20,00	6,80	6,26	8
	3	14,00	14,41	12,45	15
Y	1	43,00	1,32	1,37	3
	2	20,00	6,98	6,14	13
	3	14,00	15,01	13,00	15

#### 5.2.4. Molla Arap Cami

16. yüzyılın ilk çeyreğinde Molla Arap ünvanlı, Mevlana Mehmed tarafından inşa ettirilmiştir. Cami dokuz kubbesi ve beş gözlü son cemaat yeri ile çok kubbeli camiler formuna örnektir. Caminin batı duvarına bitişik tek minaresi mevcuttur. Caminin büyük bölümü 1855 Bursa depreminde zarar görmüştür. Daha sonra Ahmet Vefik Paşa tarafından iki kubbeli bölümü kısmi olarak onarılmış 1997 yılına kadar bu şekilde kullanılmıştır. Günümüzde ise Yıldırım Belediyesi tarafından aslına uygun olarak restore edilmiştir (Şekil 5.13).



Şekil 5.13. Molla Arap Cami minaresi ve konumu

Minarenin kaidesi sekizgen olup camiye bitişik vaziyette moloz taşlardan inşa edilmiştir. Geçiş elemanı ile birlikte gövde ve petek bölümü tuğladan inşa edilmiştir. Şerefe altı stalaktitli (püskülsüz) inşa edilmiş olup minare açık şerefelidir. Şerefe korkulukları demir parmaklıklı olarak inşa edilmiştir. Minarenin külah bölümünün malzemesi kurşun olup estetik bir mimariye sahiptir. Minarenin merdiven basamakları ise yaygın düzen olan 2 tuğla 1 taş düzeninde duvara gömülü ve çekirdeksiz olarak inşa edilmiştir. Bu sayede merdivenler minarenin rijitliğine oldukça katkı sağlamaktadır.

Molla Arap Cami minaresi için arazide alınan ivme kayıtlarından 4 farklı frekans aralığı için güç spektrumları elde edilmiştir. Ancak minarelerin x ve y yönündeki ilk üç mod, 25 Hz aralığında yer aldığı için çalışma kapsamında sadece bu aralıktaki spektrumlar verilmektedir (Şekil 5.14, Şekil 5.15). Arazide belirlenen geometrik özellikler yardımıyla minarenin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlarla sonlu elemanlar

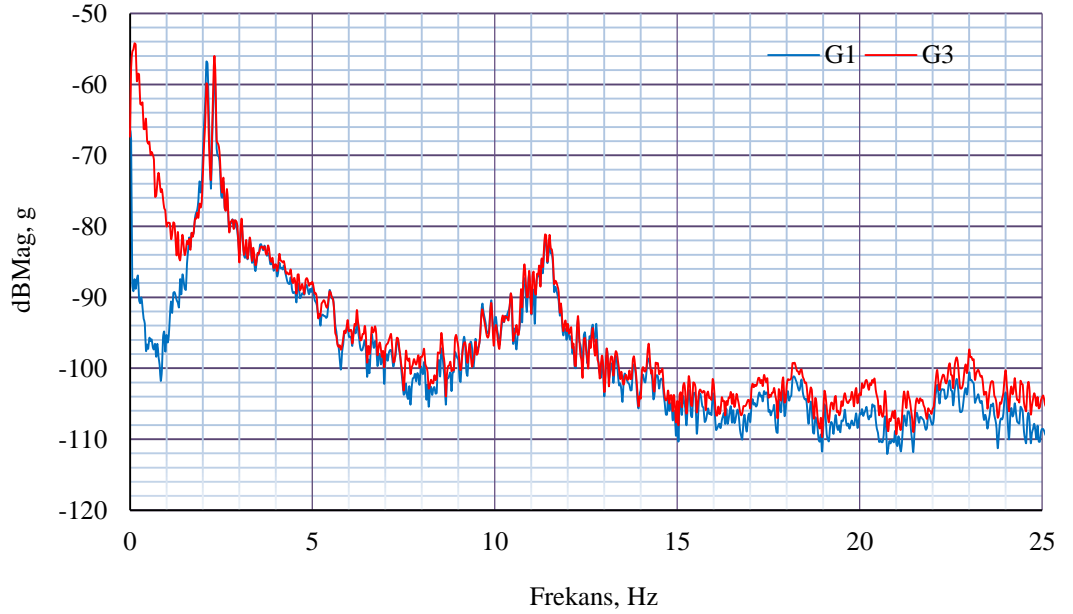


modeli karşılaştırılarak malzeme özelliklerinin ve mesnetlenme koşullarının kalibrasyonu sağlanmıştır. Kalibrasyon işleminin neticesinde elde edilen malzeme özellikleri çizelge 5.11’da verilmiştir. Minare kaidesi ise yerinde beden duvarına bitişik olarak tespit edilmiştir. Modal analiz sonucundaki karşılaştırmada bu tespit doğrulanmıştır.

**Çizelge 5.10.** Molla Arap Cami minaresi malzeme ve geometrik özellikleri

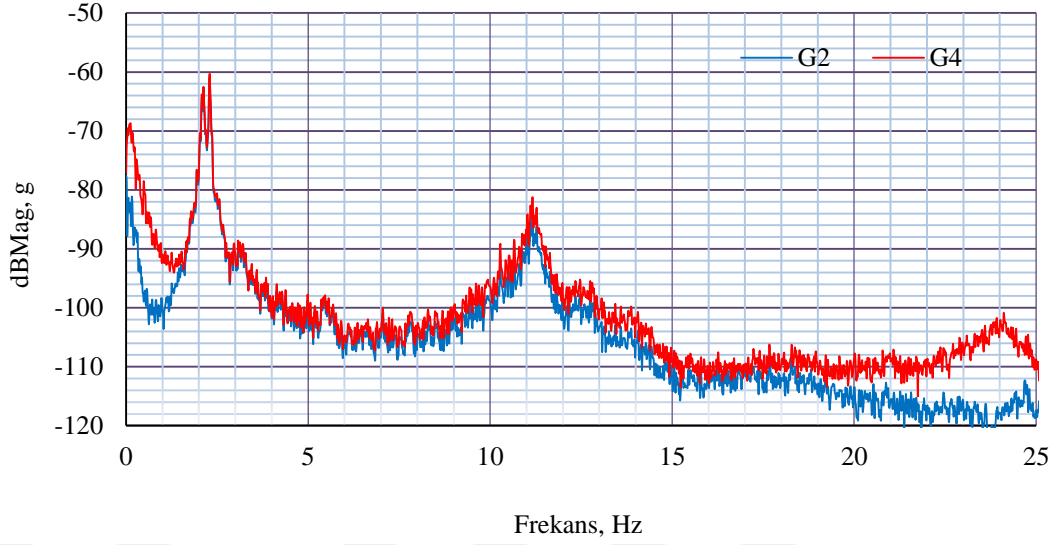
Molla Arap Cami Minaresi						
Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)	Merdiven Tipi
Kaide	Taş+Harç	Sekizgen L=1,100	R=1,450	0,600	9,202	Tek çıkış-iniş Çekirdeksiz
Küp	Tuğla+Harç	R=2,610-2,080	R=1,450-1,370	0,580-0,355	1,940	
Gövde	Tuğla+Harç	R=2,080	R=1,370	0,355	7,760	
Petek	Tuğla+Harç	R=1,790	R=1,250	0,270	3,200	
Külâh	Kurşun	-	-	-	2,250	
Minare Toplam Yüksekliği					24,352	

**Güç Spekturumu**



**Şekil 5.14.** Molla Arap Cami minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

### Güç Spekturumu



Şekil 5.15. Molla Arap Cami minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

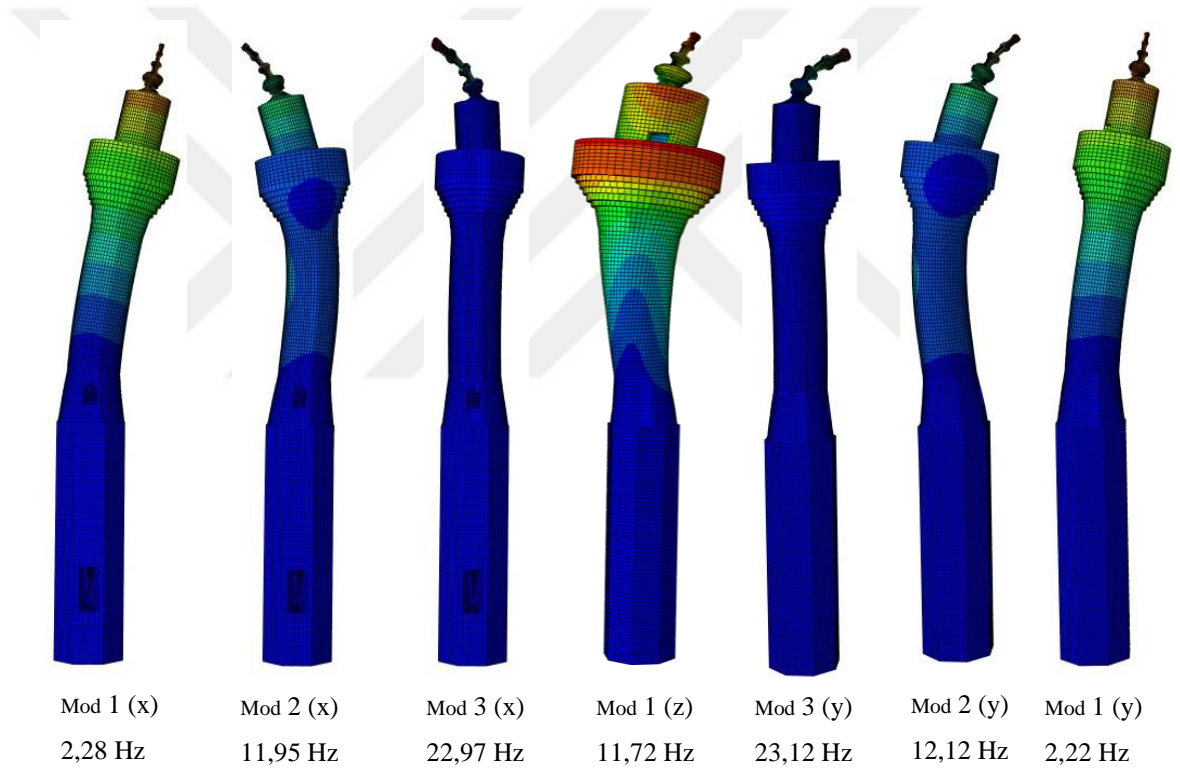
Çizelge 5.11. Molla Arap Cami Minaresi malzeme özellikleri

Molla Arap Cami Minaresi				
Minare Bölümleri	Malzeme	Elastite Modulu (E) Mpa	Birim Hacim Ağırlık ( $\beta h$ ),kg/m <sup>3</sup>	Poisson oranı ( $\nu$ )
Kaide	Taş+Harç	7000	2300	0,2
Küp	Tuğla+Harç	2450	1800	0,18
Gövde	Tuğla+Harç	2450	1800	0,18
Petek	Tuğla+Harç	2450	1800	0,18
Merdiven	Taş+Tuğla	2550	1850	0,18

Sonlu elemanlar modelinde x ve y yönleri için mod şekilleri, frekansları ve modlara ait kütle katılım oranları tespit edilmiştir (Çizelge 5.12, Şekil 5.16). Kütle katılım oranları her yöndeki üç mod için %90 mertebelerine ulaştığından dolayı sistemin hareketini ilk üç mod temsil edebilecek niteliktedir. Modal analiz sonuçlarıyla modal testten elde edilen frekans değerleri karşılaştırıldığında hata oranının maksimum 2. modda % 8 olduğu görülmektedir. Bu hata oranı çok küçük değer olduğu için model gerçek yapıyı oldukça iyi bir şekilde temsil ettiği söylenebilir.

**Çizelge 5.12.** Molla Arap Cami Minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı

İvme Kayıt Yönü	Mod	Kütle Katılım Oranı, %		Modal Analiz Frekansı, Hz	Modal Test Frekansı, Hz	Hata oranı, %
		X	Y			
X	1	49,60	16,35	2,28	2,28	0
	2	14,62	3,00	11,95	11,47	4
	3	6,25	0,00	22,97	23,22	1
Y	1	52,00	16,83	2,22	2,13	4
	2	14,05	2,48	12,12	11,20	8
	3	5,82	0,00	23,32	23,94	2



**Şekil 5.16.** Molla Arap Cami minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı

### 5.2.5. Muradiye Cami Batı Minaresi

Muradiye semtinde II. Murad tarafından yaptırılan külliyeinin içinde yer alır. Bu külliye, İstanbul Osmanlıların başkenti olana kadar Bursa'daki tahta çıkan beş padişah tarafından kente yaptırılan külliyeilerin sonuncusudur. Muradiye Caminin yapım yılı 1426 olup plan şeması olarak tabhaneli camiler grubuna girmektedir.



**Şekil 5.17.** Muradiye Cami batı minaresi ve konumu

Caminin batı minaresi 1800 yılların başında yıkılmış olup 1904 yılında tekrar inşa edilmiştir (Şekil 5.17). İkinci kez inşa edilen minarede merdiven asma kattan başlamaktadır. Asma kattan önceki kaide 3 sıra tuğla 1 taş almaşık düzenle örülmesine rağmen asma kattan sonraki kaide ve küp bölümü küfeki taşından inşa edilmiştir. Diğer farklılık ise gövde duvarı tuğla iken şerefe, petek ve külah bölümünün küfeki taşından yapılmış olmasıdır. Merdivenler, gövde duvarına kadar küfeki taşı olup şerefe seviyesinin 1 m yukarısına kadar klasik almaşık düzenle çekirdek etrafında minarenin iskeletini oluşturmaktadır. Şerefe altı sade inşa edilmiş olup minare açık şerefelidir. Ancak külah bölümünün mimarisi ve işçiliği dikkat çekicidir. Minareyle ilgili diğer geometrik özellikler çizelge 5.13'te verilmiştir.

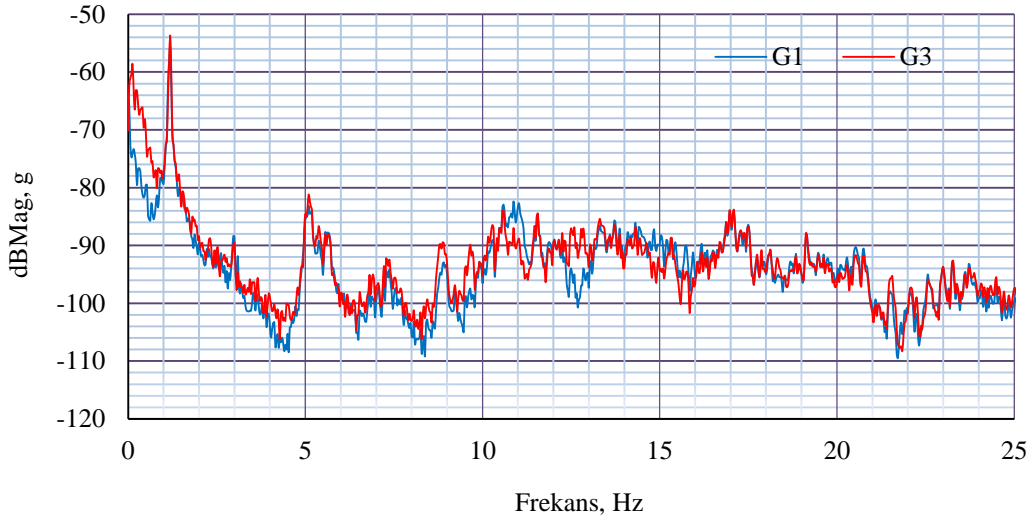
Muradiye Cami batı minaresi için arazide alınan ivme kayıtlarından 4 farklı frekans aralığı için güç spektrumları elde edilmiştir. Ancak minarelerin x ve y yönündeki ilk üç mod, 25 Hz aralığında yer aldığı için çalışma kapsamında sadece bu aralıktaki spektrumlar verilmektedir (Şekil 5.18, Şekil 5.19). Arazide belirlenen geometrik özellikler yardımıyla minarenin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Deneysel

sonuçlarla sonlu elemanlar modeli karşılaştırılarak malzeme özelliklerinin ve mesnetlenme koşullarının kalibrasyonu sağlanmıştır. Kalibrasyon işleminin neticesinde elde edilen malzeme özellikleri çizelge 5.14'te verilmiştir. Minare kaidesi ise yerinde beden duvarı ile bitişik görülmesine rağmen modal analiz sonucundaki karşılaştırmada beden duvarından ayrı olarak çalıştığı tespit edilmiştir.

**Çizelge 5.13.** Muradiye Cami Batı minaresi malzeme ve geometrik özellikleri

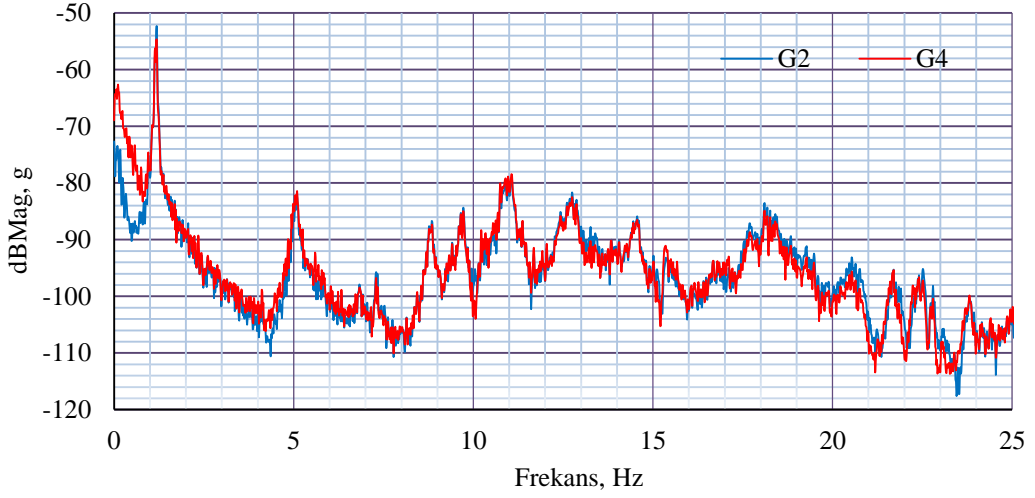
Muradiye Cami Batı Minaresi						
Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)	Merdiven Tipi
Kaide	Küfeki	Dikdörtgen L=2,400x2,260	R=1,600	0,400-0,330	9,000	Tek çıkış-iniş Çekirdekli
Küp	Küfeki	R=2,220-1,870	R=1,600-1,350	0,310-0,260	2,530	
Gövde	Tuğla+Harç	R=1,870	R=1,350	0,260	9,540	
Petek	Küfeki	R=1,670	R=1,220	0,230	4,500	
Külâh	Küfeki	Değişken	Değişken	Değişken	3,850	
Minare Toplam Yüksekliği					29,420	

Güç Spekturumu



**Şekil 5.18.** Muradiye Cami batı minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

### Güç Spekturumu



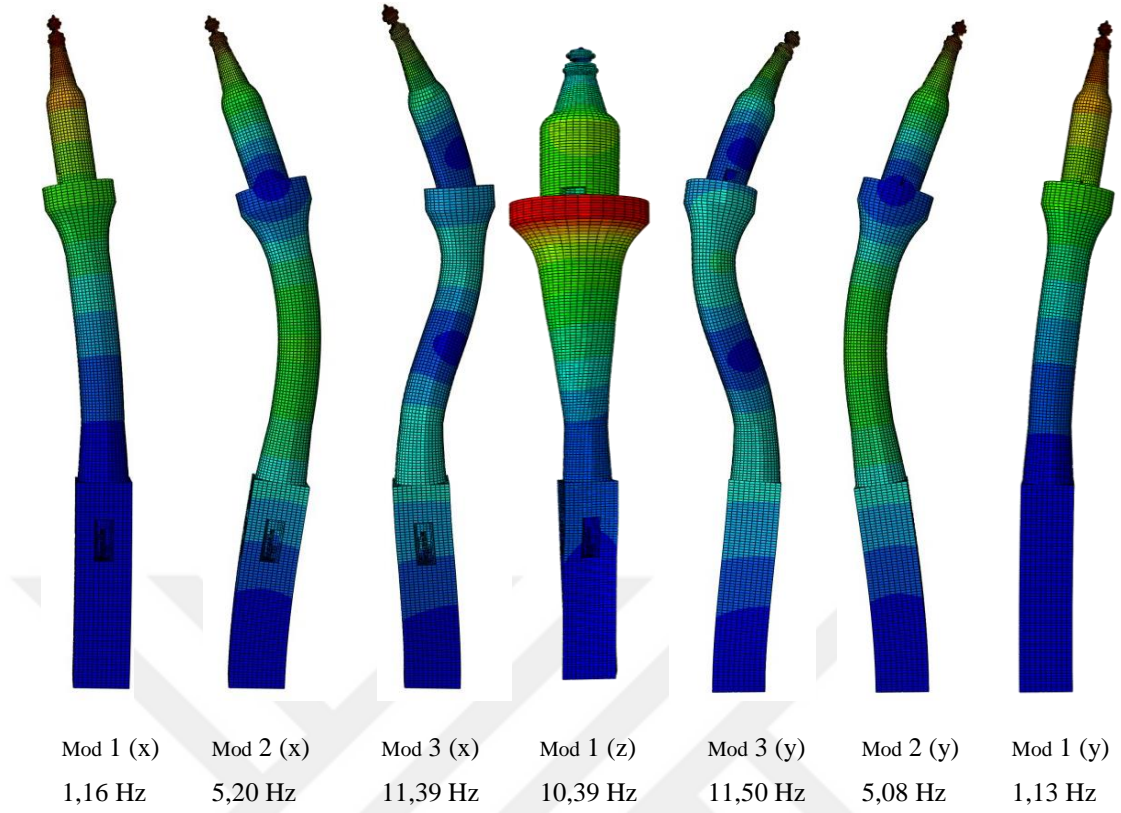
**Şekil 5.19.** Muradiye Cami batı minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

**Çizelge 5.14.** Muradiye Cami batı minaresi malzeme özellikleri

Minare Bölümleri	Malzeme	Elastite Modulu (E) Mpa	Birim Hacim Ağırlık ( $\beta_h$ ),kg/m <sup>3</sup>	Poisson oranı ( $\nu$ )
Alt Kaide	Küfeki+Tuğla	7500	2250	0,20
Kaide	Küfeki	10000	2350	0,20
Küp	Küfeki	10000	2350	0,20
Gövde	Tuğla+Harç	3300	1700	0,18
Petek	Küfeki	10000	2350	0,20
Külâh	Küfeki	10000	2350	0,20

**Çizelge 5.15.** Muradiye Cami batı minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı

İvme Kayıt Yönü	Mod	Kütle Katılım Oranı, %		Modal Analiz Frekansı, Hz	Modal Test Frekansı, Hz	Hata oranı, %
		X	Y			
X	1	37,00	0,00	1,16	1,16	0
	2	31,00	0,00	5,20	5,14	1
	3	8,00	6,00	11,39	11,09	2
Y	1	38,00	0,00	1,13	1,14	0
	2	31,00	0,00	5,08	5,09	0
	3	8,00	6,00	11,50	11,12	3



**Şekil 5.20.** Muradiye Cami batı minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı

Sonlu elemanlar modelinde x ve y yönleri için mod şekilleri, frekansları ve modlara ait kütle katılım oranları tespit edilmiştir (Çizelge 5.15, Şekil 5.20). Kütle katılım oranları her yöndeki üç mod için %85 mertebelerine ulaştığından dolayı sistemin hareketini ilk üç modun temsil edebilecek nitelikte olduğu anlaşılmaktadır. Modal analiz sonuçlarıyla modal testten elde edilen frekans değerleri karşılaştırıldığında hata oranının maksimum %3 olduğu görülmektedir. Bu hata oranı oldukça düşük değer olup minarenin modeli yapıyı oldukça iyi temsil edilebileceği manasında değerlendirilebilir. Yerinde ve laboratuvarında yapılan malzeme deneylerinden elde edilen elastisite modülü ve birim hacim yoğunluk değerleri modelde kullanılan özelliklerle oldukça yakın değerler çıkmış olup kalibrasyonun oldukça hızlı yapılmasını sağlamıştır.

### 5.2.6. Muradiye Cami Doğu Minaresi

Doğu minaresinin geçmişteki depremlerde tamamıyla yıkılmadığı ancak günümüze gelinceye kadar çeşitli dönemlerde onarımlardan geçtiği tahmin edilmektedir. Yerinde incelemede çoğu elemanın orijinal olduğu görülmüştür. Bu yüzden özellikle merdiven ve petek bölümünün malzemelerinde tahribatlara rastlanmıştır.



Şekil 5.21. Muradiye Cami Doğu minaresi

Doğu minaresinin kaidesi zeminden itibaren başlamış olup hem zeminden hem de asma kattan minareye giriş mümkündür. Minarenin kaide ve küp bölümü almaşık düzende inşa edilmiştir. Ancak Şekil 5.21’de de görüleceği gibi kaidede yapılan onarımlar düzgün sırayla yapılmamıştır. Minare gövdesi şerefe altına kadarki bölümü tuğla, şerefe ise küfeki taşından imal edilmiştir. Şerefe altı sade inşa edilmiş olup minare açık şerefelidir. Merdiven basamakları ise almaşık düzende, çekirdeksiz ve rıht yükseklikleri değişkendir. Minareye ait geometrik özellikler Çizelge 5.16’da verilmiştir.

Muradiye Cami batı minaresi için arazide alınan ivme kayıtlarından 4 farklı frekans aralığı için güç spektrumları elde edilmiştir. Ancak minarenin x ve y yönündeki ilk üç mod, 25 Hz aralığında yer aldığı için çalışma kapsamında sadece bu aralıktaki spektrumlar verilmektedir (Şekil 5.22, Şekil 5.23). Arazide belirlenen geometrik özellikler yardımıyla minarenin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlarla sonlu elemanlar modeli karşılaştırılarak malzeme özelliklerinin ve mesnetlenme koşullarının kalibrasyonu sağlanmıştır. Kalibrasyon işleminin neticesinde



elde edilen malzeme özellikleri çizelge 5.17’de verilmiştir. Minare kaidesi yerinde beden duvarının bitişik olarak görülmesine rağmen modal analiz sonucundaki karşılaştırmada beden duvarından ayırık olarak çalıştığı tespit edilmiştir.

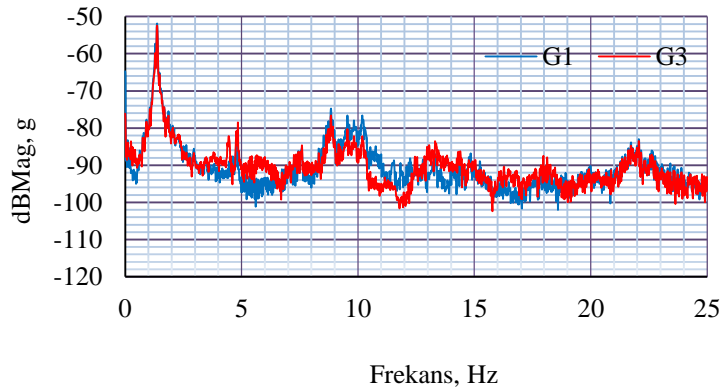
**Çizelge 5.16.** Muradiye Cami doğu minaresi malzeme ve geometrik özellikleri

Muradiye Cami Doğu Minaresi						
Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)	Merdiven Tipi
Kaide	Küfeki+Tuğla	Dikdörtgen L=2,40x2,80	R=1,45	0,675-0,475	10,50	Tek çıkış-iniş Çekirdeksiz
Küp	Küfeki+Tuğla	R=2,38-1,78	R=1,45-1,30	0,465-0,240	2,00	
Gövde	Tuğla+Harç	R=1,78	R=1,30	0,240	9,50	
Petek	Tuğla+Harç	R=1,54	R=1,10	0,220	5,00	
Külâh	Kurşun	-	-	-	4,00	
Minare Toplam Yüksekliği					31,00	

**Çizelge 5.17.** Muradiye Cami doğu minaresi malzeme özellikleri

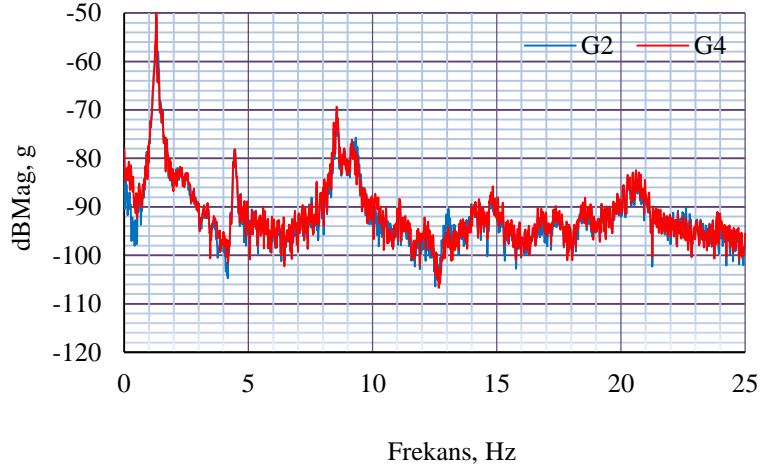
Minare Bölümleri	Malzeme	Elastite Modulu (E) Mpa	Birim Hacim Ağırlık ( $\beta_h$ ),kg/m <sup>3</sup>	Poisson oranı ( $\nu$ )
Kaide	Küfeki+Tuğla	6200	2000	0,2
Küp	Küfeki+Tuğla	6200	2000	0,2
Gövde	Tuğla+Harç	3800	1700	0,18
Petek	Tuğla+Harç	3800	1700	0,18
Merdiven	Taş+Tuğla	3800	1700	0,2

Güç Spekturumu



**Şekil 5.22.** Muradiye Cami doğu minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

### Güç Spekturumu

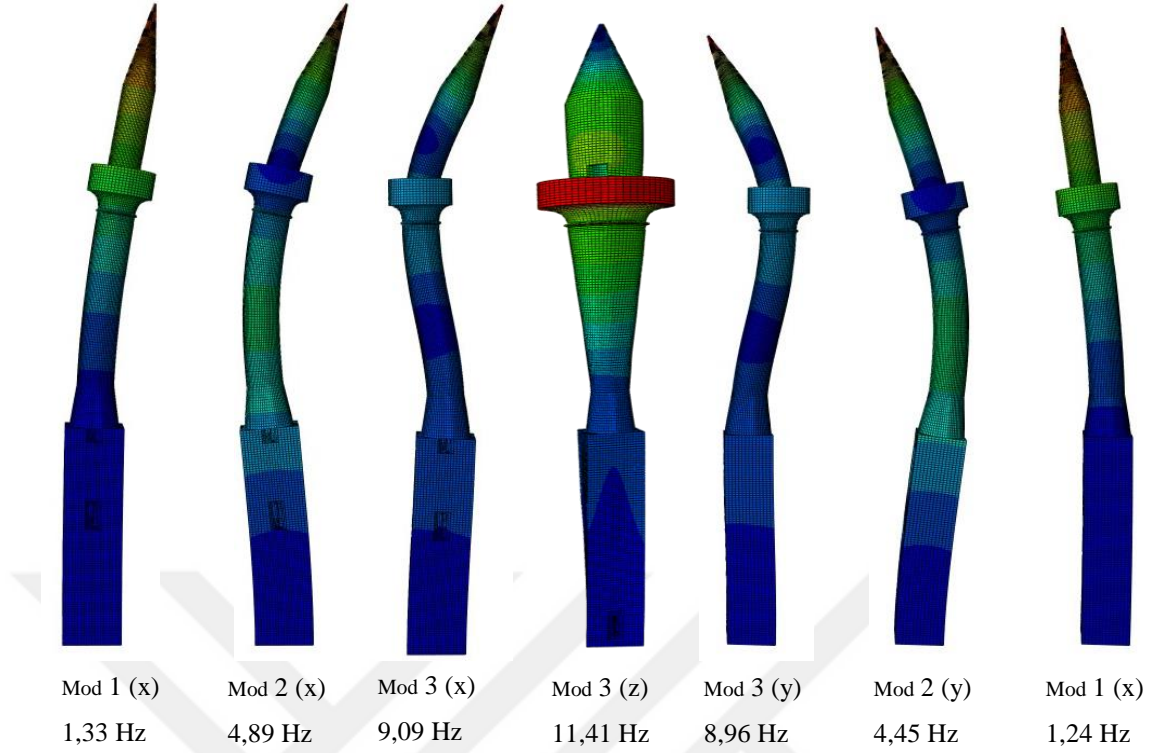


**Şekil 5.23.** Muradiye Cami doğu minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

Sonlu elemanlar modelinde x ve y yönleri için mod şekilleri, frekansları ve modlara ait kütle katılım oranları tespit edilmiştir (Çizelge 5.18, Şekil 24). Kütle katılım oranları her yöndeki üç mod için %85 mertebelerine ulaştığından dolayı sistemin hareketini ilk üç modun temsil edebilecek nitelikte olduğu anlaşılmaktadır. Modal analiz sonuçlarıyla modal testten elde edilen frekans değerleri karşılaştırıldığında hata oranının maksimum 3. modda % 4 olduğu görülmektedir. Bu hata oranı çok küçük değer olduğu için sayısal model gerçek yapıyı oldukça iyi bir şekilde temsil ettiği söylenebilir.

**Çizelge 5.18.** Muradiye Cami doğu minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı

İvme Kayıt Yönü	Mod	Kütle Katılım Oranı, %		Modal Analiz Frekansı, Hz	Modal Test Frekansı, Hz	Hata oranı, %
		X	Y			
X	1	30,00	0,00	1,33	1,35	1
	2	38,00	0,00	4,89	4,82	1
	3	10,00	5,00	9,09	8,87	2
Y	1	33,00	0,00	1,24	1,29	3
	2	38,00	0,00	4,45	4,45	0
	3	8,00	4,00	8,96	8,60	4



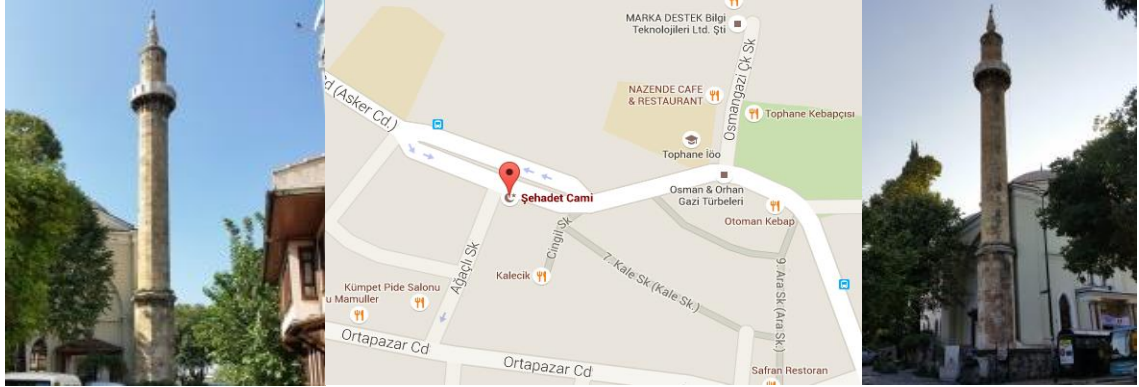
**Şekil 5.24.** Muradiye Cami doğu minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı

### 5.2.7. Şehadet Cami

Hisar içinde Sultan I. Murad tarafından 1365 yılında Bey Sarayının karşısına inşa ettirdiği Sultan Camidir. Ancak Sultan'ın 1389 yılında Kosova'da şehit olmasından sonra caminin ismi Şehadet ismini aldığı çeşitli kaynaklarda ifade edilmektedir. Cami üç sahnalı ve orta sahnının içinde iki kubbe olarak inşa edilmiştir. Ancak 1855 depreminde caminin büyük bir bölümü yıkılmıştır. 1892 yılında orta sahnın onarılarak tekrar faaliyette geçirilmiştir. Caminin kuzeydoğusunda bulunan minarenin de 1855 depreminde yıkıldığı ve yeniden yapıldığı düşünülmektedir(Şekil 5.25).

Bursa'da nadir rastlanan yapı tarzıyla caminin tüm bölümleri küfeki taşından inşa edilmiştir. Minarenin kaidesi cami duvarına bitişik ve sekizgen geometriye sahiptir. Minareye cami dışından girilmekte olup gövde de cami çatısına çıkan bir kapı mevcuttur. Kaide ile gövde birbirine bağlayan küp elemanı oldukça kısadır. Şerefe altı taş konsollu inşa edilmiş olup minare açık şerefelidir. Merdiven basamakları çekirdek etrafında dönerek şerefe tabanına kadar helezonik biçimde camini iskeletini oluşturmaktadır.

Minareyi oluşturan tüm taş elemanlar birbirlerine kenet ve zıvana demirleriyle bağlanmıştır. Ayrıyeten külah bölümünde estetik bir taş işçiliği görülmektedir.

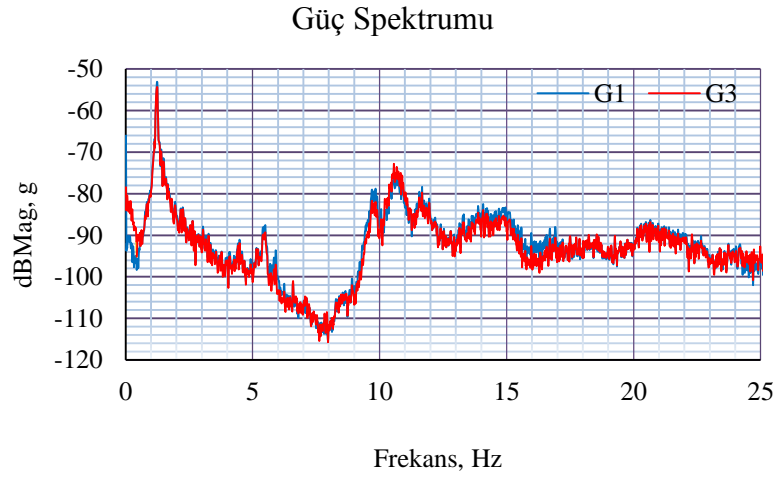


**Şekil 5.25.** Şehadet Cami minaresi ve konumu

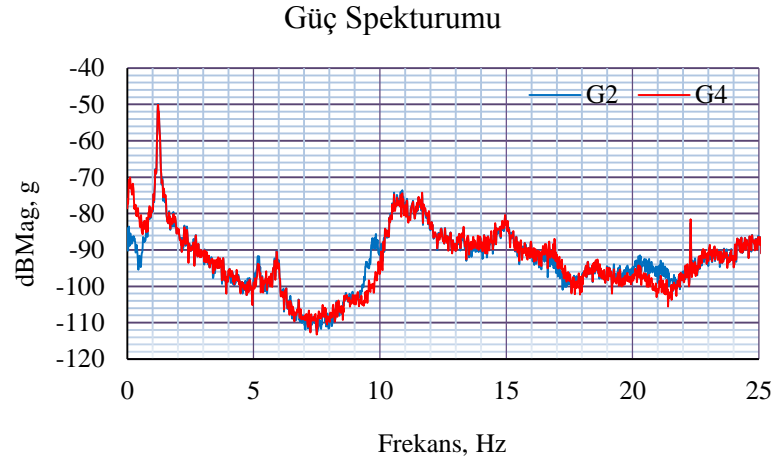
Şehadet Cami minaresi için arazide alınan ivme kayıtlarından 4 farklı frekans aralığı için güç spektrumları elde edilmiştir. Ancak minarenin x ve y yönündeki ilk üç mod, 25 Hz aralığında yer aldığı için çalışma kapsamında sadece bu aralıktaki spektrumlar verilmektedir (Şekil 5.26, Şekil 5.27). Arazide belirlenen geometrik özellikler yardımıyla minarenin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlarla sonlu elemanlar modeli karşılaştırılarak malzeme özelliklerinin ve mesnetlenme koşullarının kalibrasyonu sağlanmıştır. Kalibrasyon işleminin neticesinde elde edilen malzeme özellikleri çizelge 5.20'de verilmiştir. Karşılaştırma sonucu yerinde ve laboratuvarında yapılan malzeme deneylerinin oldukça doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Minare kaidesi modal analiz sonucundaki karşılaştırmada cami beden duvarına mesnetli olduğu tespit edilmiştir.

**Çizelge 5.19.** Şehadet Cami minaresi malzeme ve geometrik özellikleri

Şehadet Cami Minaresi						
Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)	Merdiven Tipi
Kaide	Küfeki	Sekizgen L=1,130	R=1,600	0,570	7,450	Tek çıkış-iniş Çekirdekli
Küp	Küfeki	R=2,720-2,300	R=1,600	0,570-0,350	0,510	
Gövde	Küfeki	R=2,300	R=1,600	0,350	16,970	
Petek	Küfeki	R=2,020	R=1,500	0,260	5,000	
Külah	Küfeki	Değişken	Değişken	0,260-0,050	2,750	
Minare Toplam Yüksekliği					32,680	



**Şekil 5.26.** Şehadet Cami minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu



**Şekil 5.27.** Şehadet Cami minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

**Çizelge 5.20.** Şehadet Cami minaresi malzeme özellikleri

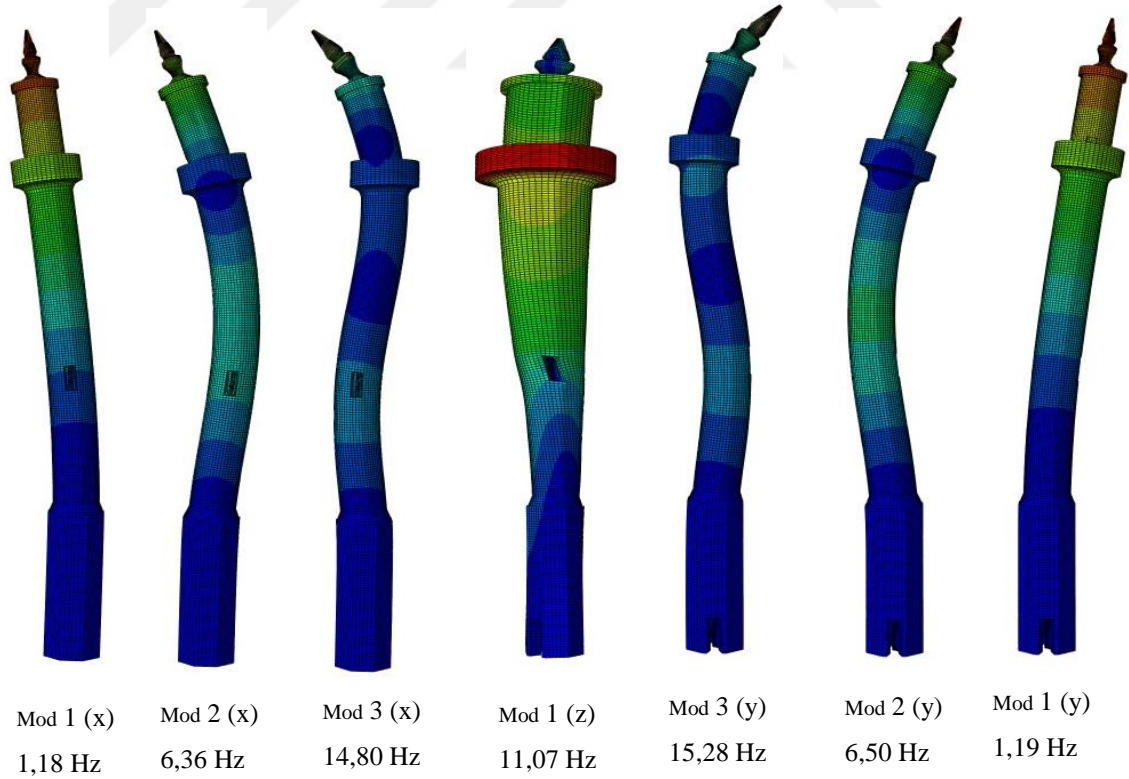
Minare Bölümleri	Malzeme	Elastite Modulu (E) Mpa	Birim Hacim Ağırlık ( $\beta h$ ),kg/m <sup>3</sup>	Poisson oranı ( $\nu$ )
Tüm Bölümler	Küfeki	7000	2340	0,20

Sonlu elemanlar modelinde x ve y yönlerinde ötelenme, z yönü için ise dönme mod şekilleri, frekansları ve modlara ait kütle katılım oranları tespit edilmiştir (Çizelge 5.21). Kütle katılım oranları her yöndeki üç mod için %90 mertebelerine ulaştığından dolayı sistemin hareketini ilk üç mod temsil edebilecek niteliktedir. Modal analiz sonuçlarıyla modal testten elde edilen frekans değerleri karşılaştırıldığında hata oranının maksimum

2. modda % 13 olduğu görülmektedir. Bu hata oranı sistemin hareketinin büyük bir kısmını temsil eden 1. modda olmadığı ve %20'nin altında kaldığı için kabul edilebilir düzeydedir. 2. Modun genliğinin düşük olması ivme alınan bölgede o modun tepkisinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden imkânlar dâhilinde daha fazla ivmeölçer kullanarak yapıların farklı bölgelerinden ivme kaydı almakta fayda vardır.

**Çizelge 5.21.** Şehadet Cami minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı

İvme Kayıt Yönü	Mod	Kütle Katılım Oranı, %	Modal Analiz Frekansı, Hz	Modal Test Frekansı, Hz	Hata oranı, %
X	1	56	1,18	1,21	2
	2	19	6,36	5,58	13
	3	9	14,8	14,86	1
Y	1	66	1,19	1,23	3
	2	22	6,5	5,91	10
	3	8	15,28	14,97	2
Z	1	-	11,07	10,9	1



**Şekil 5.28.** Şehadet Cami minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı

### 5.2.8. Sultan Alaaddin Cami

Eskişehir ili İnönü ilçesinde bulunan Sultan Alaaddin Cami 1369 yılında Hoca Yadigar Sultan Ali tarafından yaptırılmıştır. Cami tek kubbeli olup yaklaşık kare planlıdır.



**Şekil 5.29.** Sultan Alaaddin Cami minaresi ve konumu

Cami minaresinin kaidesi kare planlı ve cami duvarına bitişik inşa edilmiştir. Kaideden gövdeye sade bir küp elemanı kullanarak geçilmiştir. Şerefe altı stalaktitli (püskülsüz) inşa edilmiş olup minare açık şerefelidir. Minareye ait yerinde ölçülmüş geometrik özellikler çizelge 5.22'de verilmiştir.

Sultan Alaaddin Cami minaresinin arazide alınan ivme kayıtlarından 4 farklı frekans aralığı için güç spektrumları elde edilmiştir. Ancak minarenin x ve y yönündeki ilk üç mod, 25 Hz aralığında yer aldığından dolayı çalışma kapsamında sadece bu aralıktaki güç spektrumları verilmektedir (Şekil 5.30, Şekil 5.31).

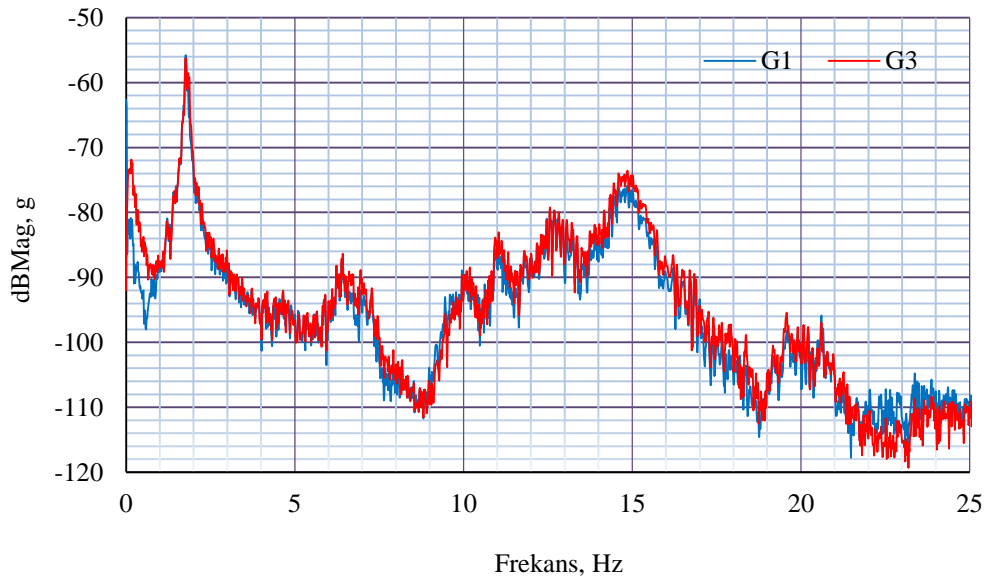
İncelemeye konu olan cami ve minarede çeşitli düzeylerde hasar ve bozulmalar gözlemlenmiştir. En önemli hasarlardan biri de minare kaidesi ve duvar arasında oluşan çatlaklardır. Bu hasarın minarenin bulunduğu zemin hareketi nedeniyle taban dönmesinden olduğu düşünülmektedir. Bu yüzden arazide belirlenen geometrik özellikler yardımıyla ilk olarak cami ve minarenin sonlu elemanlar modeli birlikte oluşturulmuştur. Bu sayede oluşan çatlakların hem dönmeden kaynaklı olup olmadığı incelenmiş hem de çatlak oluştuğundan sonra camiye mesnetli olan minare kaidesinin dinamik davranışı

incelenmiştir. Dinamik davranışın değerlendirilmesi sonucunda minare kaidesinin ayrı olarak çalıştığı anlaşılmıştır. Bu yüzden sadece minareden oluşan yeni bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlarla sonlu elemanlar modeli karşılaştırılarak malzeme özelliklerinin kalibrasyonu sağlanmıştır. Kalibrasyon işleminin neticesinde elde edilen malzeme özellikleri çizelge 5.23’de verilmiştir.

**Çizelge 5.22.** Sultan Alaaddin Cami minaresi malzeme ve geometrik özellikleri

Sultan Alaaddin Cami Minaresi						
Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)	Merdiven Tipi
Kaide	Taş	Kare L=2,160	R=1,280	0,44	7,100	Tek çıkış-iniş Çekirdeksiz
Küp	Tuğla+Harç	R=2,100-1,840	R=1,280-1,240	0,410-0,300	2,000	
Gövde	Tuğla+Harç	R=1,840	R=1,240	0,300	8,000	
Petek	Tuğla+Harç	R=1,600	R=1,180	0,210	3,700	
Külah	Kurşun	-	-	-	3,750	
Minare Toplam Yüksekliği					24,550	
Minarenin Zeminden İtibaren Yüksekliği					24,550	

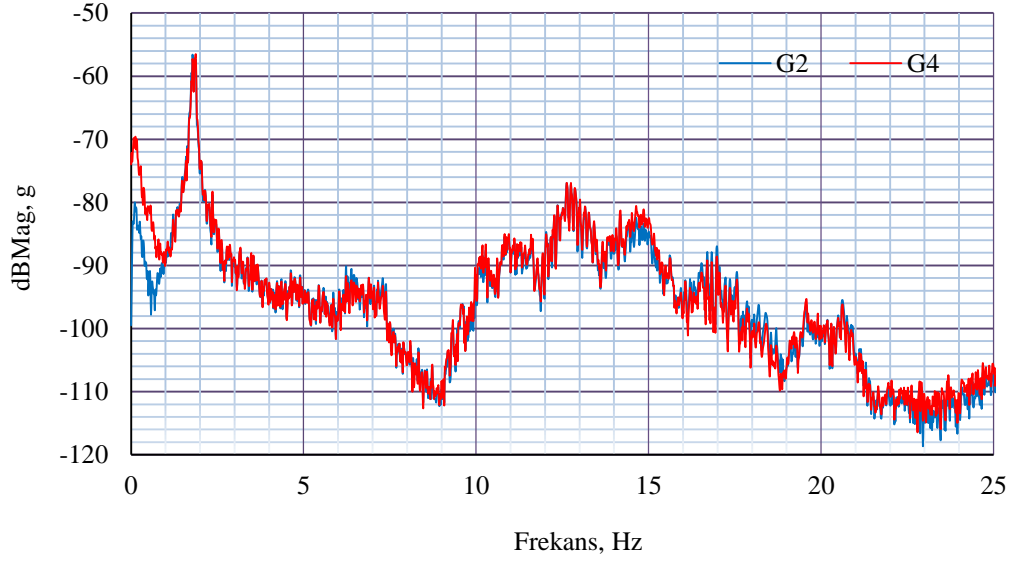
**Güç Spekturumu**



**Şekil 5.30.** Sultan Alaaddin Cami minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu



### Güç Spekturumu



**Şekil 5.31.** Sultan Alaaddin Cami minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

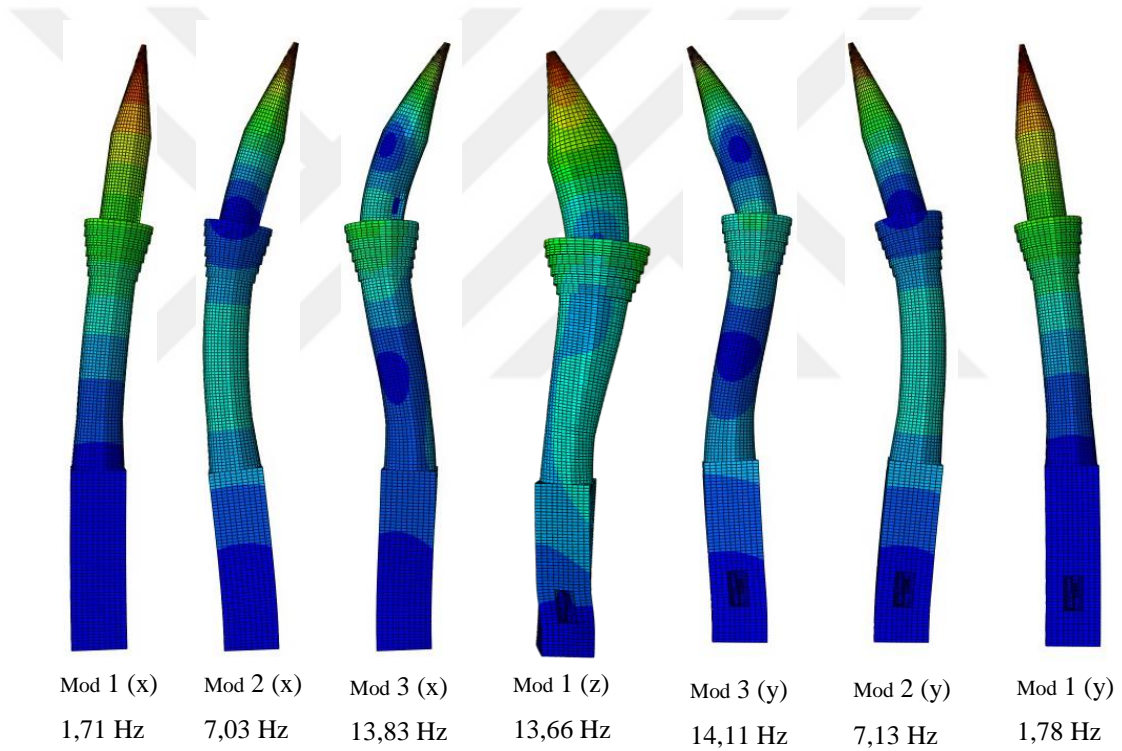
**Çizelge 5.23.** Sultan Alaaddin Cami minaresi malzeme özellikleri

Minare Bölümleri	Malzeme	Elastiste Modulu (E) Mpa	Birim Hacim Ağırlık ( $\beta_h$ ), kg/m <sup>3</sup>	Poisson oranı ( $\nu$ )
Kaide	Taş	7000	2300	0,2
Küp	Tuğla+Harç	3800	1700	0,18
Gövde	Tuğla+Harç	3800	1700	0,18
Petek	Tuğla+Harç	3800	1700	0,18

Minareye ait sonlu elemanlar modelinde x ve y yönleri için mod şekilleri, frekansları ve modlara ait kütle katılım oranları tespit edilmiştir (Çizelge 5.24, Şekil 32). Kütle katılım oranları her yöndeki üç mod için %85 mertebelerine ulaştığından dolayı sistemin hareketini ilk üç mod temsil edebilecek niteliktedir. Modal analiz sonuçlarıyla modal testten elde edilen frekans değerleri karşılaştırıldığında hata oranının maksimum 2. modda % 10 olduğu görülmektedir. Bu hata oranı sistemin hareketinin büyük bir kısmını temsil eden 1. modda olmadığı ve %20'nin altında kaldığı için kabul edilebilir düzeydedir.

**Çizelge 5.24.** Sultan Alaaddin Cami minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı

İvme Kayıt Yönü	Mod	Kütle Katılım Oranı, %	Modal Analiz Frekansı, Hz	Modal Test Frekansı, Hz	Hata oranı, %
X	1	44,00	1,71	1,76	3
	2	28,00	7,03	6,47	8
	3	10,00	13,83	14,70	5
Y	1	43,00	1,73	1,73	0
	2	29,00	7,13	6,57	8
	3	11,00	14,11	12,81	10



**Şekil 5.32.** Sultan Alaaddin Cami minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı

### 5.2.9. Timurtaş Paşa Cami Minaresi

Bir diğer adı Demirtaş olan cami İnönü caddesinden kuzeye ilerlerken sağda cami, imaret ve hamamdan oluşan külliyeinin içinde yer almaktadır. Cami 1390 yılında Kara Timurtaş Paşa'nın oğlu Ali Bey tarafından yaptırıldığı ifade edilmektedir. Cami ters T planlı olup minaresi camiden ayrı olarak yapılmıştır (Şekil 5.33).



Şekil 5.33. Timurtaş Paşa Cami minaresi ve konumu

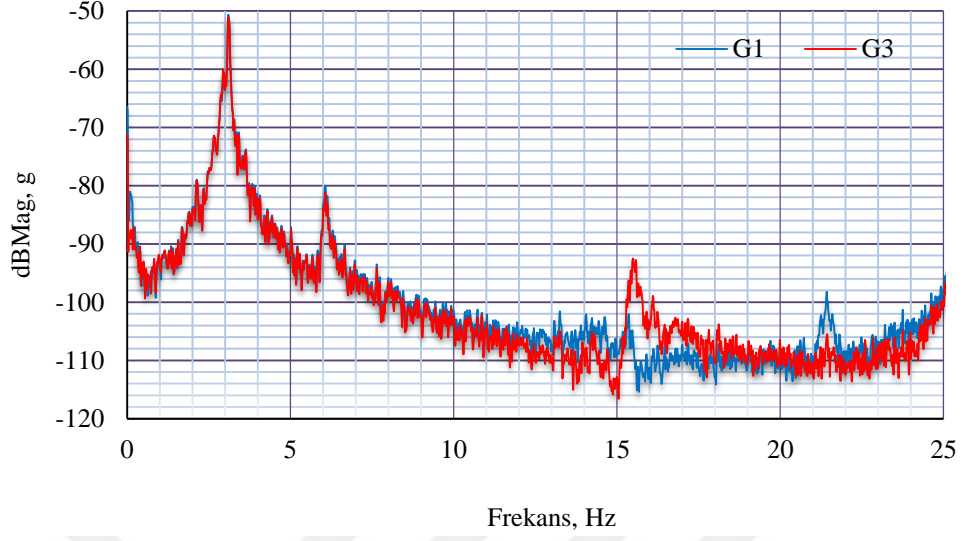
İncelenen minare alışlagelmiş minarelerden farklı olarak bir fonksiyona daha sahiptir. Minarenin altında şadırvan olup bu amaçla tasarlanmış tek örnektir. Yapı eşkenar altıgen oluşturan altı ayak üzerine kubbe ve minare bölümlerinde oluşmaktadır. Kubbe bölümü tuğla ve harçtan oluşmaktadır. Ancak kubbenin etrafı küfeki taşıyla örülerek kubbenin açılması engellenmiştir. Kubbe üzerine oturan geçiş elemanı piramidal Türk üçgeninden oluşmaktadır. Şerefe altı stalaktitli (püskülsüz) inşa edilmiş olup minare açık şerefelidir. Minarenin külah bölümü kurşundan yapılmış olup farklı bir mimariye sahiptir. Minareye çıkabilmek için zeminden başlayan demir bir merdiven daha sonra ise kubbeye bağlanan yapının alt peteği kullanılmaktadır. Şadırvan üzerindeki bu petek yaklaşık 7 m olup altıgen bir geometriye sahiptir. Yapımında ise tuğla ve harç kullanılmıştır. Yapıda kullanılan malzemeler ve geometrik özellikler çizelge 5.25'te açıkça ifade edilmiştir.

**Çizelge 5.25.** Timurtaş Paşa Cami minaresi malzeme ve geometrik özellikleri

Timurtaş Paşa Cami Minaresi						
Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)	Merdiven Tipi
Kemer Ayak	Tuğla+Harç	Altıgen L=3,0	Altıgen L=2,15	0,75	5,25	Tek çıkış-iniş Çekirdekli
Kubbe	Taş+Tuğla	Değişken	Değişken	Değişken	2,70	
Küp	Tuğla+Harç	R=2,00-1,63	R=1,15	0,42-0,24	0,96	
Gövde	Tuğla+Harç	R=1,63	R=1,15	0,24	6,00	
Petek	Tuğla+Harç	R=1,50	R=1,10	0,20	4,00	
Külâh	Kurşun	-	-	-	1,50	
Minare Toplam Yüksekliği					20,41	

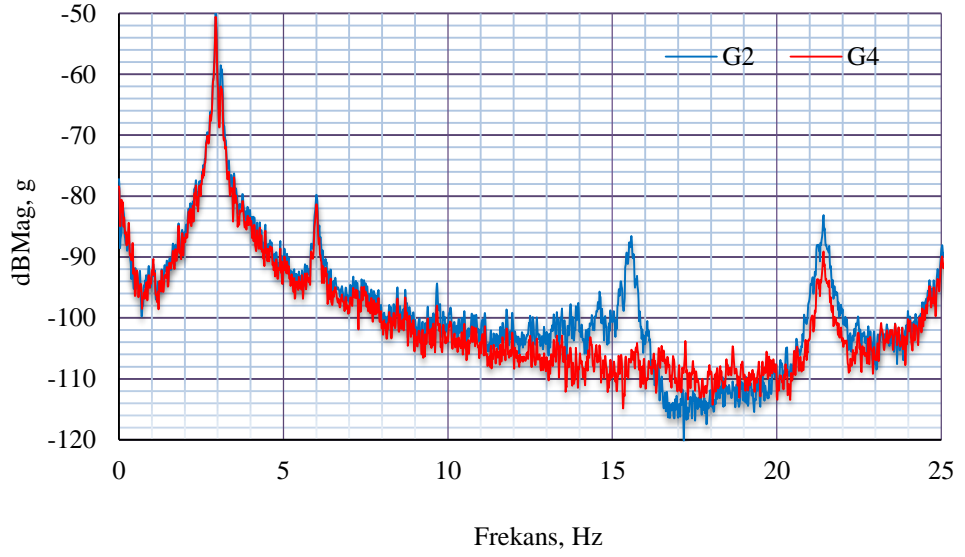
Timurtaş Paşa Cami minaresi için arazide alınan ivme kayıtlarından 4 farklı frekans aralığı için güç spektrumları elde edilmiştir. Ancak minarenin x ve y yönündeki ilk üç mod, 25 Hz aralığında yer aldığı için çalışma kapsamında sadece bu aralıktaki spektrumlar verilmesi yeterli olmuştur (Şekil 5.34, Şekil 5.35). Arazide belirlenen geometrik özellikler yardımıyla minarenin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlarla sonlu elemanlar modeli karşılaştırılarak malzeme özelliklerinin ve mesnetlenme koşullarının kalibrasyonu sağlanmıştır. Kalibrasyon işleminin neticesinde elde edilen malzeme özellikleri çizelge 5.26'da verilmiştir. Malzeme özelliklerinde Taş+Tuğladan oluşan bölümlerdeki elastisite modülü ile sadece tuğladan oluşan bölümlerin elastisite modülü arasında çok fazla fark yoktur. Çünkü kubbe bölümünün taşıyıcı kısmı tuğladan oluşmuştur. Bu yüzden elde edilen malzemede birim hacim ağırlık daha fazla artmıştır.

Güç Spekturumu



Şekil 5.34. Timurtaş Paşa Cami minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

Güç Spekturumu



Şekil 5.35. Timurtaş Paşa Cami minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

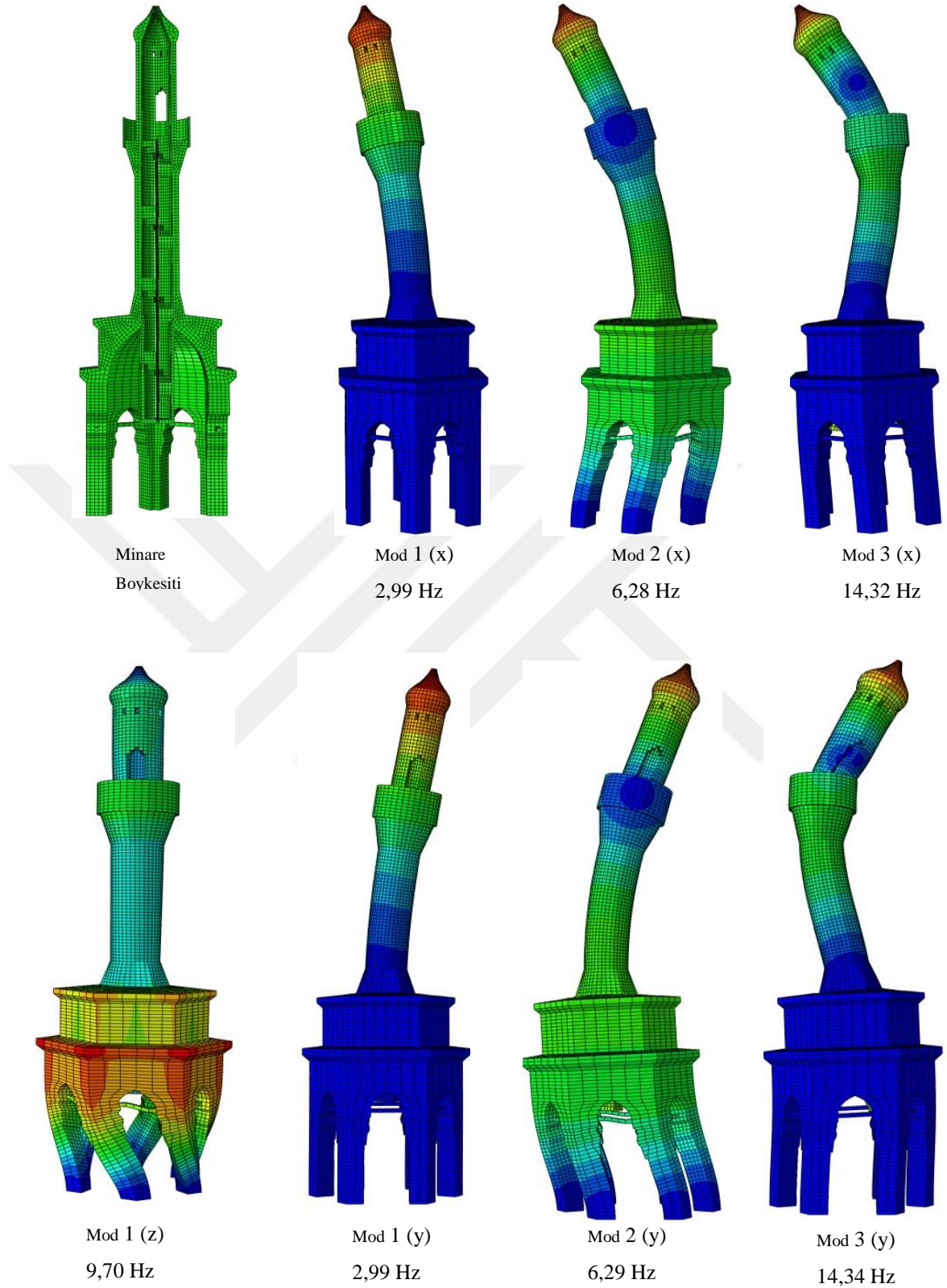
**Çizelge 5.26.** Timurtaş Paşa Cami minaresi malzeme özellikleri

Minare Bölümleri	Malzeme	Elastite Modulu (E) Mpa	Birim Hacim Ağırlık ( $\beta_n$ ),kg/m <sup>3</sup>	Poisson oranı ( $\nu$ )
Kemer Ayak	Tuğla+Harç	4600	1700	0,18
Kubbe	Taş+Tuğla	4800	2150	0,2
Küp	Tuğla+Harç	4600	1700	0,18
Gövde	Tuğla+Harç	4600	1700	0,18
Petek	Tuğla+Harç	4600	1700	0,18
Merdiven	Taş+Tuğla	4800	2150	0,2

Sonlu elemanlar modelinde x ve y yönleri için mod şekilleri, frekansları ve modlara ait kütle katılım oranları tespit edilmiştir (Çizelge 5.27, Şekil 5.36). Kütle katılım oranları her yöndeki üç mod için %99 mertebelerine ulaştığından dolayı sistemin hareketini ilk üç mod temsil etmektedir. Modal analiz sonuçlarıyla modal testten elde edilen frekans değerleri karşılaştırıldığında hata oranının x ve y yönlerinde % 7'ü geçmediği görülmüştür Bu hata oranı çok düşük değer olduğu için sonlu elemanlar modelinin yapı dinamik davranışını oldukça doğru temsil ettiği söylenebilir..

**Çizelge 5.27.** Timurtaş Paşa Cami minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı

İvme Kayıt Yönü	Mod	Kütle Katılım Oranı, %		Modal Analiz Frekansı, Hz	Modal Test Frekansı, Hz	Hata oranı, %
		X	Y			
X	1	14,00	8,00	2,99	3,08	3
	2	75,00	1,00	6,28	6,09	3
	3	1,00	0,00	14,32	15,47	7
Y	1	8,00	14,00	2,99	2,95	1
	2	1,00	75,00	6,29	6,03	4
	3	0,00	1,00	14,34	15,55	7
Z	1	-	-	9,71	9,70	0



Şekil 5.36. Timurtaş Paşa Cami minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı

### 5.2.10. Ulucami Batı Minaresi

Mimarı Ali Neccar olduğu düşünölen Ulucami, Yıldırım Beyazıt tarafından 1396-1400 yılları arasında yaptırılmıştır. Cami, kapalı namaz kılma alanı bakımından Türk tarihinde yapılan en büyük camilerden birisidir. 69x55 m dikdörtgen plana sahip cami kalın duvarlara ve 12 yığma fil ayağına oturan 20 adet kubbeye sahiptir. Cami kuzey duvarının iki köşesinde batı ve doğu minareleri mevcuttur. İki minarenin yapım tarihleri farklıdır. Cami ve minareleri zaman içinde deprem, Lodos, yangın ve bazı istilalardan oldukça zarar görmüştür.



**Şekil 5.37.** Ulucami Batı Minaresi ve konumu

Batı minaresi Yıldırım Beyazıt tarafından yaptırılmıştır (Şekil 5.37). Kaidesi sekizgen olup kaidenin bir bölümü beden duvarına bitişiktir. Minarenin kaidesi oldukça rijittir. Kaide dış yüzeyi mermer kaplama olup yapımda kullanılan ana malzeme küfeki taşıdır (Çizelge 5.28). Minareye giriş kaide dışından, cami içerisinden olmakla beraber şerefeye kadar çift merdiven vardır. Bunun dışında kaidenin cami çatısına çıkan bir kapısı daha mevcuttur. Şerefe altı stalaktitli (püskülsüz) inşa edilmiş olup minare açık şerefelidir. Minarelerin külahları vaktiyle ahşap ve üstü kurşun örtülü iken 1889 da çıkan büyük yangında bu külahlar yanınca yerine bugünkü kâgir boğumlu külahlar yapılmıştır.

Ulucami batı minaresi için arazide alınan ivme kayıtlarından 4 farklı frekans aralığı için güç spektrumları elde edilmiştir. Ancak minarenin x ve y yönündeki ilk dört mod, 25 Hz

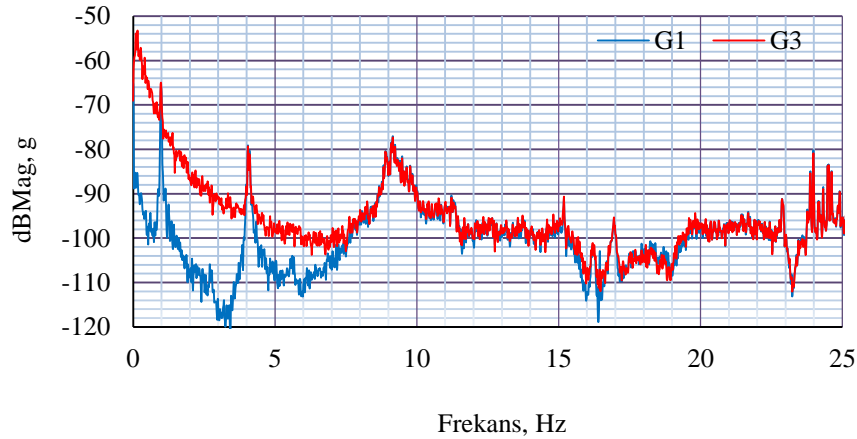


aralığında yer aldığı için çalışma kapsamında sadece bu aralıktaki spektrumlar verilmektedir (Şekil 5.38, Şekil 5.39). Arazide belirlenen geometrik özellikler yardımıyla minarenin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlarla sonlu elemanlar modeli karşılaştırılarak malzeme özelliklerinin ve mesnetlenme koşullarının kalibrasyonu sağlanmıştır. Kalibrasyon işleminin neticesinde elde edilen malzeme özellikleri çizelge 5.29’da verilmiştir. Hem taş hem tuğla için elde edilen malzeme özellikleri literatür araştırmalarında tespit edilen değerlerde olup genel manada iyi durumdadır. Minarenin kaidesi kısmi olarak caminin kuzey beden duvarına mesnetli olduğu modal analiz sonucunda doğrulanmıştır.

**Çizelge 5.28.** Ulucam Batı minaresi malzeme ve geometrik özellikleri

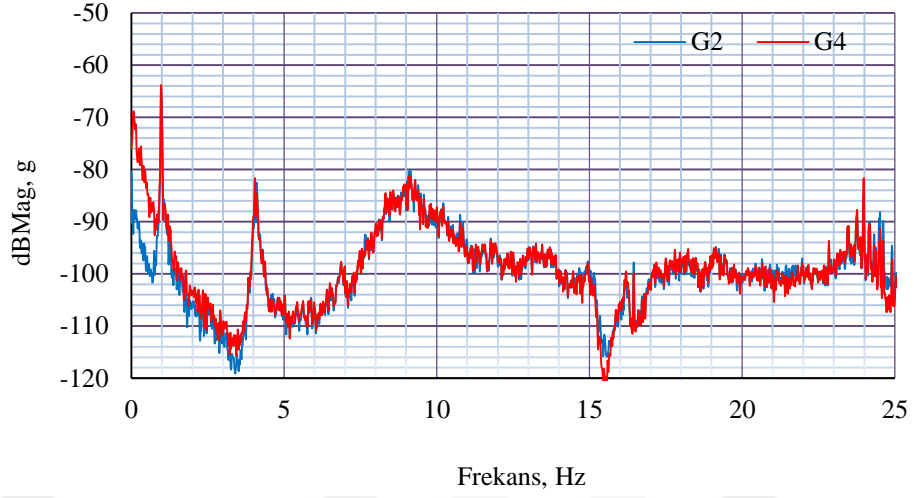
Ulucami Batı Minaresi						
Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)	Merdiven Tipi
Kaide	Taş	Sekizgen L=2,60	R=2,20	2,30	11,47	Çift çıkış-iniş Çekirdekli
Küp	Taş	R=6,26-4,30	R=2,20	2,03-1,05	2,48	
Gövde	Tuğla+Harç	R=4,30	R=2,20	1,05	21,70	
Petek	Tuğla+Harç	R=3,46	R=2,20-2,00	0,63-0,73	7,10	
Külâh	Taş	Değişken	Değişken	Değişken	6,05	
Minare Toplam Yüksekliği					48,80	

Güç Spekturumu



**Şekil 5.38.** Ulucami Batı minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

### Güç Spekturumu



**Şekil 5.39.** Ulucami Batı minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

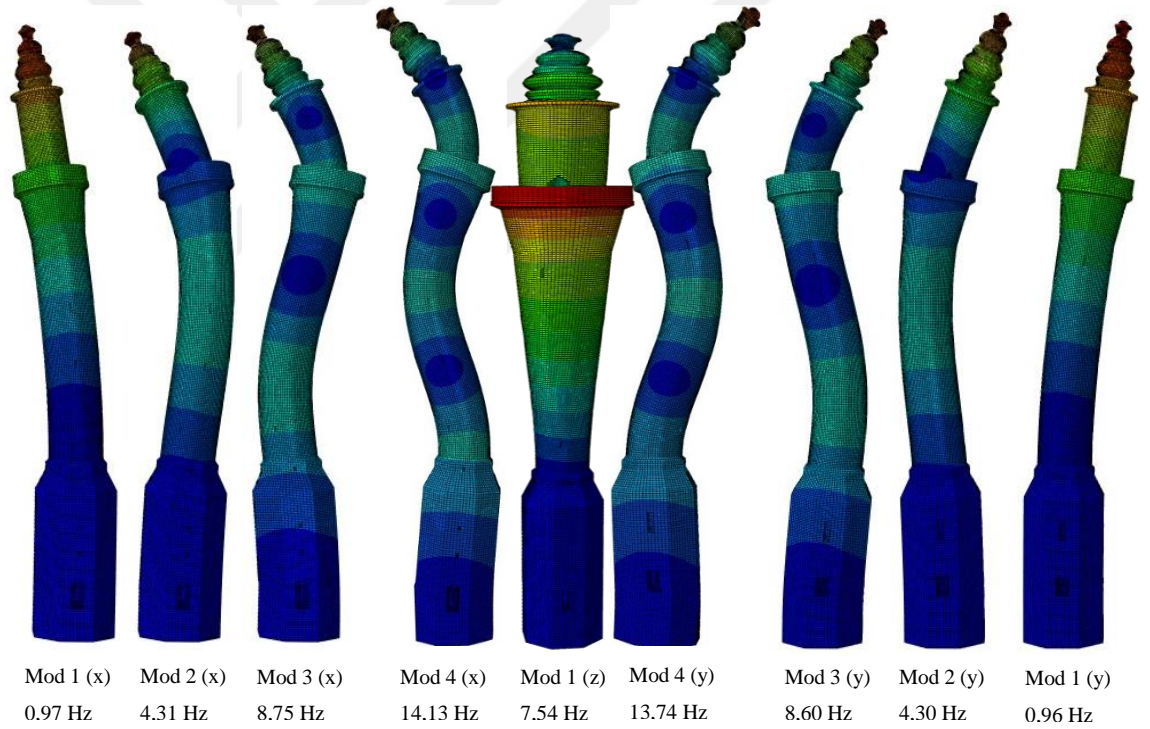
**Çizelge 5.29.** Ulucami batı minaresi malzeme özellikleri

Minare Bölgümleri	Malzeme	Elastiste Modulu (E) Mpa	Birim Hacim Ağırlık ( $\beta_h$ ), kg/m <sup>3</sup>	Poisson oranı ( $\nu$ )
Kaide	Taş	13000	2300	0,2
Küp	Taş	13000	2300	0,2
Gövde	Tuğla+Harç	3450	1800	0,18
Petek	Tuğla+Harç	3450	1800	0,18
Külâh	Tuğla+Harç	3450	1800	0,18

Sonlu elemanlar modelinde x ve y yönleri için mod şekilleri, frekansları ve modlara ait kütle katılım oranları tespit edilmiştir (Çizelge 5.30, Şekil 5.40)). Kütle katılım oranları x ve y yönlerindeki üç mod için yeterli düzeyde olmadığından dolayı dördüncü modda karşılaştırmaya alınmıştır. Dördüncü mod ile beraber kütle katılım oranı %95 mertebelerine ulaştığından dolayı sistemin davranışı oldukça iyi temsil edilmiştir. Modal analiz sonuçlarıyla modal testten elde edilen frekans değerleri karşılaştırıldığında hata oranının x ve y yönlerinde % 5'i geçmediği görülmüştür Bu hata oranı çok düşük değer olduğu için sonlu elemanlar modelinin yapı dinamik davranışını oldukça doğru temsil ettiği söylenebilir.

**Çizelge 5.30.** Ulucami batı minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı

İvme Kayıt Yönü	Mod	Kütle Katılım Oranı, %		Modal Analiz Frekansı, Hz	Modal Test Frekansı, Hz	Hata oranı, %
		X	Y			
X	1	36,00	2,00	0,97	0,98	1
	2	13,00	7,00	4,31	4,10	5
	3	19,00	1,00	8,75	9,15	4
	4	16,00	0,00	14,13	14,95	5
Y	1	2,00	35,00	0,96	0,96	0
	2	7,00	14,00	4,30	4,09	5
	3	1,00	20,00	8,60	9,03	4
	4	0,00	15,00	13,74	13,38	2



**Şekil 5.40.** Ulucami batı minaresinin ilk yedi mod şekli ve frekansı

### 5.2.11. Ulucami Doğu Minaresi

Fetret devrinden sonra 1413 yılında Çelebi Mehmet Sultan tarafından yaptırılmıştır (Şekil 5.41). Kaidesi kare planlı ve küfeki taşı kullanılarak cami beden duvarından ayrıık inşa edilmiştir. Küp elemanı piramidal Türk üçgenleriyle oluşturulmuştur. Gövde duvarları tuğla ve harçtan imal edilmiş, yukarıya doğru daralan en kesite sahiptir. Şerefe altı stalaktitli (püskülsüz) inşa edilmiş olup minare açık şerefelidir. Petek ve külah bölümünün malzeme ve geometrik özellikleri batı minaresiyle yaklaşık simetrikdir (Çizelge 5.31).

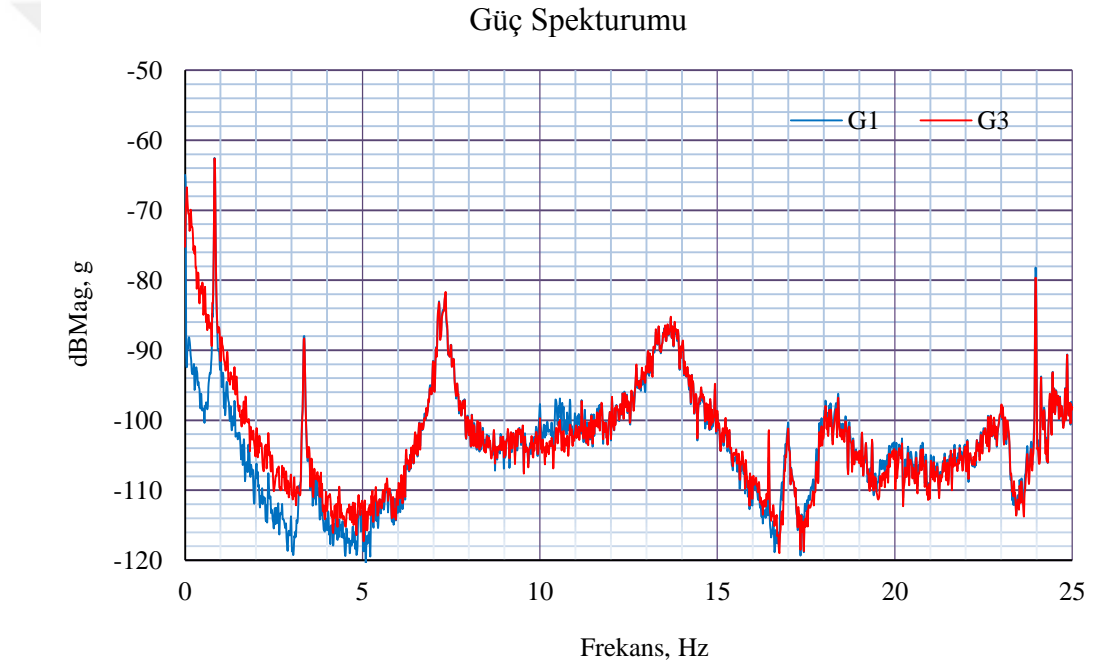


Şekil 5.41. Ulucami doğu minaresi

Çizelge 5.31. Ulucami doğu minaresi malzeme ve geometrik özellikleri

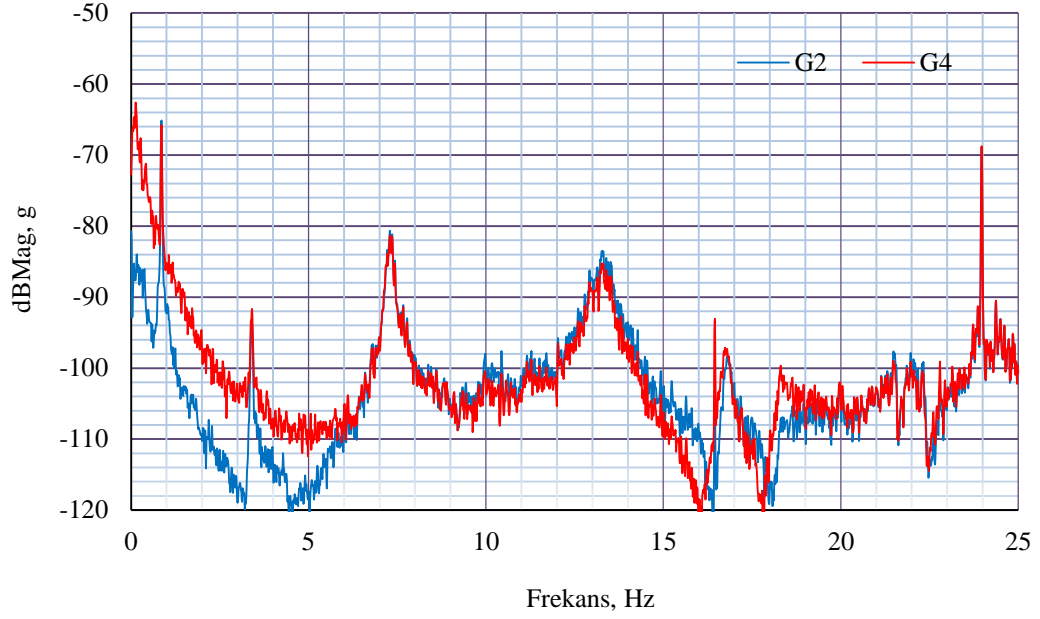
Ulucami Doğu Minaresi						
Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)	Merdiven Tipi
Kaide	Taş	Kare L=5,84	R=2,16	1,84	4,6	Tek çıkış-iniş Çekirdekli
Küp	Taş	L=5,84, R=5,26	R=2,16	1,84-1,55	2,2	
Gövde	Tuğla+Harç	R=5,26	R=2,16	1,55	28,3	
Petek	Tuğla+Harç	R=3,66	R=2,16	0,75	7	
Kühah	Taş	Değişken	Değişken	Değişken	6,4	
Minare Toplam Yüksekliği					48,5	

Ulucami doğu minaresi için arazide alınan ivme kayıtlarından 4 farklı frekans aralığı için güç spektrumları elde edilmiştir. Ancak minarenin x ve y yönündeki ilk dört mod, 25 Hz aralığında yer aldığı için çalışma kapsamında sadece bu aralıktaki spektrumlar verilmektedir (Şekil 5.42, Şekil 5.43). Arazide belirlenen geometrik özellikler yardımıyla minarenin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlarla sonlu elemanlar modeli karşılaştırılarak malzeme özelliklerinin ve mesnetlenme koşullarının kalibrasyonu sağlanmıştır. Kalibrasyon işleminin neticesinde elde edilen malzeme özellikleri çizelge 5.32’de verilmiştir. Hem taş hem de tuğla için elde edilen malzeme özellikleri literatür araştırmalarında tespit edilen değerlerde olup genel manada iyi durumdadır.



**Şekil 5.42.** Ulucami doğu minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

### Güç Spekturumu



Şekil 5.43. Ulucami doğu minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

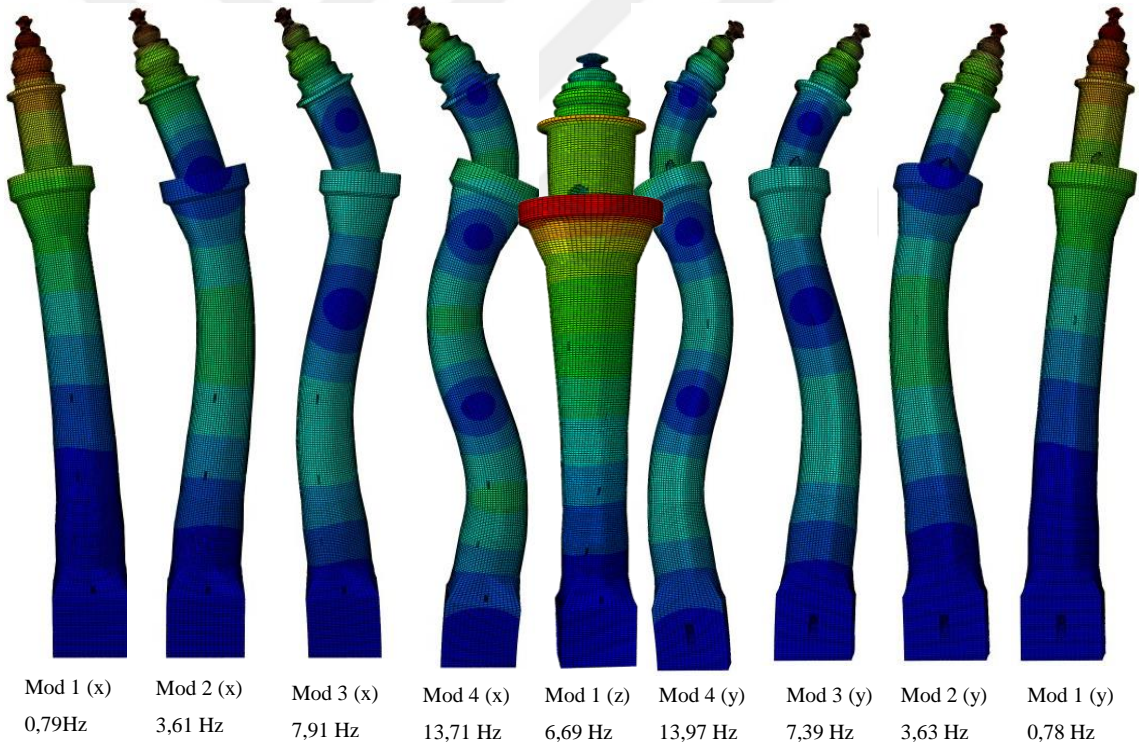
Çizelge 5.32. Ulucami batı minaresi malzeme özellikleri

Minare Bölümleri	Malzeme	Elastite Modulu (E) Mpa	Birim Hacim Ağırlık ( $\beta h$ ),kg/m <sup>3</sup>	Poisson oranı ( $\nu$ )
Kaide	Taş	7000	2350	0,2
Küp	Taş	7000	2350	0,2
Gövde	Tuğla+Harç	3650	1800	0,18
Petek	Tuğla+Harç	3650	1800	0,18
Külâh	Tuğla+Harç	3650	1800	0,2

Sonlu elemanlar modelinde x ve y yönleri için mod şekilleri, frekansları ve modlara ait kütle katılım oranları tespit edilmiştir (Şekil 5.44). Kütle katılım oranları x ve y yönlerindeki üç mod için yeterli düzeyde olmadığından dolayı dördüncü modda karşılaştırmaya alınmıştır. Dördüncü mod ile beraber kütle katılım oranı %93 mertebelerine ulaştığından dolayı sistemin davranışı oldukça iyi temsil edilmiştir. Modal analiz sonuçlarıyla modal testten elde edilen frekans değerleri karşılaştırıldığında hata oranının x ve y yönlerinde % 8'i geçmediği görülmüştür (Çizelge 5.33). Bu hata oranı çok düşük değer olduğu için sonlu elemanlar modelinin yapı dinamik davranışını oldukça doğru temsil ettiği söylenebilir.

**Çizelge 5.33.** Ulucami doğu minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı

İvme Kayıt Yönü	Mod	Kütle Katılım Oranı, %		Modal Analiz Frekansı, Hz	Modal Test Frekansı, Hz	Hata oranı, %
		X	Y			
X	1	34,00	16,00	0,79	0,82	3
	2	20,00	0,00	3,61	3,37	7
	2	11,00	1,00	7,91	7,35	7
	4	11,00	0,00	13,71	13,70	0
Y	1	16,00	34,00	0,78	0,83	6
	2	0,00	21,00	3,63	3,41	6
	3	0,00	11,00	8,01	7,39	8
	4	0,00	10,00	13,87	13,36	3



**Şekil 5.44.** Ulucami doğu minaresinin ilk dokuz mod şekli ve frekansı

### 5.2.12. Üftade Cami

Bursa Kavaklı mahallesinde bulunan cami Üftade Mehmet Muhiddin tarafından 1579 yılında inşa ettirilmiştir. Cami kare planlı olup bir adet kubbeye sahiptir. Caminin doğu kısmında beden duvarına bitişik zarif bir minaresi mevcuttur. Zaman içinde gerçekleşen Depremlerde cami ve minaresi yıkılmış veya zarar görmüştür. Ancak tekrar eski haline getirilmiştir (Şekil 5.45).



Şekil 5.45. Üftade Cami minaresi ve konumu

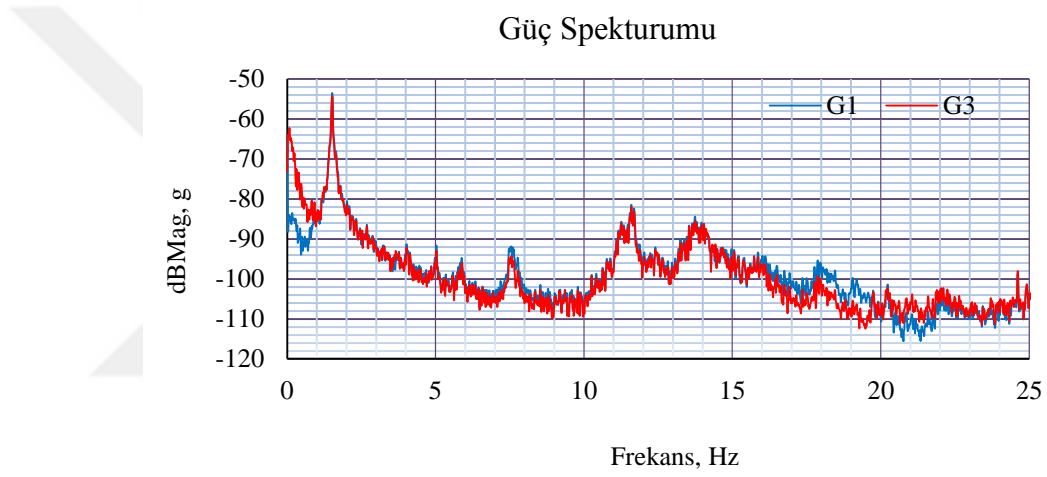
Minare kaidesi cami beden duvarına bitişik olarak kare planlı inşa edilmiştir. Kaideden gövdeye geçişteki küp elemanında uzun piramidal Türk üçgeni geometrisi kullanılmıştır. Şerefe altı stalaktitli (püskülsüz) inşa edilmiş olup minare açık şerefelidir. Minare ait yerinde ölçülmüş geometrik özellikler çizelge 5.34'te verilmiştir.

Üftade Cami minaresi için arazide alınan ivme kayıtlarından 4 farklı frekans aralığı için güç spektrumları elde edilmiştir. Ancak minarenin x ve y yönündeki ilk üç mod, 25 Hz aralığında yer aldığı için çalışma kapsamında sadece bu aralıktaki spektrumlar verilmektedir (Şekil 5.46, Şekil 5.47). Arazide belirlenen geometrik özellikler yardımıyla minarenin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlarla sonlu elemanlar modeli karşılaştırılarak malzeme özelliklerinin ve mesnetlenme koşullarının kalibrasyonu sağlanmıştır. Kalibrasyon işleminin neticesinde elde edilen malzeme özellikleri çizelge 5.35'te verilmiştir. Minare kaidesi, yerindeki incelemede cami beden duvarına bitişik olduğu tespit edilmiştir. Modal analiz sonucundaki karşılaştırmada bu tespit doğrulanmıştır.

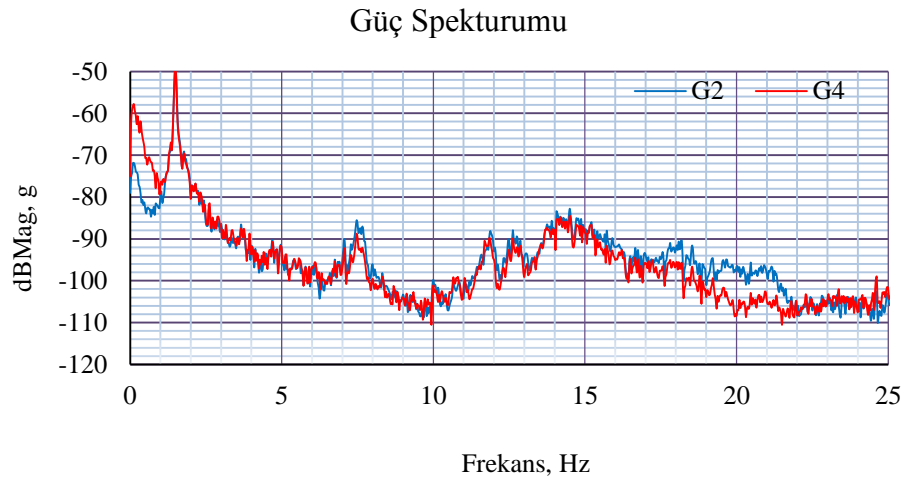


**Çizelge 5.34.** Üftade Cami minaresi malzeme ve geometrik özellikleri

Üftade cami minaresi						
Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)	Merdiven Tipi
Kaide	Küfeki+Tuğla	Kare, L=2,200	R=1,170	0,515	10,650	Tek çıkış-iniş Çekirdeksiz
Küp	Tuğla+Harç	R=2,160-1,730	R=1,170	0,500-0,280	1,430	
Gövde	Tuğla+Harç	R=1,730	R=1,170	0,280	7,740	
Petek	Tuğla+Harç	R=1,520	R=1,520	0,220	4,480	
Külâh	Kurşun	-	-	-	2,300	
Minare Toplam Yüksekliği					26,600	



**Şekil 5.46.** Üftade Cami minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu



**Şekil 5.47.** Üftade Cami minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

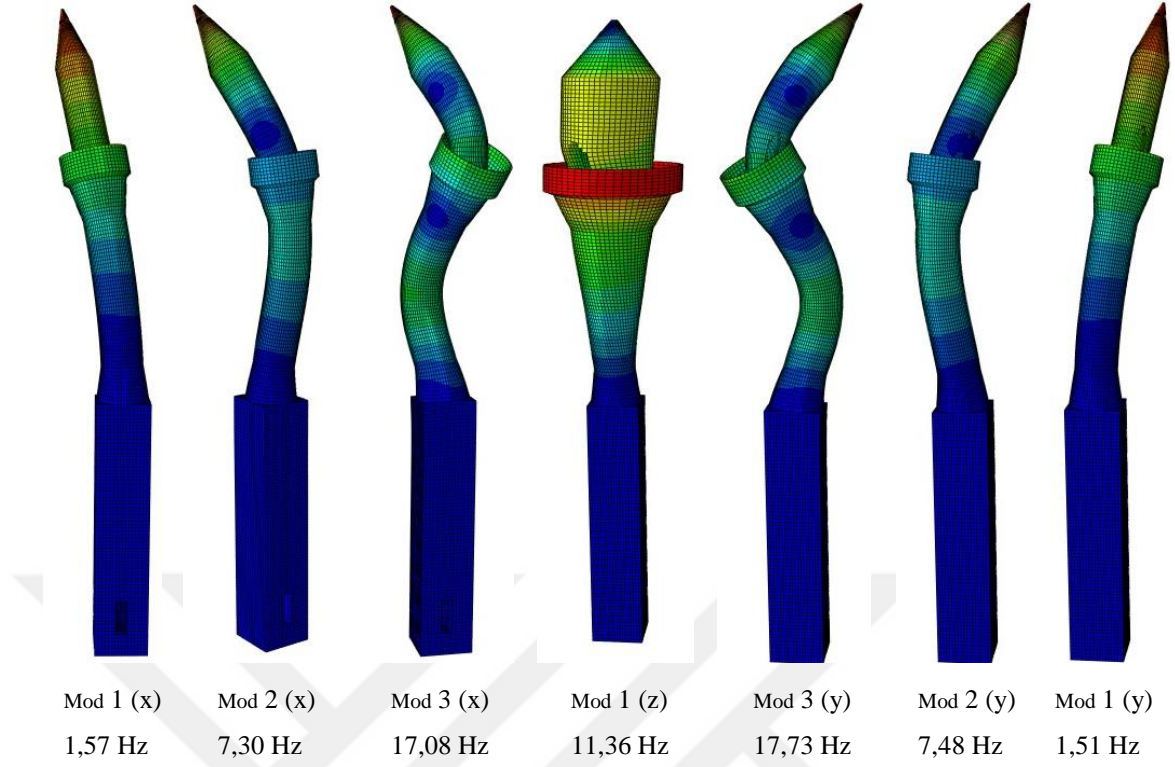
**Çizelge 5.35.** Üftade Cami minaresi malzeme özellikleri

Minare Bölümleri	Malzeme	Elastite Modulu (E) Mpa	Birim Hacim Ağırlık ( $\beta_h$ ),kg/m <sup>3</sup>	Poisson oranı ( $\nu$ )
Kaide	Küfeki+Tuğla	4000	2300	0,2
Küp	Tuğla+Harç	2000	1900	0,18
Gövde	Tuğla+Harç	2000	1900	0,18
Petek	Tuğla+Harç	2000	1900	0,18
Merdiven	Taş+Tuğla	2100	1900	0,18

Sonlu elemanlar modelinde x ve y yönleri için mod şekilleri, frekansları ve modlara ait kütle katılım oranları tespit edilmiştir (Çizelge 5.36, Şekil 5.48). Kütle katılım oranları her yöndeki üç mod için %90 mertebelerine ulaştığından dolayı sistemin hareketini ilk üç mod temsil edebilecek niteliktedir. Modal analiz sonuçlarıyla modal testten elde edilen frekans değerleri karşılaştırıldığında hata oranının x ve y yönlerinde % 4'ü geçmediği görülmüştür. Bu hata oranı çok düşük değer olduğu için sonlu elemanlar modelinin yapı dinamik davranışını oldukça doğru temsil ettiği söylenebilir. Güç spektrumlarında 11,36 Hz'te görülen pik burulma modudur.

**Çizelge 5.36.** Üftade Cami minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı

İvme Kayıt Yönü	Mod	Kütle Katılım Oranı, %		Modal Analiz Frekansı, Hz	Modal Test Frekansı, Hz	Hata oranı, %
		X	Y			
X	1	33,00	31,00	1,57	1,54	1
	2	14,00	7,00	7,30	7,60	4
	3	7,00	4,00	17,08	17,78	4
Y	1	31,00	33,00	1,56	1,51	3
	2	7,00	14,00	7,48	7,65	2
	3	4,00	7,00	17,73	17,81	1



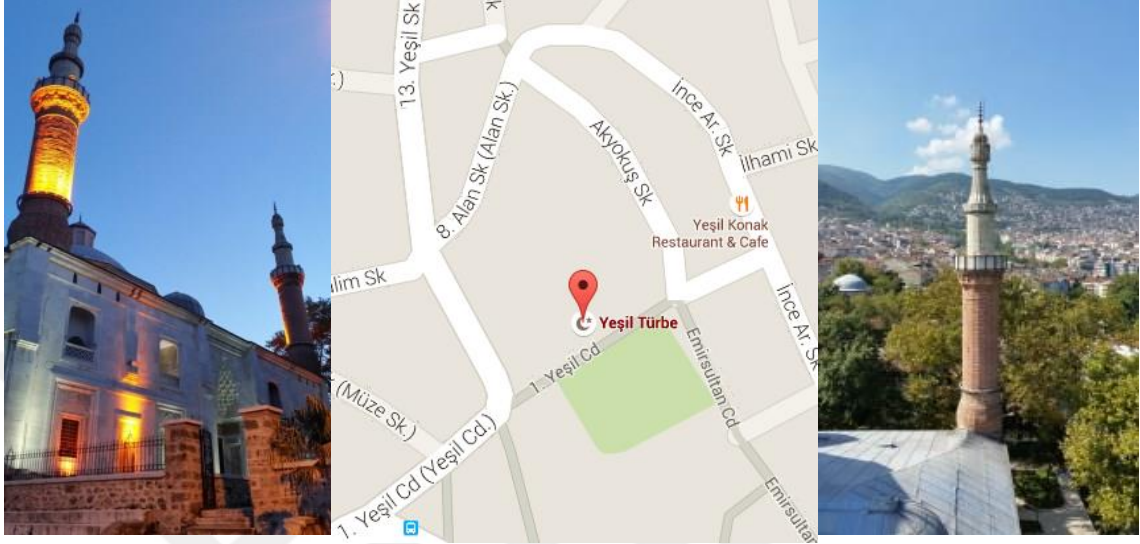
**Şekil 5.48.** Üftade Cami minaresi ilk yedi mod şekli ve frekansı

### 5.2.13. Yeşil Cami Batı Minaresi

Cami, adını verdiği Yeşil semtinde olup Yeşil külliyesi yapılarındandır. Osmanlı mimarisinin ilk dönem eserleri arasında yer alan cami 1413 yılında Çelebi Mehmed Sultan döneminde başlanmış 1424 yılında Sultan II. Murad zamanında tamamlanmıştır. Ters T planlı caminin Mimarı Hacı İvaz Paşadır. Dönemin devlet işlerinin de görüldüğü caminin kuzey duvarının batı ve doğu cephesinde iki adet minare bulunmaktadır. Günümüzdeki minareler 1855 yılındaki depremden sonra yapılmış olup önceki minarelerin camiye adını veren yeşil çinilerle kaplı olduğu tahmin edilmektedir (Şekil 5.49).

Yerinde yapılan incelemelerde caminin doğu ve batı minarelerinin simetrik olduğu tespit edilmiştir. Bu yüzden sadece batı minaresinin incelenmesinin yeterli olacağı düşünülmüştür. Minarenin kaidesi küfeki taşından yapılmış olup minarenin merdivenleri günümüz haliyle asma kattan başlamaktadır. Yerinde yapılan incelemede minare kaidesi beden duvarına bitişiktir. Küp bölümü nadir görülen armudi mimaride tasarlanmıştır.

Şerefe altı stalaktitli (püskülsüz) inşa edilmiş olup minare açık şerefelidir. Muradiye batı minaresinde olduğu gibi petek ve külah bölümü küfeki taşından inşa edilmiştir. Minareye ait yerinde ölçülmüş geometrik özellikler çizelge 5.37’de verilmiştir.



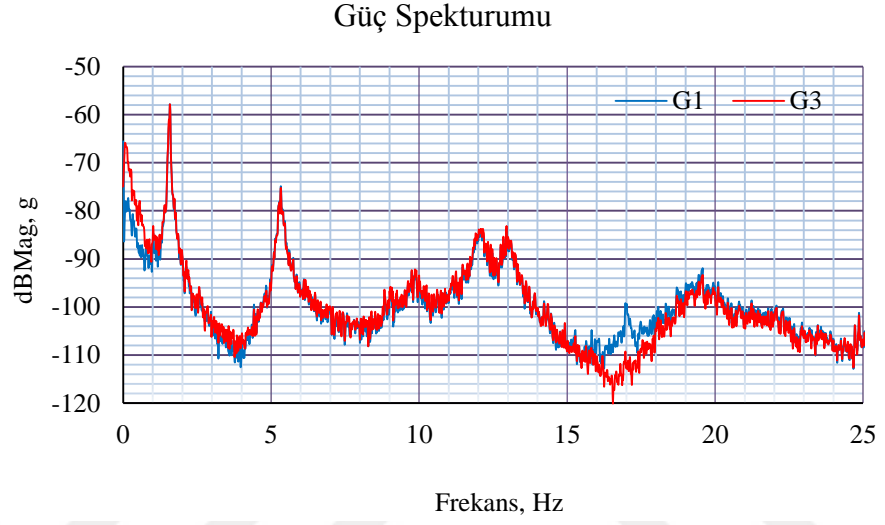
Şekil 5.49. Yeşil Cami ve konumu

Çizelge 5.37. Yeşil Cami batı minaresi malzeme ve geometrik özellikleri

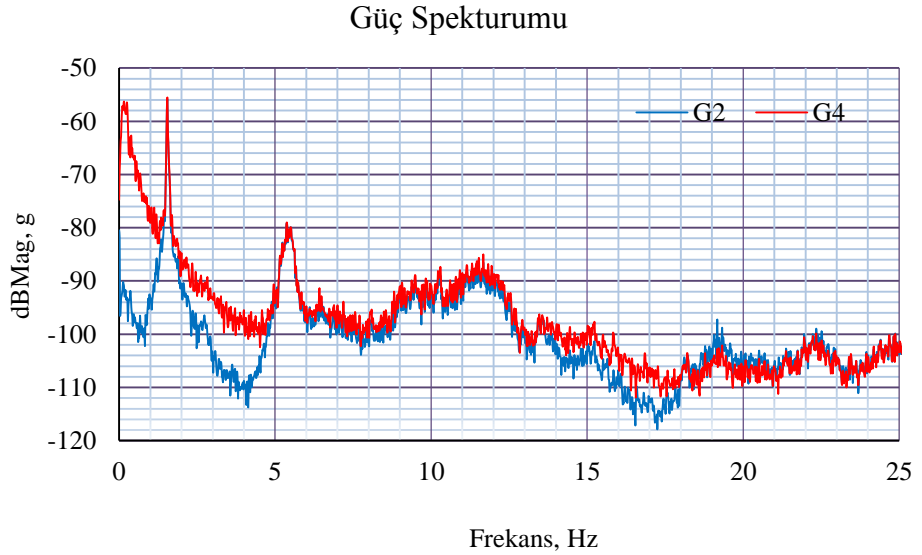
Yeşil Cami Batı Minaresi						
Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)	Merdiven Tipi
Kaide	Küfeki	Kare, L=3,25	R=1,75	0,75	12,00	Tek çıkış-iniş Çekirdekli
Küp	Tuğla+Harç	R=2,91-2,42	R=1,75-1,40	0,58-0,51	2,82	
Gövde	Tuğla+Harç	R=2,42	R=1,40	0,51	9,16	
Petek	Küfeki	R=1,88	R=1,40	0,24	4,56	
Külâh	Küfeki	Değişken	Değişken	0,24-0,11	5,40	
Minare Toplam Yüksekliği					33,95	

Yeşil Cami batı minaresi için arazide alınan ivme kayıtlarından 4 farklı frekans aralığı için güç spektrumları elde edilmiştir. Ancak minarenin x ve y yönlerindeki ilk dört mod, 25 Hz aralığında yer aldığı için çalışma kapsamında sadece bu aralıktaki spektrumlar verilmektedir (Şekil 5.50, Şekil 5.51). Arazide belirlenen geometrik özellikler yardımıyla minarenin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlarla sonlu elemanlar

modeli karşılaştırılarak malzeme özelliklerinin ve mesnetlenme koşullarının kalibrasyonu sağlanmıştır. Kalibrasyon işleminin neticesinde elde edilen malzeme özellikleri çizelge 5.38’de verilmiştir. Minare kaidesi yerindeki incelemede cami beden duvarına bitişik olarak tespit edilmiştir. Ancak modal analiz sonucundaki karşılaştırmada minarenin kaidesi zeminden 5,5 m yukarısına kadar doğu ve güney duvarlarından mesnetli bu seviye üstünün serbest çalıştığı tahmin edilmektedir.



**Şekil 5.50.** Yeşil Cami batı minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu



**Şekil 5.51.** Yeşil Cami batı minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

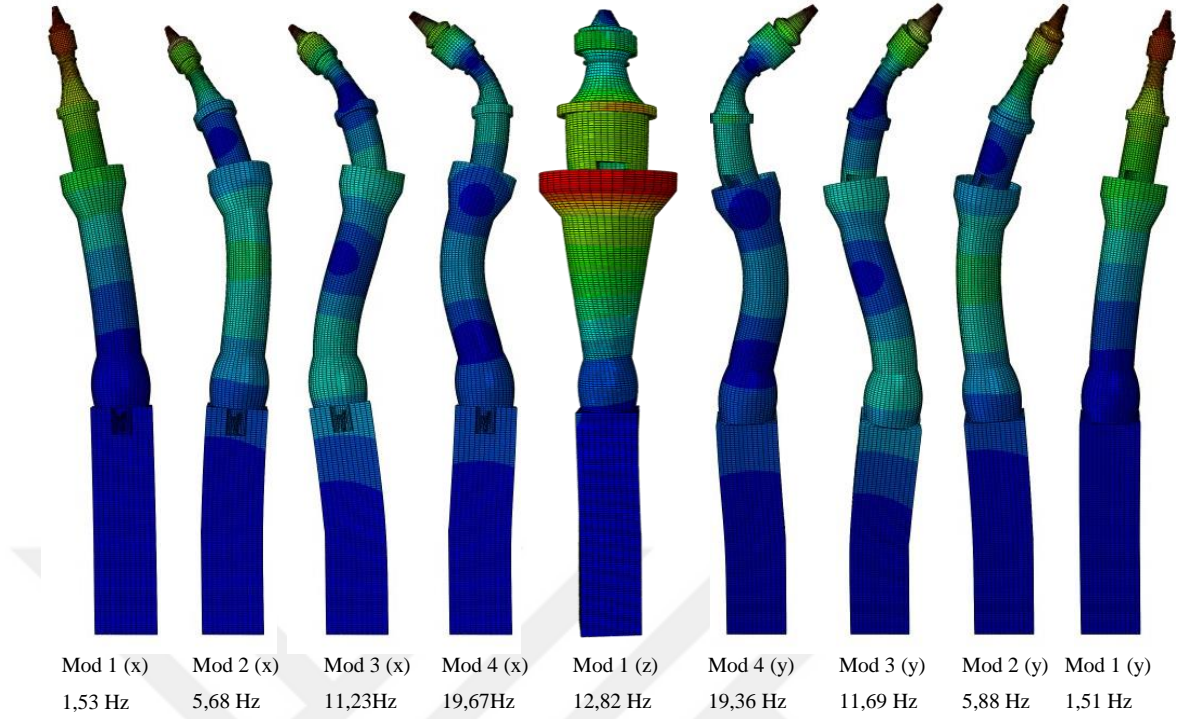
**Çizelge 5.38.** Yeşil Cami batı minaresi malzeme özellikleri

Minare Bölümleri	Malzeme	Elastite Modulu (E) Mpa	Birim Hacim Ağırlık ( $\beta_h$ ),kg/m <sup>3</sup>	Poisson oranı ( $\nu$ )
Kaide	Küfeki	10300	2250	0,20
Küp	Tuğla+Harç	2800	1800	0,18
Gövde	Tuğla+Harç	2800	1800	0,18
Petek	Küfeki	11000	2250	0,20
Külâh	Küfeki	11000	2250	0,20

Sonlu elemanlar modelinde x ve y yönleri için mod şekilleri, frekansları ve modlara ait kütle katılım oranları tespit edilmiştir. Kütle katılım oranları her yöndeki dört mod için %90 mertebelerine ulaştığından dolayı sistemin hareketini ilk dört mod temsil edebilecek niteliktedir (Çizelge 5.39, Şekil 5.52). Modal analiz sonuçlarıyla modal testten elde edilen frekans değerleri karşılaştırıldığında hata oranının x ve y yönlerinde % 7'ü geçmediği görülmüştür. Bu hata oranı çok düşük değer olduğu için sonlu elemanlar modelinin yapı dinamik davranışını oldukça doğru temsil ettiği söylenebilir. .

**Çizelge 5.39.** Yeşil Cami batı minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı

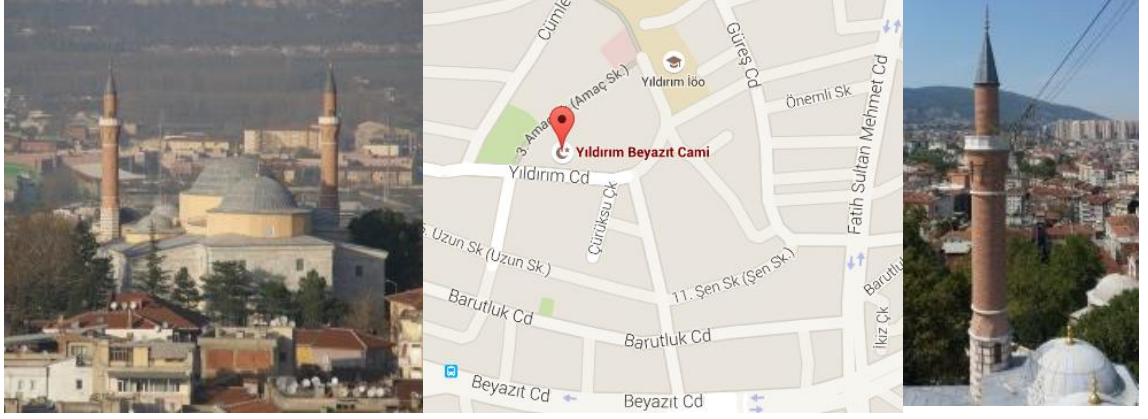
İvme Kayıt Yönü	Mod	Kütle Katılım Oranı, %		Modal Analiz Frekansı, Hz	Modal Test Frekansı, Hz	Hata oranı, %
		X	Y			
X	1	25,00	6,00	1,53	1,57	2
	2	19,00	10,00	5,68	5,36	6
	3	18,00	6,00	11,23	12,02	6
	4	8,00	0,00	19,67	19,72	1
Y	1	6,00	26,00	1,51	1,52	1
	2	10,00	19,00	5,88	5,50	7
	3	6,00	17,00	11,69	11,64	0
	4	0,00	6,00	19,36	19,23	1



**Şekil 5.52.** Yeşil Cami batı minaresi ilk dokuz mod şekli ve frekansı

#### 5.2.14. Yıldırım Beyazıt Cami batı minaresi

Yıldırım semtinin tepesindeki Yıldırım Beyazıt Külliyesinin içinde yer almaktadır. Yıldırım Beyazıt'ın 1403'te yapımını başlattığı bu yapı topluluğu Ankara Savaşı nedeniyle yarıda kalmış ve oğlu Musa Çelebi tarafından tamamlanmıştır. Caminin planı tabhaneli camiler grubuna girmekte olup caminin duvar malzemeleri kesme taştır. Caminin minareleri İdosta ve 1855 depreminde yıkılmıştır. Zaman içinde onarılan caminin minaresi 1970'de caminden ayrık kesme taş kullanılarak yenilenmiştir (Şekil 5.53). Ancak aslına uygun olmayan bu minare yıkılarak 2011 yılında camin batı ve doğu cephesinde olmak üzere iki adet minare tekrar inşa edilmiştir. Yenilenen minareler simetriktir. Bu yüzden çalışma kapsamında sadece batı minaresini incelemek yeterli görülmüştür. Mevcut durumda minare kaidesinin merdivenleri asma kattan başlamakta olup kaide almaşık düzenle örülmüştür. Küp elemanı piramidal Türk üçgeniyle geçilmiştir. Şerefe altı stalaktitli (püskülsüz) inşa edilmiş olup minare açık şerefelidir. Minarenin merdivenleri tuf taşına benzer hafif bir taştan çekirdekli olarak inşa edilmiştir. Kaidenin üstüne yapıldığı veya geçmişte bitişik inşa edilmiş beden duvarı küfektir.



**Şekil 5.53.** Yıldırım Beyazıt Cami ve konumu

Yıldırım Beyazıt Cami batı minaresi için arazide alınan ivme kayıtlarından 4 farklı frekans aralığı için güç spektrumları elde edilmiştir. Ancak minarenin x ve y yönündeki ilk üç mod, 25 Hz aralığında yer aldığı için çalışma kapsamında sadece bu aralıktaki spektrumlar verilmektedir (Şekil 5.54, Şekil 5.55). Arazide belirlenen geometrik özellikler yardımıyla minarenin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlarla sonlu elemanlar modeli karşılaştırılarak malzeme özelliklerinin ve mesnetlenme koşullarının kalibrasyonu sağlanmıştır. Minare kaidesi yerinde cami beden duvarının üzerinde olarak tespit edilmiştir. Modal analiz sonucundaki karşılaştırmada minarenin kaidesinin zeminden asma kat seviyesine kadar mesnetli bu seviyeden sonra beden duvarı kısmi olarak devam etmesine rağmen kaidenin serbest çalıştığı kanısına varılmıştır.

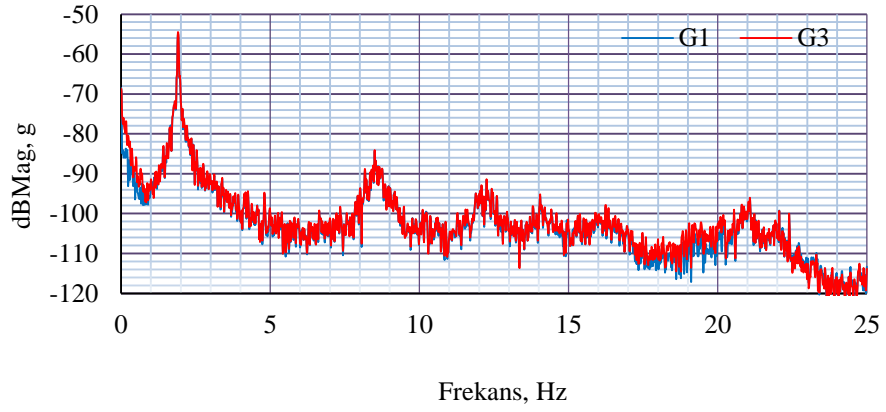
Kalibrasyon işlemi sırasında ilgili güç spektrumlarında eşleştirilemeyen birkaç adet pik noktası bulunmuştur. Bunun sebebi; ivme kaydı alınan tarihte Bursa'daki kuvvetli lodos etkisiyle cami yapı frekanslarının kayıta yer almasıdır. Tahmin edilen bu durum için literatürde tarihi camilerin modal analizi araştırılmıştır. Sonuç olarak Şenol (2011) doktora tezinde tarihi camilerin ilk mod frekanslarının 4-15 Hz arasında değiştiği anlaşılmaktadır. Bu durum, 12 Hz civarında eşleştirilemeyen frekansların camiye ait olduğu ihtimalini güçlendirmektedir.



**Çizelge 5.40.** Yıldırım Beyazıt Cami batı minaresi malzeme ve geometrik özellikleri

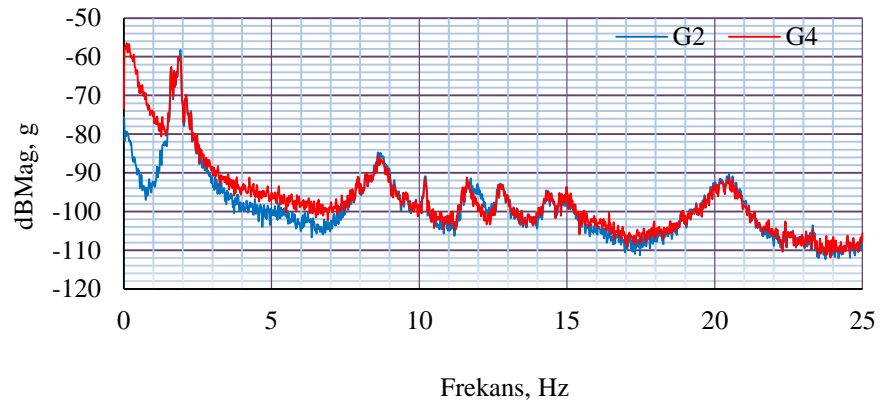
Yıldırım Beyazıt Cami Batı Minaresi						
Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)	Merdiven Tipi
Kaide	Küfeki+Tuğla	Sekizgen L=1,050	R=1,550	0,500	15,410	Tek çıkış-iniş Çekirdekli
Küp	Tuğla+Harç	R=2,500-2,210	R=1,550	0,475-0,330	1,380	
Gövde	Tuğla+Harç	R=2,210	R=1,550	0,330	9,890	
Petek	Tuğla+Harç	R=1,630	R=1,210	0,210	4,140	
Külâh	Kurşun	-	-	-	3,220	
Minare Toplam Yüksekliği					34,040	

Güç Spekturumu



**Şekil 5.54.** Yıldırım Beyazıt Cami batı minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

Güç Spekturumu



**Şekil 5.55.** Yıldırım Beyazıt Cami batı minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

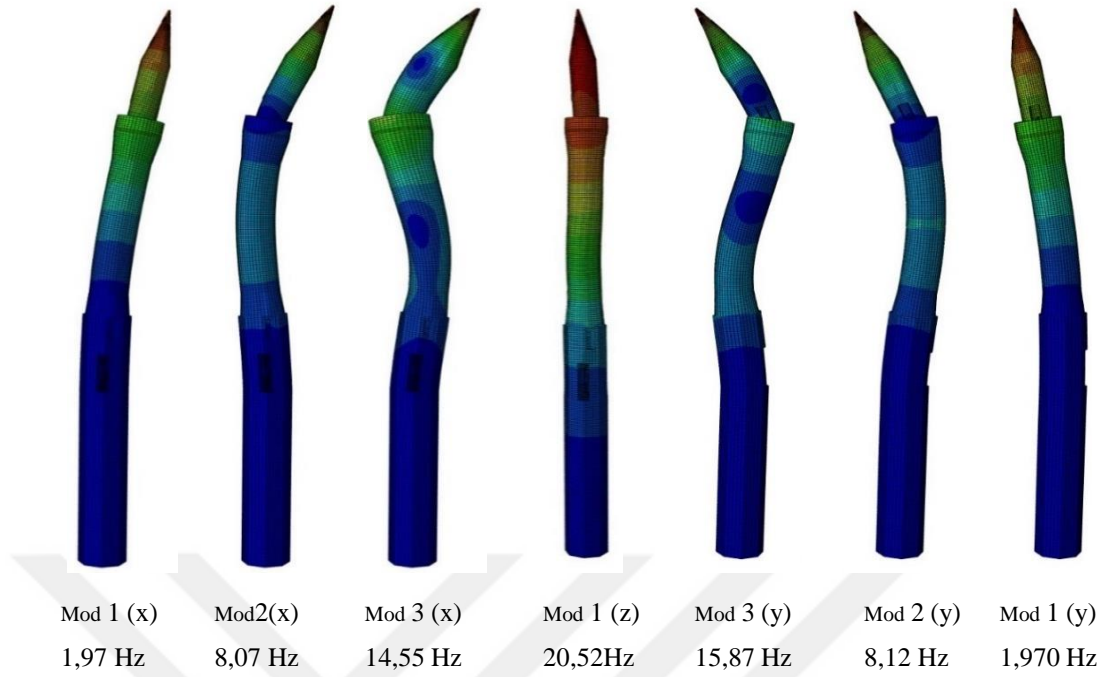
**Çizelge 5.41.** Yıldırım Beyazıt Cami batı minaresi malzeme özellikleri

Minare Bölümleri	Malzeme	Elastite Modulu (E) Mpa	Birim Hacim Ağırlık ( $\beta_h$ ),kg/m <sup>3</sup>	Poisson oranı ( $\nu$ )
Alt Kaide	Küfeki	13000	2250	0,20
Üst Kaide	Küfeki+Tuğla	7000	2000	0,20
Küp	Tuğla+Harç	3500	1600	0,18
Gövde	Tuğla+Harç	3500	1600	0,18
Petek	Tuğla+Harç	3500	1600	0,18
Merdiven	Tüf Taşı	3100	1350	0,20

Sonlu elemanlar modelinde x ve y yönleri için mod şekilleri, frekansları ve modlara ait kütle katılım oranları tespit edilmiştir (Çizelge 5.42, Şekil 5.56). Kütle katılım oranları x ve y yönleri ilk üç mod için %90 mertebelerine ulaştığından dolayı sistemin hareketini ilk üç mod temsil edebilecek niteliktedir (Çizelge 5.42, Şekil 5.56). Modal analiz sonuçlarıyla modal testten elde edilen frekans değerleri karşılaştırıldığında hata oranının x ve y yönlerinde % 6'yı geçmediği görülmüştür. Bu hata oranı çok düşük değer olduğu için sonlu elemanlar modelinin yapı dinamik davranışını oldukça doğru temsil ettiği söylenebilir.

**Çizelge 5.42.** Yıldırım Beyazıt Cami batı minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı

İvme Kayıt Yönü	Mod	Kütle Katılım Oranı, %		Modal Analiz Frekansı, Hz	Modal Test Frekansı, Hz	Hata oranı, %
		X	Y			
X	1	50,00	1,00	1,97	1,93	2
	2	20,00	3,00	8,07	8,50	5
	3	9,00	7,00	14,55	14,06	3
Y	1	1,00	52,00	1,90	1,89	0
	2	3,00	19,00	8,12	8,67	6
	3	1,00	13,00	15,87	15,02	5



**Şekil 5.56.** Yıldırım Beyazıt Cami batı minaresi ilk yedi mod şekilleri ve frekansları

### 5.2.15. 1. Murat Hüdavendigâr Camii

Çekirge semtinde yer alan Hüdavendigâr Camii ve Külliyesi, 1363-1366 yıllarında Sultan 1. Murad tarafından yaptırılmıştır (Şekil 5.57). Caminin en önemli özelliği alt katı cami üst katı medrese olarak iki katlı inşa edilmiş olmasıdır. Caminin dışında, ayrı bir yapı olarak olması gereken zaviye ve medrese mekânları bu külliye, ibadet yeri ile iç içedir. Minaresi kuzey duvarının doğu cephesindedir. Cami ve minaresi zaman içinde çeşitli onarımlar görmüştür. Cami minaresine giriş asma kattandır. Minare kaidesi dolu gövdeli olup zaman içindeki tamirlerden dolayı minare kaidesindeki alması düzende yer yer sadece tuğla ve sadece küfeki onarımları görülmektedir. Şerefe altı stalaktitli (püskülsüz) inşa edilmiş olup minare açık şerefelidir. Minareye ait geometrik özellikler çizelge 5.43'te verilmiştir.



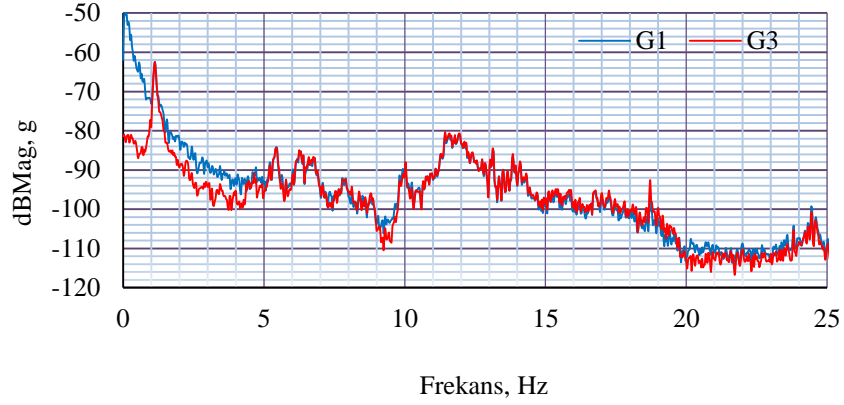
**Şekil 5.57.** 1.Murat Hüdevendigar Cami ve konumu

1.Murat Hüdevendigar Cami minaresi için arazide alınan ivme kayıtlarından 4 farklı frekans aralığı için güç spektrumları elde edilmiştir. Ancak minarenin x ve y yönlerindeki ilk üç mod, 25 Hz aralığında yer aldığı için çalışma kapsamında sadece bu aralıktaki spektrumlar verilmektedir (Şekil 5.58, Şekil 5.59). Deneysel sonuçlarla sonlu elemanlar modeli karşılaştırılarak malzeme özelliklerinin ve mesnetlenme koşullarının kalibrasyonu sağlanmıştır (Çizelge 5.43). Minare kaidesi yerindeki incelemede beden duvarının üzerinde olarak tespit edilmiştir. Modal analiz sonucundaki karşılaştırmada minarenin kaidesinin kısmi olarak beden duvarına mesnetli olduğu tespit edilmiştir. Yapılan kalibrasyonda tuğla+harç malzemesinin elastisite modülü diğer minarelerdeki malzemelere göre düşük çıkmıştır. Bunun sebebi 1855 depreminden sonra inşa edilen minarenin küp elemanı ile kaide elemanı arasında tam bir mesnetlenme sağlanamamasıdır.

**Çizelge 5.43.** 1.Murat Hüdevendigar Cami minaresi malzeme ve geometrik özellikleri

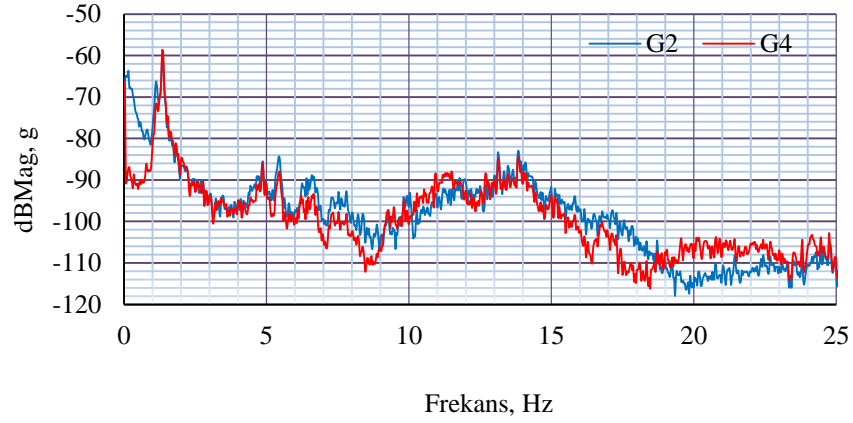
1. Murat Hüdevendigar Cami Minaresi						
Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)	Merdiven Tipi
Kaide	Taş+Tuğla	Kare, L=2,60	-	-	16,080	Tek çıkış-iniş Çekirdeksiz
Küp	Tuğla+Harç	R=2,40-2,060	R=1,430	0,485-0,315	1,840	
Gövde	Tuğla+Harç	R=2,060	R=1,430	0,315	8,280	
Petek	Tuğla+Harç	R=1,830	R=1,310	0,260	4,140	
Külâh	Kurşun	-	-	-	2,600	
Minare Toplam Yüksekliği					32,940	

### Güç Spekturumu



Şekil 5.58. 1.Murat Cami minaresi G1 ve G3 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

### Güç Spekturumu



Şekil 5.59. 1.Murat Cami minaresi G2 ve G4 ivmeölçer verilerine ait güç spektrumu

Çizelge 5.44. 1. Murat Hüdavendigâr Cami minaresi malzeme özellikleri

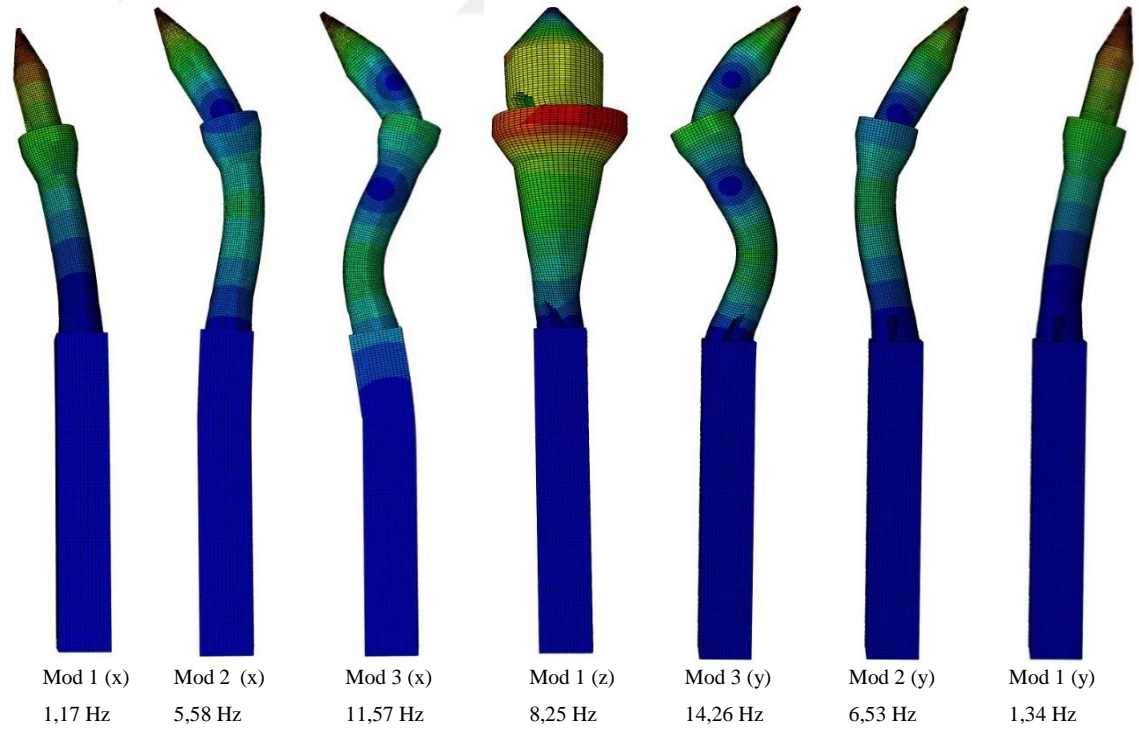
Minare Bölümleri	Malzeme	Elastite Modulu (E) Mpa	Birim Hacim Ağırlık ( $\beta_h$ ),kg/m <sup>3</sup>	Poisson oranı ( $\nu$ )
Kaide	Taş+Tuğla	5000	2100	0,2
Küp	Tuğla+Harç	1150	1800	0,18
Gövde	Tuğla+Harç	1150	1800	0,18
Petek	Tuğla+Harç	1150	1800	0,18
Merdiven	Taş+Tuğla	1300	1850	0,2

Sonlu elemanlar modelinde x ve y yönleri için mod şekilleri, frekansları ve modlara ait kütle katılım oranları tespit edilmiştir(Çizelge 5.45, Şekil 5.60).. Kütle katılım oranları x

yönünde dört ve y yönünde ilk üç mod için % 95 mertebelerine ulaştığından dolayı sistemin hareketini ilgili modlar temsil edebilecek niteliktedir. Modal analiz sonuçlarıyla modal testten elde edilen frekans değerleri karşılaştırıldığında hata oranının x ve y yönlerinde % 5'i geçmediği görülmüştür. Bu hata oranı çok düşük değer olduğu için sonlu elemanlar modelinin yapı dinamik davranışını oldukça doğru temsil ettiği söylenebilir.

**Çizelge 5.45.** 1.Murat Cami minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı

İvme Kayıt Yönü	Mod	Kütle Katılım Oranı, %	Modal Analiz Frekansı, Hz	Modal Test Frekansı, Hz	Hata oranı, %
X	1	38,00	1,17	1,13	3
	2	19,00	5,58	5,43	3
	3	21,00	11,57	11,64	1
	4	17,00	18,44	18,72	2
Y	1	64,00	1,28	1,34	4
	2	20,00	6,21	6,53	5
	3	10,00	14,26	13,84	3



**Şekil 5.60.** 1.Murat Hüdavendigâr Cami minaresi ilk yedi mod şekli ve frekansı

### **5.3. Minarelerin Modal Parametrelerinin Değerlendirilmesi**

Yapıların mod frekansları kütle ve rijitliğe bağlıdır. İncelenen minarelerde bu parametreler malzemenin cinsi, birim hacim ağırlığı, dayanımı, mesnetlenme koşulları, geometrik özelliklerle ilgilidir. Minarelerin frekanslarını etkileyen en önemli etkenlerden biri yüksekliktir. Çünkü rijitlik yüksekliğin küpü ile ters orantılı olarak değişmektedir. Rijitliği değiştirerek mod şekilleri ve frekansları etkileyen diğer etki ise mesnetlenme koşullarıdır. Mesnetlenme koşulları ise minarenin yüksekliğini etkileyen tek parametredir.

#### **5.3.1. Mesnetlenme koşullarının dinamik davranış üzerindeki etkisi**

Tarihi minareler çoğunlukla cami beden duvarına mesnetli olup nadiren tamamıyla ayrıık inşa edilmektedir. Tarihi minarelerin camiye mesnetli inşa edilmesi hem caminin hem de minarenin yapısal davranışına katkı sağlamaktadır. Çünkü beden duvarları minarelerin serbest boyunu azaltmakta, minareler ise eğer simetrik yapılmışsa kubbenin açılmasını önleyerek payanda görevi görmektedir. Genellikle minareler kaide duvarından beden duvarına mesnetlenirler. Tam mesnetlenme genellikle kaide ve beden duvarı birlikte örülmüşse gerçekleşir. Kısmi mesnetlenme ise beden duvarıyla kaide duvarı bitişik örüldüyse gerçekleşmektedir. Kaide beden duvarına bitişik yapıldıysa çoğunlukla kaide yarısına kadar bazı durumlarda ise tamamen ayrıık çalışabilir.

Çalışma kapsamında minarenin mesnet koşulları gözlemsel olarak kesin belirleyebilmek mümkün değildir. Bu yüzden, sayısal modelde mesnet koşullarını belirlemek için modal testten belirlenen mod frekansları referans alınmaktadır. Elbette ki sayısal modelde modal parametreleri etkileyen sadece mesnet koşulları değildir. Ancak yapının birinci mod frekansı ile ikinci ve üçüncü mod frekansı arasındaki oransal ilişkiyi kuran doğrudan kaidenin mesnet koşullarıdır. Çünkü kaide yapının mod şekli, frekansı ve modal kütle katılımında etkin rol oynamaktadır.

Mesnetlenme koşulları minarenin serbest yüksekliğini etkileyen önemli parametredir. Minareler yüksekleri fazla ancak atalet momenti düşük yapılardır. Bu yüzden minarelerin mesnetli veya mesnetsiz konumlandırılmış olmaları dinamik davranışlarını oldukça

önemli derecede etkilemektedir. Bu durumun geçerli olmaması için kaide en kesitinin gövdeye oranla çok geniş ve yüksekliğinin kısa olması gereklidir. Mesnetin mod frekanslarına katkısını görebilmek için kaide enkesiti gövdesiyle orantılı ve inceleme sonucu mesnetli olan Üftade Camisinin minaresi, beden duvarına mesnetli ve mesnetsiz olarak modal analiz gerçekleştirilmiş frekans değerleri çizelge 5.46 sunulmuştur. Bu örnekte minareye ait diğer bütün parametreler sabit tutulmasına karşın yalnızca mesnet durumunun değiştirilmesi ile davranışın gerçeğe ne denli yaklaşabildiği açıkça görülebilmektedir.

Üftade cami için yapılan değerlendirmeden de görüleceği gibi kaidenin beden duvarına mesnetli olmasının yadsınamaz derecede mod frekanslarına katkısı vardır. Eğer bu minare mesnetsiz kabul edilerek kalibre edilmeye çalışılırsa malzeme elastisite modülü yığma duvarlar için kabul edilemez değerlere ulaşmaktadır. Buna rağmen yine de birbirini takip eden modlara ait frekanslar arasında kalibrasyon sağlanamamaktadır. Bu yüzden gerçek yapı davranışını temsil eden modeli oluşturmak için yerinde modal test ve malzeme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak mesnetlenme şartları için belirtilmesi gereken bir husus daha vardır. Yığma minarelerde mesnetler betonarme yapılarıdaki gibi tüm modlar için tam bağlı çalışmamaktadır. Birinci modun yerdeğiştirmeleri büyük olacağı için mesnetli davranan yapı, yüksek frekanslı modlarda mesnetsiz olarak davranabilir. Muradiye Cami batı minaresi bu duruma örnek verilebilir.

**Çizelge 5.46.** Üftade Cami minaresinin ilk üç modu için mesnet katkısının değerlendirilmesi

İvme Kayıt Yönü	Mod	Modal Test Frekansı, Hz	Kaide Mesnetli Modal Analiz Frekansı, Hz	Kaide Mesnetsiz Modal Analiz Frekansı, Hz	Fark %
X	1	1,54	1,57	1,13	28
	2	7,60	7,30	3,67	50
	3	17,78	17,08	8,31	51
Y	1	1,51	1,56	1,14	27
	2	7,65	7,48	3,7	51
	3	17,81	17,73	8,49	52



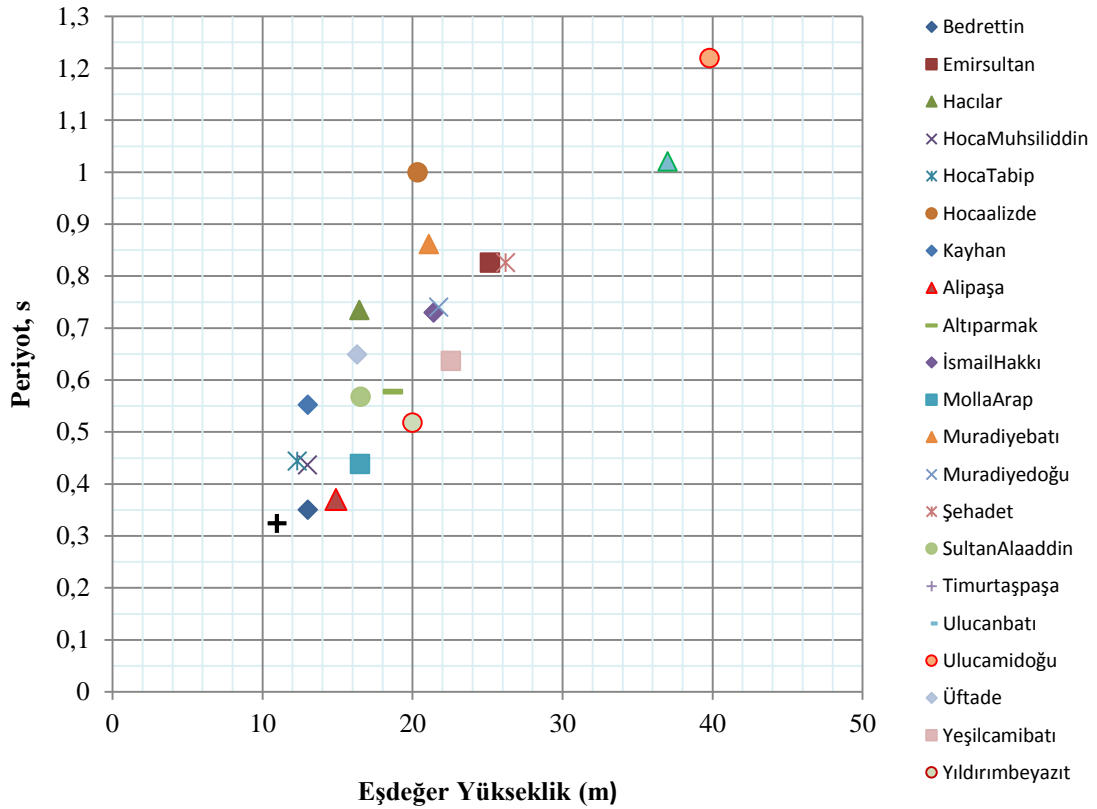
### 5.3.2. Geometrik özelliklerin dinamik davranış üzerindeki etkisi

Minarelerin dinamik davranışını etkileyen en önemli parametre geometrik özellikleridir. Çünkü yapının rijitliği malzeme ve geometrisiyle doğrudan ilişkilidir. Geometrik özellikler; yapının periyodunu yükseklik, enkesit alanı, atalet momentinden dolayı etkilemektedir. Hatta geometrik özelliklerin kütle üzerinde de doğrudan etkili olduğu düşünülecek olursa söz konusu etkileşim daha iyi anlaşılabilir.

Osmanlı mimarisinde gövde ve petek genellikle silindir; kaide ise çok farklı geometrik şekillere sahiptir. Kaide nedeniyle planda öngörülen asal rijitlik doğrultuları geometri formunun etkisiyle değişebilmektedir. Kaidenin geometrisine göre minarelerin tek yöndeki ivme kaydında hem x hem de y yönünde kütle katılımı dikkate alınması gerekmektedir. Çünkü kaidenin kenar sayısı arttıkça silindire yaklaşması ve mesnet koşulları kayıt ve model yönünün tayinini zorlaştırmaktadır. Örneğin Molla Arap Cami minaresinde kible yönünde alınan kayıta göre 1. Mod kütle katılım oranları x yönünde % 49,60 olarak tahmin edilirken aynı modda y yönünde %16,35 olarak katkı hesaplanmaktadır. İlgili minarenin kaidesi sekizgen olup farklı kenarlardan beden duvarına mesnetlidir.

Minarelerin 1. Mod şekli tek eğrilikli olup periyodu belirleyen çoğunlukla gövde ve petek bölümünün yükseklikleri ve en kesitleridir. Bu durumda yükseklik ve periyot arasında ilişki kurmak mümkündür (Şekil 5.61). Ancak kaide elemanlarının yükseklik-periyot ilişkisine katkısını dâhil etmemek yanlış olacaktır. Bu durumda kaidelerin mesnet koşulları ve boyutlarını dikkate alarak eşdeğer toplam bir yükseklik belirlemek daha doğru olacaktır. Eşdeğer yükseklikte kaide yüksekliğinin katkısını genel ifadeyle üç ayırmak mümkündür. Eğer kaide tüm yükseklik boyunca beden duvarına mesnetli veya gövdeye oranla çok rijitse katkısı ihmal edilir düzeydedir, kısmi mesnetli ise kaide yüksekliğinin yarısı ve kaide beden duvarından ayrık ise kaide yüksekliğinin tamamının eşdeğer yükseklik hesabında kullanılması davranışın doğru tahmini için gerçekçi bir yaklaşım olacaktır. Eşdeğer yükseklik-periyot değerlendirmesinde daha önce Baştürk tarafından araştırılan 7 adet minarenin de verileri kullanılmıştır.

Şekil 5.61'deki grafikten de görüleceği üzere yükseklikle orantılı olarak periyot değerleri artmaktadır. Grafikte eşdeğer yükseklikleri aynı olmasına rağmen bazı minarelerin periyotlarında farklılıklar görülmektedir. Bunun sebebi periyodu etkileyen en kesit ve kütlelerin farklı olmasıdır. Ancak genel itibariyle dağılım düzgündür.



Şekil 5.61. Tarihi minarelerde eşdeğer yükseklik-periyot ilişkisi

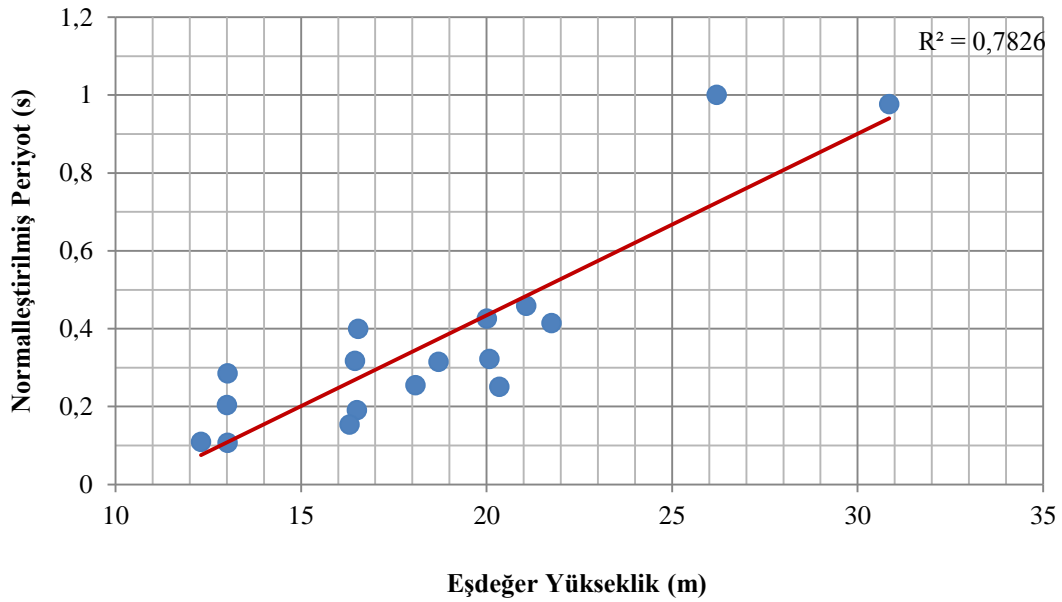
### 5.3.3. Doğal titreşim periyodunu etkileyen parametrelerin normalleştirilmesi

Minarelerin birinci mod şekilleri tek eğrilikli olup konsol yapı davranışına benzemektedir. Bu yüzden minarelerin rijitliği temeli ankastre mesnetli konsol yapı davranışıyla temsil edilebilir. Bu sayede önceki bölümde anlatılmış dinamik davranışı etkileyen parametrelerle periyot arasında ilişki kurularak ampirik bir formül elde edilmesi mümkündür.

Minarelerde yükseklik, elastisite modülü ve kesit alanın periyot üzerindeki etkisini daha net görebilmek için her incelemeye göre periyotların normalleştirilmesi istenen ilişkiye eğilimi göz önüne çıkaracaktır. Normalleştirme, kurulan ilişkiye diğer etkileri

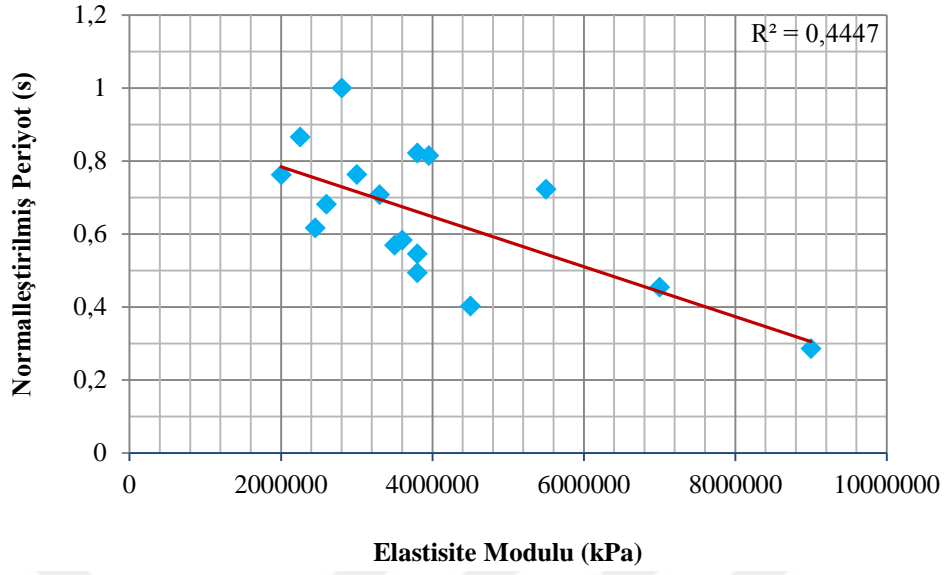
kaldırarak sadece istenen veriler arasında ilişki kurulması olarak tanımlanabilir. Bu kapsamda periyot  $T = 2\pi\sqrt{m/k}$  , rijitlik  $k=3EI/L^3$ , kütle  $m=A\beta_n L$  denklemleri kullanılarak normalleştirmeler gerçekleştirilmiştir.

Normalleştirme işlemine Ulucami minareleri ve Timurtaşpaşa minaresi katılmamıştır. Çünkü bu eserler Bursa'da yer alan geleneksel Osmanlı minare mimarisinden farklı olarak inşa edilmiş özel yapılardır. İlk olarak yüksekliğe göre normalleştirme gerçekleştirilmiştir ve eğilim çizgisi hesaplanmıştır (Şekil 62).



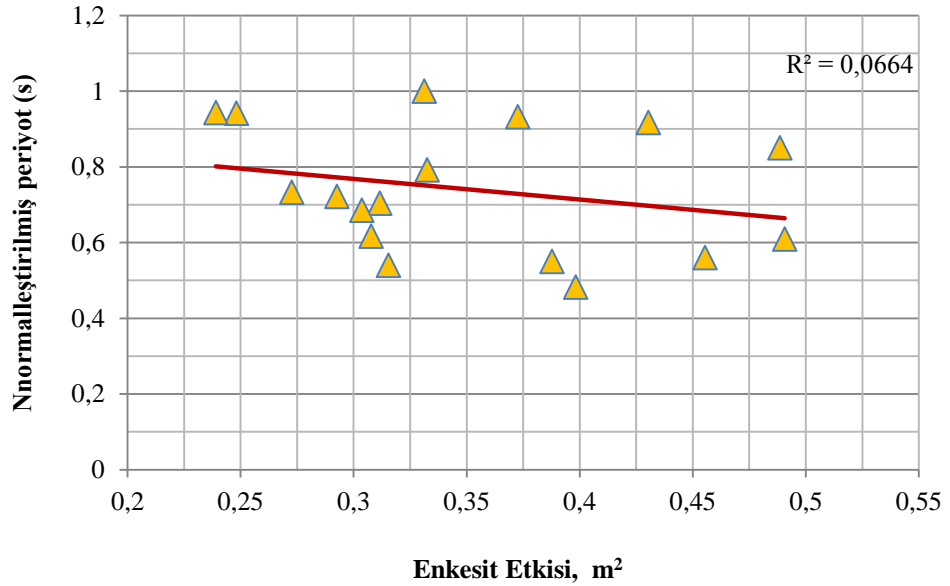
**Şekil 5.62.** Eşdeğer yükseklik-Normalleştirilmiş periyot ilişkisi

Eşdeğer yükseklik- Normalleştirilmiş periyot ilişkisi önceki bölümde çizilen yükseklik-periyot ilişkisine göre yüksekliğin etkisini daha bariz şekilde ortaya koymuştur. Elde edilen dağılımda benzer yüksekliğe sahip minarelerin periyotları arasında küçük farklar oluşması kaide geometrisinin ve kütesinin hesaba idealleştirilerek katılmasından kaynaklıdır. Elde edilen dağılım istenen düzeyde olup regresyon katsayısı 0,7826 olarak hesaplanmıştır. İkinci ilişki dağılımı ise normalleştirilmiş periyot-elastisite modülü arasında kurulmuştur. Elde edilen dağılım şekil 5.63 verilmiştir. Dağılımın düzeni istenen düzeyde olup örnek sayısının artırılması daha düzgün hale gelecektir. Dağılımdan elde edilen regresyon katsayısı 0,4447 olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 5.63.** Elastisite modülü-Normalleştirilmiş periyot ilişkisi

Son olarak ise periyot, en kesite göre normalleştirilmiştir. Bilindiği üzere minare yüksekliği ve malzeme kadar en kesitinde dinamik davranış üzerinde etkisi önemli mertebededir. En kesit dinamik karakteristiği değiştiren kütle ve atalet momenti üzerinde etkilidir. Bu yüzden normalleştirilmiş periyot hesaplanırken her iki parametre de göz önünde bulundurulmuştur.



**Şekil 5.64.** En kesit-Normalleştirilmiş periyot ilişkisi

En kesite göre yapılan normalleştirme dağılımının eğilimi, beklenildiği gibi en kesit alanı arttıkça periyotun azaldığını göstermektedir. Yükseklik ve elastisite modülüne göre normalleştirilmiş periyotların grafiklerine bakıldığında en kesite göre eğimin daha dik olduğu görülmektedir. En kesite göre yapılan normalleştirmede eğimin daha az olmasının sebebi; en kesitin etkilediği kütleyle periyot arasında doğru orantı varken atalet momentiyle periyot arasında ters orantı olmasıdır. Grafikten de anlaşıldığı gibi en kesitin periyot üzerindeki etkisinde atalet momenti daha baskındır.

En kesite göre elde edilen normalleştirilmiş periyot grafiği yükseklik ve elastisite modülüne göre elde edilen normalleştirilmiş periyot grafiğine göre dağınıktır. Bunun sebebi gövdeye göre oldukça rijit olan kaidenin en kesit alanın hesaba gövdeninki kadar katılmasıdır. Elbette ki eşdeğer yükseklik tanımının kaidenin idealleştirilmesinde etkisi vardır. Daha düzgün bir dağılım elde etmek için kaide en kesit katkısının farklı yollarla idealleştirilmesine ihtiyaç vardır. Bunun için gelecekteki çalışmalarda kaidenin geometrik şeklini de dikkate alan daha kapsamlı araştırma yapılacaktır.

#### 5.4. İncelenen Beş Minarenin Deprem Performansı

Deprem performansının doğru değerlendirilmesi için bölüm 2’de anlatılan farklı analiz tiplerinin uygulanmasına ihtiyaç vardır. Ancak çalışma kapsamında sadece doğal titreşim (hâkim) periyodu esas alınarak itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Talep diyagramında depremin talep ettiği yer değiştirme, modal testten elde edilen hâkim periyotun eğimine göre hesaplanmıştır. İnşaat mühendisliği uygulamalarının genelinde modal test yapılmadığı için yapıların yaklaşık hâkim periyodu ve talep edilen yer değiştirme, kapasite diyagramına teğet çizilerek bulunmaktadır. Ancak çalışma kapsamında minare hâkim periyotlarının kesin değerleri modal test sonuçlarından bilindiği için kapasite diyagramına teğet çizilmesine gerek duyulmamıştır. Çalışma kapsamında performans analizi seçilen beş minareye uygulanarak yorumlanmıştır.

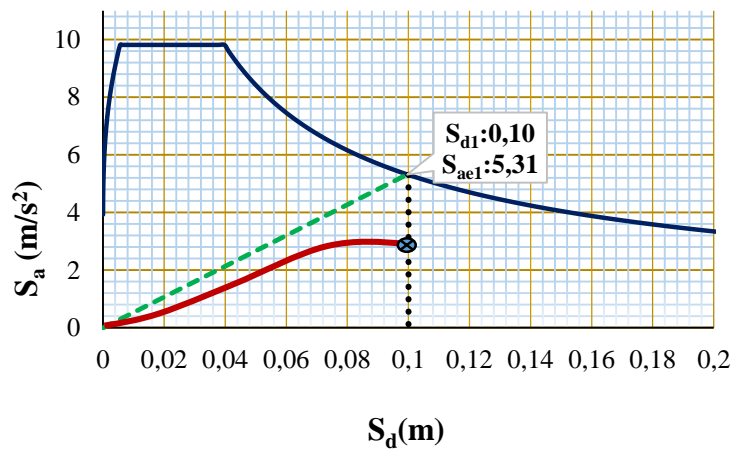
Sonlu elemanlar modelinde itme analizi 1 m aralıklarla yer değiştirme olarak uygulanmıştır. Doğrusal olmayan itme analizi için nonlineer homojen malzeme modeli olan Concrete Damage Plasticity malzeme modeli tercih edilmiştir (Şekil 5.65). Bu modelin tercih edilmesinin sebebi yığma duvar davranışının betonun hem çekme hem de basınç davranışına benzemesidir. Malzeme basınç ve çekme davranışları için 1964 yılında **Seanz** tarafından türetilen denklemler kullanılmıştır (Denklem 5.6). Malzeme elastisite modülü modal analizden elde edilen değerler olup, maksimum dayanımlar içinse ilgili malzemenin literatürde kabul görmüş değerleri kullanılmıştır. Tuğla+Harç, Taş+Tuğla, Küfeki için sırasıyla basınç dayanımları 3 Mpa, 5 Mpa, 8 Mpa; çekme dayanımları ise bu basınç dayanımlarının %10’nu olarak kabul edilmiştir. Yerinde yapılan incelemelerde malzemedeki tahribat ve Elastisite modülünde beklenmedik düşüklük olmadığı sürece çalışma kapsamında ilgili dayanımlar kullanılmıştır. Yığma yapılar basınç ezilmesinden ziyade yapılar çekme gerilmesinden dolayı zarar görmektedir. Bu yüzden incelemelerde çekme gerilmesine önem verilmiştir. Yığma malzemenin taşıyıcılığını kaybettiği çekme birim şekil değiştirme değeri için ise literatür araştırması yapılmıştır. Lorenço ve ark. (1995) tarafından gerçekleştirilen çalışmada yığma yapıların malzeme davranışının beton malzeme davranışına benzediğini ifade edilmektedir. Ancak betonun bile birim şekil değiştirme değerleri betonun dayanımına, deney yükleme hızına göre değişiklik göstermektedir. Literatür araştırmaları sonucunda betonun çekme birim şekil değiştirme değerinin yaklaşık 0,003-0,005 arasında değiştiği bilinmektedir. Yığma

malzemede ise literatürde yaygın olarak malzemenin taşıyıcılığını kaybettiği çekme birim şekil değiştirme değerinin 0,002-0,006 arasında değiştiği ifade edilmektedir. Bu nedenle Eorucode 6’da yığma yapılar için eğilmedeki maksimum birim şekil değiştirme değeri 0,0035 olarak kabul edilmektedir. Çalışma kapsamında malzemenin taşıyıcılığını kaybettiği maksimum birim şekil değiştirme değeri 0,005 olarak seçilmiştir. Plastik birim şekil değiştirme değerlendirmesinde en kesitin yarısında fazlası sınır durum değerini aştıysa kesitin taşıyıcılığını yitirdiği öngörülmüştür.

$$\sigma_c = \frac{E_0 \varepsilon_c}{1 + \left( \frac{E_0 \varepsilon_p}{\sigma_p} \right) \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} \right) + \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} \right)^2} \quad (5.6)$$

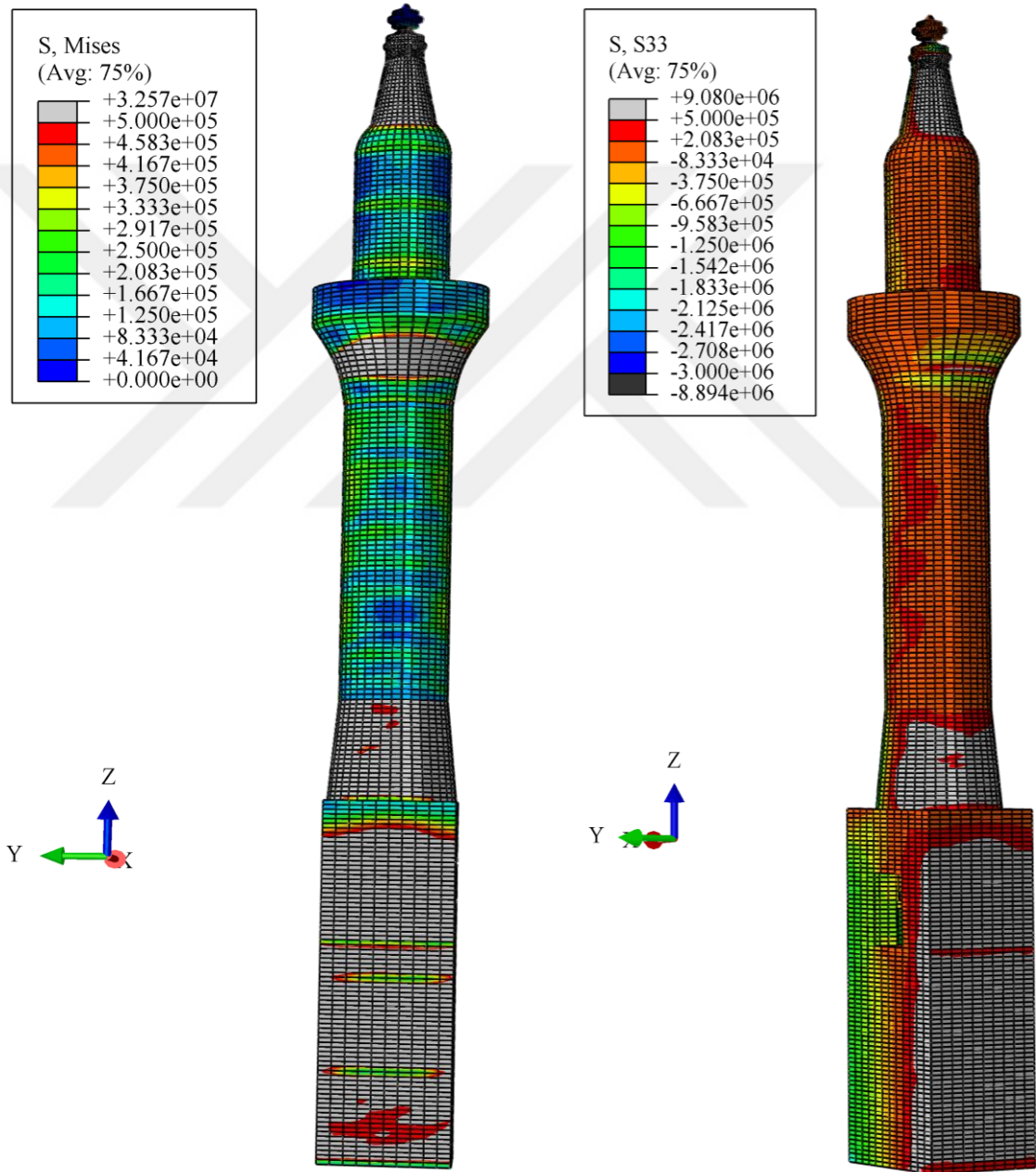
#### 5.4.1. Muradiye Cami batı minaresi performans değerlendirmesi

İtme analizini gerçekleştirmek için öncelikle Muradiye batı minaresinin talep diyagramı elde edilmiştir. Muradiye batı minaresi 1. Derece deprem bölgesinde olup bölgenin zemin özellikleri dikkate alınarak zemin grubu Z2 seçilmiştir. Bölüm 2’de anlatılan gerekli işlemler yapılarak talep diyagramı oluşturulmuştur. Talep diyagramından modal testten elde edilen doğal titreşim (hâkim) periyodunun eğimi kullanılarak minarenin deprem talep modal yer değiştirmesi 0,10 m olarak tespit edilmiştir. Minarenin kapasite eğrisi içinse sonlu elemanlar modelinde birinci mod şekli dikkate alınarak yükseklik boyunca yer değiştirme uygulanmıştır. Analiz sonucunda tepe yer değiştirmesi ile taban kesme kuvveti, modal yer değiştirme ve modal ivmeye dönüştürülerek talep ve kapasite grafikleri aynı grafikte gösterilip yorumlanmıştır (Şekil 5.66)



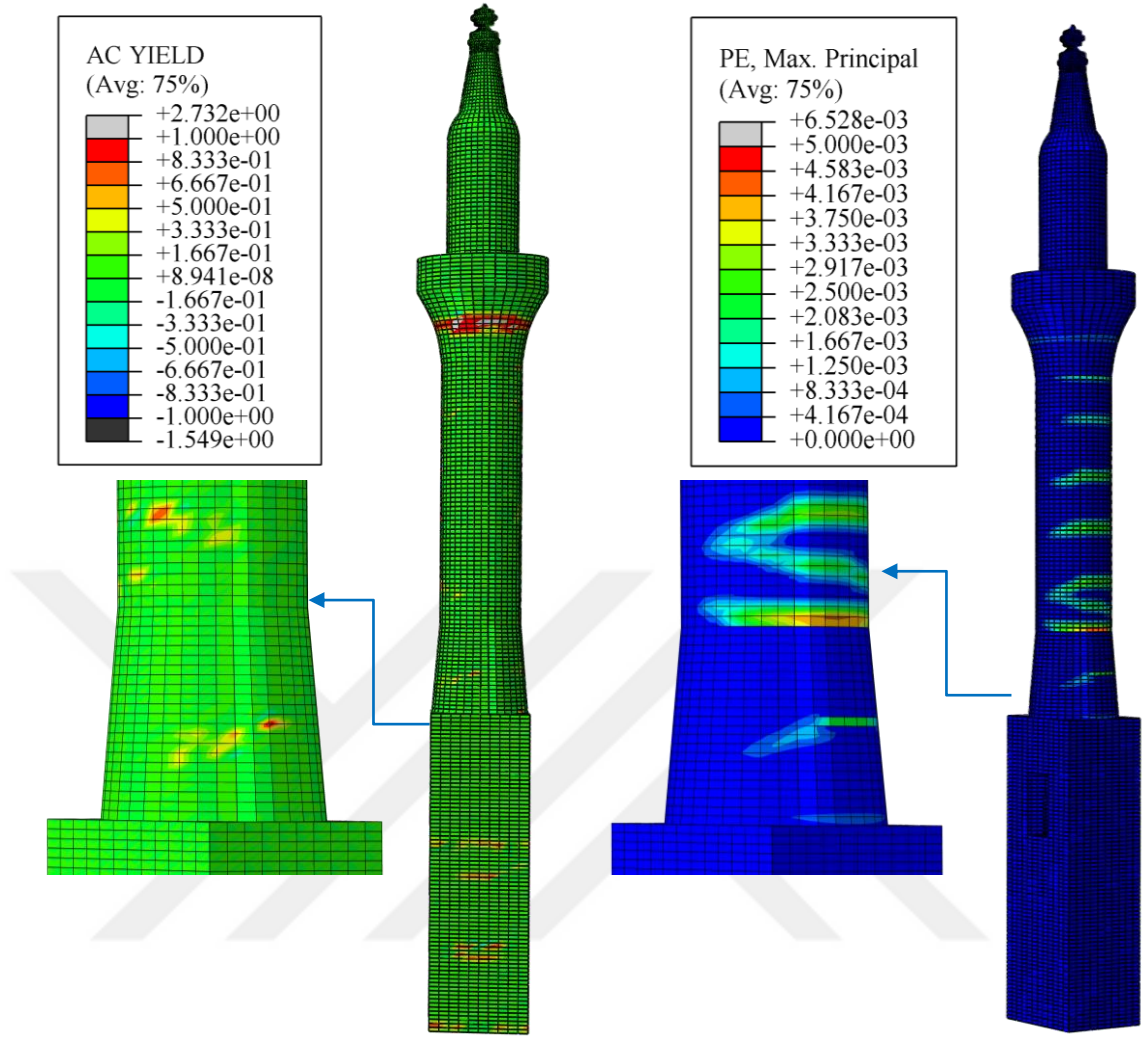
Şekil 5.65. Muradiye batı minaresi talep ve kapasite diyagramları

Batı minaresinin kapasite diyagramı incelendiğinde kesme kuvveti alınan bölgenin plastikleşmeye başladığı söylenebilir. Ancak minaredeki hangi bölgelerin ve ne derecede zorlandıklarının kararını sadece bu kapasite diyagramına bakarak vermek zordur. Bu yüzden; itme analizi sonucunda muhtemel depremin talep ettiği tepe yer değiştirmesine karşılık gelen adımdaki minarenin plastik birim şekil değiştirme, aktif akma ve gerilme grafiklerinin yorumlanması daha doğru olacaktır (Şekil 5.66, Şekil 5.67).



Şekil 5.66. Muradiye Batı Minare Von-mises ve S33 gerilme grafikleri



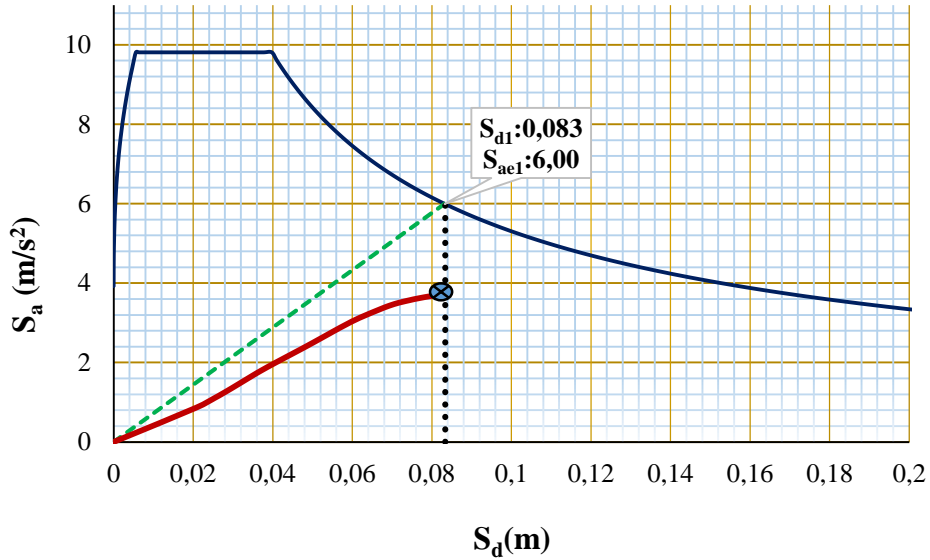


**Şekil 5.67.** Muradiye batı minare aktif akma ve plastik birim şekil değıştirme grafikleri

Batı minaresinin gerilme grafiğine bakıldığında minarenin külah, şerefe altı, kaide ve geçiş elemanı-gövde birleşiminde bölgesel olarak malzemenin çekme dayanımının aşıldığı anlaşılmaktadır. Aktif akma ve plastik birim şekil değıştirme grafiğinde ise küpten gövdeye geçiş bölgesinde kısmi plastikleşme meydana geldiği ancak malzemenin taşıyıcılığını kaybettiği 0,005 olarak belirlenen sınır değerde plastik birim şekil değıştirme, en kesitin yaklaşık ¼'ünde meydana geldiği görülmektedir. Bu yüzden; analiz sonucunda minarenin külah, şerefe altı ve küp-gövde birleşiminin muhtemel depremlerde zarar görebileceği düşünülmektedir.

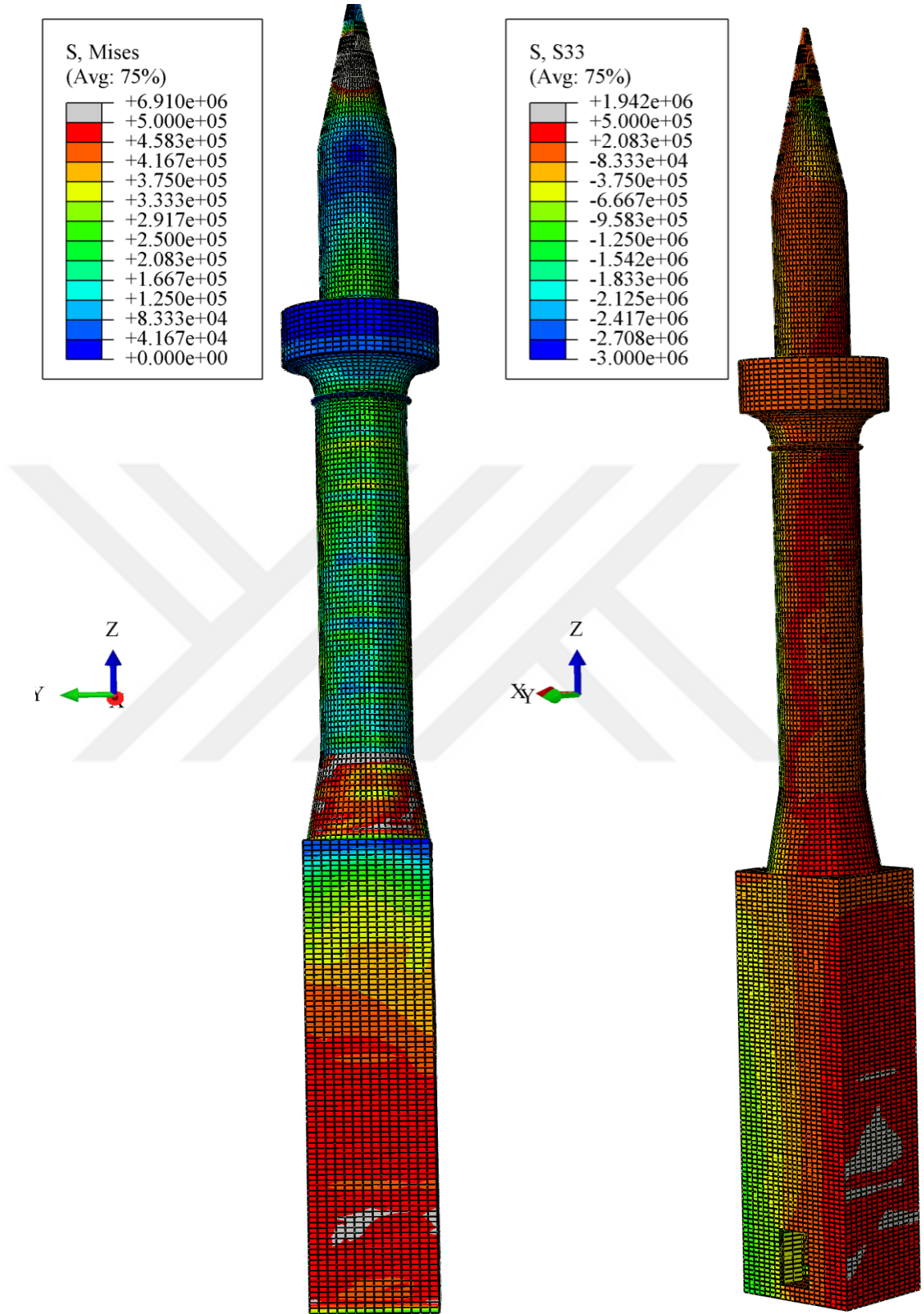
#### 5.4.2. Muradiye Cami doğu minaresi performans değerlendirmesi

İtme analizini gerçekleştirmek için öncelikle Muradiye cami doğu minaresinin talep diyagramı elde edilmiştir. Muradiye batı minaresi 1. Derece deprem bölgesinde olup bölgenin zemin özellikleri dikkate alınarak zemin grubu Z2 seçilmiştir. Bölüm 2 'de anlatılan gerekli işlemler yapılarak talep diyagramı oluşturulmuştur. Bölüm 2' de anlatılan gerekli işlemler yapılarak talep diyagramı oluşturulmuştur. Talep diyagramından modal testten elde edilen doğal titreşim (hâkim) periyodunun eğimi kullanılarak minarenin deprem talep modal yer değiştirmesi 0,083 m olarak tespit edilmiştir. Minarenin kapasite eğrisi içinse sonlu elemanlar modelinde birinci mod şekli dikkate alınarak yükseklik boyunca yer değiştirme uygulanmıştır. Analiz sonucunda tepe yer değiştirmesi ile taban kesme kuvveti, modal yer değiştirme ve modal ivmeye dönüştürülerek talep ve kapasite grafikleri aynı grafikte gösterilip yorumlanmıştır (şekil 5.68)

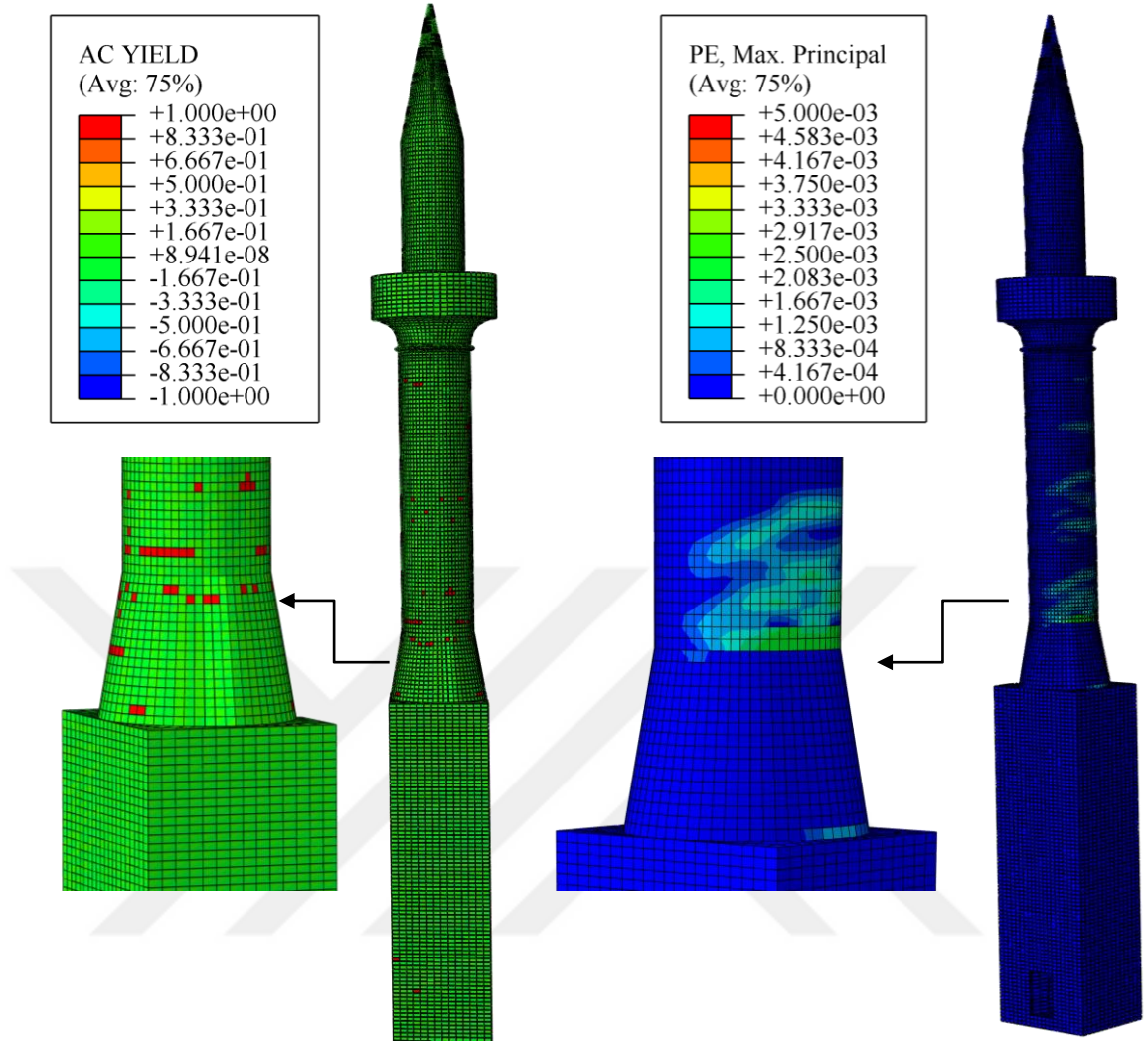


şekil 5.68. Muradiye Cami doğu minaresi talep ve kapasite diyagramları

Kapasite diyagramı incelendiğinde kesme kuvveti alınan bölgenin plastikleşmeye başladığı anlaşılmasına rağmen doğu minaresinin batı minaresine göre daha iyi durumda olduğu söylenebilir. Ancak doğu minaresinin daha doğru değerlendirilmesi için itme analizinde depremin talep yer değiştirmesine denk gelen adımındaki plastik birim şekil değiştirme, aktif akma ve gerilme grafiklerinin yorumlanması gerekmektedir (şekil 69, şekil 70).



Şekil 5.69. Muradiye Doğu Minare Von-mises ve S33 gerilme grafikleri

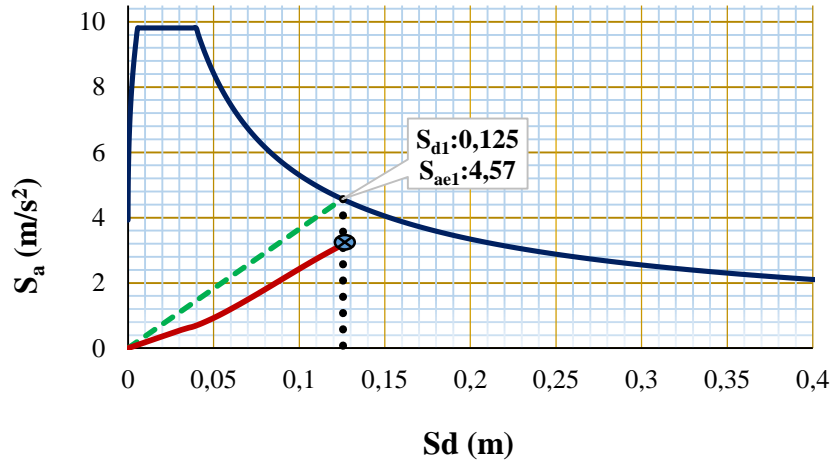


**Şekil 5.70.** Muradiye Doğu Minare aktif akma ve plastik birim şekil değiştirmeleri

Doğu minaresinin kaidesi ve küp elemanı batı minaresinden farklı olarak almalı düzenli olup gövde elemanı tuğladan örülmüştür. Almalı düzen çekme dayanımı 0,5 Mpa ve tuğla+harç 0,3 Mpa olduğu düşünülürse gerilme diyagramlarında küpten gövdeye geçiş bölgesi ve kaidenin bir bölümünün zorlandığı görülmektedir. Minarenin plastik birim şekil değiştirme grafiği incelendiğinde ise malzemenin geçiş elemanı-gövde birleşim bölgesinin plastik aşamaya geçtiği ve plastik birim şekil değiştirmenin maksimum % 0,25 mertebelerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda çekme plastik birim şekil değiştirme değeri, malzemenin taşıyıcılığını kaybettiği 0,005 olarak belirlenen sınır değerinin altında kalmıştır. Sonuç olarak muhtemel bir depremde minarenin kısmi olarak zarar görebileceği ancak mevcut durumda batı minaresine göre daha iyi bir davranış sergileyebileceği söylenebilir.

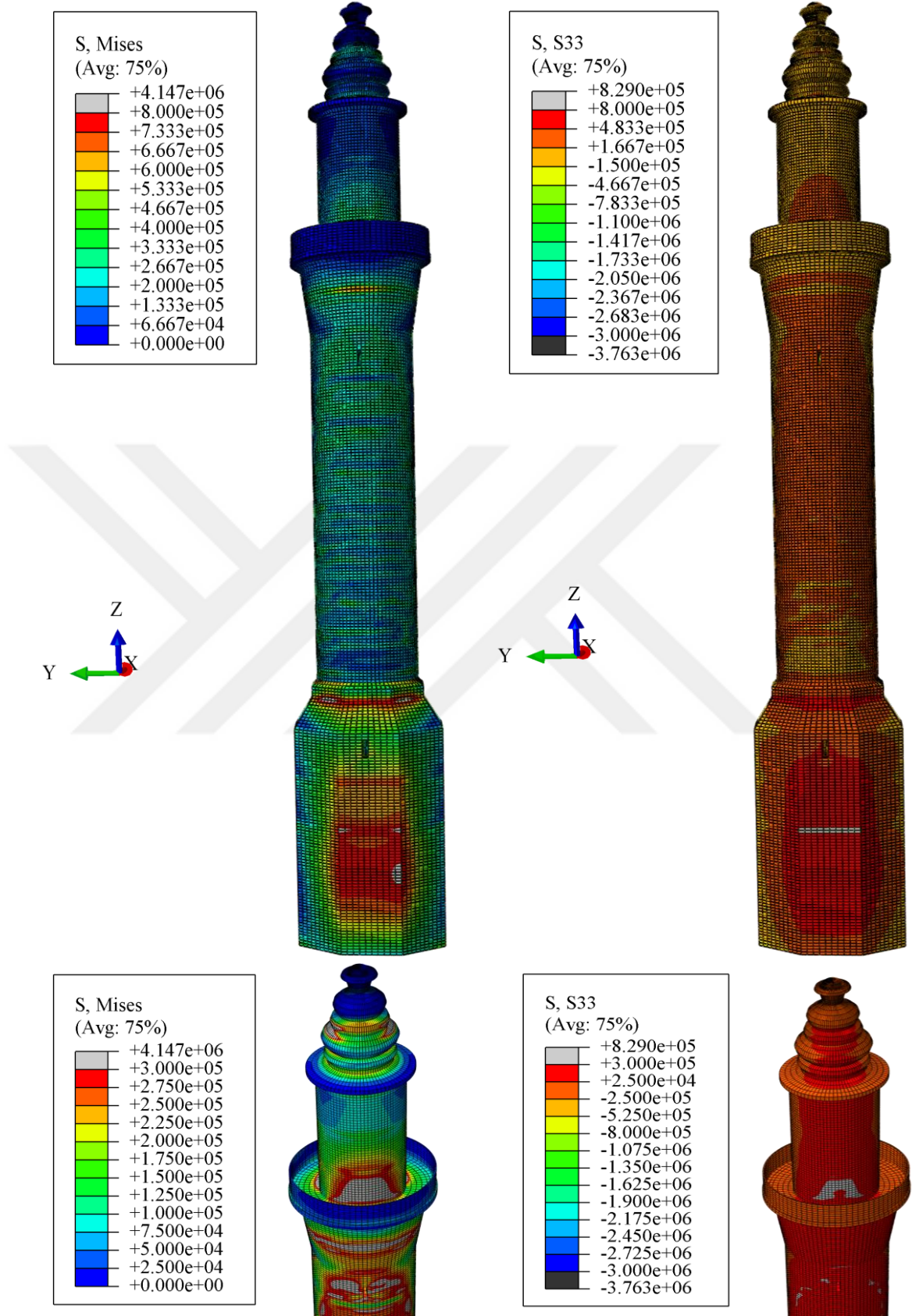
### 5.4.3. Ulucami batı minaresi performans değerlendirilmesi

İtme analizini gerçekleştirmek için öncelikle Ulucami batı minaresinin talep diyagramı elde edilmiştir. Ulucami şehrin merkezinde olup 1. Derece deprem bölgesindedir. Bölgenin zemin grubu Z2 seçilmiştir. Bölüm 2’de anlatılan gerekli işlemler yapılarak talep diyagramı oluşturulmuştur. Talep diyagramından modal testten elde edilen doğal titreşim (hâkim) periyodunun eğimi kullanılarak minarenin deprem talep modal yer değiştirme (hâkim) periyodunun eğimi kullanılarak minarenin deprem talep modal yer değiştirme 0,125 m olarak tespit edilmiştir. Minarenin kapasite eğrisi içinse sonlu elemanlar modelinde birinci mod şekli dikkate alınarak yükseklik boyunca yer değiştirme uygulanmıştır. Analiz sonucunda tepe yer değiştirme ile taban kesme kuvveti, modal yer değiştirme ve modal ivmeye dönüştürülerek talep ve kapasite grafikleri aynı grafikte gösterilip yorumlanmıştır (Şekil 5.71)

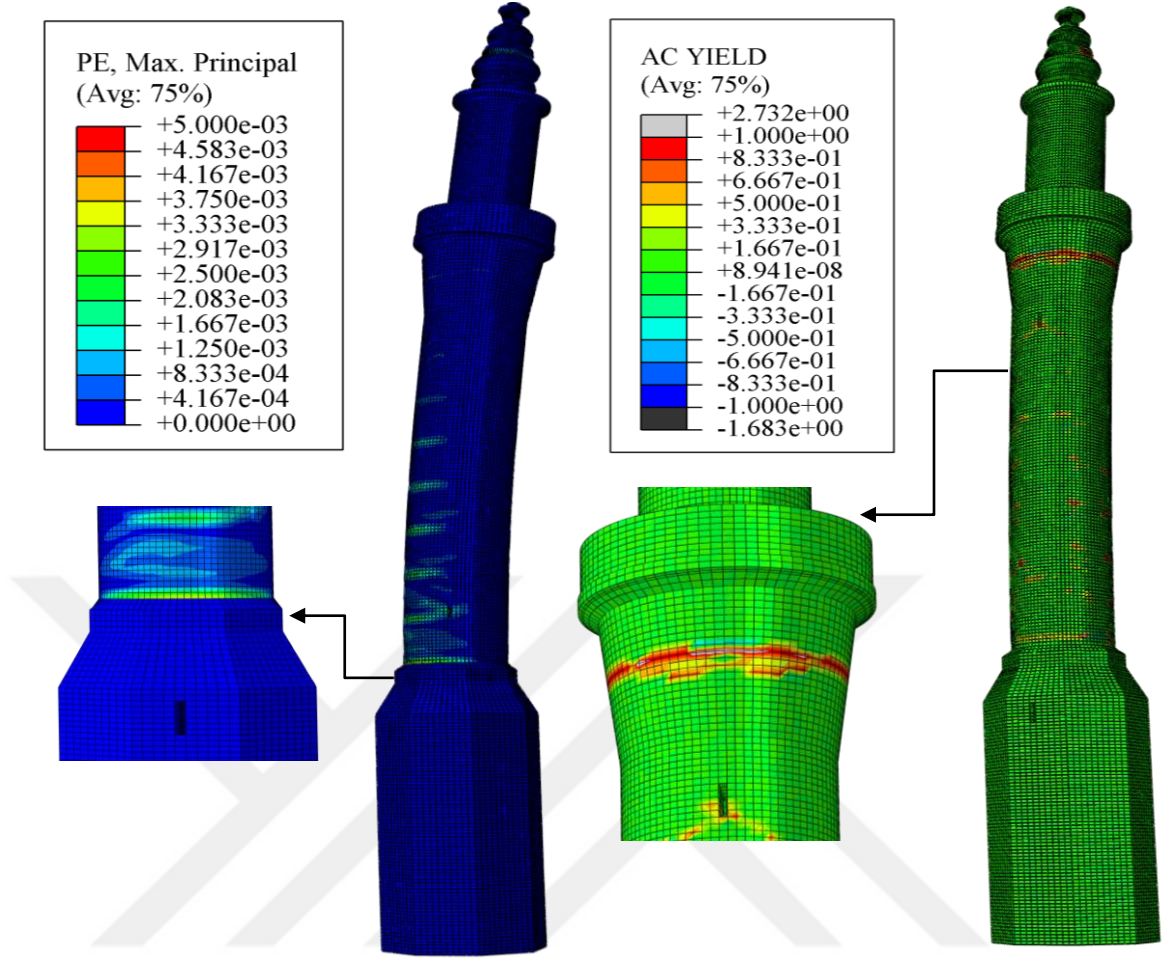


Şekil 5.71. Ulucami batı minaresi talep ve kapasite diyagramları

Kapasite eğrisine bakıldığında 0,005 m’lik ilk kısmında eğrinin rijitliğinin arttığı görülmektedir. Bu duruma, minareye ait kesme kuvvetinin alındığı kritik bölgede artan gerilmelerle birlikte plastikleşmenin başlaması ve ilgili bölgenin üstündeki ve altındaki elemanlara gerilme aktarımı ve kuvvet yörüngelerindeki değişim sebep olarak gösterilebilir. Kapasite diyagramı deprem talep ettiği yer değiştirme değerine kadar Muradiye minarelerine nazaran daha doğrusal bir davranış sergilemiştir. Ancak Ulucami batı minaresinin daha doğru değerlendirilmesi için itme analizinde depremin talep yer değiştirme değerine denk gelen adımındaki plastik birim şekil değiştirme, aktif akma ve gerilme grafiklerinin yorumlanması gerekmektedir (Şekil 72, Şekil 73).



Şekil 5.72. Ulucami batı minare Von-mises ve S33 gerilme grafikleri

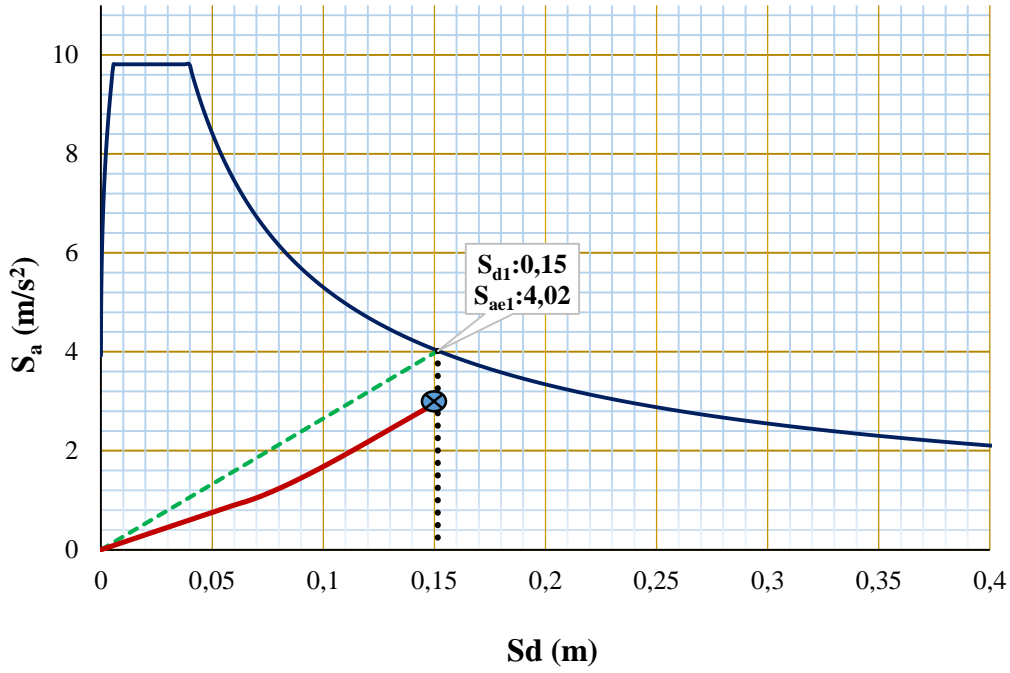


**Şekil 5.73.** Ulucami batı minare aktif akma ve plastik birim şekil değiştirmeleri

Gerilme grafikleri, hem küfeki taşının 0,8 Mpa hem de tuğla+harcın 0,3 Mpa öngörülen sınır çekme dayanımlarına göre kritik bölgeler için incelenmiştir. Gerilme grafiklerine göre kaide elemanı, gövde, şerefe altı ve petek elemanlarında bölgesel olarak zorlanmalar tespit edilmiştir. Özellikle kaidenin beden duvar mesnetinin bittiği bölgede, küp elemanından gövdeye geçişte yani malzemenin değiştiği bölümde ve şerefeden petek duvarına geçişte sınır durumların aşıldığı anlaşılmaktadır. Aktif akma ve plastik birim şekil değiştirme grafiklerinde kaide elemanın plastikleşmesinin endişe edilecek seviyelerde olmadığı ancak küpten gövde geçişte plastikleşmenin gövde en kesitinin üçte birinde %0,30 mertebelerine ulaştığı görülmektedir. Bu bölge için çekme plastik birim şekil değiştirme değeri, malzemenin taşıyıcılığını kaybettiği 0,005 olarak belirlenen sınır değerine ulaşmamasına rağmen kritik bir seviyede olduğu söylenebilir. Sonuç olarak muhtemel bir deprem bahsedilen bölgelerde hasar oluşmasına minarenin ayakta kalabileceği düşünülmektedir.

#### 5.4.4. Ulucami doğu minaresi performans değerlendirmesi

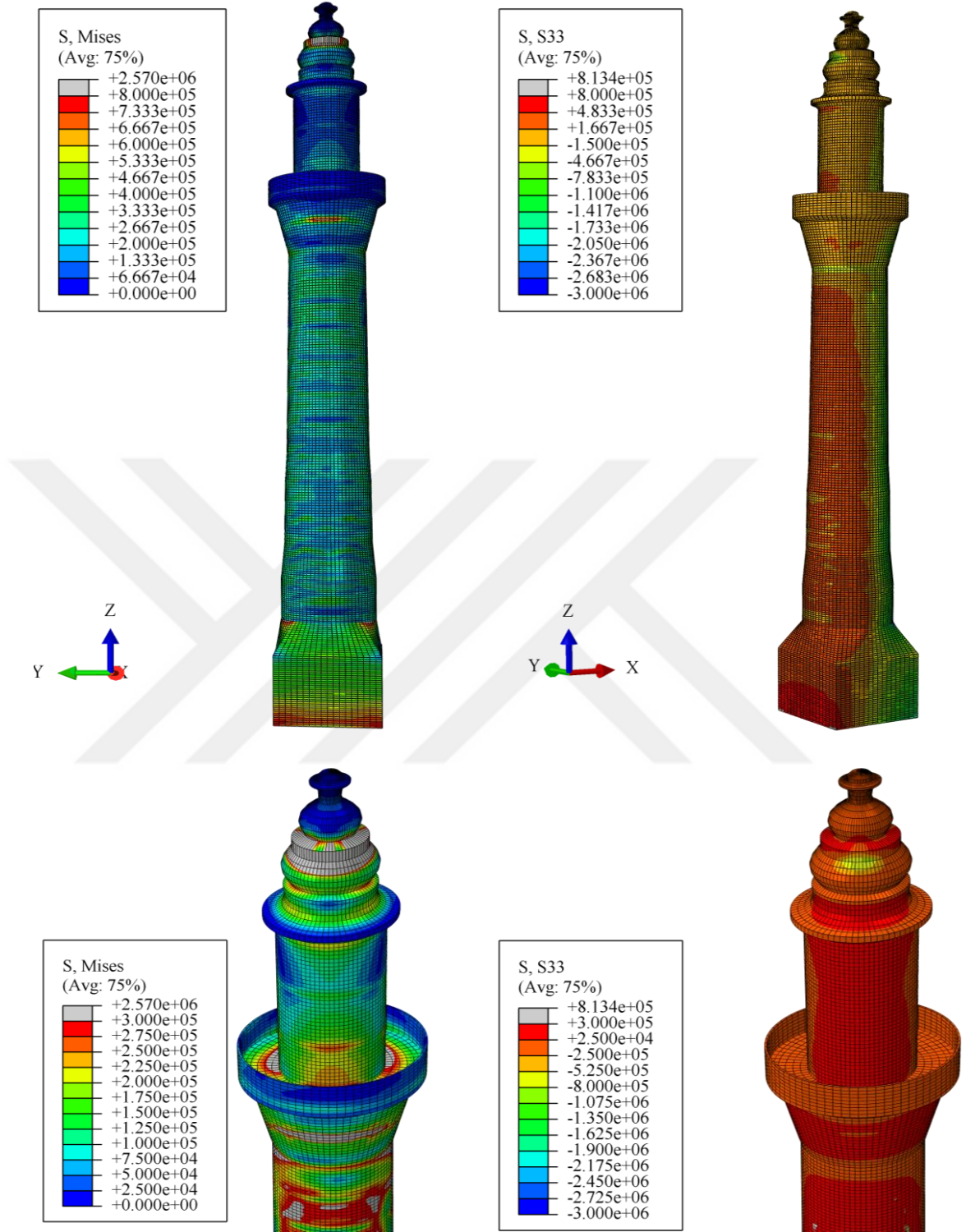
Batı minaresiyle aynı bölgede olan doğu minaresi için deprem bölgesi 1 ve zemin sınıfı Z2 olarak talep spektrumu oluşturulmuştur. Kaide boyu kısa ve beden duvarına mesnetsiz olan doğu minaresinin rijitliği daha az olduğu için batı minaresine göre periyodu daha yüksektir. Bu yüzden doğu minaresinin hakim periyotun eğimine göre deprem talep yer değiştirmesi daha yüksek olup 0,15 m olarak belirlenmiştir. Kapasite değerleri için ise sonlu elemanlar modelinde birinci mod şeklini dikkate alarak yükseklik boyunca yer değiştirme yüklemesi gerçekleştirilmiştir. Yükleme sonucunda tepe yer değiştirmesi ile taban kesme kuvveti alınıp gerekli dönüşümler yapılarak talep ve kapasite grafikleri aynı grafikte gösterilip yorumlanmıştır (Şekil 5.74) .



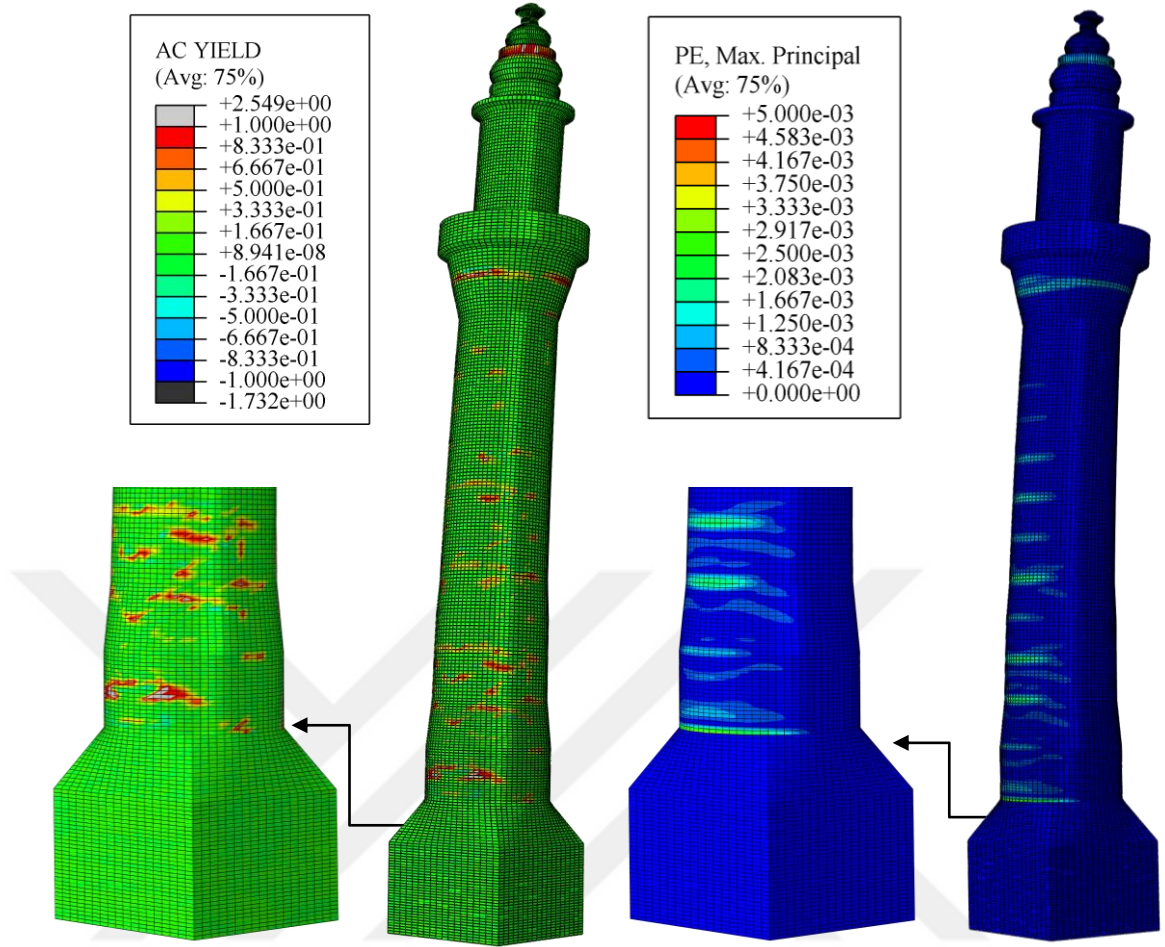
Şekil 5.74. Ulucami doğu minaresi talep ve kapasite diyagramları

Doğu minaresinin kapasite eğrisinin talep yer değiştirmesine kadar yaklaşık doğrusal bir davranış sergilediği görülmektedir. Bu durum, kesme kuvveti alınan kritik bölgede plastikleşmenin düşük seviyelerde olduğunun göstergesidir. Ancak doğu minaresinin daha doğru değerlendirilmesi için itme analizinde depremin talep yer değiştirmesine denk gelen adımındaki plastik birim şekil değiştirme, aktif akma ve gerilme grafiklerinin yorumlanması gerekmektedir (Şekil 75, Şekil 76).





Şekil 5.75. Ulucami doğu minare Von-mises ve S33 gerilme grafikleri



**Şekil 5.76.** Ulucami doğu minare aktif akma ve plastik birim şekil değiştirmeleri

Gerilme grafikleri incelendiğinde minarenin tüm elemanlarının zorlandığı görülmektedir. Özellikle gövde bölümü çekme sınır dayanımı olan 0,3 Mpa seviyesinde zorlanmaktadır. Minarenin plastik birim şekil değiştirmesi küp-gövde birleşimi ve değişken kesitli gövdenin başladığı bölgede kesitin üçte birinin yaklaşık %0,3 mertebesine ulaştığı görülmektedir. Değişken kesitli gövde boyunca plastikleşmeler devam etmesine rağmen belirlenen çekmedeki sınır duruma ve kritik en kesite ulaşmamıştır. Aktif akma grafiğinde de bahsedilen bölgelerin akmış olduğu anlaşılmaktadır. Mevcut durumuyla doğu minaresi, muhtemel bir depremde bölgesel hasarlar alabilir olmasına rağmen taşıyıcılığını yitirmeyeceği beklenmektedir. Batı minaresi ile doğu minaresi deprem performansı açısından karşılaştırılacak olursa batı minaresinin taşıyıcı sisteminin daha iyi durumda olduğu söylenebilir. Batı minaresinin kaidesinin daha yüksek olması ve çift çıkışlı merdiven yapısına sahip olması rijitliği olumlu yönde etkimiştir.

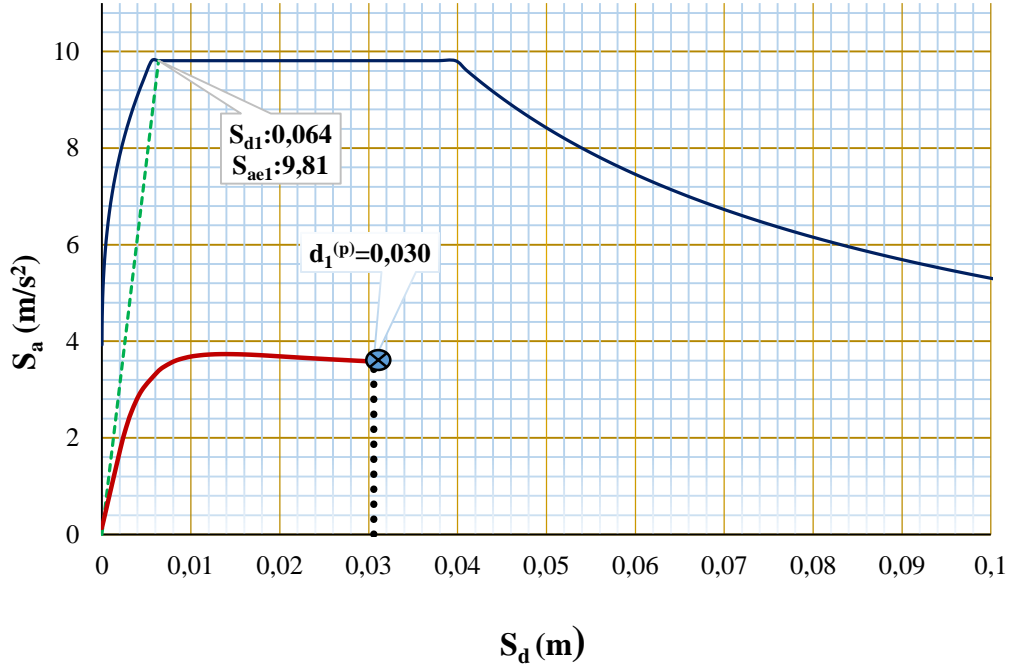
#### 5.4.5. Timurtaşpaşa cami minaresi performans değerlendirmesi

İtme analizini gerçekleştirmek için öncelikle Timurtaşpaşa Cami mimaresinin talep diyagramı elde edilmiştir. Cami 1. Derece deprem bölgesinde olup bölgenin zemin özellikleri dikkate alınarak zemin grubu Z2 seçilmiştir. Bölüm 2’de anlatılan gerekli işlemler yapılarak talep diyagramı oluşturulmuştur. Diyagramdan doğal titreşim (Hakim) periyodun eğimine göre deprem talep modal yer değiştirilmesi tespit edilmiştir. Ancak burada ifade edilmesi gereken iki durum söz konusudur. Birincisi, dördüncü bölümde yapılan modal analiz sonucunda hakim modun ikinci mod olarak tespit edilmesidir. Çünkü 2. Moddaki kütle katılım oranı yaklaşık %75 olup bu oran yapının dinamik davranışının büyük bir kısmını temsil etmektedir. İkinci modun hakim olmasının sebebi şadırvanın üstündeki kubbenin önemli bir kütle yoğunluğu oluşturmasıdır. Birinci ve ikinci modun minarenin yer değiştirmesine ne kadar katkısı olduğu ve kütle katılım oranının yapıya etkisini doğrulamak adına minareye temelden harmonik bir yük verilip dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucu görüşümüzü doğrulamış olup yer değiştirmelerde ikinci modun baskın olduğu tespit edilmiştir.

İkinci ifade edilmesi gereken durum ise ikinci mod frekansının  $T=0,16$  sn olmasından dolayı  $S_{de1}$ ’in  $T_B$  için belirlenen değerden daha küçük olmasıdır. Bu durumda bölüm 2’de anlatılan ardışık işlemler yapılarak  $a_{y1}$ ,  $R_{y1}$  ve  $C_{R1}$  değerlerinin bulunup  $d_1^{(p)}$  son yer değiştirme isteminin tespit edilmesi gerekmektedir. Bunun için ise sonlu elemanlar modelinde birinci mod şekli dikkate alınarak yükseklik boyunca yer değiştirme uygulanmıştır. Analiz sonucunda tepe yer değiştirmesi ile taban kesme kuvveti, modal yer değiştirme ve modal ivmeye dönüştürülerek talep ve kapasite grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 5.77). Daha sonra bölüm 2’de anlatılan DBYBHY-2007’deki denklemler ve eşit alanlar kuralı dikkate alınarak aşağıdaki ardışık iki hesaplama yapılmıştır.

$$a_y^0=1,6 \quad R_{y1}=6,13 \quad C_{R1}=2,255 \quad S_{de1}=0,01434 \text{ m}$$

$$a_{y1}=2,50 \quad R_{y2}=3,924 \quad C_{R2}=2,12 \quad S_{di1}=d_1^{(p)}=0,030 \text{ m}$$

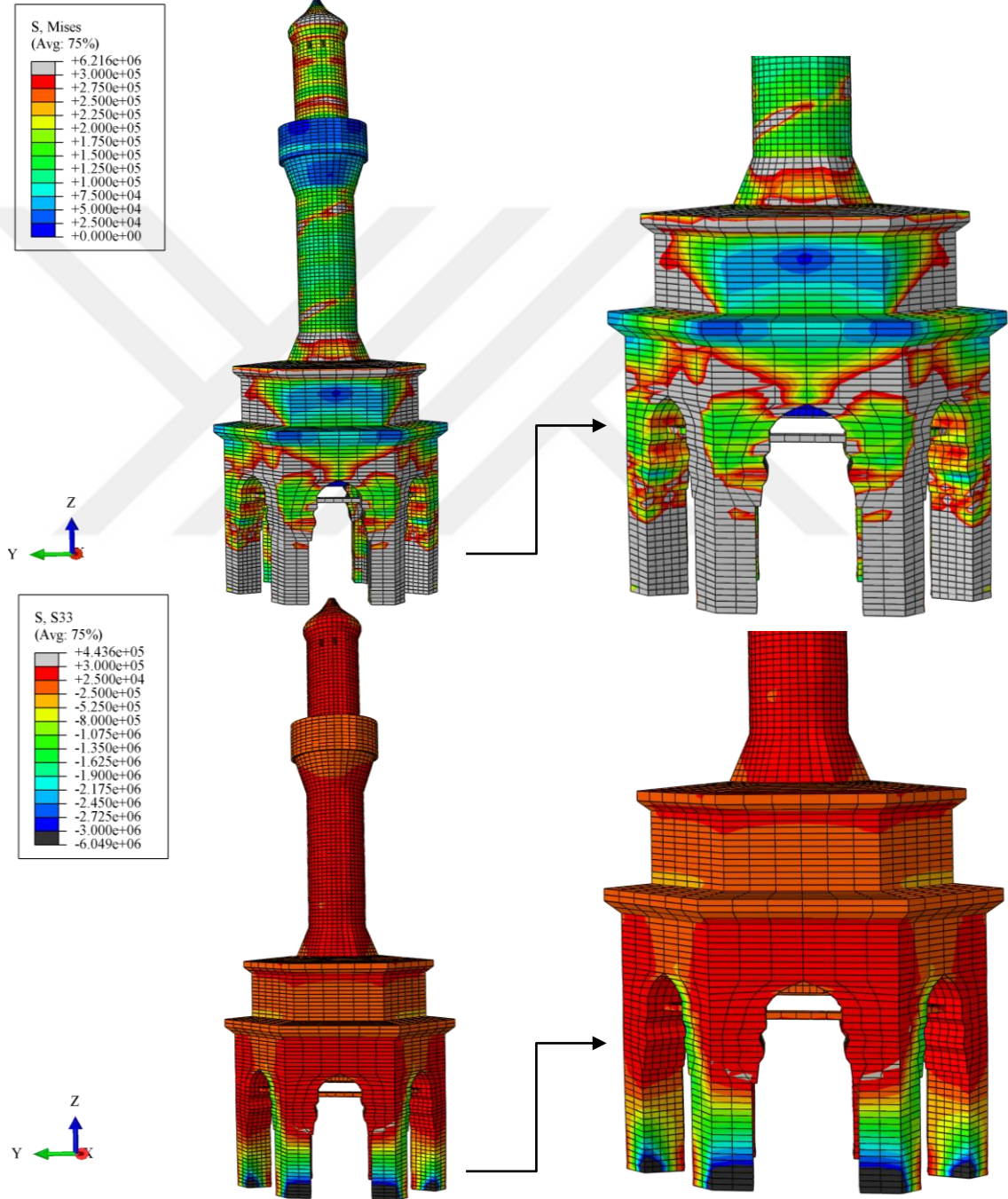


**Şekil 5.77.** Timurtaşpaşa Cami minaresi talep ve kapasite diyagramları

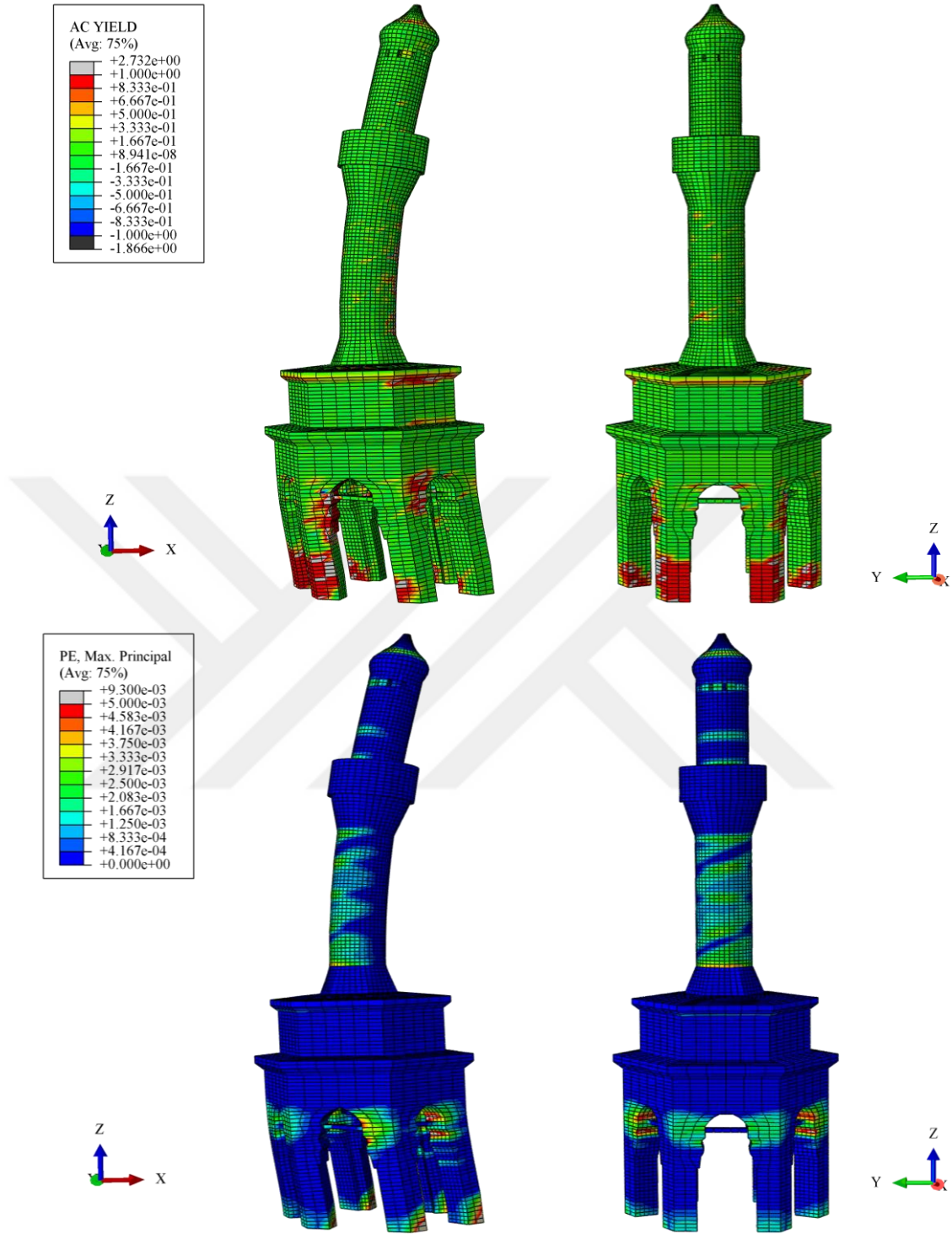
Gerekli işlemler sonucu elde edilen kapasite eğrisinden yerdeğiştirme talebi çok küçük olması rağmen kesme kuvveti alınan en kesit bölgesinin plastik aşamaya geçtiği anlaşılmaktadır. Hatta eğrinin negatif eğime geçtiği görülmektedir. Taban kesme kuvveti alınan bölge, temel seviyesinin 2 m yukarısındaki en kesittir. Minarenin tüm bölümlerinin daha doğru değerlendirilmesi için itme analizinde depremin talep değerine denk gelen adımındaki plastik birim şekil değiştirme, aktif akma ve gerilme grafiklerinin yorumlanması gerekmektedir (Şekil 5.78 ve 5.79).

Gerilme grafiklerinden anlaşılacağı üzere minarenin üstüne inşa edildiği taşıyıcı altı yığma ayağın dördünün özellikle temele yakın bölümlerinde ve ilk 2 m'lik yükseklikte kesitlerin çekme dayanımı aşılmıştır. Yığma ayakların kemer elemanlarında ve minarenin tüm bölümlerinde oluşan çekme gerilmeleri 0,3 Mpa olarak belirlenen sınır dayanıma ulaşmıştır. Ancak yapının kubbe bölümünde çekme gerilmesi 0,2 Mpa olup belirlenen sınır çekme dayanımını aşmamıştır. Aktif akma ve plastik birim şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde dört yığma ayağın temele yakın bölümlerinde, dört kemer elemanda, küpten gövdeye geçiş kesitinin üçte birinde ve gövdenin belirli bölümlerinde çekme plastik birim şekil değiştirme için belirlenen 0,005 sınır değerinin aşıldığı

görülmektedir. Plastik birim şekil değiştirme ve gerilme grafiklerinde ifade edilmesi gereken diğer husus ise merdivenin yapı davranışını nasıl etkilediğidir. Sonuç olarak, yapı elemanlarının muhtemel bir depremde zarar görebileceği düşünölmekte olup bu hasarın yığma ayak-temel birleşimi, kemer-kubbe birleşimi ve küp-gövde birleşiminde olacağı aşıkardır.



Şekil 5.78. Timurtaspaşa Cami minaresi Von-mises ve S33 gerilme grafikleri



**Şekil 5.79.** Timurtaspaşa Cami minaresi aktif akma ve plastik birim şekil değiştirmeleri

## 6. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında toplamda 22 adet tarihi minare incelenmiştir. Bunlardan 15 tanesine ait bütün modal testler, yerinde boyutların tayini ve rölelerin çıkartılması bizzat bu çalışma kapsamında yapılmıştır. Seçilen minarelerin birçoğu Bursa'nın Osmanlı Devletine başkentlik yaptığı dönemde inşa edilmiş olup devletin ileri gelenleri tarafından yaptırılmış görkemli yapılardır. Tezde yapılan çalışmaları dört ana başlık altında toplamak mümkündür. Birincisi minareler için envanter çalışması ve modal parametrelerin belirlenmesi, ikincisi minarelerin sonlu elemanlar modeli oluşturularak modal analiz ve kalibrasyon işlemleri, üçüncüsü modal parametrelere etkileyen faktörlerin yorumlanması ve minarelerin doğal titreşim periyotları arasında ilişki kurulmasıdır. Tüm bu değerlendirmeler gerek çalışma kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar gerekse de daha önce yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçların birleştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise seçilen beş adet minareye itme analizi uygulayarak sismik davranışları tespit edilmiş ve performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda yapılan değerlendirmeler, elde edilen sonuçlar ve bunlara bağlı öneriler aşağıda sıralanmıştır.

İncelenen minareler oldukça önemli tarihi eserler olmasına rağmen maalesef hangi tarihte nasıl bir onarım geçirdiği ve mevcut haldeki geometrik ve malzeme özellikleri hakkında kapsamlı bir bilgi yoktur. Maalesef ülkemiz genelindeki tarihi eserler konusunda benzer durum geçerlidir. Yerinde yapılan ölçümler ve mevcut bilgilerin derlenmesi bile Bursa ili özelinde bu eksikliğin giderilmesi için önemli adım niteliğindedir.

Minare modellerinin modal test verileriyle kalibrasyon yapılması gerçek yapıyı temsil etme gücünü arttırmıştır. Örnek olarak minarelerin beden duvarıyla ilişkisi veyahut mesnetlenme şartları gözlemsel olarak belirlenebilecek bir parametre olmadığı çalışma sonucunda elde edilen en temel sonuçların başında gelmektedir. Bu durum ise minarelerin davranışını, dinamik açıdan yapılacak değerlendirmelerde modlara katılım oranlarını dahi önemli oranda değiştirebilmektedir. Çalışma kapsamında sayısal modelinin kalibrasyonunda en çok zorlanılan, diğer bir ifadeyle mesnet koşullarının tahmin edilmesinde zorluk çekilen, 1. Murat Hüdavendigâr Cami minaresidir. Çünkü minarenin küp elemanı iki katlı bir cami yapısının üzerine oturtulmuştur. Ancak, araştırma

sonucunda 1855 depreminden sonra inşa edilen küp ve üstündeki bölümlerin kaideye düzgün mesnetlenemediği anlaşılmaktadır. Buna ilaveten kaide kabul edilen bölümle cami beden duvarı arasındaki mesnet koşullarının belirlenmesi çok zor olmuştur. Kaide ve beden duvarı çok yüksek olduğu için minare düşük frekanslarda beden duvarına mesnetli olarak, yüksek frekanslarda ise beden duvarına mesnetsiz olarak çalışmaktadır. Bu durum yerdeğiştirme düzeyine bağlı olarak kontak mekanizmasının yapı davranışını nasıl etkileyeceğini yorumlamada önemli bir örnektir. Kaide duvarının mesnet sorunu, beden duvarından bağımsız olarak sonradan onarılan veyahut yenilen minarelerde karşılaşılabilecek bir durumdur. Çalışma kapsamında da bazı minarelerde karşılaşılmıştır.

Çalışma kapsamında genellikle %85-90 mertebelerinde kütle katılım oranının sağlanması için ilk üç mod yeterli gelmiştir. Ancak Ulucami minarelerinde %90 değerine ulaşamadığı için ilk dört mod incelemeye alınmıştır. Bunun sebebi Ulucami minarelerinde yükün yükseklik boyunca yoğun dağılımıdır. Kütle katılım faktörü sistemin toplam hareketi üzerinde o modun şeklinin ne denli etkin olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Bu veriler ışığında yüksekliği 30 m'ye kadar olan minarelerde ilk üç modun yapı davranışını temsil etmede yeterli olacağı anlaşılmaktadır. Hâlbuki bu yüksekliğin üzerinde, kütle yoğunluğunun yükseklik boyunca arttığı minarelerde ilk üç modun yapı davranışını temsil etmede yeterli olamayabileceği ve kontrol edilmesi gereken bir husus olduğu sonucu çıkmaktadır.

Minarelerde genellikle birinci mod periyotu hâkim periyottur. Ancak kaidenin formu ve yüksekliğine göre bazen birinci mod ve ikinci mod kütle katılım değerleri birbirine yakın çıkmaktadır. Bazı özel durumlarda ise ikinci mod kütle katılımı daha yüksek çıkmıştır. Örneğin Timurtaşpaşa Cami minaresinin ikinci mod kütle katılım oranı %75'tir. Çünkü minarenin üzerine mesnetlendiği kubbe seviyesi yoğun bir kütleyle sahiptir. Bu durum da minarenin davranışını oldukça etkilemiştir. Benzer şekilde özel formda geometriye sahip minareler için bu duruma rastlanabileceği yine hesaplarda dikkate alınması gereken bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır.

Her ne kadar istisna durumlar olsa da minarelerin hâkim periyotunu birinci mod temsil etmektedir. Bu yüzden minarelerin birinci mod periyotlarını etkileyen yükseklik,



elastisite modülü ve en kesitlerle periyot arasında ilişki kurmak mümkündür. Çalışma kapsamında yükseklik, en kesit ve elastisite modülü kullanılarak periyot normalleştirilmiş ve bahsedilen parametrelerle dağılımı yorumlanmıştır. Grafik dağılımında, periyot yükseklikle artarken en kesit ve elastisite modülü ile azalmıştır. Bahsedilen ilişkiler tarihi minarelerin doğal titreşim periyodu için akademik çalışmanın devamında elde edilecek ampirik bir formülün temelini oluşturmuştur.

İlişki dağılımlarının daha düzenli olması için idealleştirmelerin geliştirilmesi ve örnek sayısının artırılması gerekmektedir. Örneğin normalleştirilmiş periyot-yükseklik ilişkisinde kaide yüksekliği mesnet şartlarına göre idealleştirilip diğer bölüm yüksekliklerine eklenerek toplam eşdeğer yükseklik hesaplanmıştır. Kaide en kesitinin ise eşdeğer yükseklik boyunca gövdeyle aynı olduğu kabul edilmiştir. Bu durumlar grafikteki dağılımı etkilemektedir.

Çalışmanın son aşamasında ise incelenen 5 minarenin muhtemel bir depreme karşı performansı değerlendirilmiştir. Performans değerlendirmesi doğal titreşim (hâkim) periyodu dikkate alınarak doğrusal olmayan itme analizi yardımıyla gerçekleştirilmiş ve minarelerin kapasite diyagramları elde edilmiştir. Kapasite eğrisi davranışın yorumlanması için oldukça önemlidir. Çalışma kapsamındaki kapasite eğrilerine bakıldığında, çok küçük yer değiştirmelerde eğrinin rijitliğinin arttığı görülmektedir. Bu duruma, minareye ait kesme kuvvetinin alındığı kritik bölgede artan gerilmelerle birlikte plastikleşmenin başlaması, ilgili bölgenin üstündeki ve altındaki elemanlara gerilme aktarımı ve kuvvet yörüngelerindeki değişim sebep olarak gösterilebilir.

Kapasite eğrisinin değerlendirilmesinden sonra minarelere ait gerilme ve plastik birim şekil değiştirme grafikleri incelenmiştir. İnceleme sonucunda minareler için kritik görülen bölgelerde hasarlar tespit edilmiştir. Bahsedilen kritik bölgeler genellikle minare bölümlerinin birleşim bölgeleri olup küpten gövdeye geçiş, gövdeden şerefeye geçiş, peteğin başlangıç kesitleridir. Ancak hasarın daha çok görüldüğü ve önem kazandığı bölge küp-gövde birleşimidir. Minare bu bölgeden hasar gördüğü takdirde taşıyıcılığını yitirebilir. Elbette ki çoğu minare büyük depremlerde bahsedilen bölgelerden zarar görecektir. Ancak yapının taşıyıcılığını yitirdiğini anlamak için hasar düzeyinin

belirlenmesi gerekir. Eğer itme analizi sonucunda 0,005 değerindeki çekme plastik birim şekil değiştirme, kesitin yarısına geçmişse elemanın taşıyıcılığını yitireceği öngörölmüştür. Çalışma kapsamındaki literatür araştırması genişletilerek bu sınır değerin değiştirilmesi mümkündür.

Bursa'daki 1855 depreminden sonra yapılan bazı minarelerde gövde bölümü tuğla iken şerefe, petek ve külah bölümü küfeki taşından yapılmıştır. Bu durum muhtemel depremler için petek ve külah bölümünün dayanımını arttırmaktadır. Ancak minarenin yüksek bölümlerinde küfekiden dolayı oluşan kütledeki yoğun artış, minarenin diğer bölümlerinin daha fazla zorlanmasına neden olmaktadır.

Çalışma devamında, türetilecek ampirik formül, geometrik özellikler ve muhtemel deprem talep değeri kullanılarak Türkiye çapında uygulanacak hızlı değerlendirme tekniği geliştirmesi planlanmaktadır. Bu sayede olası depremler için incelenmesi önem arz eden minareler tespit edilerek detaylı inceleme yapılacaktır. Türkiye'deki Osmanlı dönemine ait minare sayısını düşünürsek böyle bir tekniğin geliştirilmesi, ilgili kuruluşlara deprem riskinin değerlendirilmesinde yadsınamaz derecede zaman kazandıracakı açıktır. Benzer şekilde bu çalışmanın çıktıları; modellenmesi ve davranışının anlaşılması nispeten daha kolay olan güncel betonarme minarelerde rahatlıkla uygulanabilir niteliktedir. Çalışma sonuçlarından hareketle betonarme minareler konusunda da benzer çalışmalar aynı mantıkla gerçekleştirilebilir.

## KAYNAKLAR

**Acar, R. 2009.** Anıtsal kule türü yapıların deprem davranışlarının incelenmesi ve alternatif sistemlerin geliştirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.

**Akıncı, Ş. 1998.** İstanbul'un Fethinden Lale Devrine Kadar Osmanlı Kagir Mimarisinde Yapım Teknikleri, *Yayımlanmamış Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

**Akman, S. 1986.** Horasan Harcı ve Betonunun Tarihi ve Teknik Özellikleri, II. Uluslararası Türk İslam Bilim ve Teknoloji Tarihi Kongresi, İstanbul, Türkiye.

**Akman, S. 1990.** Yapı Malzemeleri. İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul.

**Altunışık, A. C. 2011.** Dynamic response of masonry minarets strengthened with Fiber Reinforced Polymer (FRP) composites. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 2011–2019.

**Arioğlu, N., Arioğlu, E. 1997.** Mimar Sinan'ın Seçtiği Taş: Küfeki ve Çekme Dayanımı, Türkiye İnşaat Mühendisliği 14. Teknik Kongresi, Ekim 1997, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, İzmir.

**Aş, E.F. 2007.** Tarihi tuğlalar ile örülen duvarların güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim dalı, İstanbul.

**Baştürk, M. H. 2013.** Bursa Tarihi Yığma Minarelerinin Dinamik Davranışlarının Modal Analiz Yöntemi ile İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

**Bayraktar, A., Sevim B., Altunışık, A. C., Türker T. 2009.** Analytical and operational modal analyses of Turkish style reinforced concrete minarets for structural identification. *Experimental Techniques*, 33(2): 65-75.

**Bayraktar, A., Altunışık A. C., Sevim B., Türker T. 2010.** 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.

**Böke, H., Akkurt, S., İpekoğlu, B. 2004.** Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harcı ve Sıvalarının Özellikleri. *Yapı Dergisi*, 269: 90-95.

**Chopra, A. K. (1995).** Dynamics of structures (Vol. 3). New Jersey: Prentice Hall.

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

**Doğangün, A., Sezen, H., Tuluk, Ö.İ., Livaoğlu, R., Acar, R. 2007.** Traditional Turkish Masonry Monumental Structures and their Earthquake Response. *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration*, 1(3): 251-271.

**Doğangün, A., Acar, R., Sezen, H., Livaoğlu, R., 2008.** Investigation of dynamic response of masonry minaret structures. *Bulletin Earthquake Engineering.*, 6:505–517.

**El-Attar, A. G., Saleh, A. M., Osman, A. 2001.** Seismic response of a historical Mamluk style minaret. *Earthquake Resistant Engineering Structures*, 57.

**El-Attar, A. G., Saleh, A. M., El-Habbal, I. R. 2008.** Seismic Risk Mitigation of Historical Minarets Using SMA Wire Dampers. In *2008 Seismic Engineering Conference: Commemorating the 1908 Messina and Reggio Calabria Earthquake*, 1020(1): 110-117. AIP Publishing.

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

**Eyice, S. 1963.** İstanbul Güzel Sanatlar Akademisi Türk Sanatı Araştırma ve İncelemeleri, I. Berksoy Matbaası, İstanbul.

**Gürdal, E., Seden A. 2006.** Tarihi Yapılarda Kullanılmış Horasan Harçları Ve Eyüp'teki Eski Eser Tarihi. Kültürü ve Sanatıyla Eyüpsultan Sempozyumu 10, 12-14 Mayıs 2006, İstanbul, Türkiye.

**Haciefendioğlu, K. 2010.** Seasonally frozen soil's effect on stochastic response of masonry minaret–soil interaction systems to random seismic excitation. *Cold Regions Science and Technology*, 60(1): 66-74.

**Haciefendioğlu, K., Birinci, F. 2011.** Stochastic dynamic response of masonry minarets subjected to random blast and earthquake-induced ground motions. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20(6):669-678.

**Jimin, H., Zhi-Fang, F. 2001.** Modal analysis. Linacre House, Oxford OX2 8DP.

**Kurugöl, S., Tekin, Ç. 2010.** Anadolu'da Bizans Dönemi Kale Yapılarında Kullanılan Tuğlaların Fiziksel, Kimyasal Ve Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(4).

**Kuşüzümü, K. H. 2010.** Yapım Teknikleri Açısından İstanbul Minareleri.

**Livaoğlu, R., 2005.** Ayaklı depoların sıvı-yapı-zemin etkileşimleri dikkate alınarak deprem davranışlarının incelenmesi. *Doktora Tezi*. KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.

**Livaoğlu, R., Baştürk, M.H. Baştürk, Serhatoğlu C., Doğangün A. 2015.** Dynamic Characteristics of Minarets of Hoca Tabip Mosque. 6th Iomac International Operational Modal analysis Conference, 10-12 May, 2015, Gijón – Spain.

**Lourenço, P. B., J.G. Rots and J. Blaauwendraad 1995.** Two Approaches for the Analysis of Masonry Structures: Micro and Macro-Modeling, *HERON*, 40(4), 313-340.

**Lourenço, P. B. 1998.** Simulations of size effect in masonry structures. *Aedificatio Publishers, Fracture Mechanics of Concrete Structures*, 3: 2001-2010.

**Mortezaei, A., Kheyroddin, A., Ronagh, H.R. 2010.** Finite Element Analysis And Seismic Rehabilitation of A 1000-Year-Old Heritage Listed Tall Masonry Mosque. *The Structural Design of Tall And Special Buildings*, 21(2012): 334–353.

**Oliveira, C. S., Çaktı, E., Stengel, D., Branco, M. 2012.** Minaret behavior under earthquake loading: The case of historical Istanbul. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(1): 19-39.

**Örmecioglu, H.T., Akan, A.E., Toker, Beeson S., Özmen, C. 2011.** Structural Analysis And Seismic Behavior of Yivli Minaret. *SDU International Technological Science*, 3(3): 52-61.

**Özcan, B. 1999.** Bursa Depremleri (2 Mart-12 Nisan 1855). *Güzel Sanatlar Enstitüsü Dergisi*, 5.

**Özen, G. Ö. 2006.** Comparison of elastic and inelastic behavior of historic masonry structures at the low load levels. *Doctoral dissertation*, Department of Architecture, Middle East Technical University, Turkey.

**Parzysz, B. 2011.** From One Polygon to Another: A Distinctive Feature of Some Ottoman Minarets. *Nexus Network Journal*, 13(2): 471-486.

**Pekgökgöz, R.K., Gürel, M.A, Mammadov, Z., Çili F. 2013.** Dynamic Analysis of Vertically Post-Tensioned Masonry Minarets. *Journal of Earthquake Engineering*, 17(4): 560-589.

**Peña, F. Lourenço, P. B. Mendes, N., Oliveira, D. V. 2010.** Numerical models for the seismic assessment of an old masonry tower. *Engineering Structures*, 32(5), 1466-1478.

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

**Resta, M., Fiore, A., Monaco, P. 2013.** Non-linear finite element analysis of masonry towers by adopting the damage plasticity constitutive model. *Advances in Structural Engineering*, 16(5), 791-803.

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

**Serhatoğlu, C., Livaoğlu R., Bağbancı B. 2015.** Dynamic Identification Of Mounental And Historical Minaret of The Şhadet. 6th Iomac International Operational Modal analysis Conference, 10-12 May, 2015, Gijón – Spain.

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

**Sickels, L.B. 1981.** Organics and Synthetics: Their Use as Additives in Mortars, Mortars, Cements and Grouts Used in the Conservation of Historic Buildings, Proceedings of Symposium in Rome, Italy.

**Şahin, A., Bayraktar, A., Özcan, D. M., Sevim, B., Altunışık, A. C., Türker, T. 2010.** Dynamic Field Test, System Identification, and Modal Validation of an RC Minaret: Preprocessing and Postprocessing the Wind-Induced Ambient Vibration Data. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 25(4): 336-356.

**Şeker, B.Ş. 2011.** Mimar Sinan Camilerinin statik ve dinamik yükler etkisinde davranışlarının incelenmesi”, *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

**Tao, Y., Chen J. F., Stratford, T. J., Ooi, J. Y.** Numerical Modelling of A Large Scale Model Masonry Arch Bridge.

**Temuz, H. T. 2007.** Minarelerin rüzgâr yükleri altında davranışlarının incelenmesi ve bunların rüzgâra göre hesabı. *Yüksek Lisans Tezi*, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.

**Teomete, E., Aktaş, E. 2010.** Structural analyses and assessment of historical Kamanlı Mosque in Izmir, Turkey. *Journal of performance of constructed facilities*, 24(4): 353-364.

**Tokay, H., Kuşüzümü, K. H. 2011.** Kaide, Papuç ve Şerefe Özelliklerine Göre İstanbul Minareleri. *Vakıf Restorasyon Yıllığı*, (2):52-63

**Turk, A. M., Cosgun, C. 2012.** Seismic behaviour and retrofit of historic masonry minaret. *Gradevinar*, 64(1): 39-45.

**Ünay, A.İ. 2006.** Evaluation of the Structural Safety of Historical Masonry Buildings. *Architectural Science Review*, 50(1): 26-30.

**EK 1**

<b>Ali Paşa Cami Minaresi</b>						
Sayı	Minare Bölmeleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)
1	Kaide	Taş+Tuğla	Kare, L=2,520	R=1,330	0,595	6,380
	Küp	Tuğla+Harç	R=2,290	R=1,330	0,480-0,240	0,975
	Gövde	Tuğla+Harç	R=1,810	R=1,330	0,240	7,800
	Petek	Tuğla+Harç	R=1,810	R=1,330	0,240	2,925
	Külâh	Kurşun	-	-	-	2,000
	Minarenin Zeminden İtibaren Yüksekliği					

<b>Altıparmak Cami Minaresi</b>						
Sayı	Minare Bölmeleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)
2	Kaide	Küfeki+Tuğla	Sekizgen L=1,210	R=1,320	0,800	7,400
	Küp	Tuğla+Harç	R=2,860-1,850	R=1,320-1,250	0,770-0,300	1,500
	Gövde	Tuğla+Harç	R=1,850	R=1,250	0,300	9,500
	Petek	Tuğla+Harç	R=1,710	R=1,250	0,230	4,000
	Külâh	Kurşun	-	-	-	3,250
	Minarenin Zeminden İtibaren Yüksekliği					

<b>İsmail Hakkı Cami Minaresi</b>						
Sayı	Minare Bölmeleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)
3	Kaide	Tuğla+Harç	Altıgen L=1,280	R=1,250	0,480	4,100
	Küp	Tuğla+Harç	R=2,150-1,590	R=1,250-1,170	0,450-0,210	1,730
	Gövde	Tuğla+Harç	R=1,590	R=1,170	0,210	13,830
	Petek	Tuğla+Harç	R=1,360	R=1,020	0,170	3,800
	Külâh	Tuğla+Harç	R=1,360-0,200	R=1,020-0,100	0,170-0,050	3,800
	Minarenin Zeminden İtibaren Yüksekliği					

<b>Molla Arap Cami Minaresi</b>						
Sayı	Minare Bölmeleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)
4	Kaide	Taş+Harç	Sekizgen L=1,100	R=1,450	0,600	9,202
	Küp	Tuğla+Harç	R=2,610-2,080	R=1,450-1,370	0,580-0,355	1,940
	Gövde	Tuğla+Harç	R=2,080	R=1,370	0,355	7,760
	Petek	Tuğla+Harç	R=1,790	R=1,250	0,270	3,200
	Külâh	Kurşun	-	-	-	2,250
	Minarenin Zeminden İtibaren Yüksekliği					

Muradiye Cami Batı Minaresi						
Sayı	Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)
5	Kaide	Küfeki	Dikdörtgen L=2,400x2,260	R=1,600	0,400-0,330	9,000
	Küp	Küfeki	R=2,220-1,870	R=1,600-1,350	0,310-0,260	2,530
	Gövde	Tuğla+Harç	R=1,870	R=1,350	0,260	9,540
	Petek	Küfeki	R=1,670	R=1,220	0,230	4,500
	Külâh	Küfeki	Değişken	Değişken	Değişken	3,850
	Minarenin Zeminden İtibaren Yüksekliği					

Muradiye Cami Doğu Minaresi						
Sayı	Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)
6	Kaide	Küfeki+Tuğla	Dikdörtgen L=2,400x2,800	R=1,450	0,675-0,475	10,500
	Küp	Küfeki+Tuğla	R=2,380-1,780	R=1,450-1,300	0,465-0,240	2,000
	Gövde	Tuğla+Harç	R=1,780	R=1,300	0,240	9,500
	Petek	Tuğla+Harç	R=1,540	R=1,100	0,220	5,000
	Külâh	Kurşun	-	-	-	4,000
	Minarenin Zeminden İtibaren Yüksekliği					

Şehadet Cami Minaresi						
Sayı	Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)
7	Kaide	Küfeki	Sekizgen L=1,130	R=1,600	0,570	7,450
	Küp	Küfeki	R=2,720-2,300	R=1,600	0,570-0,350	0,510
	Gövde	Küfeki	R=2,300	R=1,600	0,350	16,970
	Petek	Küfeki	R=2,020	R=1,500	0,260	5,000
	Külâh	Küfeki	Değişken	Değişken	0,260-0,050	2,750
	Minarenin Zeminden İtibaren Yüksekliği					

Sultan Alaaddin Cami Minaresi						
Sayı	Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)
8	Kaide	Taş	Kare L=2,160	R=1,280	0,44	7,100
	Küp	Tuğla+Harç	R=2,100-1,840	R=1,280-1,240	0,410-0,300	2,000
	Gövde	Tuğla+Harç	R=1,840	R=1,240	0,300	8,000
	Petek	Tuğla+Harç	R=1,600	R=1,180	0,210	3,700
	Külâh	Kurşun	-	-	-	3,750
	Minarenin Zeminden İtibaren Yüksekliği					



Timurtaş Paşa Cami Minaresi						
Sayı	Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)
9	Kemer Ayak	Tuğla+Harç	Altıgen L=3,00	Altıgen L=2,150	0,750	5,250
	Kubbe	Taş+Tuğla	Değişken	Değişken	Değişken	2,700
	Küp	Tuğla+Harç	R=2,000-1,630	R=1,150	0,42-0,24	0,960
	Gövde	Tuğla+Harç	R=1,630	R=1,150	0,240	6,000
	Petek	Tuğla+Harç	R=1,500	R=1,100	0,200	4,000
	Külâh	Kurşun	-	-	-	1,500
	Minarenin Zeminden İtibaren Yüksekliği					

Ulucami Batı Minaresi						
Sayı	Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)
10	Kaide	Taş	Sekizgen L=2,60	R=2,20	2,3	11,47
	Küp	Taş	R=6,26-4,30	R=2,20	2,03-1,05	2,48
	Gövde	Tuğla+Harç	R=4,30	R=2,20	1,05	21,7
	Petek	Tuğla+Harç	R=3,46	R=2,20-2,00	0,63-0,73	7,1
	Külâh	Taş	Değişken	Değişken	Değişken	6,05
	Minarenin Zeminden İtibaren Yüksekliği					

Ulucami Doğu Minaresi						
Sayı	Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)
11	Kaide	Taş	Kare L=5,84	R=2,16	1,84	4,6
	Küp	Taş	L=5,84, R=5,26	R=2,16	1,84-1,55	2,2
	Gövde	Tuğla+Harç	R=5,26	R=2,16	1,55	28,3
	Petek	Tuğla+Harç	R=3,66	R=2,16	0,75	7
	Külâh	Taş	Değişken	Değişken	Değişken	6,4
	Minarenin Zeminden İtibaren Yüksekliği					

Uftade Cami Minaresi						
Sayı	Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)
12	Kaide	Küfeki+Tuğla	Kare, L=2,200	R=1,170	0,515	10,650
	Küp	Tuğla+Harç	R=2,160-1,730	R=1,170	0,500-0,280	1,430
	Gövde	Tuğla+Harç	R=1,730	R=1,170	0,280	7,740
	Petek	Tuğla+Harç	R=1,520	R=1,520	0,220	4,480
	Külâh	Kurşun	-	-	-	2,300
	Minarenin Zeminden İtibaren Yüksekliği					

Yeşil Cami Batı Minaresi						
Sayı	Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)
13	Kaide	Küfeki	Kare, L=3,250	R=1,750	0,750	12,000
	Küp	Tuğla+Harç	R=2,910-2,420	R=1,750-1,400	0,580-0,510	2,820
	Gövde	Tuğla+Harç	R=2,420	R=1,400	0,510	9,165
	Petek	Küfeki	R=1,880	R=1,400	0,240	4,560
	Külâh	Küfeki	Değişken	Değişken	0,240-0,110	5,400
	Minarenin Zeminden İtibaren Yüksekliği					

Yıldırım Beyazıt Cami Batı Minaresi						
Sayı	Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)
14	Kaide	Küfeki+Tuğla	Sekizgen L=1,050	R=1,550	0,500	15,410
	Küp	Tuğla+Harç	R=2,500-2,210	R=1,550	0,475-0,330	1,380
	Gövde	Tuğla+Harç	R=2,210	R=1,550	0,330	9,890
	Petek	Tuğla+Harç	R=1,630	R=1,210	0,210	4,140
	Külâh	Kurşun	-	-	-	3,220
	Minarenin Zeminden İtibaren Yüksekliği					

1. Murat Hüdavendigâr Cami Minaresi						
Sayı	Minare Bölümleri	Malzeme	Dış Boyut (m)	İç Ölçü (m)	Duvar Kalınlığı (m)	Yükseklik (m)
15	Kaide	Taş+Tuğla	Kare, L=2,60	-	-	16,080
	Küp	Tuğla+Harç	R=2,40-2,060	R=1,430	0,485-0,315	1,840
	Gövde	Tuğla+Harç	R=2,060	R=1,430	0,315	8,280
	Petek	Tuğla+Harç	R=1,830	R=1,310	0,260	4,140
	Külâh	Kurşun	-	-	-	2,600
	Minarenin Zeminden İtibaren Yüksekliği					

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Cavit SERHATOĞLU  
Doğum Yeri ve Tarihi : Afyonkarahisar/1990  
Yabancı Dili : İngilizce  
Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)  
Lise : Afyon Milli Piyango Anadolu Lisesi(2004-2008)  
Lisans : Selçuk Üniversitesi, Müh-Mim Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Bölümü (2008-2012)  
Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü (2013 - ...)  
İletişim (e-posta) : cserhatoglu@uludag.edu.tr

