

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TARİHİ YIĞMA KUBBELERİN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ  
OPERASYONAL MODAL ANALİZ YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Şenay UÇAK**

**EYLÜL 2012  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TARİHİ YIĞMA KUBBELERİN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ  
OPERASYONAL MODAL ANALİZ YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

**İnş. Müh. Şenay UÇAK**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11.09.2012  
Tezin Savunma Tarihi : 26.09.2012**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR**

**Trabzon 2012**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Şenay UÇAK tarafından hazırlanan**

**TARİHİ YIĞMA KUBBELERİN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ  
OPERASYONAL MODAL ANALİZ YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 11 / 09 / 2012 gün ve 1473 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Halil KARADENİZ**

.....

**Üye : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR**

.....

**Üye : Doç. Dr. Levent GÜMÜŞEL**

.....

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

“Tarihi Yığma Kubbelerin Dinamik Davranışlarının Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi” isimli tez çalışmasını bana öneren, her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle daima yanımda olan yurtdışı deneyimine sahip olmam için beni her zaman destekleyen Hocam Sayın Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR'a minnet ve şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

Tez çalışmamın gerçekleştirilmesinde, değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşan, ölçümler sırasında sıcak soğuk demeden değerli zamanını harcayan, benim için çok değerli bir abi olan, değerli Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Temel TÜRKER'e içtenliği ve samimiyetinden dolayı çok teşekkür ederim. Tez çalışmamda, özellikle ölçümler sırasında değerli zamanını ve emeğini benim için harcamaktan kaçınmayan İnş. Yük. Müh. Fatma Nur TURAN KUDU'ya, İnş. Müh. Emre SARI'ya ve Arş. Gör. Hasan SESLİ'ye çok teşekkür ederim. Öğrenim hayatım boyunca bana emeği geçen tüm hocalarıma minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan, maddi ve manevi hiçbir desteği benden esirgemeyen sevgili annem Zeynep UÇAK'a ve değerli babam Şenol UÇAK'a minnet ve şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim. Ayrıca hayatımdaki önemini asla tarif edemeyeceğim her an yanımda olan değerli bilgilerini ve tecrübelerini hiç çekinmeden benimle paylaşan canım meslektaşım Sayın İnş. Müh. Gökhan OSMANCIKLI'ya sonsuz teşekkür ederim. Bu tez çalışmasının benzer çalışmalara kaynak ve örnek teşkil etmesini ve Ülkemize yararlı olmasını içtenlikle dilerim.

Şenay UÇAK  
Trabzon 2012



## TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Tarihi Yığma Kubbelerin Dinamik Davranışlarının Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Alemdar Bayraktar ‘ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 26/09/2012



Şenay UÇAK

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Kubbeler Hakkında Genel Bilgiler .....	2
1.2.1. Kubbeli Yapılarda Geçiş Elemanları .....	11
1.2.1.1. Pandantif .....	11
1.2.1.2. Türk Üçgeni.....	13
1.2.1.3. Tromp.....	16
1.2.2. Kubbelerle Diğer Taşıyıcı Yapı Elemanları Arasındaki Yük Aktarımı .....	18
1.2.3. Dünya’da Mevcut Kubbe Örnekleri .....	22
1.2.4. Tarihi Yapıların Modelleme Stratejileri.....	28
1.2.4.1. Makro Modelleme .....	29
1.2.4.2. Basitleştirilmiş Mikro Modelleme.....	30
1.2.4.3. Mikro Modelleme .....	30
1.3. Kubbeler Üzerine Yapılmış Literatürde Varolan Çalışmalar.....	31
1.4. Tezin Amacı ve Kapsamı .....	35
1.5. Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi.....	36
1.5.1. Teorik Modal Analiz Yöntemi .....	37
1.5.1.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler .....	37
1.5.1.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler .....	42
1.5.2. Deneysel Modal Analiz Yöntemi .....	44
1.5.2.1. Genel Kurallar .....	45

1.5.2.2.	Ölçüm Ekipmanları.....	46
1.5.2.2.1.	Titreştiriciler.....	46
1.5.2.2.2.	İvmeölçerler.....	47
1.5.2.2.3.	Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme.....	48
1.5.2.3.	Modal Parametrelerin Elde Edilme Yöntemleri.....	49
1.5.2.3.1.	Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) Yöntemi.....	50
1.5.2.3.2.	Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi.....	52
1.6.	Sonlu Eleman Model İyileştirme Yöntemleri.....	54
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	56
2.1.	İncelenen Kubbeli Yapılar ve Özellikleri.....	56
2.1.1.	Hamza Paşa Türbesi.....	56
2.1.2.	Kavak Meydan Şadırvanı.....	58
2.2.	Seçilen Kubbeli Yapıların Teorik Modal Analizleri.....	60
2.2.1.	Hamza Paşa Türbesi'nin Teorik Modal Analizi.....	61
2.2.1.1.	Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması.....	61
2.2.1.2.	Modal Parametrelerinin Belirlenmesi.....	62
2.2.2.	Kavak Meydan Şadırvanı'nın Teorik Modal Analizi.....	63
2.2.2.1.	Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması.....	63
2.2.2.2.	Modal Parametrelerinin Belirlenmesi.....	64
2.3.	Seçilen Kubbeli Yapıların Operasyonel Modal Analizleri.....	65
2.3.1.	Hamza Paşa Türbesi'nin Operasyonel Modal Analizi.....	65
2.3.1.1.	Modal Parametrelerinin Belirlenmesi.....	67
2.3.1.1.1.	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yöntemiyle Modal Parametrelerin Belirlenmesi.....	68
2.3.1.1.2.	Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemiyle Modal Parametrelerin Belirlenmesi.....	69
2.3.2.	Kavak Meydan Şadırvanı'nın Operasyonel Modal Analizi.....	71
2.3.2.1.	Modal Parametrelerinin Belirlenmesi.....	73
2.3.2.1.1.	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yöntemiyle Modal Parametrelerinin Belirlenmesi.....	73
2.3.2.1.2.	Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemiyle Modal Parametrelerinin Belirlenmesi.....	74
3.	İRDELEME VE DEĞERLENDİRMELER.....	77

3.1.	Teorik ve Deneysel Modal Parametrelerin Karşılaştırılması .....	77
3.1.1.	Hamza Paşa Türbesi'ne Ait Modal Parametrelerin Karşılaştırılması.....	77
3.1.2.	Kavak Meydan Şadırvanı'na Ait Modal Parametrelerin Karşılaştırılması ..	79
3.2.	Seçilen Kubbeli Yapılara Ait Sonlu Eleman Modellerinin İyileştirilmesi ..	81
3.2.1.	Hamza Paşa Türbesi'nin Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi .....	81
3.2.2.	Kavak Meydan Şadırvanı'nın Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi.....	84
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	87
5.	KAYNAKLAR.....	90
ÖZGEÇMİŞ		



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

TARİHİ YIĞMA KUBBELERİN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ OPERASYONAL  
MODAL ANALİZ YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ

Şenay UÇAK

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR  
2012, 96 Sayfa

Bu tez çalışmasında, tarihi yığma kubbelerin dinamik karakteristiklerinin Operasyonel Modal Analiz (OMA) ve Sonlu Elemanlar (SE) yöntemiyle belirlenmesi, başlangıç sonlu eleman modellerinin deneysel veriler kullanılarak iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, kubbeler hakkında genel bilgiler verilmekte ve tarihi yapıların modellenme stratejilerinden bahsedilmektedir. Devamında konuyla ilgili literatür çalışmaları, dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde kullanılan yöntemler ve formülasyonlar verilmektedir. Birinci bölümün sonunda, SE model iyileştirme yöntemleri hakkında bilgi sunulmaktadır. İkinci bölümde Hamza Paşa Türbesi ve Kavak Meydan Şadırvanı hakkında bilgiler verilmekte ve sonlu eleman modelleri oluşturulmaktadır. Ayrıca, gerçekleştirilen OMA uygulamaları ve deneysel dinamik karakteristikler verilmektedir. Üçüncü bölümde, teorik ve deneysel analiz sonuçları karşılaştırılmakta ve başlangıç SE modelleri deneysel bulgular kullanılarak iyileştirilmektedir. Dördüncü bölümde, analizlerin sonuçları ve öneriler sunulmaktadır. Beşinci bölümde ise, tezin hazırlanmasında yararlanılan kaynaklar verilmektedir. Çalışma sonunda OMA yönteminin, tarihi yığma kubbelerin deneysel dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde ve sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesinde güvenle kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Tarihi Yığma Kubbeler, Operasyonel Modal Analiz, Sonlu Eleman Model İyileştirme

Master Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF DYNAMIC BEHAVIOR OF HISTORICAL MASONRY DOMES  
USING OPERATIONAL MODAL TESTING

Şenay UÇAK

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR  
2012, 96 Pages

In this thesis, it is aimed to determine the dynamic characteristics of historical masonry domes using Operational Modal Testing and Finite Element (FE) method. The thesis consists of mainly five chapters. In the first chapter, the general information about domes and modeling strategies of historical structures are given. Then, literature research concerning this subject, using methods to determine dynamic characteristics and formulations are presented. The end of the first chapter, the information about the finite element updating methods is mentioned. In the second chapter, the properties of Hamza Paşa Mausoleum and Kavak Meydan Fountain are given and created finite element models are presented. Then, the performed OMA applications and experimental dynamic characteristics of domed structures are given. In the third chapter, experimental and analytical results are compared with each other and initial finite element models are updated by using experimental results. In the fourth chapter, the results of analysis and suggestions are presented. In the fifth chapter which is the end of the thesis, the references used in this thesis are given. At the end of the thesis, it is emphasized that the OMA method can be used safely to determine the dynamic characteristics of the historical masonry domes and to update initial finite element models.

**Key Words:** Historical Masonry Domes, Operational Modal Testing, Finite Element Model Updating

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Kabuk kubbe diyaframı, basınç ve çekme bölgesinin gösterimi.....	3
Şekil 1.2. Kubbenin kemer diliminde gösterimi.....	4
Şekil 1.3. Köşe kemerli kubbe örneği.....	4
Şekil 1.4. Pandantifli kubbe örnekleri.....	5
Şekil 1.5. Soğan biçimindeki kubbelere ait örnekler.....	6
Şekil 1.6. Davul kubbe örneği.....	6
Şekil 1.7. Atreus hazinesi.....	7
Şekil 1.8. Jeodezik kubbe örneği.....	7
Şekil 1.9. Oval kubbe örneği.....	8
Şekil 1.10. Parabolik kubbe örneği.....	8
Şekil 1.11. Çokgen kubbe örneği.....	9
Şekil 1.12. Yelken kubbe örneği.....	9
Şekil 1.13. Tabak kubbe örneği.....	10
Şekil 1.14. Şemsiye kubbe örnekleri.....	10
Şekil 1.15. Pandantif ve yarım kubbe örnekleri.....	11
Şekil 1.16. Pandantif yük şeması.....	12
Şekil 1.17. Basit ve mukarnaslı pandantif uygulamalarına ait örnekler.....	12
Şekil 1.18. Ayrıntılı pandantife ait kesit ve uygulama örneği.....	12
Şekil 1.19. Türk üçgeni örnekleri.....	13
Şekil 1.20. Düzlem üçgen örnekleri.....	14
Şekil 1.21. İkili, üçlü ve çoklu düzlem üçgenlere ait çizim ve uygulama örnekleri.....	14
Şekil 1.22. Mukarnaslı düzlem üçgen örneği.....	14
Şekil 1.23. Basit kısa üçgen dizisi örneği.....	15
Şekil 1.24. Basit kuşaklama üçgen dizisi örnekleri.....	15
Şekil 1.25. Baklavalı kısa üçgen dizisi örneği.....	15
Şekil 1.26. Baklavalı kuşaklama üçgen dizisi örnekleri.....	16
Şekil 1.27. Tromp örneği.....	16
Şekil 1.28. Tromp yük şeması.....	17
Şekil 1.29. Basit, ayrıntılı ve yivli tromplara ait çizim ve uygulama örnekleri.....	17

Şekil 1.30.	Mukarnaslı tromp ve baklavalı tromp örnekleri.....	18
Şekil 1.31.	Kubbelerde Oluşan Gerilmeler.....	18
Şekil 1.32.	Kasnağın kubbede oluşan çekme gerilmesini azaltmadaki etkisini gösteren çizim örneği.....	19
Şekil 1.33.	Kubbeli sistemlerde yük aktarımı.....	19
Şekil 1.34.	Kubbelere ait yük taşıma mekanizması.....	20
Şekil 1.35.	Tipik bir kubbe kesiti.....	21
Şekil 1.36.	Saz ve ağaç yapraklarından yapılmış ilkel yapı örnekleri.....	22
Şekil 1.37.	Pantheon, Roma.....	23
Şekil 1.38.	Kubbet-üs Sahra, Kudüs.....	24
Şekil 1.39.	Floransa Katedrali, İtalya.....	24
Şekil 1.40.	Tac Mahal, Hindistan.....	25
Şekil 1.41.	Gol Gumbaz, Hindistan.....	25
Şekil 1.42.	Kubbe iç görünüşü ve kesit çizim örneği.....	26
Şekil 1.43.	Aziz Vasili Katedrali, Moskova, Rusya.....	26
Şekil 1.44.	Ayasofya Müzesi, İstanbul.....	27
Şekil 1.45.	Selimiye Camii, Edirne.....	28
Şekil 1.46.	Homojenleştirme işlemi.....	29
Şekil 1.47.	Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği.....	30
Şekil 1.48.	Mikro modelleme tekniği.....	31
Şekil 1.49.	Tek serbestlik dereceli bir sistemin analitik modeli.....	37
Şekil 1.50.	TSDS'in matematik modeli.....	38
Şekil 1.51.	İki serbestlik dereceli bir sistemin analitik modeli.....	42
Şekil 1.52.	Operasyonel Modal Analiz yöntemine ait ölçüm düzeneği.....	45
Şekil 1.53.	B&K tipi tek eksenli sismik ivmeölçer örnekleri.....	48
Şekil 1.54.	Tipi B&K3560 olan 17 kanallı veri toplama ünitesi ve bilgisayar ortamı	49
Şekil 2.1.	Hamza Paşa Türbesi'ne ait görünüşler.....	57
Şekil 2.2.	Hamza Paşa Türbesi için hazırlanan basit plan çizimi.....	57
Şekil 2.3.	Kavak Meydan Şadırvanı'na ait görünüşler.....	58
Şekil 2.4.	Kavak Meydan Şadırvanı'na ait yerinde röleve çalışması.....	59
Şekil 2.5.	Kavak Meydan Şadırvanı için hazırlanan basit plan çizimi.....	59
Şekil 2.6.	Hamza Paşa Türbesi sonlu eleman modeli.....	62
Şekil 2.7.	Hamza Paşa Türbesine ait analitik olarak elde edilen ilk üç mod şekli.....	63

Şekil 2.8.	Kavak Meydan Şadırvanı sonlu eleman modeli.....	64
Şekil 2.9.	Kavak Meydan Şadırvanı'na ait analitik olarak elde edilen ilk üç mod şekli.....	65
Şekil 2.10.	Hamza Paşa Türbesi'nin kubbesi üzerine yerleştirilen ivmeölçerlere ait görüntüler.....	66
Şekil 2.11.	Hamza Paşa Türbesi'nde gerçekleştirilen deneysel ölçümlere ait görüntüler.....	66
Şekil 2.12.	Hamza Paşa Türbesi'nin kubbesi üzerinde oluşturulan deneysel ölçüm düzenleri ve ivmeölçer yönleri.....	67
Şekil 2.13.	Hamza Paşa Türbesi'ne ait spektral yoğunluk fonksiyonu.....	68
Şekil 2.14.	Hamza Paşa Türbesi'ne ait kararlılık diyagramları ve spektral yoğunluk fonksiyonları.....	69
Şekil.2.15.	GFTAA ve SAB yöntemleri kullanılarak elde edilen Hamza Paşa Türbesi'ne ait deneysel mod şekilleri.....	71
Şekil 2.16.	Kavak Meydan Şadırvanı'nda gerçekleştirilen deneysel ölçümlere ait görüntüler.....	72
Şekil 2.17.	Kavak Meydan Şadırvanı üzerinde oluşturulan deneysel ölçüm düzenleri ve ivmeölçer yönleri.....	72
Şekil 2.18.	Kavak Meydan Şadırvanı'na ait spektral yoğunluk fonksiyonu.....	73
Şekil.2.19.	Kavak Meydan Şadırvanı'na ait kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonu.....	74
Şekil 2.20.	GFTAA ve SAB yöntemleri kullanılarak elde edilen Kavak Meydan Şadırvanı'na ait deneysel mod şekilleri.....	76
Şekil 3.1.	Hamza Paşa Türbesi'nin teorik ve deneysel mod şekillerinin karşılaştırılması.....	78
Şekil 3.2.	Kavak Meydan Şadırvanı'nın teorik ve deneysel mod şekillerinin karşılaştırılması.....	80
Şekil 3.3.	Hamza Paşa Türbesi'ne ait iyileştirilmiş teorik mod şekilleriyle deneysel mod şekillerinin karşılaştırılması.....	83
Şekil 3.4	Kavak Meydan Şadırvanı'na ait yileştirilmiş teorik mod şekilleriyle deneysel mod şekillerinin karşılaştırılması.....	85



## TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Yüksekliğe bağlı kuvvet moment değişimi.....	21
Tablo 2.1. Hamza Paşa Türbesi'nin teorik analizinde kullanılan malzeme özellikleri .....	61
Tablo 2.2. Hamza Paşa Türbesi'ne ait analitik doğal frekanslar, periyotlar ve modal davranışlar .....	62
Tablo 2.3. Kavak Meydan Şadırvanı'na ait analitik doğal frekanslar, periyotlar ve modal davranışlar .....	65
Tablo 2.4. Hamza Paşa Türbesi'ne ait deneysel ölçümlerden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları .....	68
Tablo 2.5. Hamza Paşa Türbesi'ne ait ölçümlerden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları .....	70
Tablo 2.6. Kavak Meydan Şadırvanı'na ait ölçümden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları .....	74
Tablo 2.7. Kavak Meydan Şadırvanı'na ait ölçümden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları .....	75
Tablo 3.1. Hamza Paşa Türbesi için deneysel ve analitik doğal frekansların karşılaştırılması .....	77
Tablo 3.2. Kavak Meydan Şadırvanı için deneysel ve analitik doğal frekansların karşılaştırılması .....	79
Tablo 3.3. Hamza Paşa Türbesi'ne ait iyileştirilmiş sonlu eleman modelin malzeme özellikleri .....	82
Tablo 3.4. Hamza Paşa Türbesi'ne ait iyileştirilmiş sonlu eleman modelinde temel zemini için kullanılan yay katsayıları .....	82
Tablo 3.5. Hamza Paşa Türbesi'ne ait deneysel frekanslarla model iyileştirme sonrası elde edilen analitik frekans değerleri ve bu değerler arasındaki farklar .....	82
Tablo 3.6. Kavak Meydan Şadırvanı'na ait iyileştirilmiş sonlu eleman modelin malzeme özellikleri .....	84
Tablo 3.7. Kavak Meydan Şadırvanı'na ait iyileştirilmiş sonlu eleman modelinde temel zemini için kullanılan yay katsayıları .....	84
Tablo 3.8. Kavak Meydan Şadırvanı'na ait deneysel frekanslarla model iyileştirme sonrası elde edilen analitik frekans değerleri ve bu değerler arasındaki farklar .....	85

## SEMBOLLER DİZİNİ

$A_k$	Tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonuna ait k artık değer matrisi
$A_*$	Durum matrisi
$B_*$	Veri matrisi
$B_k$	Tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonuna ait k artık değer matrisi
$b$	Basıklık
$c$	Yapının sönümü
$c_{cr}$	Kritik sönüm
$C_*$	Sistem davranış matrisi
$[C]$	Sönüm matrisi
$D_*$	Doğrudan iletim matrisi
$E_*$	Değer operatörü
$E_m$	Eşdeğer elastisite modülü
$E_h$	Harcın elastisite modülü
$E_t$	Tuğlanın elastisite modülü
$F$	Yapıya uygulanan kuvvet
$F_D$	Sönüm kuvveti
$F_I$	Atalet kuvveti
$f(t)$	Yapıya uygulanan kuvveti
$F_S$	Yaydaki elastik şekil değişiminden dolayı yayda oluşan kuvveti
$\{f(t)\}$	Zamana bağlı kuvvet vektörü
$\{F\}$ ve $\{X\}$	$N*1$ boyutunda zamandan bağımsız kompleks genlikli vektörler
$G_{xx}(j\omega)$	Etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk (GSY) fonksiyonu
$G_{yy}(j\omega)$	Tepki sinyalinin GSY fonksiyonu
$H(j\omega)$	Frekans davranış fonksiyonu
$\bar{H}$	Kompleks eşlenik ve transpoze
$h$	Kubbe yüksekliği

[K]	Rijitlik matrisi
k	Yapının rijitliği
[M]	Kütle matrisi
m	Yapının kütlesi
n	Mod sayısı
$R_k$	Artık değer fonksiyonu
R(t)	Titreşim kuvveti
r	Yarıçap
$S_i$	Skaler tekil değerleri içeren diyagonal matris
$s_{ij}$	Skaler tekil değerler
s	Tekil değerler
T	Kompleks transpoze
t	Zaman
$t_h$	Harç kalınlığı
$t_t$	Tuğla kalınlığı
$U_i$	Tekil vektörleri içeren bütün matrisi
$u_{ij}$	Tekil vektörler
{ $\dot{U}(t)$ }	Zamana bağlı hız vektörü
{ $\ddot{U}(t)$ }	Zamana bağlı ivme vektörü
{ $U(t)$ }	Zamana bağlı yerdeğiştirme vektörü
$u_k$	Belirgin etki sinyal vektörü
$v_k$	İvmeölçer kusurlarından dolayı işlenen gürültü sinyali
$\delta_{pq}$	Kronecker delta
$\lambda_k$	Kutup fonksiyonu
[ $\alpha(\omega)$ ]	Frekans davranış fonksiyonu
$\theta_\alpha$	Frekans davranış fonksiyonuna ait faz değeri
$\alpha(\omega)$	Frekans davranış fonksiyonuna ait genlik değeri
$\xi$	Sönüm oranı
$\omega_d$	Sönümlü doğal açısal frekans

$\omega$	Sönümsüz doğal açısal frekans
$W_k$	Modeldeki belirsizlikler ve kusurlar nedeniyle işlenen gürültü sinyalleri
$\{x(t)\}$	Zamana bağlı yerdeğiştirme vektörü
$\{\dot{x}(t)\}$	Zamana bağlı hız vektörü
$\{\ddot{x}(t)\}$	Zamana bağlı ivme vektörü
$X$	Yerdeğiştirme
$\{X\}$	$N*1$ boyutunda zamandan bağımsız genlik
$x(t)$	Durum vektörü
$\dot{x}(t)$	Yapının hızını
$\ddot{x}(t)$	Yapının ivmesi
$x(t)$	Yapının yer değiştirmesi
$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}(k\Delta t)$	Ayrık-zaman durum vektörü
*	Kompleks eşlenik
$\gamma_t$	Kalınlık oranı
$\gamma_m$	Elastisite modülü oranı

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Mevcut yapıların etki eden yükler altında güvenli bir şekilde ayakta kalabilmesi ve oluşabilecek hasarlara karşı gerekli önlemlerin alınabilmesi için yapıya ait davranışın bilinmesi gerekmektedir. Bu, yapının teorik ya da deneysel açıdan incelenmesiyle mümkün olabilmektedir. Yapı, sonlu elemanlar modeli oluşturularak teorik açıdan, Deneysel Modal Analiz yöntemleri kullanılarak ise deneysel açıdan incelenebilmektedir. Her iki şekilde gerçekleştirilen incelemeler sonucunda yapıya ait teorik ve deneysel dinamik karakteristikler elde edilmektedir. Teorik incelemede, yapının sonlu elemanlar modeli oluşturulurken birçok kabul yapılmakta ve oluşturulan sonlu eleman modelin mevcut yapıyı temsil ettiği düşünülmektedir. Oysaki yapılan kabullerle mevcut yapının tam olarak temsil edilmesi oldukça zordur. Deneysel incelemede ise, yapıya ait dinamik karakteristikler mevcut durum için belirlenmekte ve belirlenen doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekilleri yardımıyla yapının mevcut durumu değerlendirilebilmektedir. Bu şekilde, teorik incelemeye kıyasla yapının gerçek durumuna çok yakın sonuçlar elde edilebilmektedir.

Yapılar sürekli titreşim etkilerine maruz kalmaktadırlar. Rüzgar, deprem, dalga, taşıt yükü vs. gibi birçok etken yapılarda titreşime sebep olmaktadır. Titreşimler, bazen küçük kılcal çatlaklara bazen ise ciddi hasarlara sebep olmaktadır. Bu yüzden, yapıların titreşimler altındaki davranışının bilinmesi, o yapının kullanım ömrünü doğrudan etkilemektedir. Yapının etki eden titreşimler altındaki davranışının tespiti ancak deneysel incelemelerle mümkündür. Deneysel olarak yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde Deneysel Modal Analiz yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, yapıya yerleştirilen hassas ivmeölçerlerden gelen titreşim sinyalleri veri toplama ünitesi yardımıyla toplanmakta ve güncel yazılımlar kullanılarak dinamik karakteristikler elde edilmektedir. Deneysel Modal Analiz yöntemi, Zorlanmış Titreşim Testi yöntemi ve Çevresel Titreşim Testi yöntemi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Zorlanmış Titreşim Testi yönteminde, yapı bilinen ve ölçülebilen bir etki yardımıyla titreştirilmekte ve yapının bu etkiye verdiği tepkiler ölçülmektedir. Operasyonel Modal Analiz yöntemi olarak ta adlandırılan Çevresel Titreşim Testi yönteminde ise yapının çevresel etkilerle titreştirildiği kabul edilmekte ve yapının bu etkilere vermiş olduğu tepkiler ölçülmektedir. Tepkilerin ölçülüp değerlendirilmesinde frekans ve zaman



tanım alanına dayalı birçok yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemlerin matematik tabanları aynı olup, veri işleme ve denklem çözme teknikleri ile matris dizilişleri birbirinden farklı özellikler içermektedir.

Yapıya ait dinamik karakteristiklerin tam olarak belirlenebilmesi için yapıya ait sonlu elemanlar modeli oluşturulmalı ve oluşturulan model deneysel inceleme sonuçlarıyla karşılaştırılarak gerçek durumu temsil edecek hale getirilmelidir. Bu işleme model güncelleme yöntemi adı verilmektedir. Bu yöntemde modele ait malzeme özellikleri, sınır koşulları gibi birçok aşamada yapılan kabullerdeki değişimler dikkate alınmaktadır.

Dünya’da ve Ülkemizde son yıllarda, titreşimlerin yapılar üzerindeki etkisinin ve yapısal davranışın belirlenmesi oldukça önem kazanmaktadır. Dünya; tarihi, kültürel, ekonomik vb. açıdan önem kazanmış sayısız yapıya sahiptir. Özellikle Ülkemiz tarihi geçmiş ve coğrafi konumu itibarıyla bu özelliklere sahip birçok yapıyı barındırmaktadır. Ayrıca, Ülkemizde son yıllarda sıklıkla meydana gelen depremler, bu tip yapıların titreşim etkisi altındaki davranışının deneysel olarak belirlenmesi konusundaki araştırmaları ve çalışmalarını arttırmıştır. Tarihi yapılar da deneysel olarak incelenmesi ve yapısal davranışının takip edilmesi gereken önemli yapılardandır. Deneysel yöntemlerle elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan sonlu elemanlar modeli yardımıyla tarihi yapılarda oluşabilecek hasarlar önceden tahmin edilebilmekte ve hasar oluşumunu engelleyici gerekli ve yeterli önlemler alınabilmektedir.

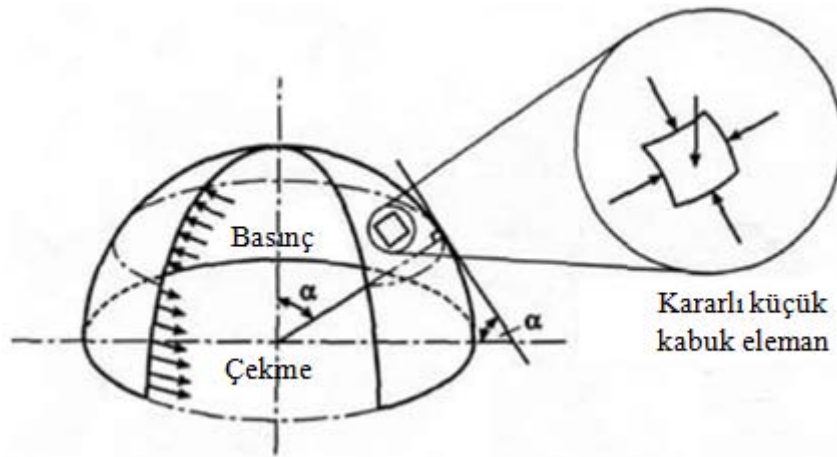
## **1.2. Kubbeler Hakkında Genel Bilgiler**

Kubbe, bir kemerin simetri eksenini etrafında dönmesiyle elde edilen uzaysal bir taşıyıcı sistemdir (Sesigür vd., 2007). Tarih öncesi çağlardan modern zamanlara kadar birçok toplum geleneksel yapı malzemelerini kullanarak kubbeleri inşa etmişlerdir. İlk kubbenin ne zaman inşa edildiği bilinmemesine rağmen, eski kubbe yapılarının nadir rastlanan örnekleri keşfedilmiştir. Mamut dişlerinden ve kemiklerinden inşa edilmiş dört küçük eski yapı, ilk keşfedilen kubbe örnekleri olarak kabul edilebilir. Bunlardan ilki 1965 yılında Ukrayna’da bir kazı sırasında, diğer üçü de daha sonra arkeoloji uzmanları tarafından bulunmuştur (Hitchcock, 2009). Modern zamanlarda nispeten basit kubbeli yapılar, Dünya genelinde çeşitli yerli halklar tarafından kullanılmıştır. Yerli Amerikalılar ot ya da deriyle kaplı, sap ya da

sırıktan kemer kullanarak Kızılderili çadırı yapmışlardır. Afrikalı bir halk, yaprak ve padavra olarak bilinen kaplama tahtası kullanarak benzer yapılar inşa etmişlerdir (Wilkie ve Morelli, 2010). Diğer bir örnek ise Eskimo Kulübesi'dir. Bu kulübeler Kanadalı yerli halk tarafından karın sıkıştırılmasıyla elde edilen bloklar kullanılarak ısınma ve barınma amaçlı yapılmışlardır. Benzer olarak Namibya halkı da toprak, kil, kum, saman ve hayvan gübresi gibi malzemeleri kullanarak Çöl Eskimo Kulübesi yapmışlardır (Crandall, 2000). Ancak bu gibi yapıların tarihsel süreci iyi bir şekilde belgelenememiştir.

Eski çağlardan beri çeşitli amaçlar için inşa edilen kubbelerin gerçek davranışları çok karmaşıktır. Bu yapılar, üç boyutlu kuvvetlere maruz kalırlar. Bu kuvvetleri eğilme, basınç ve çekme gerilmeleri oluştururlar. Ancak basitleştirmek için iki kabul yapılabilir ve bu kabuller tüm davranışın sadece bir kısmını yansıtır (Beckmann, 1995).

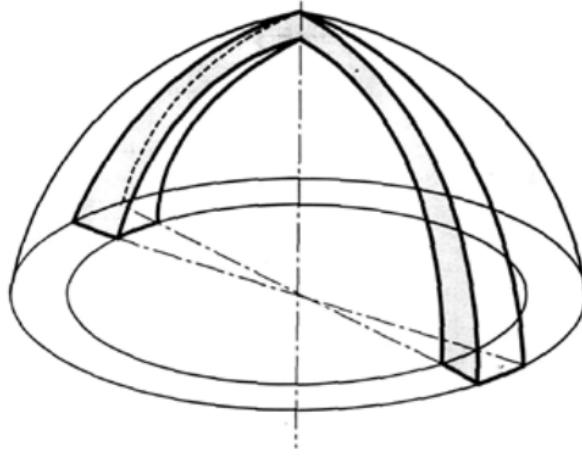
İlk kabul, kubbenin diğer boyutlara oranla çok küçük kalınlıkta bir kabuk elemanı olduğunun kabul edilmesidir. Böylece, bu küçük kalınlıklı kabuk çok düşük eğilme dayanımına sahip olmakta ve kabukta basınç gerilmeleri meridyenler boyunca oluşmaktadır. Dairesel gerilmeler, kubbe şekli ve yük dağılımından dolayı kubbe tabanına doğru inildikçe basınç gerilmesinden çekme gerilmesine dönüşmektedir (Şekil 1.1) (Beckmann, 1995).



Şekil 1.1. Kabuk kubbe diyaframı, basınç ve çekme bölgesinin gösterimi

İkinci kabulde ise kubbe bir dizi kemer olarak dikkate alınmaktadır (Şekil 1.2). Eğer kemerdeki basınç çizgisi iç ve dış yüzeyler arasında kalıyorsa kemer yeteri kadar güçlü ve

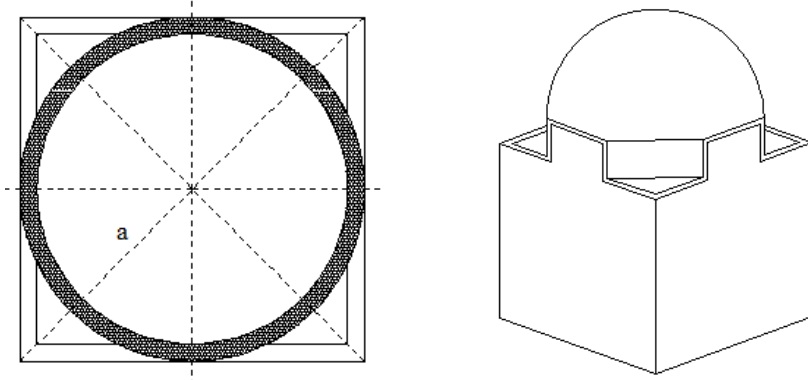
stabil olmaktadır. Kemer güçlü ve stabilse, meridyenler boyunca oluşabilecek çatlaklara rağmen kubbe de yeterince güçlü ve stabil olarak kabul edilmektedir (Beckmann, 1995).



Şekil 1.2. Kubbenin kemer diliminde gösterimi

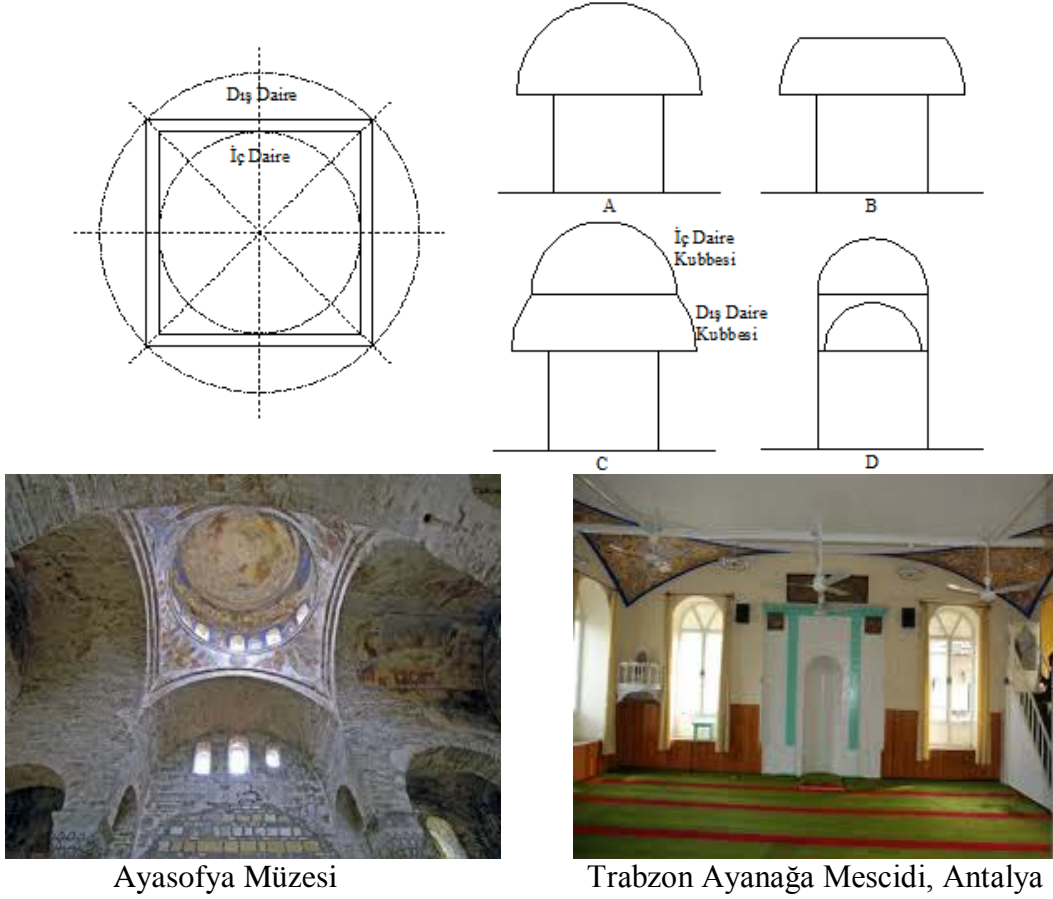
Kubbeler inşa edilişleri bakımından iki gruba ayrılırlar. Bunlar, köşe kemerli kubbeler ve pandantifli kubbelerdir.

Köşe kemerli kubbeler, 20m'ye kadar olan açıklıklara, Şekil 1.3'te görüldüğü gibi inşa edilirler. Kubbe planı üzerinde iç ve dış cidarlar yardımıyla oluşturulan kare sekizgene döndürülerek kubbenin sekizgen bir plan üzerine oturtulması sağlanır (Çelebi, 2001).



Şekil 1.3. Köşe kemerli kubbe örneği (Çelebi, 2001).

Pendantifli kubbeler, 50m ve daha büyük açıklıklarda uygulanan bir sistem olup uygulamaya ait örnekler Şekil 1.4'te verilmektedir (Çelebi, 2001).



Ayasofya Müzesi



Trabzon Ayanağa Mescidi, Antalya

Şekil 1.4. Pendantifli kubbe örnekleri (Aktüre, 1975).

Mimari açıdan kubbeler soğan, davul, konsollu, jeodezik, oval, parabolik, çokgen, yelken, tabak ve şemsiye biçimli kubbeler olarak sınıflandırılmıştır (URL-1, 2012).

Soğan biçimli kubbeler, bir noktaya doğrusal bir şekilde inerek soğan görünümünde olan yapılardır. Bu kubbeler, genellikle Rus Ortodoks kiliseleriyle ilişkili mimari kubbelerdir. Böyle bir kubbenin yüksekliği genellikle genişliğinden fazladır. Bu tip kubbeler Almanya'nın güneyinde, Avusturya ve İsviçre'de Katolik kiliselerinde, ayrıca, Hindistan ve Orta Doğu'da görülmektedir (Born, 1944). Ayrıca, Moskova'daki Saint Basil Katedrali, Tac Mahal, Aziz Vasili Katedrali'ne çok benzeyen ve birçok kişi tarafından karıştırılan Moskova Kremlin'de bulunan The Cathedral of the Annunciation olarak literatürde var olan katedral de soğan kubbelere sahip yapılara örnek gösterilebilir. Şekil 1.5'te bu tip kubbelere Dünya'dan çeşitli örnekler verilmektedir.



Bogolubskaya Kilisesi, Rusya



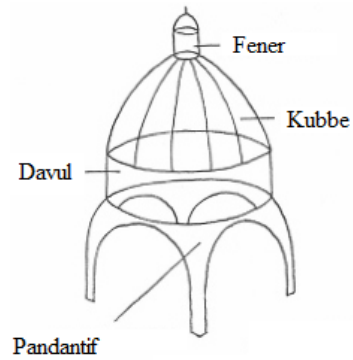
The Cathedral of the Annunciation, Rusya

Şekil 1.5. Soğan biçimindeki kubbelere ait örnekler (URL-1, 2012).

Davul kubbeler en yaygın kullanılan kubbelerdir. Bu kubbeler basit yarım küre şeklindedirler. Omar Camii bu tip kubbelere güzel bir örnektir. Şekil 1.6'da görüldüğü gibi bu tip kubbeler dairesel tabanlara uzanırlar (URL-1, 2012).



Omar Camii, Kudüs, Filistin

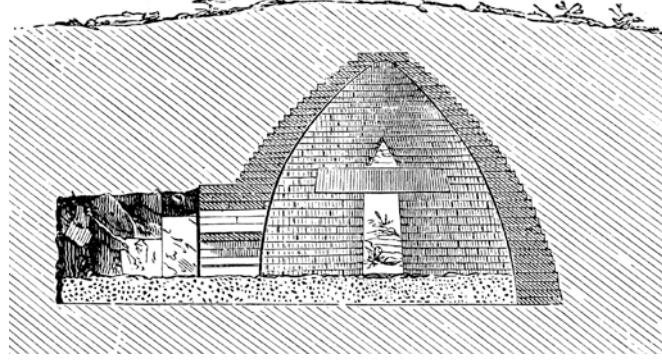


Davul kubbeli kesit

Şekil 1.6. Davul kubbe örneği (URL 2 ve 3, 2012).

Konsollu kubbeler, yalnızca yatay tabakaları içeren gerçek kubbelerden farklıdır. Her biri hafifçe tepe noktasına kadar değişen kalınlığa sahip tabakalarla desteklenmiştir. Şekil 1.7'de en ünlü örneği olarak bilinen Miken Uygarlığına ait Atreus Hazinesi verilmektedir.





Şekil 1.7. Atreus hazinesi

Jeodezik kubbeler, jeodezik kürelerin üst bölümlerinden ve bir çokyüzlü model içinde üçgen çerçevelerden oluşmaktadırlar. Tarihi yığma bir kubbeden farklı olarak tipik bir çelik jeodezik kubbe örneği Şekil 1.8’de verilmektedir (Langmead ve Garnaut, 2001). Bu yapı Japonya’nın Nagoya şehrinde 1997 yılında yaklaşık 40500 kişi kapasiteli bir beyzbol sahası olarak inşa edilmiştir.



Beyzbol sahası, Nagoya

Şekil 1.8. Jeodezik kubbe örneği (URL-4, 2012).

Oval kubbeler, ya planda ya profilde ya da her ikisinde oval şeklindedir. Bu terim Latince’deki ‘ovun’ yani yumurta kelimesinden gelmektedir. Bu kubbelerin inşaları, Orta Çağ’dan daha eskilere dayanmalarına rağmen, birçok Rönesans ve Barok kubbeleri bu tiplerdendir. En büyük oval kubbe Francesco Gallo tarafından İtalya’nın Vicoforte şehrinde inşa edilmiştir. Tarihi müze olarak kullanılan bu yapıya ait resimler Şekil 1.9’da verilmektedir (Huerta, 2007).



Santuario di Vicoforte Müzesi, İtalya

Şekil 1.9. Oval kubbe örneği (URL-5, 2012).

Parabolik kubbeler, sabit yükün düzgün yayılı yük olmasından dolayı eğilme gerilmesinin sıfır olduğu nadir yapılardandır (Şekil 1.10). Kompozit yapıların gelişiminden önce eski çağlarda binaların inşasında yaygın bir şekilde kullanılmışlardır. Çoğunlukla eski yapılarda görülmektedir. Çünkü bir parabolik kubbenin tepe noktasına tekil bir yük uygulanırsa eğilme gerilmeleri sonsuz olmaktadır. Daha sonraları ise kubbenin tepe noktasında oluşabilecek bu sonsuz gerilmelerden kaçınmak için kubbe şekli değiştirilmiştir (URL-1, 2012).



Şekil 1.10. Parabolik kubbe örneği (URL-1, 2012).

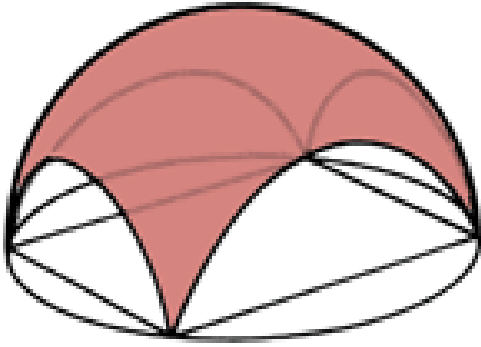
Çokgen kubbeler, kubbesel tonoz, manastır tonozu ya da kemerli tonoz olarak da adlandırılmaktadırlar. Bu kubbeler yatay kesitlerinde, yani planlarında çokgen şekillerini sürdürmektedirler. Bunun en bilinen örneği Brunelleschi tasarımı olan Rönesans döneminde sekizgen kubbe olarak inşa edilen Floransa Katedrali'dir (URL-6, 2012). Şekil 1.11'de Floransa Katedrali'ne ait resimler verilmektedir.



Floransa Katedrali, Floransa, İtalya

Şekil 1.11. Çokgen kubbe örneği (URL-6, 2012).

Yelken kubbeler, pendentifli kubbeler ya da Bizans kubbeleri olarak da bilinirler. Yelken kubbeler pendentif gibi düşünülebilir, her köşesinden aşağıya sabitlenmiş ve yukarıya doğru yükselen kare bir yelken izlenimi vermektedirler. Şekil 1.12’de tarihi yığma kubbelerden olmayan yelken kubbelerine ait bir örnek verilmektedir (URL-1, 2012).



Opera binası, Dortmund, Almanya

Şekil 1.12. Yelken kubbe örneği (URL-7, 2012).

Tabak kubbe, geometrik bir şekilde dairesel tabana ve dilimli bir kesite sahip olarak tanımlanan, düşük eğimli, sığ kubbeler için kullanılan mimari bir terimdir. Bu durumda çok düşük bir kubbe tabak kubbedir ve mevcut olan en geniş kubbelerin çoğu bu şekilde olmaktadır. Hindistan, Pakistan, İran ve Afganistan camilerinin çoğu bu tiptedir. Şekil 1.13’te yığma kubbe olmayan bir tabak kubbe örneği verilmektedir.





Louisiana Superdome futbol stadyumu, Amerika

Şekil 1.13. Tabak kubbe örneği (URL-1, 2012).

Şemsiye kubbeler ayrıca bal kabağı, karpuz ya da paraşüt kubbeler olarak da bilinirler. Bu kubbe türü, kubbe merkezinden tabana doğru yayılan bağlar gibi parçalara ayrılmıştır. Bağlar arası malzeme bir parçadan diğerine kemerlenerek aşağı yönde kuvvet transfer edilmesini sağlamaktadır. Ayasofya'nın merkez kubbesinde bu metot kullanılarak yuvarlak pencerelerin kubbe tarafında bağlar arasına yerleştirilmesine izin verilmiştir. Ayrıca St. Peter Büyük Kilisesi'nin merkezi kubbesinde de aynı tip kubbe kullanılmıştır. Şekil 1.14'te şemsiye kubbe türüne ait örnekler verilmektedir.



Santa Croce Kilisesi, Floransa



St. Peter Büyük Kilisesi, Vatikan, İtalya

Şekil 1.14. Şemsiye kubbe örnekleri (URL-1, 2012).

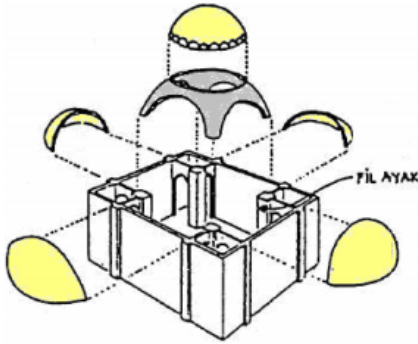
### 1.2.1. Kubbeli Yapılarda Geçiş Elemanları

Geçiş elemanları, kare planlı bir yapıda kubbenin örtü elemanı olarak kullanılmasıyla ortaya çıkan bir ihtiyaçtır. Çünkü kubbeler, taşınması için sürekli bir mesnet ile kare planlı bir yapıda kullanıldığında kenarlardaki taşıyıcı kemer ve duvarlara ek olarak köşelerde de örtüye geçiş elemanı olarak adlandırılan taşıyıcı öğelere gereksinim duymaktadır.

Kubbenin sürekli bir mesnede oturma gerekliliği, köşelerde kubbe eteğiyle temas sağlayan ve onun yükünü düzenli bir dağılımla taşıyıcı duvara aktaracak öğelere gereksinimi ortaya çıkarmıştır. Bu öğeler Pandantif (küresel bingi), Türk Üçgeni ve Tromp (tonoz bingi) olarak bilinmektedir. Geçiş elemanlarından biri olan Türk Üçgeni, sütun, ayak, duvar, lento gibi doğrusal ve düzlemsel bir eleman, Tromp ve Pandantif ise kemer, kubbe, tonoz gibi eğrisel elemanlardır.

#### 1.2.1.1. Pandantif

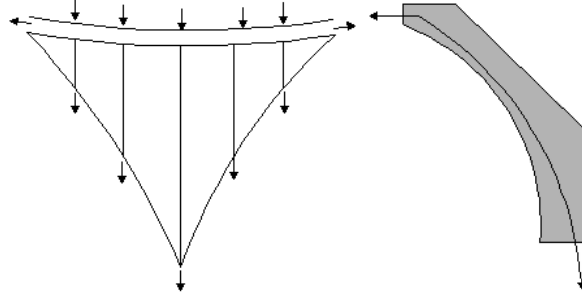
Pendantif Bizans kökenli bir geçiş elemanıdır. İlk örneklerine Suriye’de rastlanan pendantif, köşelere yerleştirilen ve yükleri düzenli şekilde ve doğrultularını değiştirmeden duvara aktaran eğrisel üçgen formunda bir elemandır (Şekil 1.15). Pendantif kubbe içinde veya altında yer alabilir (Hasol, 1979). Şekil 1.16’da pendantife ait yük şeması görülmektedir.



Yeşil Cami, Bursa

Şekil 1.15. Pendantif ve yarım kubbe örnekleri (Çelebi, 2001).





Şekil 1.16. Pendantif yük şeması (Mainstone, 1972).

Pendantifler basit, mukarnaslı ve ayrıntılı pendantif olmak üzere üç tiptedir. Basit pendantif ve mukarnaslı pendantif uygulamalarına ait birer örnek Şekil 1.17’de, ayrıntılı pendantif uygulamasına ait bir örnek ise Şekil 1.18’de verilmektedir.

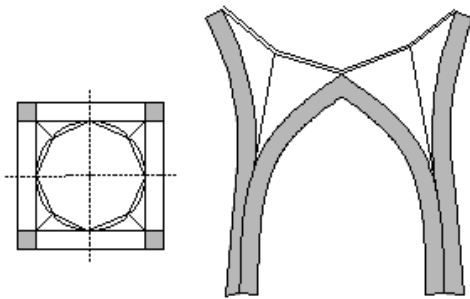


Yörgüç Paşa Hamamı, 1430, Tokat



Gedikpaşa Hamamı, 1474, İstanbul

Şekil 1.17. Basit ve mukarnaslı pendantif uygulamalarına ait örnekler (Çelebi, 2001).



Ayrıntılı pendantif kesiti

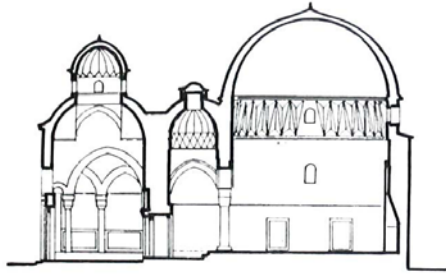


Merzifon Çifte Hamamı, 1473

Şekil 1.18. Ayrıntılı pendantife ait kesit ve uygulama örneği (Rosenthal, 1928).

### 1.2.1.2. Türk Üçgeni

Türk Üçgeni olarak adlandırılan öge, Anadolu'da Selçuklular dönemiyle ortaya çıkmıştır. Bu öge poligon oluşturulmuş kubbe kasnağının kare yapıya oturtulurken kasnakla kare taban arasında kalan boşlukları doldurmak için kullanılan geçiş elemanıdır. Şekil 1.19'da Türk Üçgeni'ne ait bir kesit ve bu yapı elemanının cami yapısında kullanılmasına ait örnek verilmektedir. Türk Üçgeni, çokgen kasnağın kare taban köşesine isabet eden parçaların her biri üçgenin taban kenarı olacak şekilde ve üçgenin tepesi kare taban köşesine gelecek biçimde duvarın örülmesiyle oluşmaktadır (Bayraktar, 2006).



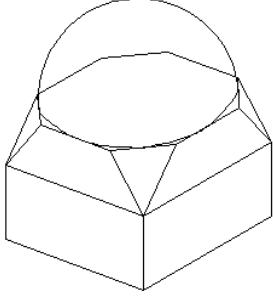
Yeşil Cami, İznik



Saray Hamamı, Edirne, 1402

Şekil 1.19. Türk üçgeni örnekleri (Bayraktar, 2006).

Türk Üçgenleri düzlem, çoklu (ikili, üçlü ve çoklu) düzlem (Aktuğ, 1989), mukarnaslı düzlem, basit kısa üçgen dizisi, basit kuşaklama üçgen dizisi (Rumpler, 1956), baklavalı kısa üçgen dizisi, baklavalı kuşaklama üçgen dizisi olmak üzere yedi tiptedir. Düzlem üçgen uygulamasına ait bir örnek Şekil 1.20'de, ikili, üçlü ve çoklu düzlem üçgen uygulamasına ait bir örnek Şekil 1.21'de, mukarnaslı düzlem üçgen uygulamasına ait bir örnek Şekil 1.22'de, basit kısa üçgen dizisi uygulamasına ait bir örnek Şekil 1.23'te, basit kuşaklama üçgen dizisi uygulamasına ait bir örnek Şekil 1.24'te, baklavalı kısa üçgen dizisi uygulamasına ait bir örnek Şekil 1.25'de ve baklavalı kuşaklama üçgen dizisine ait bir örnek ise Şekil 1.26'da verilmektedir.

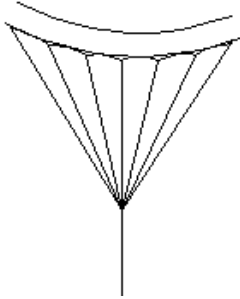


Düzlem üçgenli kubbe geçişi



Edirne Tahtakale Hamamı, 1435

Şekil 1.20. Düzlem üçgen örnekleri (Rosintal,1928).



Çoklu düzlem üçgen



Amasya'da Hızır Paşa Hamamı, 1466

Şekil 1.21. İkili, üçlü ve çoklu düzlem üçgenlere ait çizim ve uygulama örnekleri (Aktuğ, 1989).



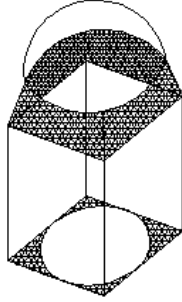
Bolu Orta Hamamı, 1389

Şekil 1.22. Mukarnashlı düzlem üçgen örneği (Rumpler, 1956).



Osmancık Koca Mehmed Paşa Hamamı, 1431

Şekil 1.23. Basit kısa üçgen dizisi örneği (Rumpler, 1956).



Basit kuşaklama üçgen dizisi



Safranbolu Eski Hamam, 1333

Şekil 1.24. Basit kuşaklama üçgen dizisi örnekleri (Rumpler, 1956).



Koca Mehmed Paşa Hamamı, Osmancık, 1431

Şekil 1.25. Baklavalı kısa üçgen dizisi örneği (Rumpler, 1956).



Saray Hamamı, Edirne, 1402

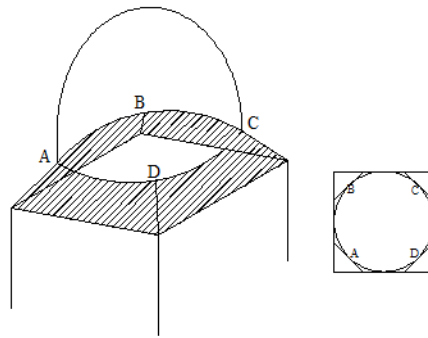


Yeşil Hamam, Bursa, 1481

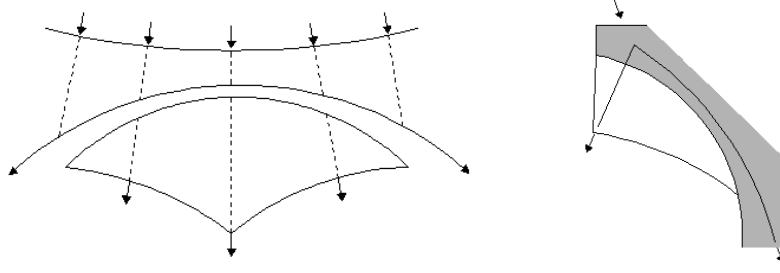
Şekil 1.26. Baklavalı kuşaklama üçgen dizisi örnekleri (Rumpler, 1956).

### 1.2.1.3. Tromp (Tonoz Mesnet)

Tromp, İran kökenli bir öğedir. İranlılar, köşelere tuğladan konik tonozlar inşa ederek trompu oluşturmuşlar ve bunu geliştirmişlerdir. Şekil 1.27’de bir tromp örneği çizimi verilmektedir (Rosintal, 1928). Tromp, kimi zaman taş, kimi zaman da tuğladan yapılmış bir kemer duvarla 45 derece açıyla yerleştirilerek ve içi taş veya tuğla malzemeyle doldurularak inşa edilmektedir. Trompta yük hem kemer hem de varsa ayrit yardımıyla yönü değiştirilerek duvarlara aktarılır. Şekil 1.28’de tromplara ait yük aktarım şeması verilmektedir (Mainstone, 1972).



Şekil 1.27. Tromp örneği (Mainstone, 1972).



Şekil 1.28. Tromp yük şeması (Mainstone, 1972).

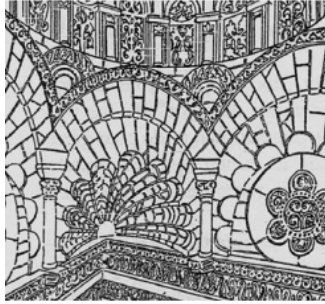
Tromplar, basit, ayrıtlı, yivli, mukarnaslı ve baklavalı tromp olmak üzere beş tiptedir. Basit tromp, ayrıtlı tromp (Aktuğ, 1989) ve yivli tromp uygulamalarına ait örnekler Şekil 1.29'da, mukarnaslı tromp ve baklavalı tromp uygulamalarına ait örnekler ise Şekil 1.30'da verilmektedir.



Basit tromp örneği Mevlana Hamamı, Tokat



Ayrıtlı tromp çizimi



Yivli tromp



Mustafa Bey Hamamı, 1436, Amasya

Şekil 1.29. Basit, ayrıtlı ve yivli tromplara ait çizim ve uygulama örnekleri (Aktuğ, 1989).



Ördekli Hamamı, 1421, Bursa

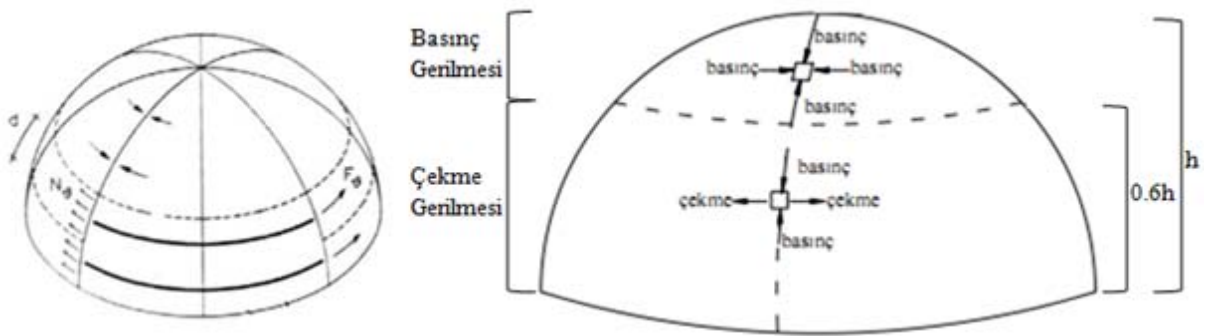


Yıldırım Hamamı, 1382, Mudurnu

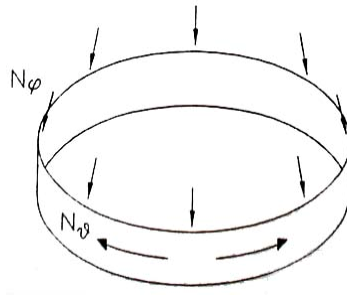
Şekil 1.30. Mukarnaslı tromp ve baklavalı tromp örnekleri (Aktuğ, 1989).

### 1.2.2. Kubbelerle Diğer Taşıyıcı Yapı Elemanları Arasındaki Yük Aktarımı

Kubbeler de duvarlar gibi basınç altında mukavemet gösterirler. Bu yüzden kubbelerin yapım tekniği, kubbe duvarının devamlı basınç altında kalacağı varsayımına dayanmaktadır. Şekil 1.31’de kubbelerde oluşan gerilmeler verilmektedir. Kubbenin oturduğu duvar kısmına kasnak denir. Kasnak, duvarın basıncını devamlı kılan önemli bir topuk elemanıdır. Kubbe duvarında devamlı basınç varken, kasnak yatay ekseninde dışa doğru kayma, boyuna doğrultuda devamlı çekme mevcuttur (Bayraktar, 2006). Şekil 1.32’de kasnağın kubbeye oluşan çekme gerilmesini azaltmadaki etkisi gösterilmektedir (Crochi, 1998).



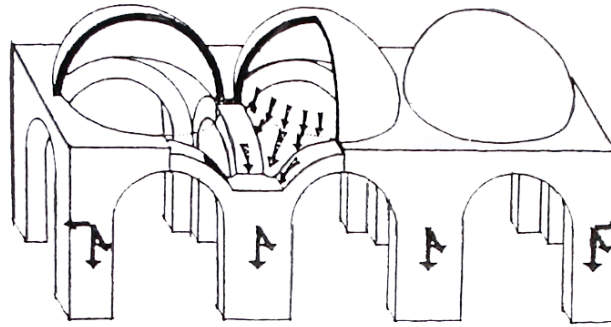
Şekil 1.31. Kubbelerde oluşan gerilmeler (Bayraktar, 2006; Çelebi, 2001).



Şekil 1.32. Kasnağın kubbeye oluşan çekme gerilmesini azaltmadaki etkisini gösteren çizim örneği (Crochi, 1998).

Kasnak kubbeli bir yapı için önemli bir yük dağıtım elemanıdır. Kasnağın açılması kubbe duvarlarındaki dengeyi bozmakta ve duvardaki basınç gerilmesini azaltmaktadır. Ön gerilme ile dayanım gösteren kubbeler, ön gerilmenin azalması ile deprem tesirleri altında dağılmaktadır. Bu yüzden, kubbelerin, oturdukları kasnakların kontrolü mutlaka yapılmalı, gerekli durumda kasnağın oturduğu duvarlar kesme kuvvetlerine karşı güçlendirilmelidirler (Bayraktar, 2006).

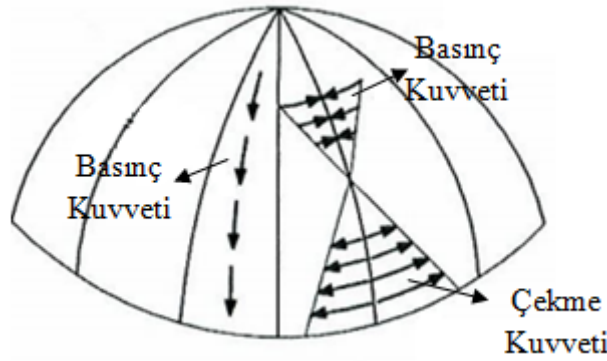
Kubbenin yükü, kubbeden düşey ayaklara oturan kemerlere iletilir. Kubbe ayakları mesnet yüklerinin düşey bileşenlerini kemerlere, yanal bileşenleri ise kemer düzlemlerine dik doğrultuda yerleştirilmiş yarım kubbeler ve payandalara iletir. Şekil 1.33'te kubbelere gelen yükün aktarılmasını gösteren örnek bir çizim verilmektedir (Saraç, 2003). Kubbeden kemerlere iletilen yüklerin kemer düzlemi içinde oluşturduğu itki kuvvetleri, gergilerle alınabildiği gibi, ayakların uzantısı olarak kullanılan ağırlık kütleleri aracılığıyla ayakların çekirdek alanı içine aktarılmaktadır (Çılı ve Sesigür, 2007).



Şekil 1.33. Kubbeli sistemlerde yük aktarımı (Saraç, 2003).



Kubbe mesnedine yakın duvar cidarlarında burulmadan kaynaklanan büyük çekme kuvvetleri oluşmaktadır. Oluşan bu çekme kuvvetlerini kemer sistemiyle güvenli bir şekilde aktarmak klasik bir yöntemdir. Ayrıca, kubbe ayağında oluşturulan kemerli sistem, deprem yüklerinin kubbeden ana yapıya aktarılması için izolatör vazifesi görmektedir (Bayraktar, 2006). Şekil 1.34'te kubbe üzerinde oluşan çekme ve basınç kuvvetleri gösterilmektedir.



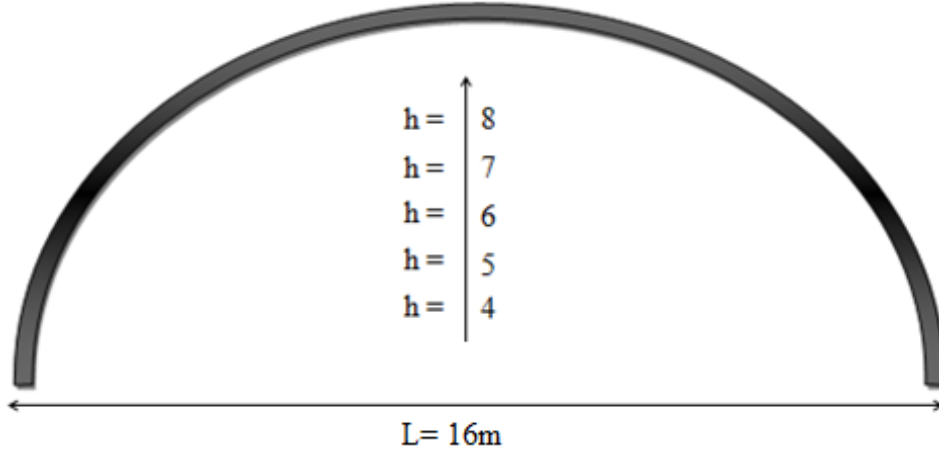
Şekil 1.34. Kubbelere ait yük taşıma mekanizması (Ünay, 2002).

Kubbelerin mesnetlenmesi de çok önemli bir problemdir. Çünkü kubbeler mesnetlerinde sürekli bir çekme ve kayma gerilmeleri oluştururlar. Bu nedenle, dairesel mesnede oturması ve mesnedinde çekme elemanlarıyla kuşaklanması şarttır. Mesnetlenme olayında dairesel kubbeler için kubbe yüksekliğinin ( $h$ ) dairesel çapa ( $2r$ ) oranı olan basıklık aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır (Bayraktar, 2006);

$$b = \frac{h}{2r} \quad (1.1)$$

Kubbenin basıklığı arttıkça yatay mesnet yükleri artmaktadır. Ağırlık ve deprem tesirleri azalmaktadır. Diğer bir ifadeyle, Basıklık oranı arttıkça (Şekil 1.35) kubbe yükü artmakta, mesnet ve kuvvet vektörünün düşeyle yaptığı açı azalmakta ve yatay mesnet yük değeri küçülmektedir. Böylece kubbe ağırlığını düşeye aktarmak kolay olmaktadır. Bu durumda sorun yatay kuvvetlerin karşılanması olmaktadır.

Değişen kubbe yüksekliğine göre etkiyen kuvvet ve moment değerleri Tablo 1.1'de verilmektedir (Bayraktar, 2006).



Şekil 1.35. Tipik bir kubbe kesiti

Tablo 1.1. Yüksekliğe bağlı kuvvet-moment değişimi (Bayraktar, 2006).

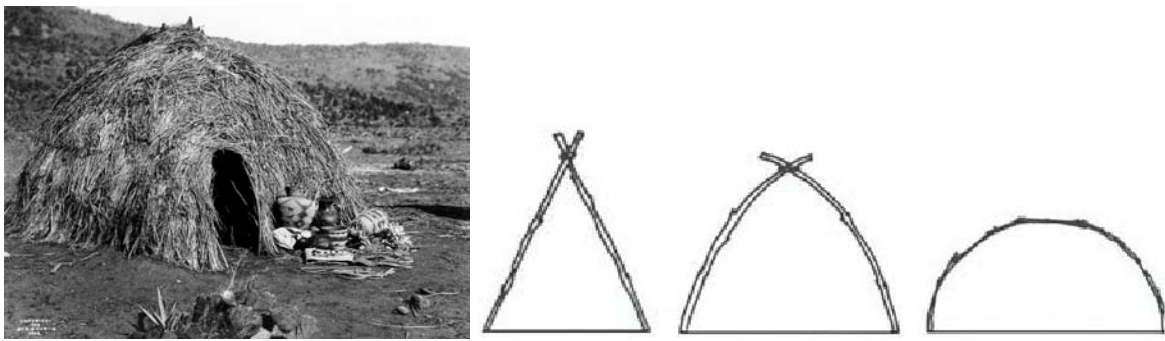
Kubbe yüksekliği h (m)	Basıklık oranı	Yük İsmi	Yatay (kN)	Düşey (kN)	Moment (kNm)	Kubbe ağırlığı (ton)
4	0.250		86.3	92.7	10.0	465.7
5	0.313		72.2	99.4	19.0	499.3
6	0.375	Zati	62.8	107.2	32.0	538.5
7	0.438		56.1	116.0	48.0	582.6
8	0.500		50.9	125.6	67.7	630.9

Mimar Sinan mesnetlendirme konusunda yaptığı çalışmalarla devrim yaratmıştır. Çünkü yatay kuvvetleri kasnakta oluşturduğu metotla çözmüştür. Kasnak, kubbe mesnet kısmını büyütürken elde edilen kesitte, ortası oyulmuş taşlar dizilmiş, içerisine çepeçevre bronz akıtılarak halka oluşturulmuştur. Bronzun içine demir çekme elemanı yerleştirilerek, çekmeye dayanıklı halka teşkil edilmiştir. Bu şekilde Ayasofya Camii için yapmış olduğu takviyelerle, cami depremde çökmekten kurtulmuştur (Çamlıbel, 1998).

### 1.2.3. Dünya’da Mevcut Kubbe Örnekleri

Yüzyıllar boyunca mühendislik ve mimari yetenekleri taçlandırmak için kullanılan kubbeler, Dünya üzerindeki en güzel ve en büyüleyici binaları süslemektedirler. Kubbeler, Roma döneminden günümüze kadar yalnızca pratik çatı kaplamaları olarak kullanılmakla kalmamış, aynı zamanda güç sembolü olarak da hizmet vermişlerdir. Çünkü bu tip binalar, tipik olarak buldukları çevreden bir kule gibi yükselmekte ve şehrin ufuk hattına egemenlik kurmaktadır. Ayrıca kubbeler, tarih boyunca manevi bir değer de kazanmışlardır. Kubbelerin iç kısmının yarattığı ek yükseklik, birçok dini yapıda göze çarpmaktadır. Kubbelerin kullanımını Hindistan'dan Roma'ya, Dünya'nın en tanınmış yapılarında görmek mümkün olmaktadır. Aşağıda kubbeli yapılara ait Dünya'dan çeşitli örnekler verilmektedir.

Kuzey Amerika Yerlileri tarafından 1900-1910 yılları arasında inşa edilmiş ilkel yapılar barınak olarak kullanılmıştır. Kubbeli yuvarlak bu barınakların birçok farklı Kızılderili kültürler tarafından kullanılmasının amacı, yapıların kavisli yüzeyleri sayesinde her türlü hava koşulları için ideal bir sığınak olmasıydı (URL-8, 2012). Bu tip yapılarda kullanılan malzemeler arasında: çimen, çalı, ağaç kabuğu, saz, deri ve bez örnek gösterilebilir. Yapı detayları ise malzemelerin yerel kullanım amaçlarına ve kültürlere göre değişiklik göstermektedir. Şekil 1.36’da bu barınaklara ait bir uygulama örneği verilmektedir.



Şekil 1.36. Saz ve ağaç yapraklarından yapılmış ilkel yapı örnekleri (URL-9, 2012).

Pantheon, M.S. 118 ve 128 yılları arasında İmparator Hadrian tarafından inşa ettirilmiştir. Pantheon Roma'da bulunmakta ve Dünya'daki en ünlü kubbeli binalardan biri sayılmaktadır. Yaklaşık iki bin yıldır ayakta kalan bina, Roma'da bulunan Romalılara ait anıtlar içerisinde en iyi korunmuş yapıdır. Aslında bir pagan tapınağı olarak inşa edilen

Pantheon, 609 yılında bir katolik kilisesine dönüştürülmüştür. Kubbenin genişliği 43.2m'dir. Kubbenin tepe noktasında çapı 9m olan daire şeklinde açık bir göz pencere bulunmaktadır. Modern zamanlardan önce Dünya üzerindeki en büyük beton yapı olan kubbe, yukarıya çıkıldıkça daha hafif ve daha özel üretilmiş olan sağlam beton bloklardan yapılmıştır. Bu yapının sırrı, dış duvarlarının 6m kalınlıkta olması ve bu duvarların, kubbeye verilmesi gereken kemer desteği ihtiyacını karşılayan devasa destekler olarak görev yapmasıdır (URL-10, 2012). Şekil 1.37'de Pantheon'a ait çeşitli resimler verilmektedir.



Şekil 1.37. Pantheon, Roma (URL-10, 2012).

Kubbet-üs Sahra İsrail'de bulunmaktadır. Tüm İslam Dünyası için en önemli dini yerlerden ve en etkileyici kubbeli binalarından biridir (Şekil 1.38). 685-691 yılları arasında Caliph Abd al-Malik İbn Marwan tarafından inşa edilen ve Müslümanlara ait olan bu mabet, bir taçlandırma başarı örneği olan parlak, altından kubbesiyle Kudüs'te birçok noktadan görülebilmektedir. Ancak, kubbe gerçekte altından yapılmış olsa da, zaman içerisinde birçok defa değiştirilmiştir. Önce alüminyum bir kubbe kullanılmıştır. Bugün ise kubbe bakırdan yapılmıştır ve üzerinde altın varak bulunmaktadır. Kubbet-üs Sahra'nın İslam mimarisinin ilk başyapıtı olduğu kabul edilmektedir (URL-10, 2012).



Şekil 1.38. Kubbet-üs Sahra, Kudüs (URL-10, 2012).

Floransa Katedrali, Floransa'nın ufuk hattında egemenlik kuran Duomo olarak da bilinen, İtalyan Rönesans mimarisinin görkemli bir örneğidir (Şekil 1.39). Yapı, Floransalı bir kuyumcu ve mimar olan Filippo Brunelleschi'nin parlak bir buluşudur. Duomo'nun kubbesi iki katmandan oluşmaktadır. İç kubbe çapı genişletmek, dış kabuk yapısı ise dekoratif bir etki yaratmak ve kötü hava koşullarına karşı koruyucu bir katman görevi üstlenmek için inşa edilmiştir. Muhteşem kubbe yapısı, kubbenin alt kısmından üst kısmına doğru derinliği gittikçe azalan 24 adet taş 'kemer kaburgası' ile desteklenmektedir. Nervürlü (şemsiye) sekizgen kubbesinin yüksekliği 91m, üzerindeki fenerle birlikte 114.5m'dir. Ayrıca kubbe açıklığı 45m'dir. Roma'daki Pantheon'u geçerek dünyadaki en büyük kubbeli yapısı olmuştur. Bu yapıyla Brunelleschi, taştan kubbeler oluşturmanın mümkün olduğunu göstermiştir. Ayrıca Brunelleschi, Floransa hükümdarlarına binanın inşasına başlayabilmek için tasarımının önemini ispatlamak zorunda kalmış ve kubbenin tuğladan 1/12 oranında bir modelini yapmıştır (URL-10, 2012).



Şekil 1.39. Floransa Katedrali, İtalya, (URL-10, 2012).

Tac Mahal, 1632-1653 yılları arasında 22 yıllık bir sürede ve 20.000 kişi tarafından inşa edilmiştir (Şekil 1.40). Beyaz mermer yapı, birbirine çok benzeyen dört cepheden oluşmakta ve her cephede 33m yüksekliğinde büyük bir merkez kemer bulunmaktadır. Ana kubbe yüksekliği 82m ve kubbe çapı 17.7m'dir (URL-10 ve 11, 2012).



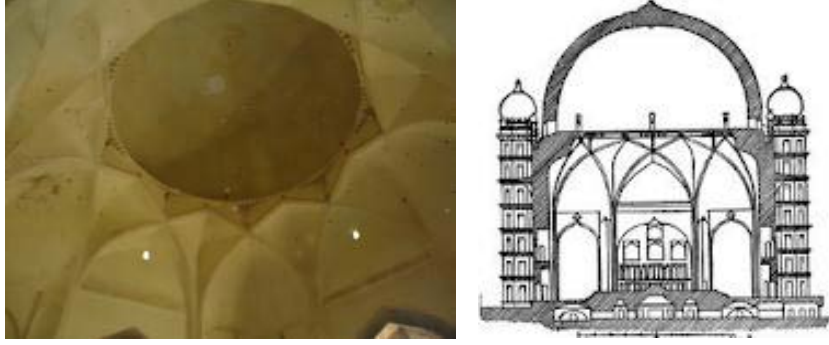
Şekil 1.40. Tac Mahal, Hindistan, (URL-11, 2012).

Gol Gumbaz, Hindistan'ın Bijapur kentinde bulunmaktadır. 17.yüzyıl anıtı olan Gol Gumbaz, içinde Muhammed Adil Şah'ın türbesinin bulunduğu bir yapıdır (Şekil 1.41). Fısıldayan Kubbe olarak adlandırılan bu yapı muazzam bir mühendislik yapıtı olarak literatürde yerini almıştır. Çünkü, yapıyı örten kubbe ayaklar tarafından desteklenmemiş, birbirleriyle kesişen kemer bingilerin üzerine oturtulmuştur (Şekil 1.42). Yapının en önemli özelliğinden birisi de fısıltı ya da kağıt sesinin kubbenin her tarafında yankılanarak 37m uzakta bulunan bir dinleyici tarafından bile 9 kez duyulabilmesidir. Kubbenin dış çapı 44m ve yapının kubbe dışında kalan karesel kısmının yüksekliği 47.5m'dir (URL-1, 2012).



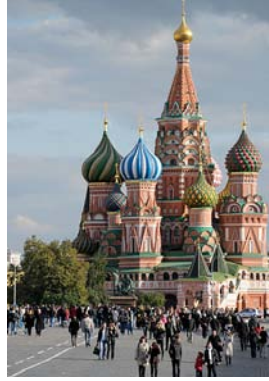
Şekil 1.41. Gol Gumbaz, Hindistan, (URL-1, 2012).





Şekil 1.42. Kubbe iç görünüşü ve kesit çizim örneği (URL-12, 2012).

Aziz Vasili Katedrali, Moskova Kızıl Meydan'da bulunan soğana benzeyen rengarenk ve kubbemsi çatılarıyla ünlü bir katedraldir. 1555-1561 yılları arasında Rus Devleti'nin Kazan ve Astrahan hanlıklarına karşı kazandığı zaferleri kutlamak amacıyla Korkunç İvan tarafından yaptırılmıştır. Değişik şekilde tasarlanmış olan sekiz kubbe, sekiz ayrı zaferi simgelemektedir (Şekil 1.43). Kilise, bugün müze olarak kullanılmaktadır (URL-1 ve 4, 2012).



Şekil 1.43. Aziz Vasili Katedrali, Moskova, (URL-1, 2012).

Ayasofya Müzesi, 532 yılında Bizans İmparatoru Justinianus tarafından dönemin iki önemli Mimarı olan Tralles'li (Aydın) Anthemios ve Miletos'lu (Balat) İsidoros'a yaptırılmıştır. Bu yapı 1453 yılına kadar bir patrik katedrali olarak kullanılmış, 1453'te camiye çevrilmiş, 1935'te ise müze olmuştur (Şekil 1.44). Günümüzde görülen Ayasofya binası aslında aynı yere üçüncü kez inşa edilen kilise olduğundan, Üçüncü Ayasofya olarak da bilinmektedir. İlk iki kilise isyanlar sırasında yıkılmıştır. Döneminin en geniş kubbesi olan

Ayasofya'nın merkezi kubbesi, Bizans döneminde birçok kez çökmüş, Mimar Sinan'ın binaya istinat duvarlarını eklemesinden itibaren bir daha hiç çökmemiştir. Ana kubbenin çapı 32.5m'dir (URL-8, 2012).



Şekil 1.44. Ayasofya Müzesi, İstanbul (URL-8, 2012).

Selimiye Camii, Edirne ilinin merkezinde bulunan ve yüksekliği 43.25m, çapı 31.25m olan muazzam kubbesiyle dikkat çeken Mimar Sinan'ın en ünlü eserlerinden biridir. Büyük kubbe, 6m genişliğindeki kemerlerle birbirine bağlanan ve fil ayağı denen dev sütunlar üzerine oturmaktadır. 31.25m çapında muazzam kubbenin ağırlığı 20000kN olup bu ağırlık, payanda kemerler ile karşılanmaktadır. Kubbe üzerindeki kurşunun ağırlığı 180kN'dur. Bu muazzam eserin kilit taşı ise 50kN ağırlığındadır. Şekil 1.45'te Selimiye Camii'ne ait resimler verilmektedir (URL-13, 2012).





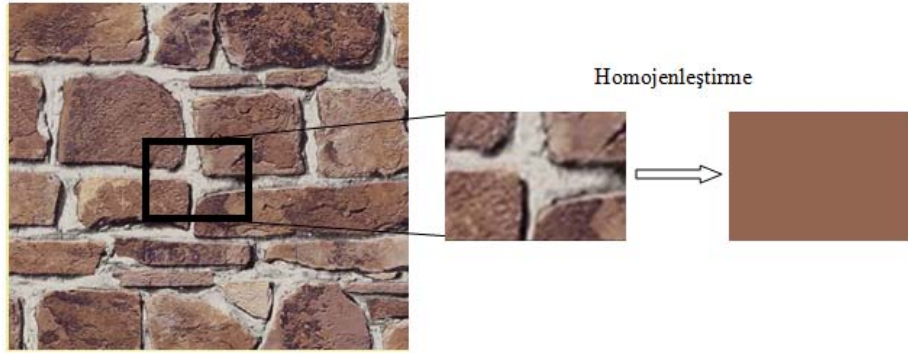
Şekil 1.45. Selimiye Camii, Edirne, (URL-13, 2012).

#### 1.2.4. Tarihi Yapıların Modelleme Stratejileri

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bir betonarme yapının modellenmesi ile yığma bir yapının modellenmesi birbirinden oldukça farklıdır. Heterojen bir malzeme olan betonarme yapının, yapılan kabullerle herhangi bir yapısal elemanını aynı çeşit sonlu elemanla oluşturmak mümkün olmaktadır. Ancak yığma yapılarda yapı elemanlarının oluşturulmasında örgü biçimlerinde ve kullanılan malzemelerde çok fazla çeşitlilik bulunmakta ve bunların tek tip sonlu eleman ile oluşturulması gerçekten uzak bir sonlu eleman modelinin elde edilmesine sebebiyet vermektedir. Tek tip sonlu eleman modeliyle yığma bir yapı veya yapı elemanlarının gerçekten uzak oluşturulması sebebiyle gerçeğe daha yakın bir yığma yapı modelinin oluşturulması için kabullere uygun bir modelleme tekniği geliştirilmek durumunda kalmıştır. Modelleme tekniğinin dışında yığma yapı elemanları kendisini oluşturan yığma yapı birimlerinin (taş, tuğla, vs.) ve ara yüzlerinin (farklı karakteristiklere sahip harç) ayrı ayrı modellenmesiyle de oluşturulabilmektedir. Bu modellemede her yapı biriminin ayrı ayrı oluşturulmasından kaynaklanan çok sayıda bilinmeyen mevcuttur ki bu modelleme özellikle büyük ölçekli yapılar için çok zaman alan bir durumdur. Mevcut literatür çalışmaları incelendiğinde yığma yapıların modellenmesinde, seçilen yapı büyüklüğüne göre modelleme teknikleri değişmekte ve üç farklı modelleme tekniği kullanıldığı görülmektedir. Bunlar; makro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve mikro modelleme olmak üzere üç şekilde yapılmaktadır (Lourenço, 1996).

### 1.2.4.1. Makro Modelleme

Makro modelleme tekniğinde, homojenleştirme işlemine tabi tutulan yığma yapı elemanı kompozit malzeme olarak düşünülmektedir (Anthoine, 1997). Malzeme özelliklerinin yanında mekaniksel özellikler de homojenleştirme işlemi sonucunda elde edilen değerleri almaktadır. Homojenleştirme işlemi kullanılarak tuğla ve harçtan meydana gelen duvar ya da herhangi bir yapı elemanı için tek bir malzeme özelliği elde edilebilmektedir (Zucchini ve Lourenço, 2002).



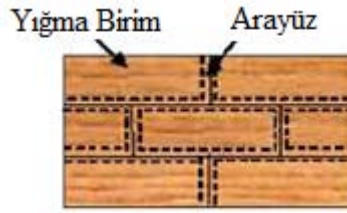
Şekil 1.46. Homojenleştirme işlemi

Şekil 1.46'da görüldüğü gibi tuğla duvar örgüsünden alınan basit bir hücre, harç ve tuğlanın katılım oranları dikkate alınarak tek bir malzeme olarak kabul edilebilmektedir. Zucchini ve Lourenço vd. (2006) ve Atamtürktür vd., (2012)'in yapmış oldukları çalışmalarda, tuğla ve harç için elastisite modülü başta olmak üzere diğer malzeme parametrelerinin hesaplanmasında denklem 1.2'de verilen bağıntı önerilmektedir. Bu bağıntıda kullanılan  $E_m$  eşdeğer elastisite modülünü,  $\gamma_t$  (kalınlık oranı) =  $\frac{t_h}{t_t}$ ,  $t_h$  harç kalınlığını,  $t_t$  tuğla kalınlığını,  $\gamma_m$  (elastisite modülü oranı) =  $\frac{E_h}{E_t}$ ,  $E_h$  harcın elastisite modülünü,  $E_t$  ise tuğlanın elastisite modülünü ifade etmektedir.

$$E_m = \frac{1 + \gamma_t}{1 + \frac{\gamma_t}{\gamma_m}} \times E_t \quad (1.2)$$

#### 1.2.4.2. Basitleştirilmiş Mikro Modelleme

Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğinde, yığma birimlerin boyutları, harç tabakasının kalınlığının yarısı kadar genişletilerek harç tabakası ihmal edilmekte ve yığma birimler ortalama ara yüzey çizgileriyle birbirinden ayrılmaktadırlar (Şekil 1.47). Meydana gelmesi muhtemel çatlakların bu ortalama ara yüzey çizgisinde oluşacağı kabul edilmektedir (Romano, 2005). Bu modellemede harcın poisson oranı ihmal edilmektedir. Makro modelleme tekniğinden farklı olarak harç ve taşların birleşim ara yüzeyleri ayrıca tanımlanmaktadır. Yığma duvar modellemelerinde, muhtemel göçme mekanizmalarının tümünün dikkate alınmaması önemli sorunlardan birisidir. Bu sebeple yapılan kabule göre, yığma duvarlarda meydana gelebilecek olan çekme - kayma çatlaklarının ve tüm hasarın ara yüzeylerde oluşacağı, tuğlalarda meydana gelebilecek olan potansiyel çatlakların ise tuğlanın orta kısmında düşey olarak gerçekleşeceği kabul edilmektedir.

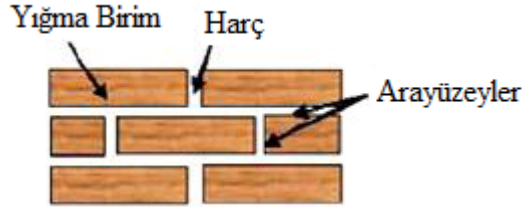


Şekil 1.47. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği (Jafarov vd., 2012).

#### 1.2.4.3. Mikro Modelleme

Bu modelleme tekniği en gelişmiş modelleme yöntemidir. Taş ve harç elemanlar birbirinden bağımsız olarak modellenerek birleşim yerlerinde yüzey elemanları tanımlanmaktadır (Bayraktar vd., 2007). Mikro modellemede yığma yapı elemanını meydana getiren yapı taşlarının (taş/tuğla/briket ve harcın) ayrı ayrı her birinin mekanik özellikleri yani elastisite modülleri, poisson oranları ve elastik olmayan özellikleri dikkate alınmaktadır. Bu yaklaşımda çatlakların yığma birim ve harcın arasındaki birleşim yüzeylerde meydana geleceği varsayılmaktadır (Oliviera, 2003). Şekil 1.48'de tuğla ve harç kullanılarak

oluşturulan duvarın mikro modelleme tekniğinde nasıl değerlendirileceğine ilişkin bir örnek verilmektedir.



Şekil 1.48. Mikro modelleme tekniği (Jafarov vd., 2012).

### 1.3. Kubbeler Üzerine Yapılmış Literatürde Varolan Çalışmalar

Kunieda (1982), küresel kabukların aksenal serbest titreşimi için geliştirilen kesin ifadelerin karmaşık yapısını tartışmış ve bu hesaplamalı çalışmayı basitleştirmek için yaklaşık bir metot elde etmiştir.

Liew ve Lim (1982), eğrisel kabuk titreşimleri üzerinde kapsamlı çalışmaları tamamlamışlardır. İzotrop ve homojen ince kabuk üzerine yoğunlaşan yazarlar, genel özdeğer denklemini elde etmek için Ritz prensibinin minimum enerji prensibini kullanmışlardır. Ayrıca bu kapsamlı çalışmada, yarı-küresel ince kabuğun sabit mesnet durumları göz önüne alınarak bu konuda önemli bilgiler sunulmuştur. Eliptik durumlar için eğrilik oranlarının etkilerinin bir takım tamamlanan sonuçları sunulmuştur. Bu çalışma yarı-küresel kabukların sabit ve ankastre mesnetli mod şekillerinin sonuçlarını kapsamlı bir şekilde ortaya koymuştur.

Souza ve Croll (1983), test numunelerinin kalınlık değişimlerinin ya da geometrik kusurlarının elde edilen veriler üzerinde önemli belirsizliklere sebep olabileceğinin altını çizmektedirler. Sıgdan derine, inceden çok inceye 5 farklı küresel test numunelerinin doğru bir şekilde geometrik kalitelerinin kontrolü için iyi tanımlanmış ürün prosedürünü takip etmişlerdir. Yer değiştirme hareketlerinin gözlemlenmesi için küresel numunenin mesnetlenmemiş kenarında titreşim kaynağı olarak bir hoparlör kullanmışlardır. Deneysel verilerden elde edilen frekanslar ve mod şekillerini, ince kabuk teorisi ile karşılaştırmışlardır. Deneysel sonuçlar arasında çok yakın bir ilişki elde etmişlerdir.

Mal'tsev vd., (1984), bir patlatma yükünden dolayı, küresel ince kabuk yapı üzerinde oluşan kabuk gerilmelerin analitik ve deneysel olarak elde edilenleri arasındaki farkları belirtmişlerdir. 2m çaplı ve 8mm kalınlıktaki bir küresel çelik kabuk yapısı yüksek patlayıcı ammonit ile açığa çıkan yoğun patlatma etkisiyle uyarılmıştır. Kabuktaki gerilme yangına dayanıklı gerilme göstergeleri tarafından gözlemlenmiştir.

Ogihara (1985), bir kütle model için silikon kauçuk küresel bir kabuk yapı üzerinde yapının temsili rijitliğini değerlendirmek için yapı üzerinde titreşim testleri gerçekleştirmiştir. Yapının sinüs eğrisi şeklinde kademeli uyarılması tek eksenli sarsma tablası yardımıyla gerçekleştirmiş ve küresel kabuğun tepkisi optik yer değiştirme ölçerlerle ölçülmüştür. Daha sonra frekanslar ve mod şekilleri sonlu eleman modelin öz değer analiziyle hesaplanmıştır.

Armstrong vd., (1995), tarihi yığma kemer köprülerde modal analiz tekniğini hasarları belirlemek için kullanmıştır. Yapı bir çekiç yardımıyla uyarılarak, köprü boyunca yerleştirilen ivmeölçerler tarafından yapıya ait tepkiler elde edilmiştir. Frekans tepki fonksiyon grafiği orijinal yapı için elde edilmiştir ve daha sonra sisteme yapay bir kütle yükü etkittirilerek işlem tekrarlanmıştır. Dolgu toprak karakteristiklerinden dolayı, yapıya ait doğal frekans değişimleri iyi bir şekilde açıklanamamaktadır. Bunun yanında dikkat edilmesi gereken bir diğer hususta mod şekillerinin sahip olduğu düzensizliklerdir. Bu çalışmada, deneysel modal analiz yöntemi kullanılarak bir başlangıç ölçümü olmadan yığma yapılarda hasarın belirlenmesinin beklenemeyeceği belirtilmiştir.

Hwang(1996), çalışmasındaki deneyleri 15cm yarıçaplı yarı küresel alüminyum kabuk üzerinde gerçekleştirmiştir. Uyarma kuvvetleri test yapısına fiziksel bir müdahale olmaksızın bir elektromanyetik kuvvet tarafından üretilmiştir. Kabuk tepkisi, bir mikrofon alıcısı ve kabuk yüzeyine yerleştirilen ivmeölçerler tarafından elde edilmiştir. Analog sinyaller el ile sayılaştırılmış ve daha sonra Frouier dönüşümü yardımıyla analiz edilmiştir. Elde edilen test sonuçları (doğal frekanslar ve mod şekilleri) farklı analitik yaklaşımlar kullanılarak karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda, analitik ve deneysel sonuçlar arasında genel bir uyum elde edilmiştir.

Ross (1996), bu çalışmasında ince cidarlı kubbe titreşimlerini ve yarı-elipsoit kabukların titreşim modlarını özellikle eksenel modlarını araştırmıştır. Kabuk elemanın meridyenleri boyunca oluşan yer değiştirme fonksiyonları, düzlem içi yer değiştirmelerin lineer değişimleri ve düzlem dışı yer değiştirmelerin parabolik değişimleri olarak tanımlanmıştır. Meridyen çizgileri boyunca yapılan hesaplamalar Gauss sayısal integrasyon yöntemiyle yapılmıştır.

Çalışmasını, taban çapı 0.2m ve kalınlığı 0.02m olan katı üretilen plastik malzemeden yapılmış yarı elipsoidal kubbe üzerinde bir dizi deneyler yaparak tamamlamıştır. Deneysel veriler ve analitik tahminler karşılaştırılmıştır.

Pesciullesi, vd., (1997), kendi ağırlıkları altında üniform yüklü küresel yığma kubbeleri sonsuz ve sınırlı basınç durumları için incelemiştir. Kubbenin her noktasının küresel olduğu ve yığma yapı malzemesinin gerilmeye maruz kalmadığı farz edilmiştir. İlave yüklemelerden dolayı çevresel çekme gerilmesinin olduğu ve kabul edilebilir açıklığın azaldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma aynı zamanda tek gözlü küresel kubbelerin çözümlerini sunmuştur.

Creazza vd. (2001), çalışmalarında bir beşik tonoz modeli üzerinde çeşitli teorik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. İlk olarak, güçlendirilmiş yığma bir beşik tonozun davranışını üç boyutlu sonlu eleman modeliyle temsil etmişlerdir. Daha sonra laboratuarda modellenen beşik tonozu uygulanan düşey ve yarı-statik yük altında hasar analizi yapmışlardır. Yükleme durumunu tonozda kararsız bir durum ortaya çıkana kadar artırmışlardır. Ölçülen yerdeğiştirme ve hasara sebep veren yükü sonlu eleman model tahminleriyle karşılaştırmışlardır. Benzer çalışma bir yıl sonra yine Creazza vd. (2002) tarafından yivli ve çapraz tonoz için oluşturulan bir model üzerinde gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, yavaş artan statik yük altında göçme mekanizmasının karakteristiklerinin yanı sıra maksimum şekil değiştirmelerin ve konumlarının üzerinde durmuşlardır.

Theodossopoulos vd. (2002, 2003), ölçeklendirilmiş ahşap modeller üzerinde gerçekleştirilen statik testler yardımıyla yığma çapraz tonozların davranışlarını incelemiştir. Bu modeller Edinburg'ta bulunan ve kısmen çökmüş olan Abbey Church of Holyrood'un bir tonozunu temsil etmektedir. İlk olarak, yerçekimi kuvveti altında gerilme ve yerdeğiştirmeleri deneysel olarak kaydetmişlerdir. Daha sonra bozulma belirlemek için tonoz mesnetlerinin hareketini test etmişlerdir. Bu bozulmaları kullanarak bir sonlu eleman modeli oluşturmuşlardır. Ölçülen gerilmeler ile tahminler arasında farklılıklar elde etmişlerdir. Bu çalışma homojen olmayan yığma ve harç malzeme davranışında ortaya çıkardığı farklılıkların gösterilmesiyle ilişkili bir örnektir.

Erdoğan (2004), Gothic katedrallerinin tonozları üzerine bir yaklaşım uygulamıştır. Ortaçağ tekniklerine dayalı olarak inşa edilen 20. yy'ın tonozlarının ilk simetri modunu belirlemiştir. Bu ilk modu, malzeme özellikleri ve sınır koşulları açısından Sonlu Eleman modelinin düzenlenmesi için bir referans olarak kullanmıştır. İyileştirilen sonlu eleman

modeli diğer karmaşık tonozlu tarihi kiliselerin sonlu eleman modellerinin geliştirilmesi için bir temel olarak kullanılmıştır.

Kang ve Leissa (2004), küresel kabukların üç boyutlu analizini gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, kalınlık boyunca göz önüne alınan değişimlerde yapılan kabullerin yüksek frekanslarda uygulanamayacağı açıklanmıştır. Çalışmada hem katı hem de içi boş kabuklar üzerinde çalışılmış ve kullanılan polinom derecesinin artmasıyla kesin sonuçlarda bir yakınsamadan bahsetmişlerdir. Bu alışma, düşük frekans için iyi bilinen iki boyutlu kabuk eleman analizinin kesinliğini doğrulamış ve daha yüksek frekanslar için üç boyutlu analiz gerekliliğinin ortaya koymuştur.

Akan ve Özen (2005), Bursa'da bulunan Yeşil Türbe'yi incelemiş ve SAP2000 bilgisayar programıyla yapıyı modellemişlerdir. Yapının modlarını inceleyip, salınım periyodları hesaplayarak elde edilen verileri tepki spektrumu aracılığıyla yapıya deprem yükü uygulamak amacıyla kullanmışlardır. Yeşil Türbe'nin sonlu elemanlar analizinin sonuçlarının yorumlayabilmek için deplasman, moment, kesme kuvveti ve eksenel kuvvetleri gösteren grafiklerden yararlanmışlardır. Bu çalışmada sınırlı sayıda düğüm noktası ve eleman kullanılmıştır. Ayrıca, modellemeyi lineer elastik malzeme özelliklerine göre yapmışlardır.

Atamtürktür (2006), Guastavino kubbelerine Deneysel Modal Analiz tekniğinin uygulanabilirliğini açıklamıştır. Yüksek kalitede veriler elde edilerek yeteri kadar modal test değişkeninin sağlanması, yığma gibi zor bir malzemede dahi mümkün olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca çok katmanlı yığma kabuk elemanın kalınlığını belirlemek için etki-yankı uygulamasından umut verici sonuçlar elde etmiştir.

Atamtürktür and Boothby (2007), iki farklı yığma tuğla kubbe üzerinde birbirini tamamlayan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalardan yüksek kalite verileri elde edilmiş ve on mod şekli belirlenmiştir. Tuğla ve harcın malzeme özelliklerini belirlemek için tahribatlı ve tahribatsız tekniklerin kullanıldığı çalışmalarda, iyileştirme parametreleri sınır koşullarıyla sınırlandırılmıştır. İyileştirme tamamlandığında sonlu eleman model tahminleriyle deneysel olarak belirlenen ilk altı doğal frekans ve mod şekilleri karşılaştırılmıştır.

Atamtürktür vd. (2007), mevcut referanslar yardımıyla Washington National Katedrali'nde havalandırma üzerinde bulunan tonoz üzerinde Geleneksel ve Operasyonel Modal Analiz'in pratik ve teknik farklılıklarını belirlemek için testler uygulamışlardır. Darbe eki etkisini Geleneksel Modal Analiz boyunca kullanmışlardır Operasyonel Modal Analiz

için ise zil sesi, çan sesi gibi çevresel sesler dikkate alınmamıştır. Her iki test tekniği içinde yüksek katılım faktörlü modların tutarlı görünmelerine rağmen Operasyonel Modal Analiz'le belirlenemeyen modlar Geleneksel Modal Analiz ile elde edilmiştir.

De Stefano (2007), küçük bir barok kilisesinin yığma kubbesi üzerinde dört farklı titreştirici parametresi (çevre, çekiç, düşürülen objeler ve helikopter tarafından oluşturulan rüzgar türbülansı) kullanarak dinamik deneyler gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak ilk altı mod şekli belirlenmiştir. Ayrıca sonlu eleman modeli oluşturulurken komşu yapılarla etkileşimi sağlamak için modele elastik yaylar atanmış ve etkili parametreler duyarlılık analizine bağlı olarak seçilmiştir. Çalışma, tahmini olarak belirlenen iyileştirme parametrelerinin ve mühendislik kurallarına bağlı yapılan kabullerle oluşturulan sonlu eleman modellerinin belirsizliklerini sunmuştur.

Atamtürktür vd. (2011), ağır hasarlı ve hasarsız durumlara sahip iki tonoz üzerinde darbe çekici kullanarak titreşim testi gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirilen deneysel yöntemler sonucunda kubbelerin iki farklı yapısal konumu arasındaki farklılıklar başarılı bir şekilde ortaya konmuştur.

Atamtürktür vd. (2012), Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan iki farklı Guastavino tarzı yığma kubbenin doğrusal olmayan deprem performansı üzerinde gerçekleştirilen analitik ve deneysel çalışmaları sunmuşlardır. Yığma kubbelerin sismik performansları lineer olmayan sonlu eleman modelleri ile temsil edilmiştir. Sonlu eleman modellerinin geliştirilmesi aşamasında varsayım ve kararları desteklemek için kubbelerin titreşim tepkilerini yapılar üzerinde gerçekleştirilen ölçümlerle belirlemişlerdir. Ölçülen mod şekilleriyle görsel açıdan doğal frekanslarla yakın uyum olacak şekilde sonlu eleman modelleri geliştirmişlerdir. Son olarak 1940 El Centro deprem ivme kayıtlarını kullanarak sismik yükleme altında iki farklı kubbenin performansını belirlemişlerdir.

#### **1.4. Tezin Amacı ve Kapsamı**

Bu tez çalışmamda, Dünya'da ve Ülkemizde birçok tarihi yapı uygulamasında sıklıkla karşılaşılan, yapılarda örtü elemanı olarak yada yapının mimari önem taşıması adına inşa edilmiş olan kubbelerin Deneysel Modal Analiz yöntemi kullanılarak dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi ve elde edilen dinamik parametreler yardımıyla başlangıç



sonlu eleman modelinin model güncelleme yöntemiyle gerçek durumu yansıtabilecek şekilde iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Hamza Paşa Türbesi ve Kavak Meydan Şadırvanı olarak bilinen iki farklı tarihi kubbeli yapı incelenmiştir.

Genel Bilgiler bölümünde, kubbelerin mevcut yapılardaki görevlerinden, kubbeli yapılarda yük aktarımından, dünyadaki kubbeli yapılara ait önemli bazı örneklerden ve tarihi yapıların modelleme stratejilerinden bahsedilmektedir. Daha sonra, dinamik karakteristiklerin belirlenmesi kısmında Teorik ve Deneysel Modal Analiz'den bahsedilmekte ve ilgili formülasyonlar verilmektedir. Ayrıca Deneysel Modal Analiz'de kullanılan ekipmanlar hakkında bilgi verilmekte, dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde kullanılan yöntemlerden bahsedilmektedir. Genel Bilgiler bölümünde son olarak model iyileştirme yöntemleri hakkında genel bilgi verilmektedir.

Yapılan Çalışmalar bölümünde, tez çalışması için seçilen kubbeli yapılar hakkında genel bilgiler verilmektedir. Yapıların başlangıç sonlu eleman modellerinin oluşturulmasına değinilmektedir. Sonrasında ise Teorik ve Deneysel Modal Analiz'in yapılar üzerinde uygulamasından bahsedilmektedir. Son olarak modal parametrelerin teorik ve deneysel sonuçları verilmektedir.

Üçüncü bölüm başlığı olan İrdeleme ve Değerlendirmeler bölümünde her iki yapıda gerçekleştirilen Teorik ve Deneysel Modal Analiz sonucunda elde edilen modal karakteristiklerin karşılaştırılması yapılmakta; deneysel veriler kullanılarak başlangıç analitik modeller gerçeği yansıtabilecek şekilde iyileştirilmektedir.

Son bölüm olan Sonuçlar ve Öneriler başlığı altında her iki yapıya uygulanan analitik ve deneysel çalışmaların sonuçları karşılaştırılmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmalardan çıkarılan sonuçlar ve gelecek çalışmalara ışık tutacağı ümit edilen bazı öneriler sunulmaktadır.

### **1.5. Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi**

Bir yapıya ait dinamik karakteristikler doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekilleri olarak bilinmektedir. Bu karakteristikler modal analiz yöntemlerinin gerçekleştirilmesiyle belirlenebilmektedir. Modal analiz yöntemleri Teorik ve Deneysel Modal Analiz yöntemi olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

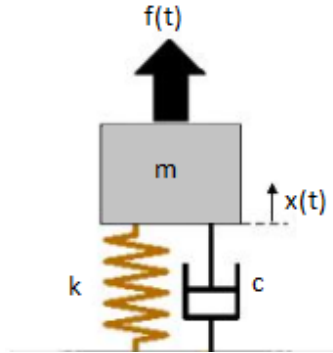
### 1.5.1. Teorik Modal Analiz Yöntemi

Modal analizin teorik olarak gerçekleştirilmesi işleminde yapıya ait kütle ve rijitlik özelliklerinden yararlanılmakta; bu şekilde doğal frekanslar ve mod şekilleri elde edilmektedir. Tek ve çok serbestlik dereceli sistemler için formülasyon aşağıda verilmektedir.

#### 1.5.1.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

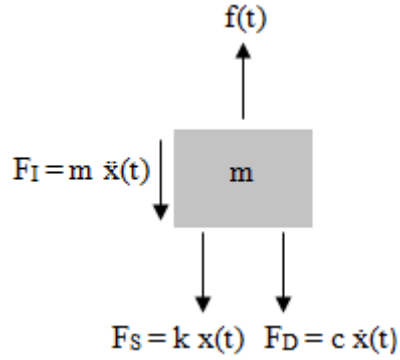
Yapılar teorik olarak çok serbestlik dereceli sistemler olmalarına rağmen bu sistemler tek serbestlik dereceli sistemlerin süperpozisyonu olarak hesaplanabilmektedir. Bu sebepten dolayı öncelikle Tek Serbestlik Dereceli Sistemlerde frekans davranış fonksiyonlarının elde edilmesi gerekmektedir.

Bir serbestliğe sahip en basit sistemlere Tek Serbestlik Dereceli Sistemler (TSDS) denir ve tek serbestlik dereceli bir sistemin analitik modeli Şekil 1.49'da verilmektedir (Chopra, 1995; 2006).



Şekil 1.49. Tek serbestlik dereceli bir sistemin analitik modeli

Şekil 1.49'da verilen analitik model kullanılarak elde edilen matematik model Şekil 1.50'de sunulmaktadır.



Şekil 1.50. TSDS'in matematik modeli

Şekil 1.50'deki serbest cisim diyagramı üzerinden denge denklemi yazılırsa,

$$F_I + F_D + F_S = f(t) \quad (1.3)$$

elde edilmektedir. Burada  $F_I$  atalet kuvvetini,  $F_D$  sönüm kuvvetini ve  $F_S$  yaydaki elastik şekil değişiminden dolayı yayda oluşan kuvveti göstermektedir. (1.3) denkleminde gerekli ifadeler yerlerine yazıldığında tek serbestlik dereceli sistemler için genel hareket denklemi,

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = f(t) \quad (1.4)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada;  $m$ ,  $c$  ve  $k$  sırasıyla yapının kütesini, sönümünü ve rijitliğini,  $\ddot{x}(t)$  yapının ivmesini,  $\dot{x}(t)$  yapının hızını  $x(t)$  yapının yer değiştirmesini ve  $f(t)$  ise yapıya uygulanan kuvveti göstermektedir. Sönümsüz tek serbestlik dereceli bir sistemin hareket denklemini elde etmek istediğimizde (1.4) denkleminde  $c = 0$  yazılır ve bu hareket denklemi,

$$m \ddot{x}(t) + k x(t) = f(t) \quad (1.5)$$

şeklinde elde edilir. Yapının sönümsüz serbest titreşim yaptığı düşünülürse,  $f(t) = 0$  için (1.5) denklemi düzenlenirse,

$$m \ddot{x}(t) + k x(t) = 0 \quad (1.6)$$

elde edilir. Bu denklem çözümlerse,

$$k - \omega^2 m = 0 \quad (1.7)$$

ve

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.8)$$

olarak sönümsüz doğal açısal frekans ( $\omega$ ) elde edilir.

Yapının zorlanmış sönümsüz titreşim yaptığı düşünüldüğünde hareket denklemi, (1.5) denkleminde verildiği şekildedir. Bu denklemin çözümü için,

$$f(t) = F e^{i\omega t} \quad (1.9)$$

ve

$$x(t) = X e^{i\omega t} \quad (1.10)$$

olarak kabul edilir ve bu ifadeler (1.5) teki hareket denkleminde yerine yazılıp düzenlenirse,

$$(k - \omega^2 m) X e^{i\omega t} = F e^{i\omega t} \quad (1.11)$$

ifadesi elde edilir. Burada; Burada, X yerdeğiştirme, F uygulanan kuvvet, t zaman ve i karmaşık sayı sembolüdür. Bu denklem kullanılarak, zorlanmış titreşim yapan sönümsüz bir yapının frekans davranış fonksiyonu  $H(\omega)$ ,

$$H(\omega) = \frac{X}{F} = \frac{1}{k - \omega^2 m} \quad (1.12)$$

şeklinde elde edilir.

Yapının viskoz sönümlü olması durumunda analitik model; kütle, sönüm ve rijitlik elemanlarından oluşmakta ve hareket denklemi (1.4)'te verildiği gibidir. Serbest titreşim durumunda ise hareket denklemi,

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = 0 \quad (1.13)$$

ifadesine dönüşür. Bu denklemin çözümü için,

$$x(t) = \mathbf{X} e^{st} \quad (1.14)$$

olduğu kabul edilirse (burada s karmaşık sayı olmak üzere) ve hareket denklemi düzenlenirse,

$$m s^2 + c s + k = 0 \quad (1.15)$$

denklemini elde edilir. Bu denklem çözülürse,

$$\begin{aligned} s_{1,2} &= -\frac{c}{2m} \mp \frac{\sqrt{c^2 - 4km}}{2m} \\ &= -\omega \xi \mp i \omega \sqrt{1 - \xi^2} \\ &= -\omega \xi \mp i \omega_d \end{aligned} \quad (1.16)$$

olarak elde edilir. Burada;  $\omega$  sönümsüz doğal açısal frekansı,  $\omega_d$  sönümlü doğal açısal frekansı ve  $\xi$  ise sönüm oranını göstermektedir. Bu ifadede geçen sönümlü doğal açısal frekans ve sönüm oranı,

$$\omega_d = \omega \sqrt{1 - \xi^2} \quad (1.17)$$

ve

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (1.18)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada;  $c_{cr}$  kritik sönümü göstermektedir. Bu şekilde elde edilen  $s_{1,2}$  değerleri (1.15) denklemindeki yer değiştirme ifadesinde yerine yazılırsa,

$$\begin{aligned} x(t) &= X e^{(-\omega\xi \mp i\omega\sqrt{1-\xi^2})t} \\ &= X e^{-\omega\xi t} e^{i(\omega\sqrt{1-\xi^2})t} \end{aligned} \quad (1.19)$$

elde edilir. Bu denklemde;  $\omega\xi$  olarak yazılan ifade gerçek kısmı,  $\omega\sqrt{1-\xi^2}$  olarak yazılan ifade ise sanal kısmı gösterir.

Yapının zorlanmış titreşim yaptığı düşünüldüğünde, hareket denklemi (1.4) denkleminde verildiği şekildedir. Bu denklemin çözümü için,

$$f(t) = F e^{i\omega t} \quad (1.20)$$

ve

$$x(t) = X e^{i\omega t} \quad (1.21)$$

olarak kabul edilirse ve bu ifadeler (1.13) hareket denkleminde yerine yazılıp düzenlenirse,

$$(-\omega^2 m + i \omega c + k) X e^{i\omega t} = F e^{i\omega t} \quad (1.22)$$

denklemi elde edilir. Bu denklemden, zorlanmış titreşim yapan viskoz sönümlü bir yapının frekans davranış fonksiyonu  $H(\omega)$ ,

$$H(\omega) = \alpha(\omega) = \frac{1}{(k - \omega^2 m) + i(\omega c)} \quad (1.23)$$

şeklinde elde edilir. Frekans davranış fonksiyonunun genlik ve faz açısı,

$$|\alpha(\omega)| = \frac{|X|}{|F|} = \frac{1}{\sqrt{(k - \omega^2 m)^2 + (\omega c)^2}} \quad (1.24)$$

ve

$$\angle\alpha(\omega) = \angle X - \angle F = \text{tg}^{-1}(-\omega c / (k - \omega^2 m)) = -\theta_\alpha \quad (1.25)$$

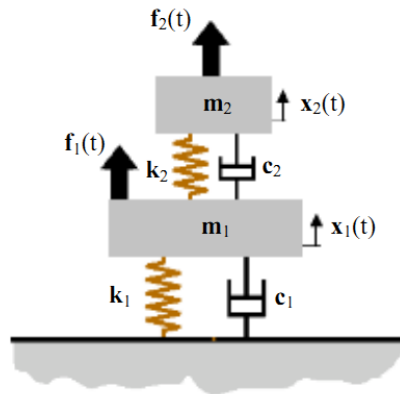
ifadesiyle elde edilir. Burada;  $|\alpha(\omega)|$  ve  $\theta_\alpha$  sırasıyla frekans davranış fonksiyonuna ait genlik ve faz değerini göstermektedir.

### 1.5.1.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Gerçekte sistemlerin çoğu çok serbestlik dereceli sistemlerdir. Tek serbestlik dereceli sistemlerin titreşimindeki skaler değerlerin yerini, çok serbestlik dereceli sistemlerde vektörel ve matris büyüklükler alır. Çok serbestlik dereceli sistemlerde genel hareket denklemi (Chopra, 2006),

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (1.26)$$

denklemi ile ifade edilmektedir. Burada,  $[M]$ ,  $[C]$  ve  $[K]$  sırasıyla çok serbestlik dereceli sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini ve  $\{\ddot{x}(t)\}$ ,  $\{\dot{x}(t)\}$ ,  $\{x(t)\}$  ve  $\{f(t)\}$  ise sırasıyla çok serbestlik dereceli sistemin zamana bağlı ivme, hız, yerdeğiştirme ve kuvvet vektörlerini göstermektedirler. Çok serbestlik dereceli sistemlere örnek olması adına iki serbestlik dereceli bir sistemin kütle-yay-sönüm teorik modeli Şekil 1.51'de verilmiştir.



Şekil 1.51. İki serbestlik dereceli bir sistemin analitik modeli



Yapıda sönüm olmaması durumunda, analitik model kütle ve rijitlik terimleriyle ifade edilir. Bu durumda hareket denklemi,

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{x}}(t)\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{x}(t)\} = \{\mathbf{f}(t)\} \quad (1.27)$$

bağıntısıyla verilir. Yapının doğal frekanslarını veya modal özelliklerini bulmak için yapının serbest titreşim yaptığı düşünülürse, bu durumda hareket denklemi,

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{x}}(t)\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{x}(t)\} = \{\mathbf{0}\} \quad (1.28)$$

olarak verilir. Bu denklemin çözümü için,

$$\{\mathbf{x}(t)\} = \{\mathbf{X}\} e^{i\omega t} \quad (1.29)$$

olduğu varsayılır. Burada;  $\{\mathbf{X}\}$   $N \times 1$  boyutunda zamandan bağımsız genliği göstermektedir.

(1.29) denklemi kullanılarak (1.28) denklemi çözülürse,

$$([\mathbf{K}] - \omega^2 [\mathbf{M}])\{\mathbf{X}\} e^{i\omega t} = \{\mathbf{0}\} \quad (1.30)$$

denklemi elde edilir. Bu denklemin sıfırdan farklı çözümü için,

$$\det[\mathbf{K}] - \omega^2 [\mathbf{M}] = 0 \quad (1.33)$$

olmalıdır. Bu denklemin çözümünden  $N$  serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal açısız frekans (öz vektör)  $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_N)$  elde edilir. Her bir doğal frekansa karşılık yapının almış olduğu şekil, mod şekli olarak tanımlanır. Doğal frekansların küçükten büyüğe doğru sıralanması sonucunda elde edilen en küçük frekans temel frekans ve bu frekansa karşılık gelen mod şekli temel mod şekli olarak adlandırılır (Petyt, 1990).

Yapının tepki modelini oluşturmak için yapının aynı frekansta fakat değişen genlik ve fazda sinüzoidal bir kuvvetle titreştirildiği düşünülürse, bu durumda kuvvet ve yer değiştirme vektörleri sırasıyla,

$$\{f(t)\} = \{F\} e^{i\omega t} \quad (1.34)$$

ve

$$\{x(t)\} = \{X\} e^{i\omega t} \quad (1.35)$$

olarak kabul edilir. Burada  $\{F\}$  ve  $\{X\}$   $N \times 1$  boyutunda zamandan bağımsız kompleks genlikli vektörlerdir. (1.34) ve (1.35) ifadeleri (1.27) hareket denkleminde yerine yazılır ve düzenleme yapılırsa,

$$([K] - \omega^2 [M]) \{X\} e^{i\omega t} = \{F\} e^{i\omega t} \quad (1.36)$$

elde edilir. Bilinmeyen tepkinin çözümü için bu ifade tekrar düzenlenirse,

$$\{X\} = ([K] - \omega^2 [M])^{-1} \{F\} \quad (1.37)$$

ve

$$\{X\} = [\alpha(\omega)] \{F\} \quad (1.38)$$

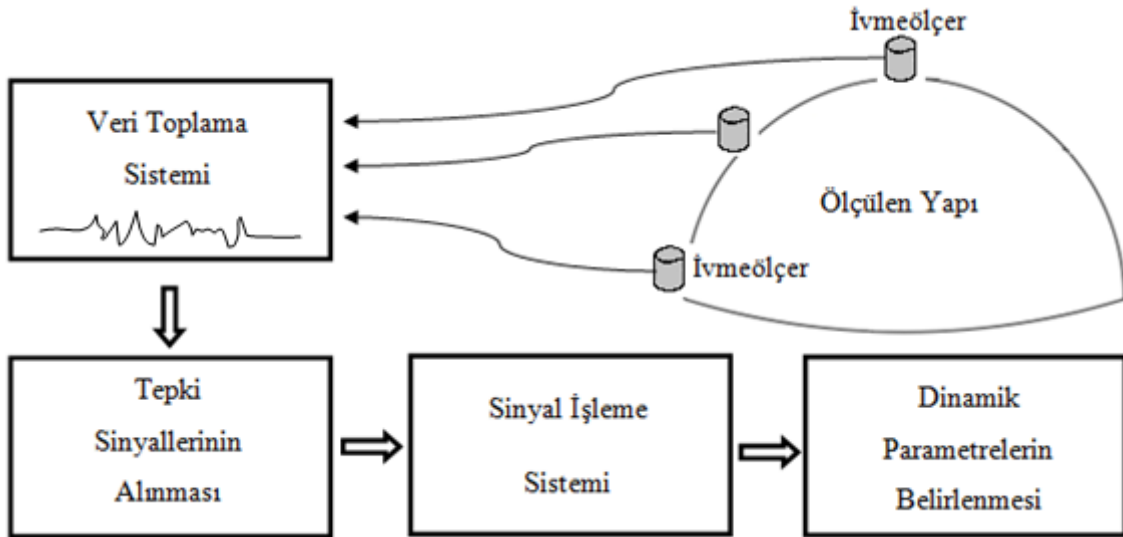
elde edilir. Burada  $[\alpha(\omega)]$   $N \times N$  boyutunda frekans davranış fonksiyonudur.

### 1.5.2. Deneysel Modal Analiz Yöntemi

Bu yöntemde yapıda oluşan titreşimlerden yararlanılarak yapıya ait dinamik karakteristikler elde edilmektedir. Burada titreşimin bilinip bilinmemesi kullanılacak yöntem açısından önemlidir. Eğer bir yapıya uygulanan titreşimler biliniyorsa Geleneksel Modal Analiz yöntemi, eğer bilinmiyor, çevresel etkilerin (rüzgar, araç ve yaya trafiği vs.) oluşturduğu titreşimlerden yararlanılıyorsa Operasyonel Modal Analiz adı altında inceleme

yapılmaktadır. Yapılan çalışmalarda Operasyonel Modal Analiz uygulaması gerçekleştirildiği için sadece bu analize değinilecektir.

Operasyonel Modal Analiz yönteminde yukarıda da belirtildiği gibi yapıya etkiyen titreşimler bilinmemektedir. Bu titreşimler çevresel etkilerden oluşmakta; titreşimlere verilen tepkiler zaman ve frekans ortamında işlenerek yapılara ait dinamik karakteristikler deneysel olarak belirlenebilmektedir. Titreşimlerin çevresel kaynaklı olmasından dolayı yapıya etkiyen titreşimlerin genliği ve buna bağlı olan zamanla değişimi bilinmemektedir. Doğal titreşim kaynakları bazen trafik ya da yaya yükü olurken bazen yer sarsıntıları bazen ise rüzgar kaynaklı olabilmektedirler. Gürültü ise yapılarda olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Bu durumda titreşimlerden oluşan tepkilerin işleme yönteminin doğru seçilmesi ve bu olumsuzluğun seçilen yöntemle giderilmesi önem arz etmektedir. Örnek olarak bir Operasyonel Modal Analiz ölçüm düzeneği Şekil 1.52’de verilmiştir.



Şekil 1.52. Operasyonel Modal Analiz yöntemine ait ölçüm düzeneği

### 1.5.2.1. Genel Kurallar

Deneysel Modal Analiz yöntemi daha öncede bahsedildiği gibi Zorlanmış ve Çevresel Titreşim Testi yöntemi olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Hangi yöntemin kullanılacağı, ölçülecek yapının hacimsel büyüklüğü, çevresel koşulların durumu gibi sebeplere bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, yapının hacimsel olarak büyük (baraj, köprü

vb.) olması durumunda yapıda titreştiriciler kullanılarak titreşim oluşturulması hem çok zordur hem de oldukça maliyetlidir. Ayrıca diğer önemli faktör, böylesi büyük yapıların belirli bölgelerine uygulanan darbe çekiçleri, sarsıcılar vs. ile titreştirilmesinin tüm yapıda aynı etkiyi yaratmayacağı ve elde edilen sonuçlarında tüm yapıyı temsil etmeyeceğidir. Bu durumda çevresel koşullardan yararlanmak gerekmektedir. Çevresel etkiler yapının tümünü etkilenmekte ve yapı genelinde titreşim oluşmaktadır. Elde edilen sonuçların da yapı genelini temsil ettiği rahatlıkla söylenebilmektedir. Ancak bazen çevresel koşullar yapıda titreşim oluşturmak için elverişli olmamaktadır. Tüm bu durumlar göz önüne alınarak en uygun deneysel yöntem seçilerek gerçek yapıyı en iyi temsil edecek deneysel parametreler elde edilmektedir.

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen parametrelerin geçerli olabilmesi için ölçüm süresince bazı temel kabuller yapılmaktadır. Bu kabuller;

- Titreşimlerin küçük olduğu bu yüzden de yapının lineer davranış sergilediği, aksi halde büyük titreşimlere maruz kalan yapılardan doğru sonuç elde edilemeyeceği,
- Yapısal davranışın zamanla değişmediği,
- Yapının bir bütün ve sürekli olduğu,
- Deneysel ölçümlerde malzeme özellikleri, sınır şartları gibi değerlerin sıcaklık, nem vb. gibi bir etki altında herhangi bir değişime uğramadığı şeklinde sıralanabilir.

### **1.5.2.2. Ölçüm Ekipmanları**

#### **1.5.2.2.1. Titreştiriciler**

Deneysel Modal Analiz yöntemi ile yapılarda iki farklı titreşim oluşturulabilmektedir. Bu titreşimler yapay ya da doğal kaynaklı olmaktadır. Eğer titreşim bir darbe çekici, sarma tablası ya da sarsıcılar tarafından yapay olarak oluşturuluyorsa yapıda zorlanmış titreşim oluşmakta ve titreşim oluşturan kuvvet ve genlik bilinmektedir. Trafik yükü, yaya yükü, rüzgar, patlatma etkisi, dalga gibi birçok doğal ve çevresel etkilerle yapı üzerinde doğal kaynaklı titreştiriciler yardımıyla titreşim oluşturulması ise çevresel titreşim olarak ifade edilmektedir. Yapay ya da doğal titreştiricilerin hangisinin kullanılacağı yapının büyüklüğüne ve rijitliği göre belirlenmektedir. Yapının büyük ölçekli olması durumunda çok sayıda darbe

çekici vb. titreştiricilerin kullanılması hem uygulanabilirlik hem de ölçüm maliyeti bakımından zorlayıcı olacağından genellikle doğal kaynaklı titreştiricilerden yararlanılmaktadır. Bu çalışmada doğal titreştiricilerden yararlanmak için Operasyonel Modal Analiz yöntemi tercih edilmiştir. Doğal titreştiriciler kullanıldığı için ölçüm ekipmanlarından sarsma tablası, darbe çekici ve sarsıcılar ayrıca açıklanmayacaktır.

#### 1.5.2.2.2. İvmeölçerler

İvmeölçerler yapılarda oluşan titreşimleri ölçmek için kullanılan tepki dönüştürücülerdir. İvmeölçerler yapıya farklı şekillerde yerleştirilebilmektedirler. Örneğin, yapışkan bir madde, mıknaş, vida vb. malzemeler ivmeölçerin yapıya monte edilebilmesi için kullanılmaktadırlar. Yapıda oluşan titreşimlere karşı elektriksel voltajın üretilmesi ve bunun taşınabilir voltaj sinyali olarak veri toplama ünitesi aktarılması ivmeölçerlerin başlıca görevlerindedir. İvmeölçerler, uygulanacak yapının hacimsel büyüklüğüne ve yapılacak ölçümün amacına göre değişik şekillerde seçilebilmektedirler. Eğer bir ivmeölçerin hassasiyeti yüksek ise ivmeölçerin büyüklüğü ve ağırlığı da fazladır. Bu durumda bu tip ivmeölçerlerin hassas ve küçük ölçekli yapılarda kullanılması doğru olmayacaktır. Kullanılacak ivmeölçerler,

- Hassasiyet,
- Ölçüm frekans aralığı,
- Maksimum ivme değeri,
- Ortam sıcaklığı,
- İvmeölçer ağırlığı

gibi durumlar dikkate alınarak seçilmelidir (Türker, 2011).

Yapılan ölçümlerde hem Hamza Paşa Türbesi hem de Kavak Meydan Şadırvanı'nda türü B&K8340 olan tek eksenli sismik ivmeölçerler kullanılmış ve ivmeölçerlerin kubbeler üzerindeki bağlantıları dübel ve vida yardımıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.53).



Şekil 1.53. B&K tipi tek eksenli sismik ivmeölçer örnekleri

### 1.5.2.2.3. Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme

Veri toplama sistemi yapıdan alınan titreşimlerin ivmeölçerler aracılığıyla elektrik sinyallerine dönüştürülüp veri toplama ünitesine aktarılması ile işlevine başlamaktadır. Bu durumda veri toplama sistemi iki ana kısımdan oluşmakta; birincisi veri toplama ünitesi diğeri ise koşullanan sinyallerin aktarıldığı bilgisayar ortamıdır. Sinyallerin koşullanması işlemi istenmeyen durumların filtrelendiği ya da sinyallere istenilen bazı özelliklerin kazandırılması için yapılan çalışmalardır. Ancak sinyal işleme sisteminin asıl amacı ivmeölçerlerden gelen sinyaller içerisinde istenmeyen gürültünün varlığına müdahale edilerek gürültünün dinamik karakteristikler üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak ya da kaldırmaktır. Sinyal filtreleme işleminin gerçekleşmesinden sonra sinyaller bilgisayar ortamına aktarılarak sinyal işleme aşaması gerçekleştirilmektedir. Bu aşama bilgisayar ortamında geliştirilen özel yazılımlar sayesinde gerçekleştirilmektedir.

Çalışmalarda veri toplama ünitesi olarak tipi B&K3560 olan 17 kanallı bir düzenek kullanılmış ve filtreleme işleminden sonra bilgisayar ortamına aktarılması sırasında PULSE (PULSE, 2006) yazılımından yararlanılmış, sinyaller OMA yazılımı kullanılarak işlenmiş ve yapılara ait dinamik karakteristiklerin belirlenmesi sağlanmıştır (OMA, 2006). Aşağıdaki Şekil 1.54'te, çalışmalarda kullanılan veri toplama sistemine ait örnek verilmiştir.



Şekil 1.54. Tipi B&K3560 olan 17 kanallı veri toplama ünitesi ve bilgisayar ortamı

### 1.5.2.3. Modal Parametrelerin Elde Edilme Yöntemleri

Çevresel titreşimlerden yararlanılarak gerçekleştirilen Operasyonel Modal Analiz yönteminde hem tepki bilinmemekte hem de ölçüm belirli noktalarda gerçekleştirilmektedir. Bu durumda dinamik parametreler, belirli noktalardan alınan titreşimlerin frekans ve zaman tanım alanında algoritmalara sahip yöntemlerde kullanılması ile elde edilmektedir (Brincker vd., 2003). Bu iki yöntemin birbirinden kesin üstünlükleri olmamasına rağmen bazı farklılıklardan söz edilebilmektedir. Örneğin, zaman tanım alanına dayalı yöntem çözümünde gürültü daha kolay fark edilmekte ve kolaylıkla filtrelene işlemi gerçekleştirilmektedir. Bunun yanında sinyal işleme sırasındaki bazı kusurlarda kontrol edilebilmektedir. Ayrıca zaman tanım alanı yönteminin kullanılmasıyla birbirine yakın frekans değerlerinin tespiti daha kolay olmaktadır (Ramos, 2007). İki yöntemde kullanım amacına göre sıklıkla kullanılmaktadır.

Yapılan çalışmalarda OMA (2006) yazılımında yer alan ve literatürde sıklıkla rastlanan yöntemlerden Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) Yöntemi ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi kullanılmıştır.



### 1.5.2.3.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi

Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (FTAA) Yönteminin geliştirilmiş haline Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemi denir. Bu yöntem frekans ortamına dayalı bir yöntemdir. Bu durumda GFTAA yönteminin FTAA yöntemine göre bazı üstünlükleri vardır. Mesela; GFTAA yönteminde doğal frekanslar ve mod şekillerinin yanında modal sönüm oranları da belirlenebilmektedir. Bununla birlikte, piklerin seçilmesi ile gerçekleşen bir işlem olduğu için bazı dezavantajlar ortaya çıkmaktadır. Çünkü piklerin seçimi objektif değil subjektif bir konudur ve bu durumda sonuçların güvenilirliği azalmaktadır. Sönüm maksimum genliğe bağlı olarak hesaplandığı için maksimum genliğin doğruluğu, belirlenecek sönümü de o derecede etkilemekte ve sönüm tahminlerinin güvenilirliği azalmaktadır (Bayraktar vd., 2008; Peeters, 2000). Avantajları ve dezavantajları olmasına rağmen GFTAA yöntemi modal analizin sinyal işleme aşamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemin çevresel titreşim altında bilinmeyen etki kuvveti ve ölçülebilen tepki kuvveti yani davranış fonksiyonu altındaki teorik bağıntısı,

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega)^* G_{xx}(j\omega)H(j\omega)^T \quad (1.39)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Bendat ve Piersol, 2004). Burada  $G_{xx}(j\omega)$  etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu,  $G_{yy}(j\omega)$  tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu ve  $H(j\omega)$  frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir.

Denklem (1.40) \* ve T sırasıyla ifadelerin kompleks eşleniğini ve transpozisini göstermektedir. Matematiksel düzenlemelerden sonra tepki sinyaline ait Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda (Jacobsen vd., 2006),

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.40)$$

şeklinde elde edilmektedir (Bendat ve Piersol, 2004). Burada  $n$  mod sayısını,  $\lambda_k$ , kutup fonksiyonunu ve  $R_k$ , artık değer fonksiyonunu göstermektedir. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra denklem (1.39),

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[ \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] G_{xx}(j\omega) \left[ \frac{R_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{R_s^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right]^{\bar{H}} \quad (1.41)$$

şeklinde elde edilmektedir (Brincker vd., 2000). Burada;  $s$ , tekil değerleri,  $\bar{H}$ , kompleks eşleniği ve transpozeyi ifade etmektedir.

Matematiksel ifadeler sadeleştirildiğinde tepki sinyaline ait GSY fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda,

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{A_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{B_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{B_k^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.42)$$

şeklinde elde edilmektedir (Brincker vd., 2000). Burada  $A_k$ , tepki sinyalinin GSY fonksiyonuna ait  $k$  artık değer matrisini göstermektedir.

GFTAA yönteminde ilk adım GSY matrisini belirlemektir. Ayrık frekanslarda tepki sinyalinin GSY'nun tahmini  $\omega = \omega_i$  olarak bilinmekte ve sonra tekil değer ayrıştırım matrisi alınarak ayrıştırılmaktadır (Brincker vd., 2000). Buna göre denklem (1.42),

$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^{\bar{H}} \quad (1.43)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $u_{ij}$  tekil vektörleri,  $U_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]$  tekil vektörleri içeren bütün matrisi,  $s_{ij}$  skaler tekil değerleri ve  $S_i = [s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im}]$  skaler tekil değerleri içeren diyagonal matrisi göstermektedir.

Denklem (1.43)'te verilen GSY fonksiyonunda, pik değer yapan noktalar doğal frekanslara karşılık gelmektedir. Pik noktaları oluşturan tekil vektörler ( $u_{ij}$ ) ise doğal mod şekillerine karşılık gelmektedir (Brincker vd., 2000).

### 1.5.2.3.2. Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi

Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemi zaman tanım alanında doğrudan çalışıp veri veren ve bu durumda spektral dönüşüme veya korelasyona ihtiyaç duyulmayan bir yöntemdir. Gürültüden oluşan olumsuz etkilere müdahalenin yapılabildiği bu yöntem dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için uygun ve kullanışlı bir yöntemdir (Overschee ve Moor, 1996; Peeters ve Roeck, 2000). Bu yöntemde dikkate alınan formülasyon ve bağıntılar hareket denklemlerine bağlı olarak aşağıda verilmekte; yapı sisteminin dinamik davranışı lineer, sabit katsayılı ikinci derece diferansiyel denklem olarak düşünülmektedir.

$$[M]\{\ddot{U}(t)\} + [C]\{\dot{U}(t)\} + [K]\{U(t)\} = \{R(t)\} = [B]\{u(t)\} \quad (1.44)$$

Burada;  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$  sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini,  $R(t)$  titreşim kuvvetini,  $\{U(t)\}$ ,  $\{\dot{U}(t)\}$ ,  $\{\ddot{U}(t)\}$  ise zamana bağlı yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir.

Burada,  $\{R(t)\}$  kuvvet vektörü, ortamdaki verileri simgeleyen  $[B]$  matrisi ve  $\{u(t)\}$  vektörü cinsinden ifade edilebilmektedir. Dinamik denge denklemi, denklem (1.44), titreşen yapının davranışını temsil etmesine rağmen bu şekliyle SAB yöntemine uygun değildir. Bu yüzden, denklem (1.44) daha uygun bir form olan ayrık-zaman stokastik durum-uzayı modeline dönüştürülmektedir. Durum-Uzay modeli kontrol teorisinden üretilmekte, fakat bu model inşaat mühendisliğinde viskoz sönüme sahip yapıların dinamik karakteristiklerini hesaplamak için kullanılmaktadır (Yu ve Ren, 2005). Aşağıdaki tanımlamalar kullanılarak (1.44) denklemi,

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= \begin{pmatrix} U(t) \\ \dot{U}(t) \end{pmatrix} \\ A_* &= \begin{pmatrix} 0 & I_{n_2} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{pmatrix} \\ B_* &= \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}B \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1.45)$$

$$\dot{x}(t) = A_*x(t) + B_*u(t) \quad (1.46)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada,  $A_*$  durum matrisini,  $B_*$  veri matrisini ve  $x(t)$  durum vektörünü göstermektedir.

Çevresel titreşim testlerinde, yapının bütün serbestliklerini ölçmek pek mümkün olmamaktadır. Dolayısıyla, durum-uzay vektörünün eleman sayısı, sistemin durumunu tanımlayan bağımsız değişken sayısına eşittir ve gözlem denklemi,

$$y(t) = C_*x(t) + D_*u(t) \quad (1.47)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada,  $C_*$  sistem davranış matrisini,  $D_*$  doğrudan iletim matrisini göstermektedir. Denklem (1.46) ve (1.47) sürekli-zaman belirli durum-uzayı modelini oluşturmaktadır. Burada, “Sürekli Zaman” ile ifadelerin herhangi bir  $t \in \mathbb{N}$  anında değerlendirilebileceği ifade edilmektedir. Fakat ölçümler  $k\Delta t$  ( $k \in \mathbb{N}$ ) gibi ayırık zamanlarda gerçekleştirilmektedir. Örnekleme süresi ve ortamdaki gürültü sinyal verilerini her zaman için etkilemektedir. Örneklemeden sonra, durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= A_*x_k + B_*u_k \\ y_k &= C_*x_k + D_*u_k \end{aligned} \right\} \quad (1.48)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada,  $x_k = x(k\Delta t)$  ayırık-zaman durum vektörünü,  $u_k$  belirgin etki sinyal vektörünü göstermektedir. Gerçek operasyonel koşullarda yapılan ölçümler, yapıya ve dış ortamdaki gürültüye ait sinyalleri içermektedir. Dolayısıyla denklem (1.48)’de stokastik gürültü bileşenleri eklendiğinde belirli-stokastik durum-uzayı modeli,

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= A_*x_k + B_*u_k + w_k \\ y_k &= C_*x_k + D_*u_k + v_k \end{aligned} \right\} \quad (1.49)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada,  $w_k$ , modeldeki belirsizlikler ve kusurlar nedeniyle işlenen gürültü sinyallerini,  $v_k$  ise ivmeölçer kusurlarından dolayı işlenen gürültü sinyalini göstermektedir. Her iki vektörde değeri ölçülemeyen sinyallerden oluşmaktadır. Etkisi olmayan beyaz gürültü ve kovaryans matrisleri,

$$E_* \left[ \begin{pmatrix} w_p \\ v_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_q^T & v_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (1.50)$$

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

$$\delta_{pq} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } p = q \\ 0, & \text{eğer } p \neq q \end{cases} \quad (1.51)$$

SAB yönteminde yapı sisteminin davranışı, normal operasyon koşullarında belirlenmektedir. Bu durumda, denklem (1.49)'da gösterilen belirgin sinyal verisi  $u_k$ 'yi, gürültü terimleri olan  $w_k$  ve  $v_k$ 'den ayırt etmek mümkün değildir. Bunun için,  $u_k$  gürültü terimleri  $w_k$  ve  $v_k$  cinsinden yazılıp yapının ayrık-zaman stokastik durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= A_* x_k + w_k \\ y_k &= C_* x_k + v_k \end{aligned} \right\} \quad (1.52)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (1.52), çevresel titreşimlerden dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde zaman tanım alanının temelini oluşturmaktadır.

## 1.6. Sonlu Eleman Model İyileştirme Yöntemleri

Sonlu eleman modeli oluşturularak teorik açıdan, modal analiz yapılarak deneysel açıdan incelenen bir yapı için her iki çözümde elde edilen değerler son derece önemlidir.

Teorik ve deneysel analizlerin her ikisinde de yapıya ait dinamik karakteristikler bulunmakta ve bu değerler arasında uyum olması beklenmektedir (Kaya, 2004). Fakat bu değerler arasında uyumun değil de birtakım farklılıkların olması genellikle teorik analiz için kullanılan sonlu eleman modelinin oluşturulması sırasında yapılan kabullerle ilgilidir. Çünkü sonlu eleman modelinin oluşturulması sırasında malzeme özelliklerinden, sınır şartlarına kadar birçok kabul yapılmakta; gerçek yapının bu kabul değerlere sahip olduğu varsayılmaktadır. Oysaki yapıyı gerçekten temsil eden değerler ancak o yapı üzerinde yapılacak olan deneysel ölçümler ve çeşitli deneylerle mümkün olabilmektedir. Deneysel Modal Analiz yöntemi yapı üzerinde gerçekleştirildiği için elde edilen veriler gerçek yapıyı temsil etmektedir. Bu durumda deneysel analiz sonuçlarından elde edilen veriler ışığında sonlu eleman modelinde yapılan kabullerin düzeltilmesi yani iyileştirilmesi gerekmektedir. Böylece kalibre edilen sonlu eleman modeli gerçek yapıyı temsil edebilecek duruma gelmektedir. Kısaca, teorik inceleme için oluşturulan sonlu eleman modelinin deneysel sonuçlardan elde edilen veriler kullanılarak yeniden düzenlenmesine Model İyileştirme Yöntemi adı verilmektedir. Gerçekleştirilen model iyileştirme işlemiyle sonlu eleman modeli deneysel olarak ta doğrulanmış olmaktadır. Yapının sonlu eleman modeli iki yöntemle iyileştirilebilmektedir. Bunlar;

- Deneme-Yanılma Yöntemi
- Optimizasyon Yöntemi'dir (Şahin, 2009).

Sonlu eleman modeli oluşturulurken malzeme özellikleri, sınır şartları, bilinmeyen kesit boyutları gibi birçok parametrede yapılan kabuller, belirsizlikleri açığa çıkarmaktadır. Modelin iyileştirme aşamasında belirsizliklerde yeniden bir veya birçok kez düzenlemeler yapılarak yapının gerçeği daha iyi temsil etmesi sağlanmaktadır. Eğer bu belirsiz parametrelerin düzenlenmesinden yararlanılarak model, veriler değiştirilerek iyileştiriliyorsa Deneme-Yanılma Yöntemi kullanılmış olmaktadır. Temelinde Deneme-Yanılma Yöntemi yatan Optimizasyon Yöntemi'nde ise belirsiz olan parametreler için tanımlanan belirli aralıktaki tüm değerlere ait ayrı ayrı analiz edilmesi ile model iyileştirme gerçekleştirilmektedir. Her değer için yapılan analiz sonuçları yine tek tek deneysel verilerle karşılaştırılarak deneysel verilere en yakın değerler için sonlu eleman modeli düzenlenmektedir. Bu durumda gerçeği en iyi temsil eden sonlu eleman modeli oluşturulmaktadır.

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

Tez çalışmasının bu kısmında, iki farklı tarihi yığma kubbeli yapı üzerinde Operasyonel Modal Analiz gerçekleştirilerek kubbeli yapılara ait dinamik davranışların elde edilmesi ve gerçeğe en yakın sonlu eleman modellerinin oluşturulması amaçlanmıştır. Kubbeli yapılar SAP2000 (SAP2000, 1997) programı yardımıyla modellenerek analitik olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda her iki kubbeli yapıya ait deneysel ve teorik karakteristikler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Teorik ve deneysel karakteristikler arasındaki farkın en aza indirgenmesi için başlangıç sonlu eleman modelleri üzerinde model iyileştirme, işlemleri modelleme sırasında yapılan kabuller (sınır şartları, malzeme özellikleri vs.) göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir.

### **2.1. İncelenen Kubbeli Yapılar ve Özellikleri**

Bu tez çalışmasında Hamza Paşa Türbesi ve Kavak Meydan Şadırvanı olmak üzere iki farklı uygulama örneği seçilmiş ve yapılar üzerinde teorik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

#### **2.1.1. Hamza Paşa Türbesi**

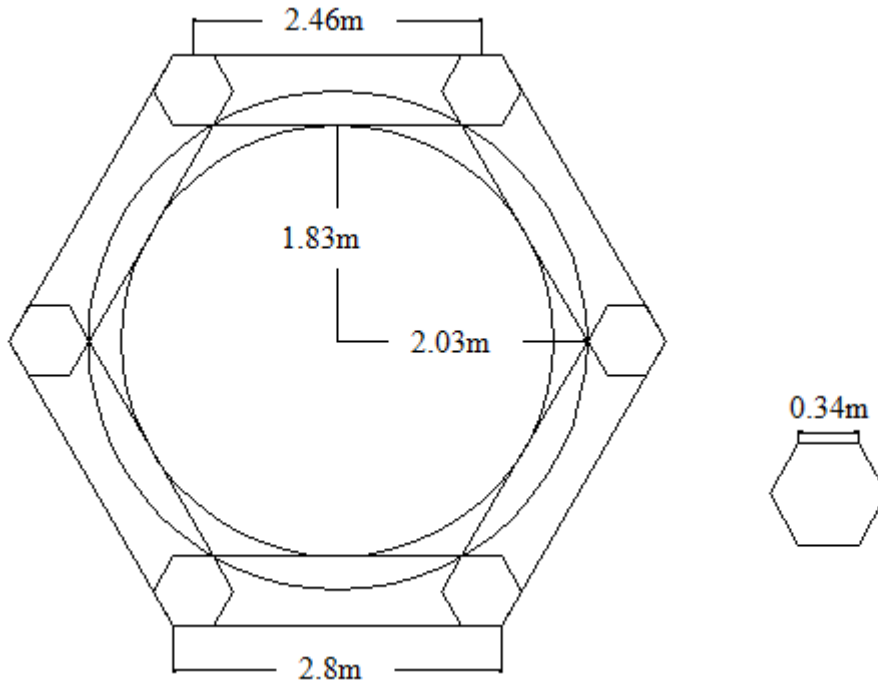
Bu eser Trabzon il merkezinde, Hamza Paşa Camisinin doğusunda yer alan Küçük İmaret Mezarlığında bulunmaktadır. Meyilli bir alana yapılan altıgen planlı türbenin köşelerinde bir paye ve bunların üzerine de basık bir kubbe oturtulmuştur. Siyah ve beyaz taşların alternatif biçimde sıralanmış oluşu kubbeye ilginç bir görünüm kazandırmaktadır. 18. yüzyılda tarihlenen Osmanlı mimarisindeki altı köşeli baldaken tarzı bir türbedir (URL-14 ve 15, 2012). Kubbeye ait resimler Şekil 2.1'de verilmektedir.





Şekil 2.1. Hamza Paşa Türbesi'ne ait görüşler

Türbeye ait herhangi bir mimari projenin mevcut olmamasından dolayı ön hazırlık için yerinde röleve çalışması yapılmıştır. Yapılan röleve çalışmasında basit ancak yapıya ait sonlu eleman modelinin oluşturulması ve Deneysel Modal Analiz uygulamasının gerçekleştirilmesi için kullanılacak yeterli ve gerekli boyutları içeren bir plan hazırlanmıştır. Plan Şekil 2.2'de verildiği gibi düzenlenmiştir.



Şekil 2.2. Hamza Paşa Türbesi için hazırlanan basit plan çizimi

Hamza Paşa Türbesi'nde kolonlar ile zemin arasındaki taban alanının yüksekliği 0.5m, mezarların bulunduğu toprak alanın dışında kalan taban genişliği 0.8m olarak ölçülmüştür. Kolonların her biri 2.30m yüksekliğinde olup, kolon üst ucundan kemer üst ucuna kadar olan yükseklik 1.40m, kemer üst ucundan kubbenin oturtulduğu tabana kadar olan yükseklik 0.2m, kubbe yüksekliği 1.70m ve kubbe kalınlığı 0.08m'dir.

### 2.1.2. Kavak Meydan Şadırvanı

Trabzon il merkezinin batısında eski Cirit Meydanı olarak bilinen yerde bulunan bu şadırvanın (çeşmenin) kitabesi günümüze ulaşamadığından yapan kişi ve yapım tarihi bilinmemektedir. Ancak yapı üslubundan yararlanılarak XVI. Yüzyılda yapıldığı sanılmaktadır. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi şadırvan (çeşme) kesme taştan yüksek bir kaide üzerine altıgen planlı olarak inşa edilmiştir. Mevcut altı sütun yuvarlak kemerlerle birbirine bağlanmış ve üzeri kubbe ile örtülmüştür. Cepheleri dışarıya açık olan çeşmenin ortasında altıgen bir su haznesi bulunmaktadır. Bu su haznesinin çevresine musluklar sıralanmıştır. Bazı kaynaklarda su haznesinin on cepheli olduğu ve onarımlardan dolayı değiştiği belirtilmektedir (URL-16, 2012).



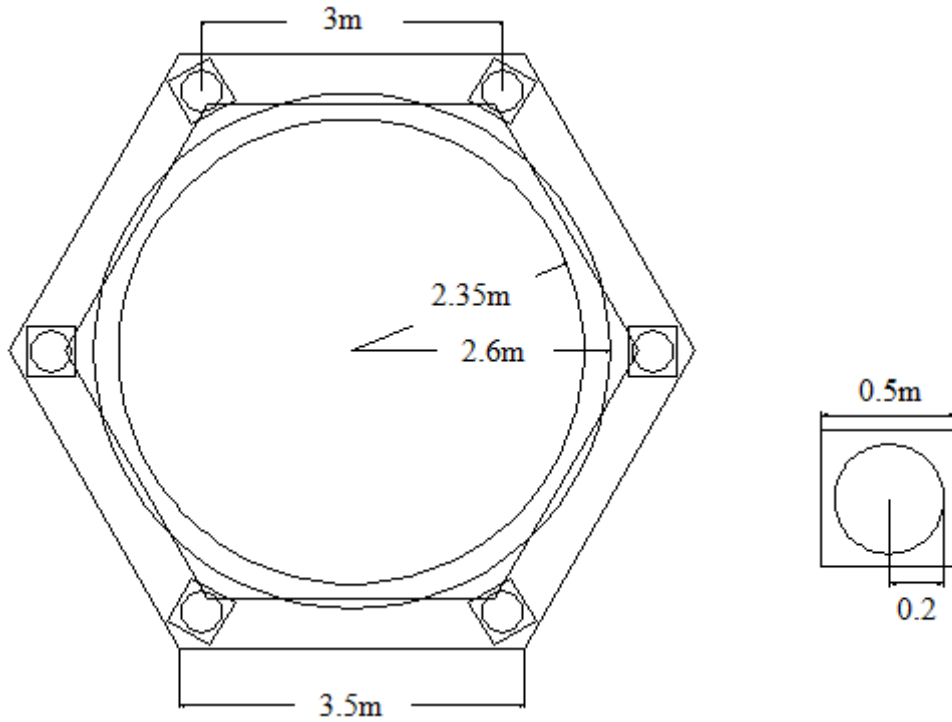
Şekil 2.3. Kavak Meydan Şadırvanı'na ait görünüşler

Şadırvana ait herhangi bir projenin mevcut olmamasından dolayı Şekil 2.4'te görüldüğü üzere ön hazırlık için türbe ölçümünde de olduğu gibi yerinde röleve çalışması yapılmıştır.



Şekil 2.4. Kavak Meydan Şadırvanı'na ait yerinde röleve çalışması

Yapılan röleve çalışmasında basit ancak yapıya ait sonlu eleman modelinin oluşturulması ve Deneysel Modal Analiz uygulamasının gerçekleştirilebilmesi için kullanılacak yeterli ve gerekli boyutları içeren bir plan hazırlanmıştır. Plan Şekil 2.5'te verildiği gibi düzenlenmiştir.



Şekil 2.5. Kavak Meydan Şadırvanı için hazırlanan basit plan çizimi

Kavak Meydan Şadırvanı'nda, kolonlar ile zemin arasındaki taban alanının yüksekliği 0.37m ve yan duvarların genişliği 0.6m'dir. Dairesel kolanların her birinin çapı 0.414m ve yüksekliği 2.45m'dir. Kemer yüksekliği 1.65m, kemer üst ucu ile kubbenin oturtulduğu alan arasındaki yükseklik 0.3m, kubbe yüksekliği 2.40m ve kubbe kalınlığı 0.10m olarak ölçülmüştür.

## 2.2. Seçilen Kubbeli Yapıların Teorik Modal Analizleri

Modal parametrelerin elde edilmesinde teorik ve deneysel modal analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Teorik Modal Analiz yönteminde, yapının analitik modeli Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak oluşturulmaktadır. Sonlu Elemanlar Yöntemi yaklaşık olarak bir sistem içerisinde gerilmelerin, yer değiştirmelerin ve kuvvetlerin dağılımlarının belirlendiği sayısal bir yöntemdir. SEY'nin uygulanabilmesi için geometri, malzeme özellikleri, sınır koşulları ve aynı zamanda mevcut ya da mümkün olabilecek yükler altında çalışan yapının davranışlarının idealize edilebileceği bir analitik model oluşturmak gerekmektedir. İdealize, sistemin nasıl davranacağı hakkındaki analiz kararına ve yapının çözümünde hangi yüklerin önemli olduğuna bağlıdır. Analitik model oluşturulması sırasında ise yapının gerçek davranışını temsil edecek elemanların seçilmesi, en yakın malzeme ve sınır koşullarının atanması oldukça önemlidir. Çünkü temsili modelin geometrik olarak gerçek yapıyı en iyi şekilde temsil etmiş olması malzeme özellikleri ve sınır koşulları açısından da aynı yakınlığa sahip olduğu anlamına gelmez (Atamtürktür, 2006). Bu durumda oluşturulan temsili modelin gerçek yapıyı temsil eden bir model olmaktan uzaklaşma olasılığı fazladır.

Tarihi bir yapının modellenmesinin betonarme bir yapının modellenmesinden oldukça farklı olması durumu ve bu farklılıkların sebepleri Genel Bilgiler kısmında yer alan Tarihi Yapıların Modelleme Stratejileri konu başlığı altında detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Özellikle tarihi bir yapının malzeme özelliklerinin belirlenmesi oldukça zor, bir o kadar da pahalı bir iştir. Bununla birlikte bazen yapının tarihsel dokusuna zarar verecek durumlar ortaya çıkabilmektedir. Bu durumlar göz önüne alınarak seçilen uygulama örneklerinin sonlu eleman modellerinin oluşturulmasında malzeme özelliklerinin tanımlanması aşamasında literatürde daha önce var olan çalışmalardan yararlanılmıştır.

## 2.2.1. Hamza Paşa Türbesi'nin Teorik Modal Analizi

### 2.2.1.1. Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Hamza Paşa Türbesi'nin sonlu elemanlar modeli oluşturulurken SAP2000 (SAP2000, 1997) programı kullanılmıştır. Türbeye ait malzeme özellikleri için tarihsel dokuya zarar verilmemesi ve belirleme aşamasında yaşanan zorluklardan dolayı literatürde var olan çalışmalardan yararlanılarak Tablo 2.1'de verilen değerler dikkate alınmıştır (Bayraktar vd., 2008).

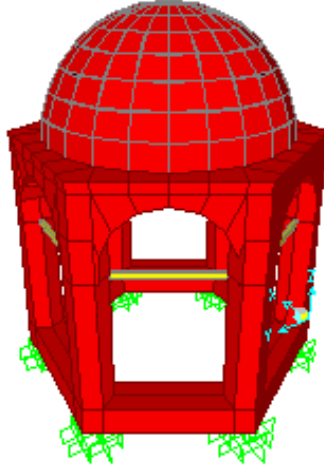
Tablo 2.1. Hamza Paşa Türbesi'nin teorik analizinde kullanılan malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (N/m <sup>2</sup> )	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
Taş	2.00×10 <sup>9</sup>	0.2	2169
Gergi	2.00×10 <sup>11</sup>	0.3	7850

Yapının matematiksel modelinin oluşturulması için gerekli olan bütün geometrik boyutlar, daha önce hazırlanmış ve belirtilmiş olan röleve çalışmalarından alınmıştır. Modelleme ve hesap parametreleri aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

- Yapının sonlu eleman modeli yerinde röleve çalışmasından elde edilen boyutlar kullanılarak SAP2000 programı yardımıyla oluşturulmuştur.
- Modelleme için üç boyutlu katı elemanlar, düzlem elemanlar ve çubuk elemanlar kullanılmıştır.
- Model, 158 adet üç boyutlu katı eleman, 192 adet düzlem eleman ve 6 adet çubuk elemandan oluşmaktadır.
- Mesnetlenme koşulu olarak tüm temel mesnetlerinin serbestliklerinin tutulu olduğu kabul edilmiştir.

Hamza Paşa Türbesi'ne ait sonlu eleman modeli Şekil 2.6'da verilmektedir.



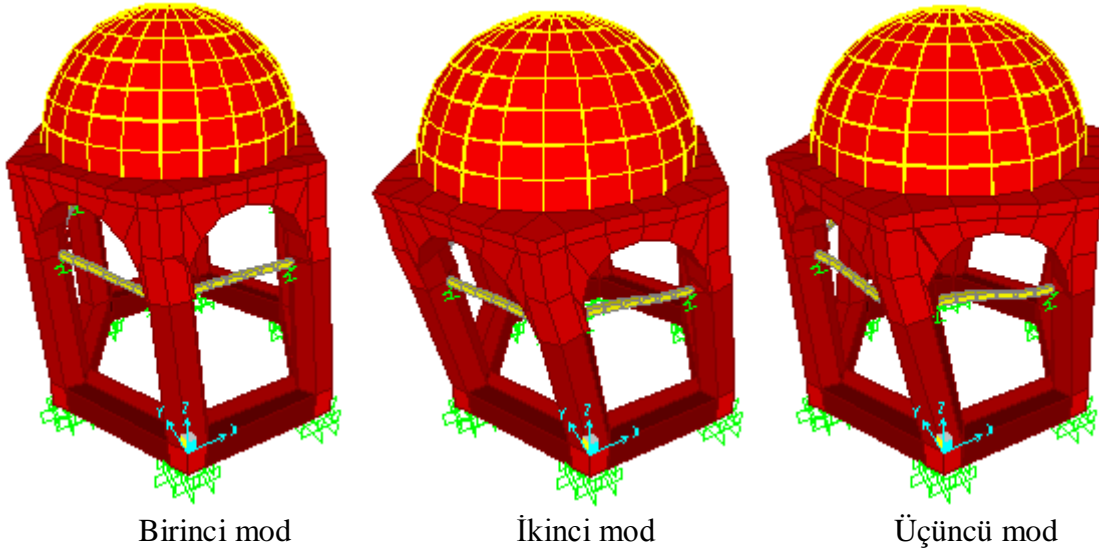
Şekil 2.6. Hamza Paşa Türbesi sonlu eleman modeli

### 2.2.1.2. Modal Parametrelerinin Belirlenmesi

Hamza Paşa Türbesi'ne ait SAP2000 sonlu elemanlar programı kullanılarak oluşturulan sonlu eleman modeli üzerinde Teorik Modal Analiz gerçekleştirilmiş; türbeye ait teorik dinamik karakteristikler olan doğal frekanslar ve mod şekilleri elde edilmiştir. Tarihi Hamza Paşa Türbesi'ne ait Teorik Modal Analiz sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli ve bu mod şekillerine karşılık gelen doğal frekans değerleri Tablo 2.2'de verilmektedir. Analiz sonuçlarına göre ilk üç teorik doğal frekans 6-9Hz arasında değerler almaktadır. Bu doğal frekans değerlerine karşılık gelen mod şekilleri incelendiğinde ise birinci modun y-ekseni doğrultusunda yanal, ikinci modun x-ekseni doğrultusunda yanal ve üçüncü modun ise burulma modu olduğu Şekil 2.7'de görülmektedir.

Tablo 2.2. Hamza Paşa Türbesi'ne ait analitik doğal frekanslar, periyotlar ve modal davranışlar

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Modal Davranış
1	6.305	0.159	Yanal mod
2	6.316	0.158	Yanal mod
3	8.212	0.123	Burulma modu



Şekil 2.7. Hamza Paşa Türbesi'ne ait analitik olarak elde edilen ilk üç mod şekli

## 2.2.2. Kavak Meydan Şadırvanı'nın Teorik Modal Analizi

### 2.2.2.1. Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Kavak Meydan Şadırvanı'na ait sonlu elemanlar modeli oluşturulurken SAP2000 (SAP2000, 1997) programı kullanılmıştır. Şadırvanın malzeme özellikleri için tarihsel dokuya zarar verilmemesi ve belirleme aşamasında yaşanan zorluklardan dolayı literatürde var olan çalışmalardan yararlanılarak Tablo 2.1'de verilen ve Hamza Paşa Türbesi'nin analitik modeli için de kullanılan değerler dikkate alınmıştır.

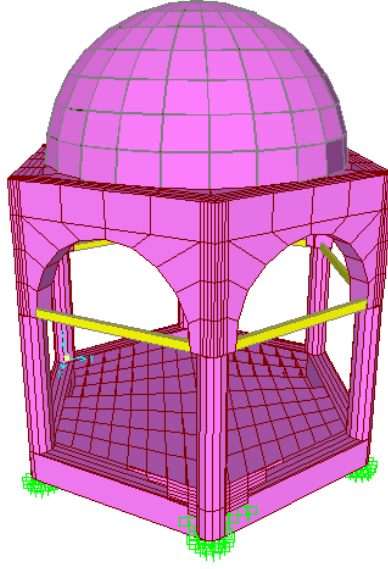
Yapının matematiksel modelinin oluşturulması için gerekli olan bütün geometrik boyutlar ve ölçüler, daha önce hazırlanmış ve belirtilmiş olan röleveler kullanılarak elde edilmiştir.

- Yapının sonlu eleman modeli yerinde röleve çalışmasından elde edilen boyutlar kullanılarak SAP2000 programı yardımıyla oluşturulmuştur.
- Modelleme için türbede olduğu gibi üç boyutlu katı elemanlar, düzlem elemanlar ve çubuk elemanlar kullanılmıştır.
- Model, 1678 adet üç boyutlu katı eleman, 192 adet düzlem eleman ve 6 adet çubuk elemandan oluşmaktadır.



- Mesnetlenme koşulu olarak tüm temel mesnetlerinin serbestliklerinin tutulu olduğu kabul edilmiştir.

Kavak Meydan Şadırvanı'na ait sonlu eleman modeli Şekil 2.8'de verilmektedir.



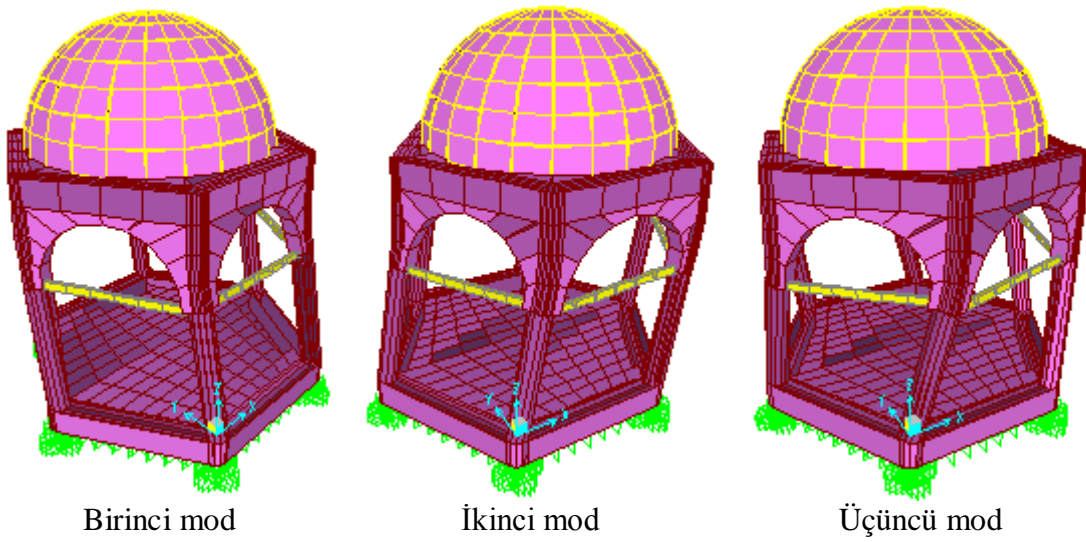
Şekil 2.8. Kavak Meydan Şadırvanı sonlu eleman modeli

#### 2.2.2.2. Modal Parametrelerinin Belirlenmesi

Kavak Meydan Şadırvanı'na ait SAP2000 sonlu elemanlar programı kullanılarak oluşturulan model üzerinde Teorik Modal Analiz gerçekleştirilmiş ve şadırvana ait teorik dinamik karakteristikler olan doğal frekanslar ve mod şekilleri elde edilmiştir. Tarihi Kavak Meydan Şadırvanı'na ait Teorik Modal Analiz sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli ve bu mod şekillerine karşılık gelen doğal frekans değerleri Tablo 2.3'te verilmektedir. Analiz sonuçlarına göre ilk üç teorik doğal frekans 3-5Hz arasında değerler almaktadır. Bu doğal frekans değerlerine karşılık gelen mod şekilleri incelendiğinde ise birinci modun y-ekseni doğrultusunda yanal, ikinci modun x-ekseni doğrultusunda yanal ve üçüncü modun ise burulma modu olduğu Şekil 2.9'da görülmektedir.

Tablo 2.3. Kavak Meydan Şadırvanı'na ait analitik doğal frekanslar, periyotlar ve modal davranışları

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Modal Davranış
1	3.570	0.280	Yanal mod
2	3.779	0.265	Yanal mod
3	4.818	0.208	Burulma modu



Şekil 2.9. Kavak Meydan Şadırvanı'na ait analitik olarak elde edilen ilk üç mod şekli

### 2.3. Seçilen Kubbeli Yapıların Operasyonel Modal Analizleri

#### 2.3.1. Hamza Paşa Türbesi'nin Operasyonel Modal Analizi

Tarihi Hamza Paşa Türbesi'ne ait deneysel dinamik karakteristiklerin belirlenebilmesi için Operasyonel Modal Analiz yöntemi ile titreşim testi gerçekleştirilmiştir. Referanslı ölçümler sırasında toplam 19 adet tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Ancak ivmeölçer sayısının yetersiz olmasından dolayı referanslı ölçüm uygulaması gerçekleştirilmiştir. Referanslı ölçüm uygulamasında ölçülecek yapı üzerine yerleştirilen ivmeölçerlerden birisi referans olarak tanımlanıp bütün ölçüm süresince aynı konumda tutulmakta, diğer ivmeölçerler ise diğer planlanan yerlere taşınmaktadır (Türker, 2011). Ölçümde kullanılan

ivmeölçerler kubbenin tepe noktasında bir referans olmak üzere kubbe yüzeyine dik ve kubbe kasnağında düşey doğrultuda olmak üzere Şekil 2.10'da verildiği gibi konumlandırılmışlardır.



Şekil 2.10. Hamza Paşa Türbesi'nin kubbesi üzerine yerleştirilen ivmeölçerlere ait görüntüler

Ölçümler 0-12.5Hz frekans aralığında ve 30dk süreyle çevresel titreşimler altında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ölçümlere ait görüntüler Şekil 2.11'de verilmektedir.

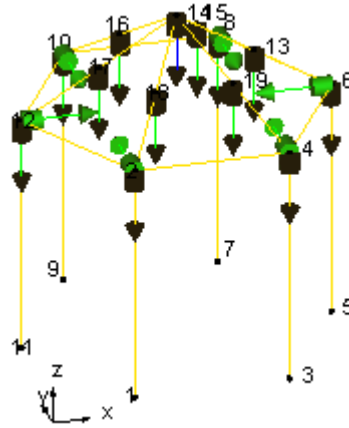


Şekil 2.11. Hamza Paşa Türbesi'nde gerçekleştirilen deneysel ölçümlere ait görüntüler

Şekil 2.11'in devamı



Ölçüm yapılırken PULSE (PULSE, 2006) programında oluşturulan temsil model ve ivmeölçer düzeni ise Şekil 2.12'de verilmektedir.



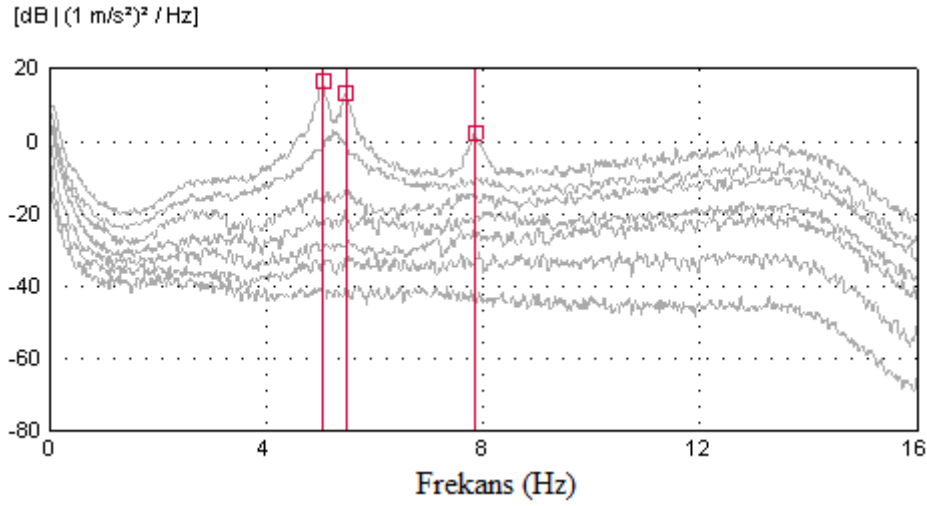
Şekil 2.12. Hamza Paşa Türbesinin kubbesi üzerinde oluşturulan deneysel ölçüm düzenleri ve ivmeölçer yönleri

### 2.3.1.1. Modal Parametrelerinin Belirlenmesi

Hamza Paşa Türbesi için gerçekleştirilen çevresel titreşim testinden toplanan sinyaller GFTAA ve SAB yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri ve kararlılık diyagramları ayrı başlıklar altında verilmektedir.

### 2.3.1.1.1. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemiyle Modal Parametrelerin Belirlenmesi

Frekans ortamına dayalı bir yöntem olan Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yönteminde doğal frekanslar ve mod şekillerinin yanında modal sönüm oranları da belirlenebilmektedir. Şekil 2.13'te GFTAA yöntemine ait bütün sinyallerden elde edilen tekil değerler ve Tablo 2.4'te bu değerlerden elde edilen doğal frekans değerleri ve sönüm oranları verilmektedir.



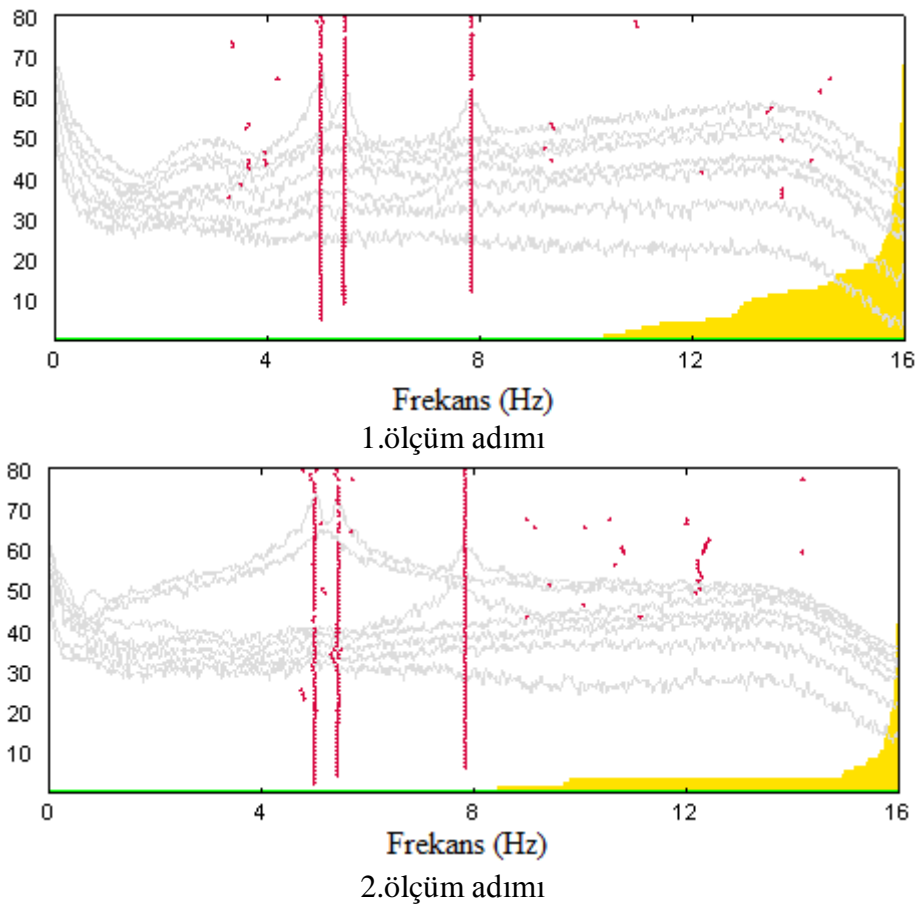
Şekil 2.13. Hamza Paşa Türbesi'ne ait spektral yoğunluk fonksiyonu

Tablo 2.4. Hamza Paşa Türbesi'ne ait deneysel ölçümlerden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Frekans No	GFTAA Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)
1	5.035	1.401
2	5.469	1.386
3	7.861	0.768

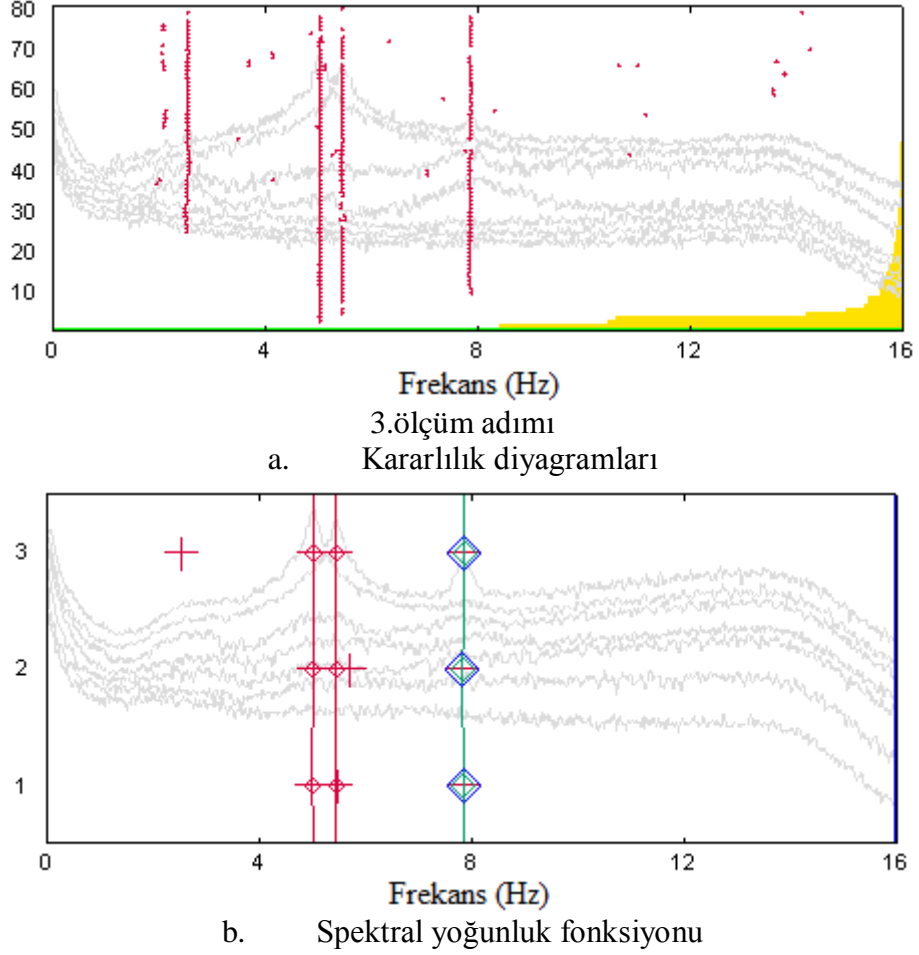
### 2.3.1.1.2. Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemiyle Modal Parametrelerin Belirlenmesi

Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yönteminde dinamik karakteristikler sinyallerin yığılımlı toplamından tekil değerler olarak elde edilmektedir. Şekil 2.14'te SAB yöntemine ait bütün sinyallerden elde edilen kararlılık diyagramları ve yığılımlı tekil değerler, Tablo 2.5'te ise bu değerlerden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları verilmektedir.



Şekil 2.14. Hamza Paşa Türbesi'ne ait kararlılık diyagramları ve spektral yoğunluk fonksiyonu

Şekil 2.14'ün devamı



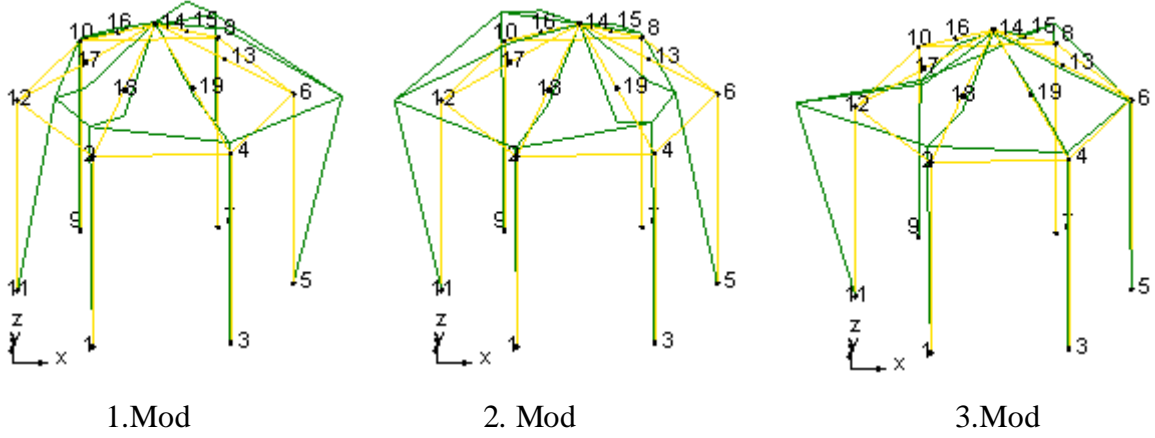
Tablo 2.5. Hamza Paşa Türbesi'ne ait ölçümlerden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Frekans No	SAB Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)
1	5.026	1.221
2	5.470	1.589
3	7.864	1.108

GFTAA ve SAB yöntemleri kullanılarak elde edilen dinamik karakteristiklerin birbirine çok yakın olduğu Tablo 2.4-2.5'ten görülmektedir. Her iki yöntemden de elde edilen mod şekilleri aynıdır. Şekil 2.15'te Hamza Paşa Türbesi'ne ait ilk üç deneysel mod şekilleri



verilmektedir. Bu mod şekilleri incelendiğinde ise birinci modun y-ekseni doğrultusunda yanal, ikinci modun x-ekseni doğrultusunda yanal ve üçüncü modun ise burulma modu olduğu Şekil 2.15'ten görülmektedir.



Şekil.2.15. GFTAA ve SAB yöntemleri kullanılarak elde edilen Hamza Paşa Türbesi'ne ait deneysel mod şekilleri

### 2.3.2. Kavak Meydan Şadırvanı'nın Operasyonel Modal Analizi

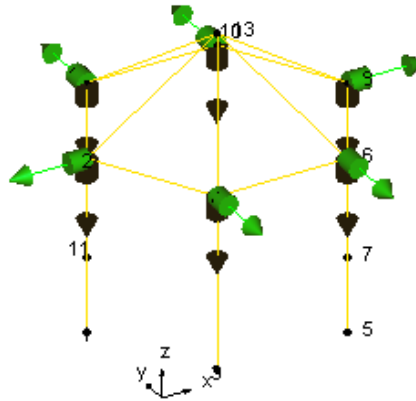
Tarihi Kavak Meydan Şadırvanı'nın kubbesine ait deneysel dinamik karakteristiklerini belirlemek için Operasyonel Modal Analiz yöntemi ile titreşim testi gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sırasında toplam 12 adet tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçer sayısının yeterli olmasından dolayı referanslı ölçüm uygulaması gerçekleştirilmemiştir. Ölçümler kubbe üst yüzeyinin örtülü olmasından dolayı kubbe kasnağının iç yüzeyinden alınmıştır. Ölçümler 0-6.25Hz frekans aralığında ve 30dk süreyle çevresel titreşimler altında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ölçümlere ait görüntüler Şekil 2.16'da verilmektedir.





Şekil 2.16. Kavak Meydan Şadırvanı'nda gerçekleştirilen deneysel ölçüme ait görüntüler

Ölçüm yapılırken PULSE (PULSE, 2006) programında oluşturulan temsil model ve ivmeölçer düzeni ise Şekil 2.17'de verilmektedir.



Şekil 2.17. Kavak Meydan Şadırvanı üzerinde oluşturulan deneysel ölçüm düzenleri ve ivmeölçer yönleri

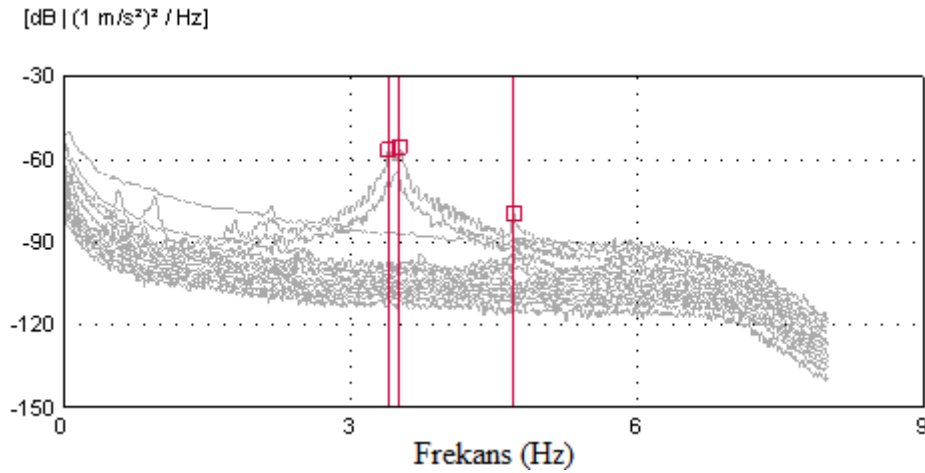
Şekil 2.17'den anlaşılacağı üzere deneysel ölçümde kullanılan ivmeölçerler yatay ve düşey doğrultuda yerleştirilmiştir.

### 2.3.2.1. Modal Parametrelerinin Belirlenmesi

Kavak Meydan Şadırvanı için gerçekleştirilen çevresel titreşim testinden toplanan sinyallerin GFTAA ve SAB yöntemlerine göre ayrıştırma işlemleri yapılmıştır. Ayrıştırma işlemleri sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri ve kararlılık diyagramları ayrı başlıklar altında verilmektedir.

#### 2.3.2.1.1. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yöntemiyle Modal Parametrelerin Belirlenmesi

Şadırvan kubbesi üzerinde gerçekleştirilen ölçümler sonrasında, GFTAA yöntemiyle elde edilen tekil değerler Şekil 2.18'de, bu değerlerden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları ise Tablo 2.6'da verilmektedir.



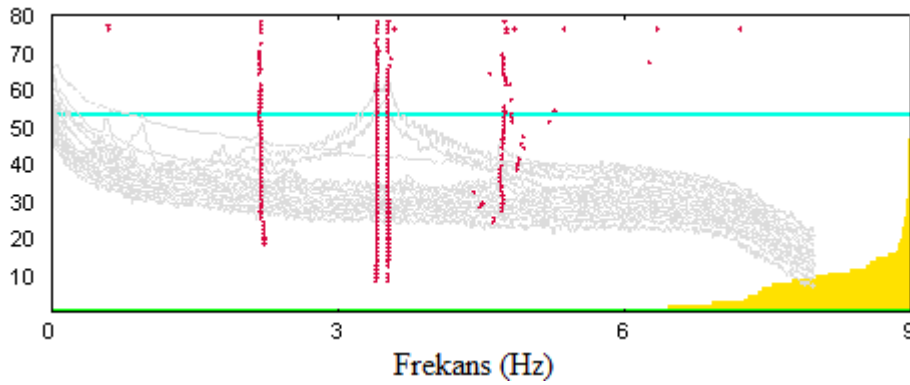
Şekil 2.18. Kavak Meydan Şadırvanı'na ait spektral yoğunluk fonksiyonu

Tablo 2.6. Kavak Meydan Şadırvanı'na ait ölçümden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Frekans No	GFTAA Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)
1	3.419	0.825
2	3.517	0.375
3	4.718	0.230

### 2.3.2.1.2. Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemiyle Modal Parametrelerin Belirlenmesi

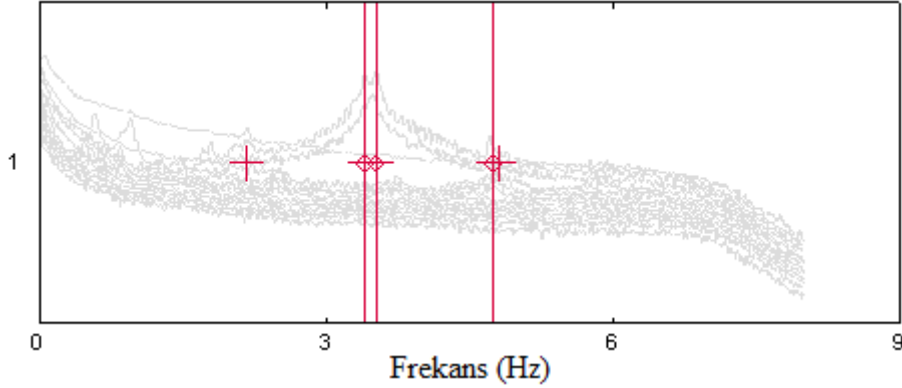
Gerçekleştirilen ölçümler sonucunda SAB yöntemiyle elde edilen yığılımlı tekil değerler Şekil 2.19'da, bu değerlerden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları ise Tablo 2.7'de verilmektedir.



a. Kararlılık diyagramı

Şekil 2.19. Kavak Meydan Şadırvanı'na ait kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonu

Şekil 2.19'un devamı

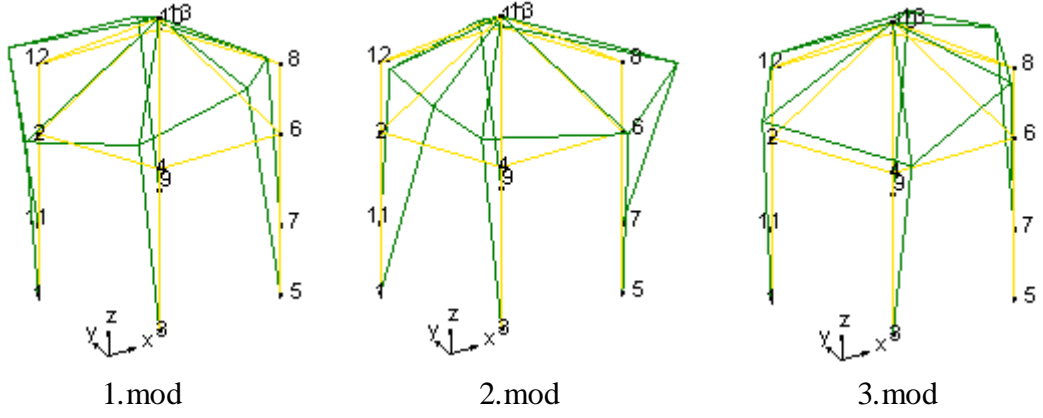


b. Spektral yoğunluk fonksiyonu

Tablo 2.7. Kavak Meydan Şadırvanı'na ait ölçümden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Frekans No	SAB Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)
1	3.415	1.026
2	3.527	0.993
3	4.756	0.626

GFTAA ve SAB yöntemleri kullanılarak elde edilen dinamik karakteristiklerin birbirine çok yakın olduğu Tablo 2.6-2.7'den görülmektedir. Şadırvan'a ait her iki yöntemden de elde edilen mod şekilleri de aynıdır. Şekil 2.20'de Kavak Meydan Şadırvanı'na ait ilk üç deneysel mod şekilleri verilmektedir. Bu mod şekilleri incelendiğinde ise birinci modun y-ekseni doğrultusunda yanal, ikinci modun x-ekseni doğrultusunda yanal ve üçüncü modun ise burulma modu olduğu Şekil 2.20'de görülmektedir.



Şekil.2.20. GFTAA ve SAB yöntemleri kullanılarak elde edilen Kavak Meydan Şadırvanı'na ait deneysel mod şekilleri

### 3. İRDELEME VE DEĞERLENDİRMELER

Tez çalışmasının bu bölümünde, uygulama örnekleri üzerinde gerçekleştirilen analitik ve deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen dinamik parametrelerin karşılaştırılıp değerlendirilmesinin ardından SAP2000 programında oluşturulan başlangıç sonlu eleman modellerin deneysel veriler kullanılarak güncellenmesi adımlarına yer verilmektedir.

#### 3.1. Teorik ve Deneysel Modal Parametrelerin Karşılaştırılması

##### 3.1.1. Hamza Paşa Türbesi'ne Ait Modal Parametrelerin Karşılaştırılması

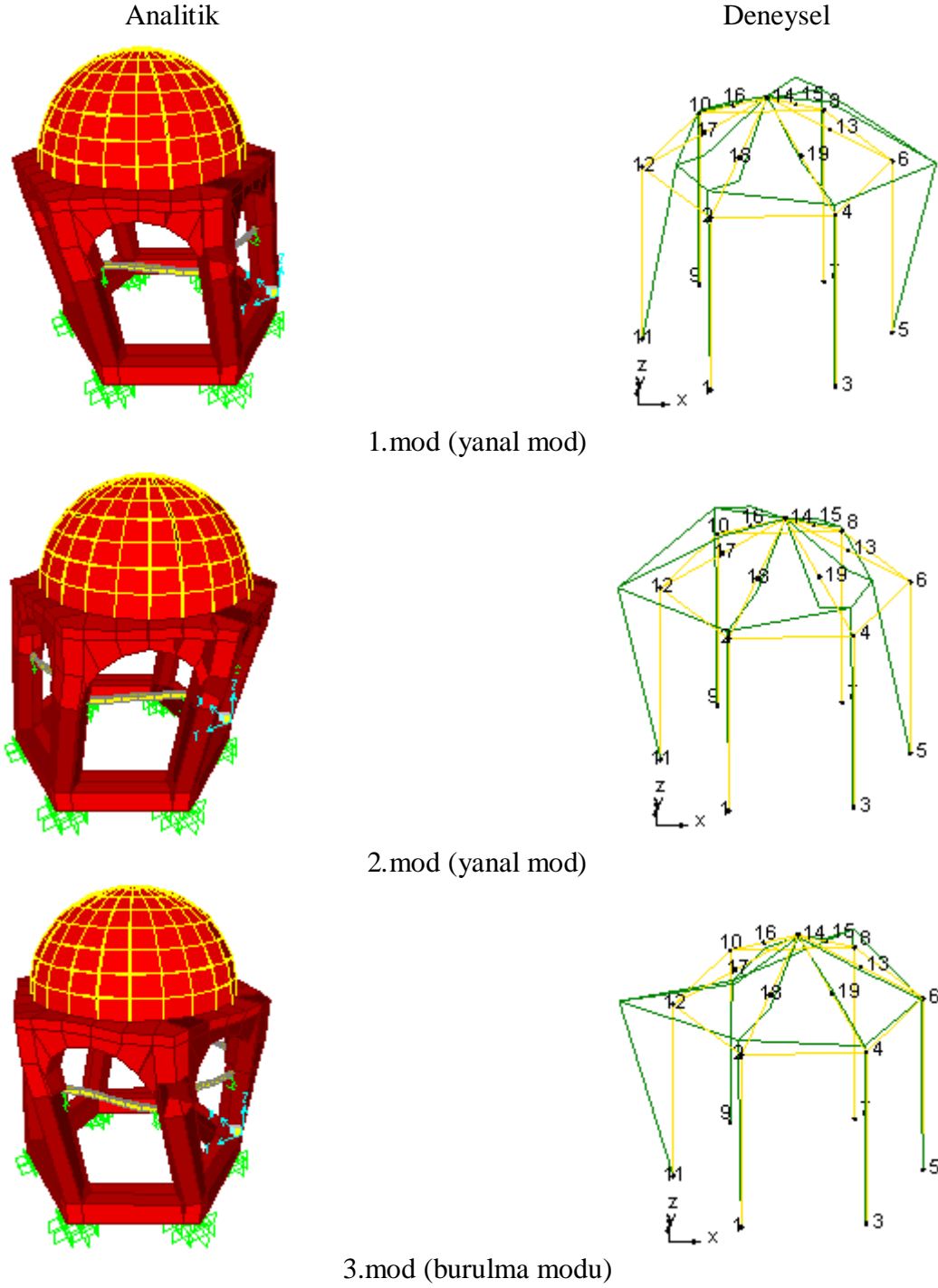
Hamza Paşa Türbesi'ne ait analitik ve deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırmalı olarak Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1. Hamza Paşa Türbesi için deneysel ve analitik doğal frekansların karşılaştırılması

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)				
	Deneysel		Analitik	Fark (%)	
	GFTAA	SAB		GFTAA	SAB
1	5.035	5.026	6.305	25.22	25.45
2	5.469	5.470	6.316	15.49	15.47
3	7.861	7.864	8.212	4.47	4.43

Tablo 3.1'den görüldüğü üzere Hamza Paşa Türbesi'nin deneysel ve teorik doğal frekansları arasındaki ortalama fark yaklaşık %15'tir. Gözlenen bu farklılıklar, yapının başlangıç analitik modelinin oluşturulması sırasında malzeme özelliklerinden sınır şartlarına kadar birçok kabulün yapılması ve bu kabullerin gerçek değerlerle tam olarak uyuşmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durumda mevcut olan farklılıkların en aza indirilmesi için deneysel veriler kullanılarak Hamza Paşa Türbesi'ne ait SAP2000 programında oluşturulan sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi gerekmektedir.

Ayrıca, Şekil 3.1’de türbeye ait teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen mod şekilleri verilmektedir. Mod şekillerine bakıldığında her bir modun birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.1. Hamza Paşa Türbesi’nin teorik ve deneysel mod şekillerinin karşılaştırılması

### 3.1.2. Kavak Meydan Şadırvanı'na Ait Modal Parametrelerin Karşılaştırılması

Tablo 3.2'de Kavak Meydan Şadırvanı'na ait analitik ve deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

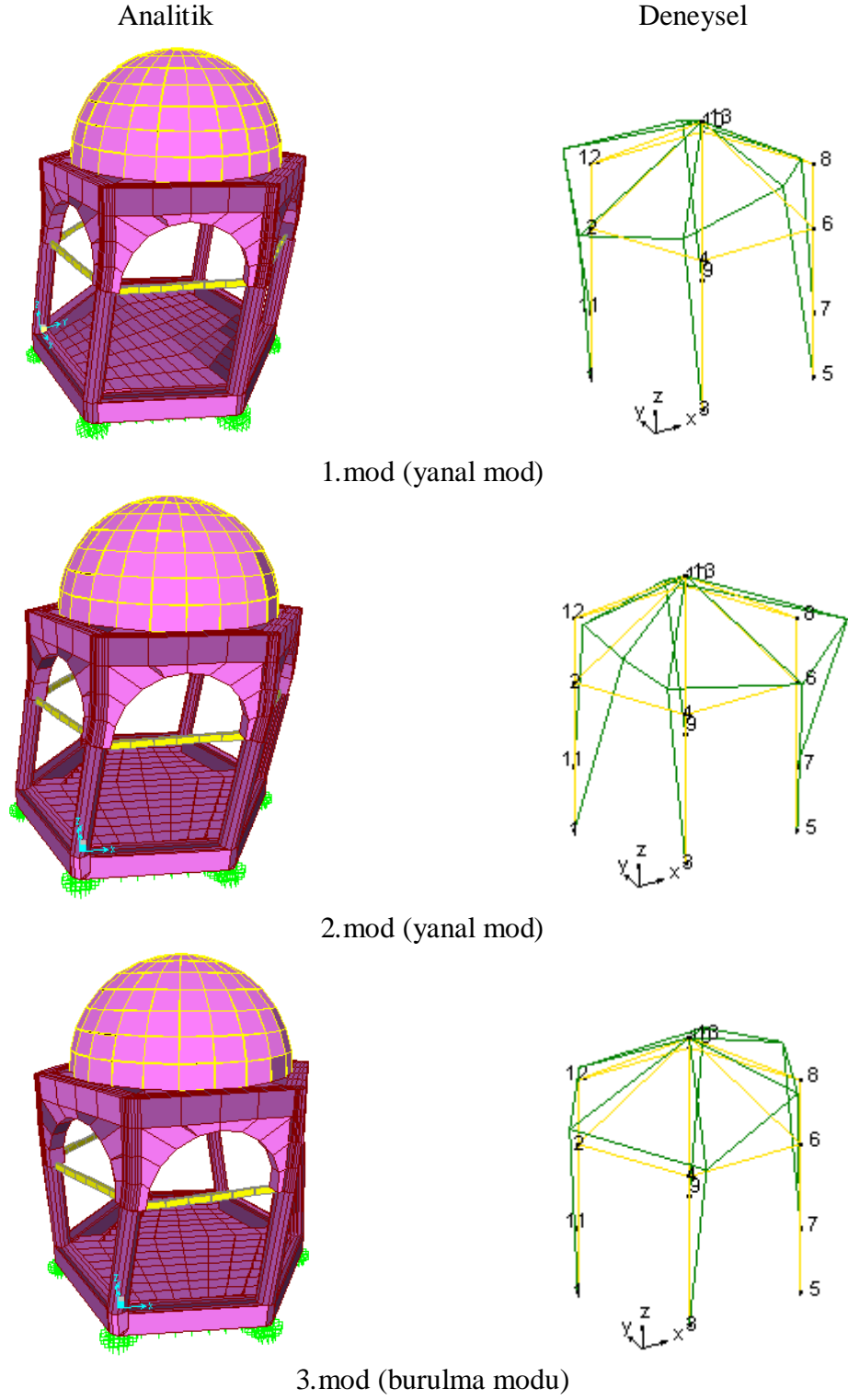
Tablo 3.2. Kavak Meydan Şadırvanı için deneysel ve analitik doğal frekansların karşılaştırılması

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)				
	Deneysel		Analitik	Fark (%)	
	GFTAA	SAB		GFTAA	SAB
1	3.419	3.415	3.570	4.42	4.54
2	3.517	3.527	3.779	7.45	7.15
3	4.718	4.756	4.818	2.12	1.30

Kavak Meydan Şadırvanı'na ait deneysel ve teorik çalışmalardan elde edilen doğal frekanslar arasındaki ortalama farkın yaklaşık %5 olduğu Tablo 3.2'den görülmektedir. Gözlenen bu farklılıklar, yapının analitik modelinin oluşturulması sırasında malzeme özelliklerinden sınır şartlarına kadar birçok kabulün yapılması ve bu kabullerin gerçek değerlerle tam olarak uyuşmaması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu durumda, Kavak Meydan Şadırvanı'na ait SAP2000 programında oluşturulan sonlu eleman modelinin mevcut olan farklılıkların en aza indirilmesi için deneysel veriler kullanılarak iyileştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Ayrıca, şadırvana ait teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen mod şekilleri Şekil 3.2'de karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Mod şekillerine bakıldığında her bir modun birbiriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir.





Şekil 3.2. Kavak Meydan Şadırvanı'nın teorik ve deneysel mod şekillerinin karşılaştırılması

### **3.2. Seçilen Kubbeli Yapılara Ait Sonlu Eleman Modellerinin İyileştirilmesi**

Uygulama amacıyla seçilen Hamza Paşa Türbesi ve Kavak Meydan Şadırvanı için ayrı ayrı teorik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalarda her iki yapıya ait teorik ve deneysel dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Bu dinamik karakteristiklerden biri olan mod şekilleri arasında bir uyum söz konusu iken, teorik ve deneysel doğal frekanslar arasında bir takım farklılıkların olduğu görülmüştür. Bu farklılıkları en aza indirebilmek için yapılara ait sonlu eleman modelleri iyileştirilmiştir.

Bu aşamada, model iyileştirme konusunda dikkat edilmesi gereken bir takım noktalar vardır. Doğruluğu kesine yakın bir netliğe sahip parametrelerden uzak durmaktır (Sevim, 2010). İyileştirmede asıl amaç, doğruluğu bilinmeyen parametreler üzerinde değişiklik yaparak gerçeğe en yakın sonlu eleman modeli oluşturmaktır.

#### **3.2.1. Hamza Paşa Türbesi'nin Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi**

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi tarihi yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesi oldukça zor, pahalı ve yapı üzerinde kalıcı olan hasarlara sebebiyet vermektedir. Bu yüzden seçilen tarihi yapıların sonlu eleman modellerinin oluşturulmasında mevcut olan literatür çalışmalarından faydalanılmıştır. Literatür çalışmalarından elde edilen parametrelerin her yapıda mutlak uyum içerisinde olup olmayacağı konusunda ki belirsizlik, model iyileştirme aşamasında iyileştirme parametresi olarak yapılara ait malzeme özelliklerinin, sınır şartlarının ve malzeme yoğunluğunun alınması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu durumda, Hamza Paşa Türbesi'nin model iyileştirmesi aşamasında iyileştirme parametresi olarak sınır şartları, malzemenin elastisite modülü ve yoğunluğu seçilmiştir. Tablo 3.3'te iyileştirilmiş modele ait malzeme özellikleri verilmektedir. Tablo 3.4'te ise zemin-temel etkileşimini sağlayabilmek için temel alt uçlarına atanan yayların değerleri verilmektedir. Böylece deneysel dinamik karakteristikler yardımıyla gerçek yapıyı en iyi temsil edecek sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Tablo 3.5'te deneysel doğal frekanslar ile model iyileştirme öncesinde ve sonrasında elde edilen teorik doğal frekanslar verilmektedir. Tablo 3.5'ten anlaşılacağı üzere iyileştirilmiş analitik frekanslar ile ölçümlerden elde edilen deneysel frekanslar arasındaki farkın %26'dan yaklaşık %0.7'ye gerilediği görülmektedir.

Tablo 3.3. Hamza Paşa Türbesi'ne ait iyileştirilmiş sonlu eleman modelin malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (N/m <sup>2</sup> )	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
Taş	1.80×10 <sup>9</sup>	0.2	1850
Gergi	2.00×10 <sup>11</sup>	0.3	7850

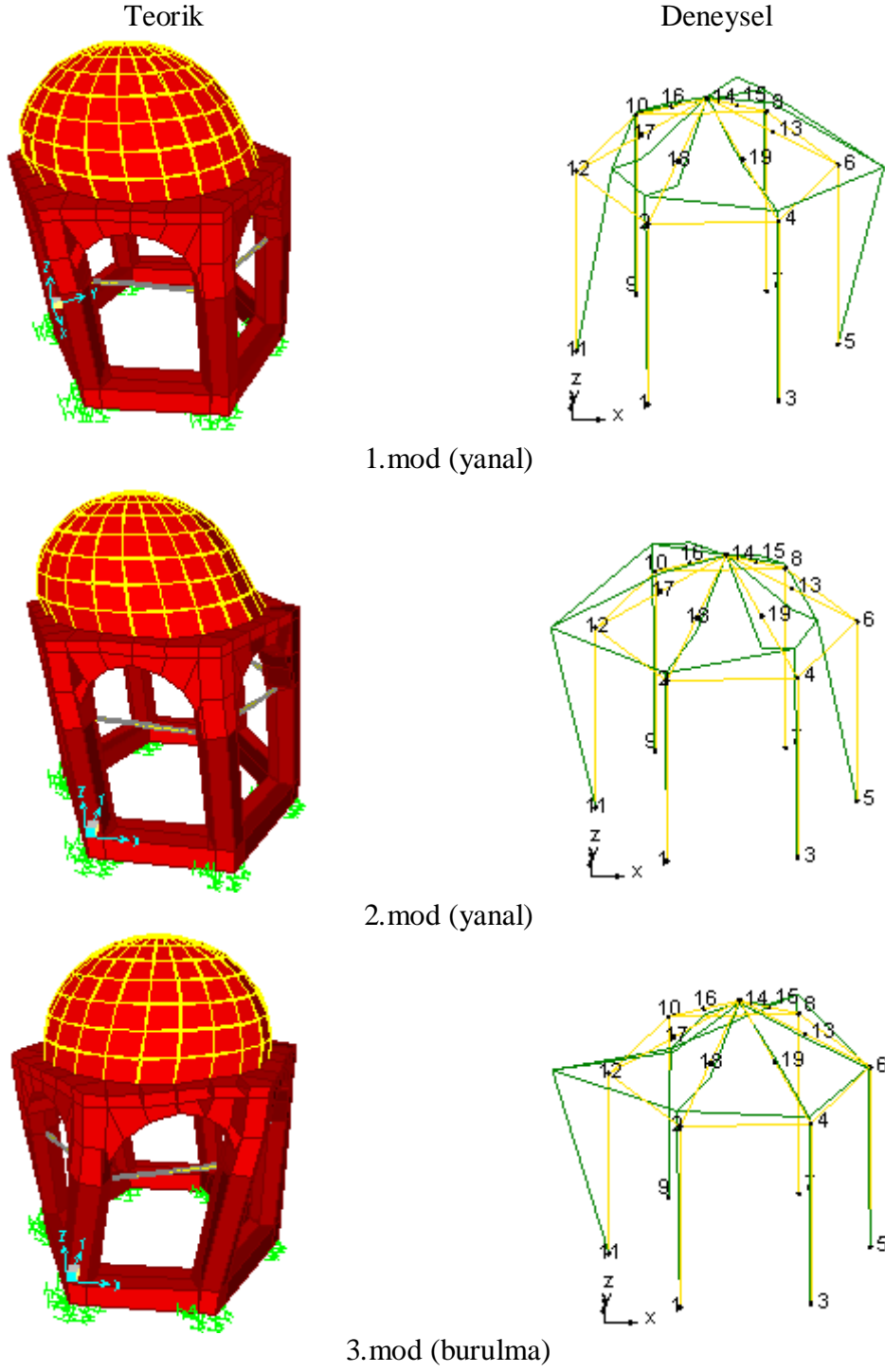
Tablo 3.4. Hamza Paşa Türbesi'ne ait iyileştirilmiş sonlu eleman modelinde temel zemini için kullanılan yay katsayıları

Sınır Şartları	Yay katsayıları (kN/m)		
	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>
Temel	8000	4000	40000

Tablo 3.5. Hamza Paşa Türbesi'ne ait deneysel frekanslarla model iyileştirme sonrası elde edilen analitik frekans değerleri ve bu değerler arasındaki farklar

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)					
	Deneysel		Analitik		Fark (%)	
	GFTAA	SAB	İyileştirme öncesi	İyileştirme sonrası	GFTAA	SAB
1	5.035	5.026	6.305	5.002	0.65	0.48
2	5.469	5.470	6.316	5.433	0.66	0.68
3	7.861	7.864	8.212	7.871	0.13	0.09

Şekil 3.3'te Hamza Paşa Türbesi'ne ait iyileştirilmiş teorik mod şekilleri ile deneysel mod şekillerinin karşılaştırılması verilmektedir. İyileştirilmiş mod şekilleri ile deneysel sonuçlar arasında uyum görülmektedir.



Şekil 3.3. Hamza Paşa Türbesi'ne ait iyileştirilmiş teorik mod şekilleriyle deneysel mod şekillerinin karşılaştırılması

### 3.2.2. Kavak Meydan Şadırvanı'nın Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi

Diğer uygulama örneğinde olduğu gibi Kavak Meydan Şadırvanı'nın teorik ve dinamik frekansları arasındaki farkı en aza indirebilmek için bu yapıya ait sonlu eleman modelinin deneysel veriler kullanılarak iyileştirilmesine karar verilmiştir. İyileştirme parametresi olarak sınır şartlarının, malzeme elastisite modülünün ve yoğunluğunun kullanılmasına karar verilmiştir. Tablo 3.6'da Kavak Meydan Şadırvanı'nın iyileştirilmiş modeline ait malzeme özellikleri verilmektedir. Tablo 3.7'de zemin temel etkileşimini sağlayabilmek için temel alt uçlarına atanan yayların değerleri verilmektedir. Böylece dinamik karakteristikler kullanılarak gerçek yapıyı en iyi temsil edecek sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Tablo 3.8'de deneysel doğal frekanslar ile model iyileştirme öncesinde ve sonrasında elde edilen teorik doğal frekanslar verilmektedir. Tablo 3.8'den anlaşılacağı üzere iyileştirilmiş analitik doğal frekanslarla deneysel ölçümlerden elde edilen doğal frekanslar arasındaki farkın %7.45'ten %1.35'e gerilediği görülmektedir.

Tablo 3.6. Kavak Meydan Şadırvanı'na ait iyileştirilmiş sonlu eleman modelin malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (N/m <sup>2</sup> )	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
Taş	1.95×10 <sup>9</sup>	0.2	2200
Gergi	2.00×10 <sup>11</sup>	0.3	7850

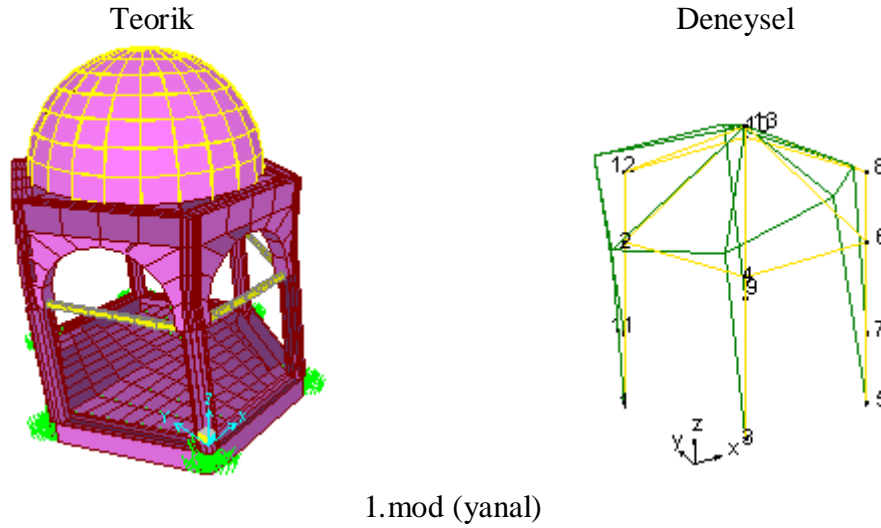
Tablo 3.7. Kavak Meydan Şadırvanı'na ait iyileştirilmiş sonlu eleman modelinde temel zemini için kullanılan yay katsayıları

Sınır Şartları	Yay katsayıları (kN/m)		
	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>
Temel	1500	10000	19000

Tablo 3.8. Kavak Meydan Şadırvanı'na ait deneysel frekanslarla model iyileştirme sonrası elde edilen analitik frekans değerleri ve bu değerler arasındaki farklar

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)					
	Deneysel		Analitik		Fark (%)	
	GFTAA	SAB	İyileştirme öncesi	İyileştirme sonrası	GFTAA	SAB
1	3.419	3.415	3.570	3.410	0.26	0.15
2	3.517	3.527	3.779	3.534	0.48	0.19
3	4.718	4.756	4.818	4.692	0.55	1.35

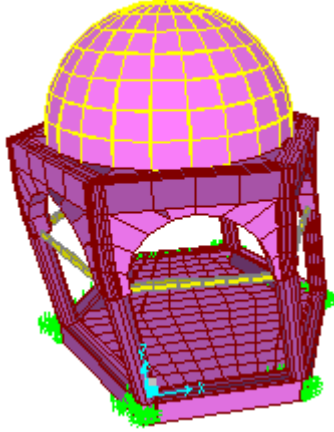
Şekil 3.4'te Kavak Meydan Şadırvanı'na ait iyileştirilmiş teorik mod şekilleriyle deneysel mod şekillerinin karşılaştırılması verilmektedir. İyileştirilmiş mod şekilleri ile deneysel sonuçlar arasında uyum görülmektedir.



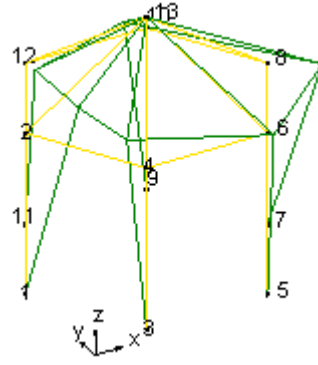
Şekil 3.4. Kavak Meydan Şadırvanı'na ait iyileştirilmiş teorik mod şekilleriyle deneysel mod şekillerinin karşılaştırılması

Şekil 3.4'ün devamı

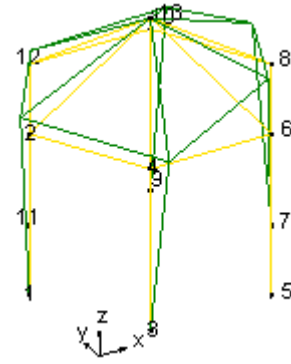
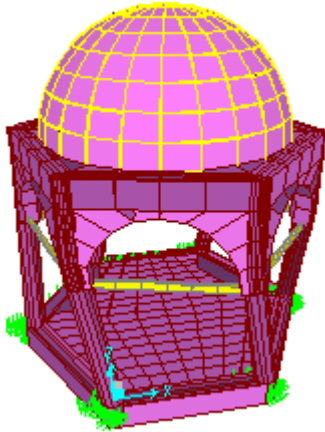
Teorik



Deneysel



2.mod (yanal)



3.mod (burulma)

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında tarihi yığma kubbelerin Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi kullanılarak dinamik karakteristiklerin belirlenmesi ve sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada her ikisi de tarihi yapı olan Hamza Paşa Türbesi ve Kavak Meydan Şadırvanı uygulama örnekleri olarak seçilmiştir. Öncelikle, teorik analiz uygulaması için Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak başlangıç sonlu eleman modelleri SAP2000 programı ile oluşturulmuş ve yapılar üç boyutlu katı, düzlem ve çubuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Modelleme aşamasında, yerinde yapılan röleve çalışmasıyla belirlenen ölçüler kullanılmıştır. Yapılara ait malzeme özellikleri ise literatürde var olan çalışmalardan alınmıştır. Teorik Modal Analiz sonucunda yapılara ait teorik dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Analitik model oluşturma işleminde malzeme özelliklerinden sınır şartlarına kadar birçok kabul yapılmasından dolayı oluşturulan sonlu eleman modellerinin gerçeğe ne kadar yakın olduğunun belirlenmesi için tarihi kubbeli yapılar üzerinde OMA gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda ise yapılara ait deneysel dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Her iki yapı için elde edilen analitik ve deneysel sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmış ve aralarında farklılıkların olduğu görülmüştür. Bu farklılıkların analitik modellerinin oluşturulmasında yapılan kabullerden kaynaklandığı düşünülmüştür. Her iki yapının başlangıç sonlu eleman modelleri sınır şartlarındaki, elastisite değerlerindeki değişimler ve malzemelerin yoğunlukları göz önüne alınarak iyileştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Böylece türbe ve şadırvanın mevcut durumlarını en iyi şekilde temsil edecek sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmaktadır:

- Hamza Paşa Türbesi'nin Teorik Modal Analiz sonucunda elde edilen ilk üç doğal frekansı 6.305-8.212Hz aralığında, Kavak Meydan Şadırvanı'nın ilk üç teorik doğal frekansı ise 3.570-4.818Hz aralığında elde edilmiştir.

- Hamza Paşa Türbesi'nde OMA uygulaması çevresel titreşimler altında 0-12.5Hz frekans aralığında ve 30dk süreyle gerçekleştirilmiştir. Kavak Meydan Şadırvanı'nda ölçüm yine çevresel titreşimler altında 0-6.25Hz frekans aralığında ve 30dk süreyle gerçekleştirilmiştir.



- Gerçekleştirilen ölçümler sonucunda hem Hamza Paşa Türbesi hem de Kavak Meydan Şadırvanı'na ait deneysel doğal frekanslar ve sönüm oranları Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemleri ile elde edilmiştir.

- Hamza Paşa Türbesi için GFTAA yöntemiyle elde edilen doğal frekans değerleri 5.035-7.861Hz aralığında ve SAB yöntemiyle elde edilen doğal frekans değerleri 5.026-7.864Hz aralığında değerler almıştır. Her iki yöntemden elde edilen doğal frekans değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu ve her iki yöntemden elde edilen mod şekillerinin de birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

- Kavak Meydan Şadırvanı için GFTAA yöntemiyle elde edilen doğal frekans değerleri 3.419-4.718Hz aralığında ve SAB yöntemiyle elde edilen doğal frekans değerleri 3.415-4.756Hz aralığında değerler almıştır. GFTAA ve SAB yöntemlerinden elde edilen doğal frekans değerlerinin ve mod şekillerinin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

- Türbe ve şadırvanda gerçekleştirilen analitik ve deneysel çalışmalardan elde edilen dinamik karakteristikler incelendiğinde, doğal frekanslar arasında farklılıkların olduğu görülmüştür. Bu farklılıkların giderilebilmesi veya en aza indirilebilmesi için deneysel sonuçlar yardımıyla malzeme özelliklerindeki ve sınır şartlarındaki değişimler dikkate alınarak her iki yapıya ait başlangıç analitik modelleri iyileştirilmiştir.

- Türbe ve şadırvan için model iyileştirme işleminde iyileştirme parametreleri olarak sınır şartları, malzemelerin elastisite modülleri ve yoğunlukları seçilmiştir. Hamza Paşa Türbesi'nin iyileştirme işlemi sonrasında teorik frekansları arasındaki farkın %25.45'ten %0.68'ye ve Kavak Meydan Şadırvanı'nın teorik frekansları arasındaki farkın %7.45'ten %1.35'e kadar gerilediği görülmüştür. Böylece dinamik karakteristikler yardımıyla gerçek yapıyı en iyi temsil edecek sonlu eleman modeli oluşturulmuştur.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında OMA yöntemiyle çeşitli yapılarda olduğu gibi kubbeli yapılarda da deneysel dinamik karakteristiklerin elde edilebileceği ve bu parametreler yardımıyla gerçek yapıları en iyi şekilde temsil edecek sonlu eleman modellerinin oluşturulabileceği uygulamalı olarak görülmüştür.

Gerçekleştirilen tez çalışmasından yola çıkarak geleceğe ışık tutacağı ümit edilen bazı öneriler aşağıda verilmektedir.

- Çevresel Titreşim Testi aynı çaplı fakat farklı basıklıklara sahip çeşitli kubbeli yapılara uygulanabilir. Böylece basıklığın kubbeli yapıların dinamik davranışları üzerindeki etkileri belirlenebilir.
- Çevresel Titreşim Testi aynı çapta fakat farklı kubbe kalınlığına sahip yapılara uygulanarak, kubbe kalınlığının yapı davranışı üzerindeki etkileri belirlenebilir.
- Çevresel Titreşim Testi doğal titreştiriciler yardımıyla gerçekleştirildiği için farklı çevresel koşullarda aynı yapı üzerinde titreşim testi tekrarlanabilir. Böylece farklı çevresel etkilerin kubbeli yapılar üzerindeki etkileri görülebilir.
- Kubbe kasnağının kalınlığı, yüksekliği gibi boyut ve ölçülerinde çeşitli değişiklik yapılarak deneysel ölçümler gerçekleştirilebilir. Böylece kasnakta oluşan değişimlerin kubbeli yapıların deneysel davranışı üzerindeki etkileri gözlemlenebilir.
- Çevresel Titreşim Testi daha büyük açıklıklı farklı malzemenen yapılmış kubbelere uygulanabilir.
- Deneysel ölçümler kullanılarak Hamza Paşa Türbesi ve Kavak Meydan Şadırvanı'na ait hasar tespit çalışmaları yapılabilir.
- Yapıların buldukları bölgede meydana gelen çeşitli deprem ivme kayıtları alınarak sismik davranışları belirlenebilir.

## 5. KAYNAKLAR

- Akan, A., E. ve Özen, Ö., 2005. Bursa Yeşil Türbe'nin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Deprem Analizi, Deprem Sempozyumu, Mart, Kocaeli, Bildiriler Kitabı: 758-762.
- Akan, E., A., 2010. Determination of Structural Performance of Timber Pillared Historical Mosques by Finite Element Analysis, Süleyman Demirel University International Technologic Science, 2, 1, 41-54, February.
- Aktuğ, İ., 1989. Batı Anadolu 14. Yüzyıl Beylikler Mimarisinde Yapım Teknikleri, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aktüre, S., 1975. 17.yy. Başından 19.yy Ortasına Kadarki Dönemde Anadolu Osmanlı Şehrinde Şehrsel Yapının Değişme Süreci, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi Dergisi.
- Anthoine, A., 1997. Homogenization of Periodic Masonry: Plane Stress, Generalized Plane Strain or 3d Modeling, International Journal of Solids and Structures.
- Armstrong, D., M., Sibbald, A., Fairfield, C., A. ve Forde, M., C., 1995. Modal Analysis for Masonry Arch Bridge Spandrel Wall Separation Identification, NDT&E International, 28, 6, 377-386.
- Atamtürktür, H., S., 2006. Structural Assessment of Guastavino Domes, The Pennsylvania State University, The Graduate School Department of Architectural Engineering, USA.
- Atamtürktür, S. ve Boothby, T., 2007. The Development of Finite-Element Models and The Horizontal Thrust of Guastavino Domes, APT Bull, 38, 4, 21-29.
- Atamtürktür, S., Fanning, P. ve Boothby, T., 2007. Traditional and operational modal Testing of the Washington National Cathedral, Proceedings of the International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, Denmark.
- Atamtürktür, S., Bornn, L. ve Hemez, F., 2011. Vibration Characteristics of Vaulted Masonry Monuments Undergoing Differential Support Settlement, Engineering Structures, 33, 9, 2472-2484.
- Atamtürktür, S., Asce, M. ve Sevim, B., 2012. Seismic Performance Assessment of Masonry Tile Domes through Nonlinear Finite-Element Analysis, Journal of Performance of Constructed Facilities, 26, 4, 410-423.
- Atamtürktür, S., Li, T., Ramage, M., H. ve Farajpour, I., 2012. Load Carrying Capacity Assessment of A Scaled Masonry Dome: Simulations Validated with Non-Destructive and Destructive Measurements, Construction and Building Materials, 34, 418-429.

- Bayraktar, A., 2006. Tarihi Yapıların Analitik İncelenmesi ve Sismik Güçlendirme Metotları, Beta Yayınları, İstanbul, 1.Basım, 145s.
- Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Sevim, B., Türker, T. ve Domaniç, K. A., 2008. Köprülerin Dinamik Karakteristiklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Yapı Dünyası, 150, 44-57.
- Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Türker, T. ve Sevim, B., 2007. Tarihi Yığma Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-1, Eylül, Ankara, Bildiriler Kitabı: 429-440.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Akköse, M. ve Coşkun, N., 2008. Modal Analysis, Experimental Validation and Calibration of a Historical Masonry Minaret, Journal of Testing and Evaluation, 36, 6, 516-524.
- Beckmann, P., 1995. Structural Aspects of Building Conservation, McGraw-Hill International, UK.
- Bendat, J., S. ve Piersol, A., G., 2004. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 3th Edition, John Wiley and Sons, USA.
- Born, W., 1944. The Introduction of the Bulbous Dome into Gothic Architecture and Its Subsequent Development, 19, 2, 208-221.
- Brincker, R., Zhang, L. ve Andersen, P., 2000. Modal Identification from Ambient Responses Using Frequency Domain Decomposition, 18th International Modal Analysis Conference, San Antonio, USA, 4062, 2, 625-630.
- Brincker, R., Ventura, C.E. ve Andersen, P., 2003. Why Output-Only Modal Testing is a Desirable Tool for a Wide Range of Practical Applications, Proceeding of the 21st International Modal Analysis Conference, Kissimmee, Florida.
- Chopra, A., K., 1995. Dynamics of Structures, Prentice Hall International, Toronto.
- Chopra, A., K., 2006. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Third Edition, Prentice Hall, USA, 4th Edition, 995p.
- Crandall, D., P., 2000. The Place of Stunted Ironwood Trees: A Year in the Lives of the Cattle-Herding Himba of Namibia, Continuum International Publishing Group, 269, ISBN 978-0-8264-1270-6, 34-35.
- Çamlıbel, N., 1998. Sinan Mimarlığında Yapı Strüktürünün Analitik İncelenmesi, 279, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul.

- Cecchi, A., Milani, G. ve Tralli, A., 2005. Validation of Analytical Multiparameter Homogenization Models for Out-of-plane Loaded Masonry Walls by Means of the Finite Element Method. *Journal of Engineering Mechanics*, 185-198.
- Çelebi, R., 2001. Yapı Bilgisi, İstanbul Kültür Üniversitesi Yayınları, 12, İstanbul.
- Çılı, F. ve Sesigür, H., 2007. Tarihi Yapıların Onarımı/Güçlendirilmesi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Seminer Notları.
- Creazza, G., Saetta, A., V. ve Matteazi, R., 2001. Analysis of Masonry Structures Reinforced by FRP. *Historical Constructions*, 539–546.
- Crochi, G., 1998. The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage, 3, Computational Mechanics Publications, Dorchester, UK.
- De Stefano, A., 2007. Structural Identification and Health Monitoring on the Historical Architectural Heritage, *Key Engineering Materials*, 347, 37–54.
- Erdogmus, E., 2004. Structural Appraisal of the Florentine Gothic Construction System. PhD Thesis, The Pennsylvania State University, USA.
- Hasol, D., 1979. Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü, Yapı ve Endüstri Merkezi Yayınları, 558s.
- Hitchcock, D., 2009. Don's Maps, Mezhirich-Mammoth Camp, Retrieved, August.
- Huerta, S., 2007. Oval Domes: History, Geometry and Mechanics, *Nexus Network Journal*, 9, 2, 211-248.
- Hwang, C., 1996. Some Experiments on Vibration of Hemispherical Shell, *Journal of Applied Mechanics*, 66.
- Jacobsen, N., J., Andersen, P. ve Brincker, R., 2006. Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis, Proceedings of ISMA2006: International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium.
- Jafarov, O., Köksal, H., O., Doran, B. ve Karakoç, C., 2012. An Investigation On The Nonlinear Behavior Of Unreinforced Masonry Walls, *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 133-143.
- Kang, J., H. ve Leissa, A., W., 2004. Three-Dimensional Vibration Analysis of Solid and Hollow Hemispheres Having Varying Thicknesses With and Without Axial Conical Holes, *Journal of Vibration and Control*, 10, 199–214.
- Kaya, H., 2004. Experimental Modal Analysis of a Steel Grid Frame, MSc Thesis, The Middle East Technical University, The Graduate School of Natural And Applied Sciences, Ankara.

- Kunieda, H., 1982. Flexural Axisymmetric Free Vibrations of A Spherical Dome; Exact Results and Approximate Solutions, Journal of Sound and Vibration, 92, 1, 1-10.
- Langmead, D. ve Garnaut, C., 2001. Encyclopedia of Architectural and Engineering Feats, 3rd Edition, ABC-CLIO, 388p.
- Liew, K., M. ve Lim, C., W., 1982. Vibratory Behavior of Doubly Curved Shallow Shells of Curvilinear Planform, Journal of Engineering Mechanics, 121, 12.
- Lourenço, P., B., 1996. Computational Strategies for Masonry Structures, Delft University of Technology, the Netherlands, PhD Thesis, Available from [www.civil.uminho.pt/masonry/Publications/1996a\\_Lourenco.pdf](http://www.civil.uminho.pt/masonry/Publications/1996a_Lourenco.pdf).
- Lourenço, P., B., Vasconcelos, G. ve Ramos, L., 2001. Assessment of the Stability Conditions of a Cistercian Cloister, 2nd International Congress on Studies in Ancient Structures, Yıldız Technical University, İstanbul.
- Mainstone, R., J., 1972. Squinches and Pendentives: Comments on Problems of Definitions, Art and Archeology Research Papers, 131-137.
- Mal'tsev, V., A., Konon, Y., A. ve Adishchev, V., V., 1984. Experimental Study and Analysis of the Vibrations of an Impulsively Loaded Thin-Walled Spherical Shell, Plenum Publishing Corporation / Fizika oreniye I Vzryva, 20, 2, 97-102.
- Ogihara, Y., 1985. Stiffness Evaluation Method and Vibration Tests of a Spherical Shell Structures, Pressure Vessels and Piping Division, 98, 3.
- Oliviera, D., V., 2003. Experimental and Numerical Analysis of Blocky Masonry Structures under Cyclic Loading, PhD Dissertation, Minho University, Portugal.
- OMA, 2006. Operational Modal Analysis, Release 4.0 Structural Vibration Solution A/S, Denmark.
- Overschee, P., V. ve Moor, B., D., 1996. Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation and Applications, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Peeters, B., 2000. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, PhD Thesis, Katholieke University, Leuven, Belgium.
- Peeters, B. ve Roeck, G., D., 2000. Reference Based Stochastic Subspace Identification in Civil Engineering, Inverse Problems in Civil Engineering, 8, 47-74.
- Pesciullesi, C., Rapallini, M., Tralli, A. ve Cianchi, A., 1997. Optimal Spherical Masonry Domes of Uniform Strength, Journal of Structural Engineering, 123, 2.

- Petyt, M., 1990. Introduction to Finite Element Vibration Analysis, Cambridge University Pres, Cambridge.
- PULSE, 2006. Analyzers and Solutions, Release 11.2., Bruel And Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S, Denmark.
- Ramos, J., L., F., S., 2007. Damage Idendification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, PhD Thesis, University of Minho, Portugal.
- Romano, A., 2005. Modelling, Analysis and Testing of Masonry Structures, PhD Dissertation, The University of Naples Federico II, Italy.
- Rosenthal, J., 1928. Pendentifs, Trompes et Stalactites, Geuthner, Paris.
- Ross, C., T., F., 1996. Vibration and Elastic Instability of Thin-Walled Domes under Uniform External Pressure, Thin-Walled Structures, 26, 3, 159-177.
- Rumpler, M., 1956. La Coupole Dans L'Architecture Byzantine et Musulman, Edition Le Tilleul, Strasbourg.
- Sab, K., 2003. Yield Design of Thin Periodic Plates by a Homogenization Technique an Application to Masonry Walls. C. R. Mecanique, 331 641-645.
- SAP2000, 1997. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures, Berkeley, California, USA.
- Saraç, M., M., 2003. Tarihi Yığma Kargir Yapıların Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sesigür, H., Çelik, O., C. and Çılı, F., 2007. Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Bileşenler, Hasar Biçimleri, Onarım ve Güçlendirme, İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul Bülteni, 89, 10-21.
- Sevim, B., 2010. Kemer Barajların Dinamik Davranışlarının Sonlu Eleman ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Souza, V., C., M., D. ve Croll, J., G., S., 1983. Vibration Tests on Spherical Shell Caps, Journal of Strain Analysis, 18, 1.
- Şahin, A., 2009. Yapıların Deneysel ve Operasyonel Modal Analizleri için Sayısal Sinyal İşleme, Dinamik Karakteristik Belirleme ve Sonlu Eleman Model İyileştirme Yazılımları: SignalCAD-ModalCAD-FemUP, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Theodossopoulos, D., Sinha, B., P., Usmani, A., S. ve Macdonald, A., J., 2002, Assessment of The Structural Response of Masonry Cross Vaults, An International Journal for Experimental Mechanics, 38, 119–127.
- Theodossopoulos, D., Sinha, B., P. ve Usmani, A., S., 2003. Case study of The Failure of A Cross Vault: Church of Holyrood Abbey, Journal of Architectural Engineering, 9, 3, 119–127.
- Türker, T., 2011. Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti Ve Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Ünay, A., İ., 2002. Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Yayınları, Ankara.
- Wilkie, D., S. ve Morelli, G., A., 2010. Forest Foragers: A Day in the Life of Efe Pygmies in the Democratic Republic of Congo, Cultural Survival Quarterly, Retrieved December 7.
- Yu, D., J. ve Ren, W., X., 2005. EMD-Based Stochastic Subspace Identification of Structures from Operational Vibration Measurements, Engineering Structures, 27, 1741-1751.
- Zucchini A. ve Lourenço P., B., 2002. A Micro-Mechanical Model for the Homogenisation of Masonry, International Journal of Solids and Structures, 39, 12, 3233-3255.
- Zucchini, A., Lourenço, P., B., 2006. Homogenization of Masonry Using A Micromechanical Model: Compressive Behaviour, III European Conference on Computational Mechanics Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering, June, Lisbon, Portugal.
- URL-1, <http://en.wikipedia.org/wiki/Dome>. 12 Mart 2012.
- URL-2, <http://israelipalestinian.procon.org/view.background-resource.php?resourceID=1171>. 12 Mart 2012.
- URL-3, <http://architecturaltravels.wordpress.com/2012/03/10/dome/>. 14 Mart 2012.
- URL-4, <http://www.baseball-fever.com/showthread.php?63160-Japanese-Baseball-Stadiums>. 14 Mart 2012.
- URL-5, <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Vicoforte3.JPG>. 15 Mart 2012.
- URL-6, <http://www.chrskern.net/essay/jeffersonsDomeAtMonticello.html>. 18 Mart 2012.
- URL-7, <http://wowturkey.com/forum/viewtopic.php?t=66470>. 18 Mart 2012.
- URL-8, <http://de.wikipedia.org/wiki/Kuppel>. 10 Nisan 2012. 18 Mart 2012.



URL-9, Vaulted Structures, <http://www.earth-auroville.com>, 2005. 19 Mart 2012.

URL-10, <http://natgeotv.com/tr/antik-mega-yapilar/zel-makaleler>. 11 Nisan 2012.

URL-11, <http://en.wikipedia.org/wiki/TacMahal>. 15 Nisan 2012.

URL-12, [http://etc.usf.edu/clipart/58200/58280/58280\\_gol\\_gumbaz.htm](http://etc.usf.edu/clipart/58200/58280/58280_gol_gumbaz.htm). 15 Nisan 2012.

URL-13, <http://www.selimiyecamii.com/kubbe.html>. 17 Nisan 2012.

URL-14, <http://www.restorasyonforum.com/trabzon/trabzon-turbeleri-t209.0.html>. 14 Haziran 2012.

URL-15, <http://www.forumdas.net/trabzon/trabzonun-tarihi-yerleri-94125/>. 15 Haziran 2012.

URL-16, <http://www.turkish-media.com/forum/topic/177959-trabzon-cesmeleri/>. 15 Haziran 2012.

## ÖZGEÇMİŞ

Şenay UÇAK, 1986 yılında Edirne ilinin Uzunköprü ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Uzunköprü'de tamamladı. 2005 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2009 yılında İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2011-2012 Güz ve Bahar yarıyıllarında Almanya'nın Bochum şehrindeki Ruhr Üniversitesi'nde 'Computational Engineering' bölümünde Erasmus-LLP programı kapsamında bir yıllık eğitim aldı. Bekar olan Şenay UÇAK, iyi derecede İngilizce ve az derecede Almanca bilmektedir.

Bu tez çalışması sırasında aşağıdaki çalışmalar hazırlanmıştır.

**Uçak, Ş.**, Osmancıklı, G., Turan, F., N., Türker, T. ve Bayraktar, A. Structural Identification of a Historical Timber Bridge by Ambient Vibration Test, Journal of Vibration and Control, (İncelemede).

Osmancıklı, G., **Uçak, Ş.**, Turan, F., N., Türker, T. ve Bayraktar, A., 2011. Investigation of Restoration Effects on the Dynamic Characteristics of the Hagia Sophia Bell-Tower by Ambient Vibration Test, Construction and Building Materials, 29, 564-572, (SCI, A Grubu).

Turan, F., N., **Uçak, Ş.**, Osmancıklı, G., Türker, T. ve Bayraktar, A. Estimation of Modal Damping Ratios by Operational Modal Analysis Method, Structural Control and Health Monitoring, (İncelemede).