



**TARİHİ EMİR SALTUK KÜMBETİ DİNAMİK
KİMLİKLENDİRME ÇALIŞMASI**

Yusuf GEDİK

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU**

**2022
Her hakkı saklıdır**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TARİHİ EMİR SALTUK KÜMBETİ DİNAMİK KİMLİKLENDİRME
ÇALIŞMASI**

Yusuf GEDİK

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2022

Her hakkı saklıdır.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

27 / 01 / 2022

Yusuf GEDİK

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TARİHİ EMİR SALTUK KÜMBETİ DİNAMİK KİMLİKLENDİRME ÇALIŞMASI

Yusuf GEDİK

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU

Medeniyetler beşiği Anadolu coğrafyası dünyanın en aktif sismik bölgelerinden birisi olarak kabul edilen toprakları üzerinde sayısız tarihi yapıya ev sahipliği yapmaktadır. Anadolu’ da kurulan ilk Türk-İslam devleti olarak kabul edilen Saltuklu Beyliği’ne başkentlik yapmış olan Erzurum şehri barındırdığı tarih yapı çeşitliliği bakımından öne çıkan kadim bir yerleşim yeridir. Şehrin bu özelliğine dikkat çekmek amacıyla 2020 yılı Erzurum ili Yakutiye İlçe Belediyesi tarafından Saltuklu Yılı olarak ilan edilmiş ve bu kapsamda muhtelif etkinlikler planlanmıştır. Bu tez çalışması 2020 Saltuklu Yılı etkinlikleri çerçevesinde Erzurum ili şehir merkezinde bulunan Üç Kümbetler alanındaki Emir Saltuk Kümbeti’ nin yapısal inceleme ve dinamik kimliklendirme çalışmasını konu edinmiştir. Öncelikle kümbet yapısı malzeme karakterizasyonu üzerinde çalışılmış ve kümbet inşasında kullanılmış olan yöresel kamber taşının fiziksel ve mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Sonlu eleman modeli üzerinde teorik modal analiz çalışması yapıldıktan sonra yapı üzerinde gerçekleştirilen Operasyonel Modal Analiz uygulaması ile kümbetin dinamik davranış parametreleri elde edilmiştir. Teorik ve deneysel çalışma sonucunda ilk iki mod şeklinin birbiriyle örtüştüğü ve yanal öteleme hareketi olduğu belirlenmiştir. Eurocode 6 (1996) mevzuatı üzerinden hesaplanan yığma yapı mekanik özellikleri ile teorik olarak hesaplanan birinci ve ikinci mod şekline ait frekans değerleri ile deneysel sonuçlar arasında sırasıyla yaklaşık olarak %7 ve %10 fark olduğu görülmüştür.

2022, 164 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Emir Saltuk Kümbeti, Dinamik Kimliklendirme, Operasyonel Modal Analiz, Kamber Taşı, Tahribatsız Muayene

ABSTRACT

MS. Thesis

DYNAMIC IDENTIFICATION STUDY OF EMIR SALTUK CUPOLA

Yusuf GEDİK

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Dilek OKUYUCU

The geography of Anatolia, defined as the cradle of civilizations, is home to numerous historical structures on its lands, which are considered one of the most active seismic regions in the world. The ancient city of Erzurum, which was the capital of the Saltuklu Principality, which is accepted as the first Turkish-Islamic state established in Anatolia, is an ancient settlement that stands out in terms of its historical structure diversity. In order to draw attention to this feature of the city, the year 2020 was declared as the Year of Saltuklu by the Yakutiye District Municipality of Erzurum, and various activities were planned in this context. This thesis is about the structural analysis and dynamic identification of the Emir Saltuk Cupola, which is one of the Three Cupolas located in Erzurum city centre within the framework of the 2020 Saltuklu Year activities. First, the material characterization of the cupola structure was studied; the physical and mechanical properties of the local camber stone used in the construction of the cupola were investigated experimentally. After the theoretical modal analysis study on the finite element model, the dynamic behaviour parameters of the cupola were obtained with the Operational Modal Analysis application performed on the structure. As a result of the theoretical and experimental studies, it was determined that the first two mode shapes overlap with each other and have lateral translational motion. It has been observed that there is approximately a 7% and 10% difference between theoretical modal frequencies estimated by using the mechanical properties of the masonry structure calculated over the Eurocode 6 (1996) legislation and the frequency values of experimental results, respectively.

2022, 164 Page

Keywords: Emir Saltuk Cupola, Dynamic Identification, Operational Modal Analysis, Camber Stone, Non-destructive Testing

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam vetiresinde tarafıma sağlamış olduğu maddi manevi yardımlarından, anlayışlı olmasından, şahsıma sabır ve hoşgörü ile yaklaşmasından dolayı her türlü bilgi, birikim ve değerli fikirleri ile yoluma güneş gibi ılık tutan kıymetli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU Hanımefendiye teşekkür eder ve minnettarlığımı sunarım.

Araştırma kapsamında tarihi bir yapı olması hasebi ile gerekli izinlerin alınması ve saha çalışmalarında yardımcı olunmasından dolayı Erzurum İl Kültür Turizm Müdürlüğü' ne ve şahsında İl Müdürü Sayın Cemal ALMAZ Beyefendiye, Erzurum Yakutiye İlçe Belediyesi' ne ve şahsında İlçe Belediye Başkanı Sayın Dr. Mahmut UÇAR Beyefendiye teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda ve saha çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen kıymetli meslektaşlarım Erdem ERKMEN, Ahmet Yasir KANBUR, Zabiullah FAKUORİ, Dursun Burak ÖZDOĞAN Beyefendilere ve Meliha YILMAZ Hanımefendiye teşekkür ederim.

Ayrıca beni bugünlere getiren üzerimde hakkını ödeyemeyeceğim kadar çok emeği bulunan kıymetli annem Fatime GEDİK Hanımefendiye, kıymetli babam Özay GEDİK Beyefendiye teşekkür ederim. Tarafıma göstermiş olduğu sabır ve hoşgörüden dolayı hayatımı paylaştığım eşim, hayat arkadaşım sevgili Özlem GEDİK Hanımefendiye ve yüreğimde sıcacık bir yer kaplayan evlatlarım Zeynep GEDİK ile İbrahim Yuşa GEDİK' e teşekkürü bir borç bilirim.

Yusuf GEDİK

Ocak 2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	3
1.2. Türkiye Depremselliği	6
1.3. Erzurum Bölgesi Depremselliği.....	7
1.4. Tarihi Yapıların Sismik Davranışlarının İncelenmesi	10
1.5. Türkiye ve Ev Sahipliği Yaptığı Medeniyetler	15
1.6. Saltuklular	18
1.7. Saltuklu Beyliği'nin Hükmettiği Coğrafyadaki Bırakmış Olduğu Tarihi Yapılar...	20
2. KAYNAK ÖZETLERİ	23
2.1. Saltuklu Tarihi ve Emir Saltuk Kümbeti	23
2.2. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi	25
2.3. Tahribatsız Malzeme İnceleme Yöntemleri.....	30
3. MATERYAL ve YÖNTEM	32
3.1. Emir Saltuk Kümbeti ve Mimarisi	32
3.2. Kamber Taşı Üzerinde Yapılan Malzeme Karakterizasyonu Çalışmaları	37
3.2.1. Kamber taşının birim hacim ağırlığının belirlenmesi	40
3.2.2. Kamber taşı porozite tayini.....	43
3.2.3. Schmidt darbe çekici uygulaması ile kamber taşı basınç dayanımının tayini	46
3.2.4. Kamber taşı numuneleri üzerinde ultrases geçiş hızı ölçümleri	50
3.2.5. Kamber taşı numuneleri üzerinde eksenel basınç dayanımı deneyleri	53
3.3. Kamber Taşı Elastisite Modülün Hesaplanması	56
3.4. Kamber Taşı Duvar Blok Deneyleri	60
3.5. Emir Saltuk Kümbeti Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması	62
3.5.1. Yığma yapı modelleme yöntemleri	63
3.5.2. Sonlu eleman modelinin oluşturulması	66

3.6. Emir Saltuk Kümbeti Dinamik Kimliklendirme Çalışması	68
3.6.1. Operasyonel modal analiz.....	68
3.6.2. Operasyonel modal analiz veri işleme çalışması	74
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	79
4.1. Emir Saltuk Kümbeti Duvar Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi	79
4.1.1. Kamber taşı basınç dayanımı-Schmidt sertlik değerleri arasındaki bağıntı	79
4.1.2. Schmidt sertlik değerleriyle porozite arasındaki bağıntı	82
4.1.3. Schmidt sertlik değerleriyle birim hacim ağırlık arasındaki bağıntı	84
4.1.4. Elastik modül ile basınç mukavemeti arasındaki bağlantı.....	85
4.1.5. Elastik modül ile birim hacim ağırlık arasındaki bağlantı.....	87
4.1.6. Elastik modül ile porozite arasındaki bağlantı	89
4.1.7. Kümbet yapısı üzerinde sertlik okumalarının alınması	91
4.1.8. Yığılma duvar basınç dayanımı ve elastik modül belirlenmesi.....	94
4.2. Teorik Modal Analiz Sonuçları	102
4.3. Emir Saltuk Kümbeti Operasyonel Modal Analiz Sonuçları.....	108
4.3.1. Kümbet yapısı EFDD analiz sonuçları	111
4.3.2. Kümbet yapısı SSI-UPC analiz sonuçları.....	123
4.3.3. Operasyonel modal analiz sonucunda elde edilen mod şekilleri ve frekans değerleri	135
4.4. Emir Saltuk Kümbet Yapısı Yer Değiştirme Analizi.....	138
4.5. Kümbet Yapısına Ait Doğal Titreşim Periyodunun Hesaplanması	139
4.6. Deneysel ve Teorik Modal Analiz Sonuçlarının İrdelenmesi	141
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	146
KAYNAKLAR	149
EKLER.....	159
EK-1.....	159

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$^{\circ}$	Derece
C	Celcius
cm	Santimetre
E	Elastisite modülü
f_b	Basınç Mukavemeti
f_c	Taş basınç mukavemeti
f_m	Duvar harcı basınç mukavemeti
f_k	Duvar basınç mukavemeti
g	Gram
G_d	Taşın doygun haldeki kütlesi
G_{ds}	Doygun haldeki taşın su içindeki kütlesi
G_k	Değişmez kütleye kadar kurutulmuş taş kütlesi
GPa	Gigapascal
Hz	Hertz
I	Atalet Momenti
kg	Kilogram
kN	Kilonewton
l	Uzunluk
L_0	İlk boy
m	Kütle
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Mepapascal
r	Regresyon katsayısı
R_h	Yataydaki yüzey sertlik değeri
sn	Saniye
ε	Şekil değiştirme
σ	Gerilme
ΔL	Boy değişimi

Kısaltmalar

CFDD	Curve-fit Frequency Domain Decomposition
DBYBHY	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007)
EFDD	Enhanced Frequency Domain Decomposition
FDD	Frequency Domain Decomposition
MAC	Modal Assurance Criterion
OMA	Operasyonel Modal Analiz
SAP	Structural Modal Analysis
SSI-UPC	Unweighted Principal Component
SSI-UPCX	Extended Unweighted Principal Component
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)
TS	Türk Standartları

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Türkiye Deprem Haritası (Anonim 2019a).....	6
Şekil 1.2. Erzurum ili lokasyon haritası (Kuşcu vd 2019).....	8
Şekil 1.3. Erzurum ili bölgesel fay hatları (Anonim 2012).....	8
Şekil 1.4. Üç yapraklı yığma yapı duvarı (Kocaman vd 2019)	11
Şekil 1.5. Yönetmelikte belirtilen tasarım için kullanılacak ivme spektrumu (TBDY 2018).....	13
Şekil 1.6. Ultrases geçiş hızı tayini cihazı çalışma prensibi (Aksoy ve Karaton 2019) .	14
Şekil 1.7. Anadolu Coğrafyası ilk yerleşimler (Anonim 2019b).....	16
Şekil 1.8. İlk dönem Anadolu Medeniyetleri.....	16
Şekil 1.9. Türkiye turizm haritası (Anonim 2007).....	17
Şekil 1.10. İlk dönem Anadolu Beylikleri (Anonim 2020)	20
Şekil 3.1. Erzurum Üç Kümbetler Bölgesi genel görünümü ve Emir Saltuk Kümbeti ..	33
Şekil 3.2. Emir Saltuk Kümbeti külah şeklindeki üst örtüsü	33
Şekil 3.3. Emir Saltuk Kümbeti içten görünüm	34
Şekil 3.4. Kümbetin kuzey yönünde bulunan kapı ve üzerindeki lento.....	35
Şekil 3.5. Kümbet üzerinde bulunan açık ve kapalı çiftli pencereler	35
Şekil 3.6. Silindirik gövdedeki nişler ve üzerlerindeki hayvan kabartmaları	36
Şekil 3.7. Üç Kümbetler bölgesi restorasyon öncesi görünümü (Özkan 2016).....	36
Şekil 3.8. Emir Saltuk Kümbeti Muhtevastaki Kırmızı Kamber Taşları.....	38
Şekil 3.9. Erzurum Narmanlı Camii haziresindeki kamber taşından imal edilmiş mezar taşları (Anonim 2021b).....	38
Şekil 3.10. Kırmızı Kamber Taşının kesilmeden önce ocaktaki hali.....	39
Şekil 3.11. Kırmızı Kamber Taşının Makinada Kesilmesi	39
Şekil 3.12. Kesildikten sonra elde edilen kamber taşı numuneleri	40
Şekil 3.13. Kamber taşı numune boyutlarının kontrol edilmesi	41
Şekil 3.14. Kamber taşı numunelerin birim ağırlık için kütle ölçümleri	41
Şekil 3.15. Kamber taşı numunelerinin porozite tayini amacıyla su içinde bekletilmesi	43
Şekil 3.16. Suyla doygun haldeki kamber taşı numunelerinin ölçülmesi	44
Şekil 3.17. Arşimet terazisi ile kamber taşı numuneleri üzerinde yapılan ölçümler	44
Şekil 3.18. Kamber taşı numunelerinin kurutulma amacıyla etüve yerleştirilmesi	45

Şekil 3.19. Proceq marka N tipi Schmidt çekici	48
Şekil 3.20. Proceq marka ultrases ölçüm cihazı ile kamber taşı numuneleri üzerinde ultrases geçiş hızı ölçümleri.	51
Şekil 3.21. Emir Saltuk Kümbeti duvarlarına ultrases geçiş hızı tayini uygulaması.....	51
Şekil 3.22. Kamber taşı numunelerine eksenel basınç deneyi uygulaması.....	54
Şekil 3.23. Kamber taşı numunesine ait eksenel basınç deneyi ekran görüntüsü.....	54
Şekil 3.24. Kamber taşı numunesi eksenel basınç testi sonrası görüntüsü	55
Şekil 3.25. Kamber taşı numunelerine ait gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri	57
Şekil 3.26. Kamber taşı ile kil harcı kullanarak bloklar hazırlama ve eksenel basınç dayanımı deneyinden görüntüler.	61
Şekil 3.27. Basınç dayanımı tayini amacıyla hazırlanan killi harç numuneleri.....	61
Şekil 3.28. Mikro modelleme tekniği (Lourenço 1996)	64
Şekil 3.29. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği (Lourenço 1996).....	65
Şekil 3.30. Makro modelleme tekniği (Lourenço 1996).....	65
Şekil 3.31. Emir Saltuk Kümbeti rölövesi (kuzey cephesi)	66
Şekil 3.32. Emir Saltuk Kümbeti rölöve kesit görüntüleri	67
Şekil 3.33. Emir Saltuk Kümbeti SAP2000 (2016) yazılımı ile oluşturulan sonlu eleman modeli.....	67
Şekil 3.34. Üç boyutlu sekiz noktalı katı eleman (SAP2000 2016)	68
Şekil 3.35. Tek eksenli ivmeölçer örneği	71
Şekil 3.36. Emir Saltuk Kümbeti operasyonel modal analiz uygulaması ivmeölçer sensör yerleşim planı.	72
Şekil 3.37. Emir Saltuk Kümbeti operasyonel modal analiz uygulaması ivmeölçer sensör yerleşim uygulaması.	72
Şekil 3.38. Dinamik veri toplama sistemi.....	73
Şekil 3.39. Artemis Modal Pro (2018) yazılımında oluşturulan analize esas model görüntüsü.	75
Şekil 3.40. İvme veri kayıtlarının Artemis Modal Pro (2018) yazılımına tanıtılması	75
Şekil 3.41. İvme kayıt dosyalarının sensör yerleşim planı uyarınca modele uygulanması	76
Şekil 3.42. Örnek bir spektral yoğunluk fonksiyonu grafiği (Erkmen 2022)	77
Şekil 3.43. Modal güvence kriteri değerleri için örnek bir sütun grafiği.....	78
Şekil 4.1. Kamber taşı yüzey sertliği-basınç dayanımı dağılımı	80
Şekil 4.2. Emir Saltuk Kümbeti dış duvarlarına Schmidt çekici uygulaması.....	81

Şekil 4.3. Hacimce su emme oranı – Schmidt sertlik değeri arasındaki ilişki.....	83
Şekil 4.4. Schmidt sertlik değeri – birim hacim ağırlık arasındaki ilişki.....	84
Şekil 4.5. Kamber taşı numunesine ait elastik modül (Doğrusal Eğim) ve eksenel basınç dayanımı arasındaki ilişki.	85
Şekil 4.6. Kamber taşı numunesine ait elastik modül (sekant modülü) ve eksenel basınç dayanımı arasındaki ilişki.	86
Şekil 4.7. Kamber taşı numunesine ait elastik modül (tanjant modülü) ve eksenel basınç dayanımı arasındaki ilişki.	87
Şekil 4.8. Kamber taşı numunesine ait elastik modül (Doğrusal Eğim) ve birim hacim ağırlık arasındaki ilişki.	88
Şekil 4.9. Kamber taşı numunesine ait elastik modül (Sekant Modülü) ve birim hacim ağırlık arasındaki ilişki.	88
Şekil 4.10. Kamber taşı numunesine ait elastik modül (Sekant Modülü) ve birim hacim ağırlık arasındaki ilişki.	89
Şekil 4.11. Kamber taşı numunesine ait elastik modül (Doğrusal Eğim) ve porozite arasındaki ilişki.	89
Şekil 4.12. Kamber taşı numunesine ait elastik modül (sekant modülü) ve porozite arasındaki ilişki.	90
Şekil 4.13. Kamber taşı numunesine ait elastik modül (tanjant modülü) ve porozite arasındaki ilişki.	91
Şekil 4.14. Emir Saltuk Kümbeti duvarlarına Schmidt uygulaması	92
Şekil 4.15. SAP2000 (2016) yazılımı kullanılarak oluşturulan ve teorik modal analize esas sonlu elaman modeli ekran görüntüsü.	103
Şekil 4.16. Emir Saltuk Kümbeti için hesaplanan spektral yoğunluk fonksiyon grafikleri	110
Şekil 4.17. Ölçüm 1'e ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.....	111
Şekil 4.18. Ölçüm 1'e ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği.....	111
Şekil 4.19. Ölçüm 2'ye ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.....	112
Şekil 4.20. Ölçüm 2'ye ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği.....	112
Şekil 4.21. Ölçüm 3'e ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.....	113
Şekil 4.22. Ölçüm 3'e ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği.....	113

Şekil 4.23. Ölçüm 4'e ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.....	114
Şekil 4.24. Ölçüm 4'e ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği.....	114
Şekil 4.25. Ölçüm 5'e ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.....	115
Şekil 4.26. Ölçüm 5'e ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği.....	115
Şekil 4.27. Ölçüm 6'ya ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.....	116
Şekil 4.28. Ölçüm 6'ya ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği.....	116
Şekil 4.29. Ölçüm 7'ye ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.....	117
Şekil 4.30. Ölçüm 7'ye ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği.....	117
Şekil 4.31. Ölçüm 8'e ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.....	118
Şekil 4.32. Ölçüm 8'e ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği.....	118
Şekil 4.33. Ölçüm 9'a ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.....	119
Şekil 4.34. Ölçüm 9'a ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği.....	119
Şekil 4.35. Ölçüm 10'a ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.....	120
Şekil 4.36. Ölçüm 10'a ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği.....	120
Şekil 4.37. Ölçüm 11'e ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.....	121
Şekil 4.38. Ölçüm 11'e ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği.....	121
Şekil 4.39. Ölçüm 12'ye ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.....	122
Şekil 4.40. Ölçüm 12'ye ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği.....	122
Şekil 4.41. Ölçüm 1'e ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.....	123
Şekil 4.42. Ölçüm 1'e ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği	123
Şekil 4.43. Ölçüm 2'ye ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.	124
Şekil 4.44. Ölçüm 2'ye ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği	124

Şekil 4.45. Ölçüm 3'e ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.....	125
Şekil 4.46. Ölçüm 3'e ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği	125
Şekil 4.47. Ölçüm 4'e ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.....	126
Şekil 4.48. Ölçüm 4'e ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği	126
Şekil 4.49. Ölçüm 5'e ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.....	127
Şekil 4.50. Ölçüm 5'e ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği	127
Şekil 4.51. Ölçüm 6'ya ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.	128
Şekil 4.52. Ölçüm 6'ya ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği	128
Şekil 4.53. Ölçüm 7'ye ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.	129
Şekil 4.54. Ölçüm 7'ye ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği	129
Şekil 4.55. Ölçüm 8'e ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.....	130
Şekil 4.56. Ölçüm 8'e ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği	130
Şekil 4.57. Ölçüm 9'a ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.....	131
Şekil 4.58. Ölçüm 9'a ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği	131
Şekil 4.59. Ölçüm 10'a ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.	132
Şekil 4.60. Ölçüm 10'a ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği	132
Şekil 4.61. Ölçüm 11'e ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.	133
Şekil 4.62. Ölçüm 11'e ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği	133
Şekil 4.63. Ölçüm 12'ye ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.	134
Şekil 4.64. Ölçüm 12'ye ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği	134
Şekil 4.65. Emir Saltuk Kümbeti' nin öz ağırlığı altında maksimum yer değiştirme değerleri.....	138
Şekil 4.66. Emir Saltuk kümbetinin modal analiz ile elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri.....	139

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Kamber taş numuneleri boyut, ağırlık ve birim hacim ağırlık değerleri	42
Çizelge 3.2. Numunelere ait ölçümler ve kütlece-hacimce su emme oranları.....	46
Çizelge 3.3. Kamber taşı numunelerine ait yüzey sertlik değerleri	49
Çizelge 3.4. Kamber taşı numunelerine ait ultrases deneyi basınç dayanımı ve elastik modül değerleri	52
Çizelge 3.5. Kamber taşı numunelerine ait üç deney için elde edilen deney sonuçları ..	55
Çizelge 3.6. Kamber taşı numunelerine ait üç farklı yöntem ile hesaplanmış elastik modül değerleri	59
Çizelge 3.7. Kamber Taşı Blokları Mekanik Özellikleri	62
Çizelge 3.8. Yazılım analiz türleri	77
Çizelge 4.1. Kamber taşı numunelerine ait porozite ve sertlik değerleri.....	82
Çizelge 4.2. Schmidt çekici deneyi ortalama sertlik değerleri.....	92
Çizelge 4.3. Schmidt sertlik değerleri kullanılarak formülasyonlar ile elde edilen basınç mukavemeti değerleri	93
Çizelge 4.4. Yönetmeliklere göre elde edilen basınç dayanımları ve elastik modüller	102
Çizelge 4.5. Eurocode 6 (1996)' da önerilen yöntemle elde edilen azami elastik modül değeri kullanılarak hesaplanan teorik modal analiz sonuçları.	104
Çizelge 4.6. DBYBHY (2007)' de önerilen yöntemle elde edilen azami elastik modül değeri kullanılarak hesaplanan teorik modal analiz sonuçları.	105
Çizelge 4.7. TBDY (2018)' de önerilen yöntemle elde edilen azami elastik modül değeri kullanılarak hesaplanan teorik modal analiz sonuçları.	106
Çizelge 4.8. Kullanılan yönetmelikler ile elde edilen teorik analizlerin mod değerleri	107
Çizelge 4.9. Ölçüm 1'e ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	111
Çizelge 4.10. Ölçüm 2'ye ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	112
Çizelge 4.11. Ölçüm 3'e ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	113
Çizelge 4.12. Ölçüm 4'e ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	114

Çizelge 4.13. Ölçüm 5'e ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	115
Çizelge 4.14. Ölçüm 6'ya ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	116
Çizelge 4.15. Ölçüm 7'ye ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	117
Çizelge 4.16. Ölçüm 8'e ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	118
Çizelge 4.17. Ölçüm 9'a ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	119
Çizelge 4.18. Ölçüm 10'a ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	120
Çizelge 4.19. Ölçüm 11'e ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	121
Çizelge 4.20. Ölçüm 12'ye ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	122
Çizelge 4.21. Ölçüm 1'e ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	123
Çizelge 4.22. Ölçüm 2'ye ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	124
Çizelge 4.23. Ölçüm 3'e ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	125
Çizelge 4.24. Ölçüm 4'e ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	126
Çizelge 4.25. Ölçüm 5'e ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	127
Çizelge 4.26. Ölçüm 6'ya ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	128
Çizelge 4.27. Ölçüm 7'ye ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	129
Çizelge 4.28. Ölçüm 8'e ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	130
Çizelge 4.29. Ölçüm 9'a ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	131

Çizelge 4.30. Ölçüm 10'a ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	132
Çizelge 4.31. Ölçüm 11'e ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	133
Çizelge 4.32. Ölçüm 12'ye ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.....	134
Çizelge 4.33. Operasyonel modal analizde ölçümlerde elde edilen frekans sonuçları.	135
Çizelge 4.34. Operasyonel modal analizde elde edilen mod şekilleri ve ortalama frekanslar.	137
Çizelge 4.35. Yapıya ait fiziksel ve mekanik özellikler	140
Çizelge 4.36. Üç farklı yönetmelik için teorik olarak elde edilen frekans değerlerinin OMA frekans değerlerine bağlı hata oranları.	142

1. GİRİŞ

Anadolu coğrafyası birçok medeniyete ev sahipliği yapmış ve bu medeniyetler kendi çağlarına ait yapılar inşa etmişlerdir. Bu tarihi yapıların birçoğu günümüze ulaşmayı başarmıştır. Günümüze ulaşan bu tarihi yapıların bulunduğu Anadolu Coğrafyası sismik olarak dünyanın en aktif coğrafyalarından birisi olarak kabul edilmektedir. Geçmişimize ışık tutan bu yapılar üzerinde inşaat mühendisleri olarak mesleki sorumluluğumuz genel olarak yapıları deprem etkisinden olabildiğince korumak ve geleceğe devredebilmektir. Bu amaç doğrultusunda tarihi yapıların mevcut durumu çalışılarak incelenmekte; gerek görüldüğünde ise takviye/güçlendirme benzeri uygulamalar yapılmaktadır.

Bu kapsamda yapılacak çalışmalarda, mevcut tarihi bir yapının sismik davranışını inceleyebilmek amacıyla sonlu eleman modelinin oluşturulması ve bu model üzerinde analizler yapılması yaygın olarak tercih edilen uygulamadır. Ancak, tarihi yığma bir yapının sonlu eleman modelinin oluşturulması esnasında yapılan çok sayıda kabul ve peşinen kabul edilen muhtelif belirsizlikler üretilen modelin mevcut tarihi yapıyı temsil kabiliyetini sorgulanır kılmaktadır. Tarihi yapı taşıyıcı duvarlarının heterojen yapıda olması, temel türü konusunda yeterli bilgi edinilememesi, tarihi yapının imalat süreci hakkındaki bilgi eksiklikleri, tahribatlı yöntemlerle malzeme karakterizasyonu yapılamaması, tarihsel süreç içerisinde yapıya uygulanan müdahaleler hakkında yeterli bilgi bulunmaması vb. hususlar sonlu eleman modeli oluşturulurken yapılan kabullerin nedenleri arasında sıralanabilmektedir. Bu durumda, oluşturulan sonlu eleman modeli üzerinde yapılacak analizlere istinaden tarihi yapı davranışının teknik olarak daha güvenilir bir şekilde çalışılabilmesinin nispeten daha güvenilir sonlu eleman modeli oluşturulmasına bağlı olduğu açıktır.

Bilgisayar ortamında oluşturulan sonlu eleman modellerinin gerçek yapıyı temsil kabiliyetinin; dinamik davranış parametreleri üzerinden çalışılması mümkündür. Modal parametreler olarak da tanımlanan mod şekilleri, mod şekilleri için hesaplanan frekans ve sönüm değerleri her yapı için karakteristiktir. Tarihi yığma yapı çalışması özelinde; elde gerçek yapı ve gerçek yapıyı temsil etmek üzere hazırlanan sonlu eleman modeli bulunmaktadır. Gerçek yapı üzerinde Operasyonel Modal Analiz uygulaması ile dinamik

davranış parametreleri deneysel olarak elde edilebilir. Sonlu eleman modeli üzerinde ise bu parametreler teorik olarak hesaplanabilir. Teorik olarak hesaplanan modal davranış parametreleri ile deneysel olarak gerçek yapı üzerinden elde edilen modal davranış parametreleri arasındaki farkın düşük olması sonlu eleman modelinin gerçek yapıyı temsil kabiliyetinin *nispeten* yüksek olması olarak yorumlanabilmektedir. Bu özellikteki bir sonlu eleman modeli üzerinde yapılacak ileri seviye analizlerle tarihi yığma yapı davranışının incelenmesinin daha uygun olacağı teknik olarak açıktır.

Sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan modal davranış parametrelerinin deneysel olarak yapı üzerinden elde edilen değerlere yakın değerler vermesi amacıyla sonlu eleman modeli üzerinde model kalibrasyonu olarak tabir edilen muhtelif uygulamalar yapılmaktadır. Bu uygulamaların;

- Malzeme birim hacim ağırlık ve elastik modül gibi malzeme özelliklerinin güncellenmesi
- Yapı geometrisinin ve geometrik ölçülerin incelenmesi ve güncellenmesi
- Yapı mesnet koşullarının güncellenmesi

gibi çalışmalar olduğunu Costa et al. (2016) çalışmasına referansla sıralamak mümkündür. Literatürde bu tür kalibrasyon uygulamalarını konu edinen çok sayıda çalışmaya erişim sağlamak mümkündür. Yığma bir kule yapısı sonlu elemanlar modelinin kalibrasyonunu konu alan Shabani et al. (2022), tarihi bir kilise yapısı üzerindeki çalışmayı konu edinen Aslay ve Okuyucu (2019) çalışmaları bu hususta örnek verilebilecek çalışmalardır. Ancak, bu yöntemlerin tamamının bir *deneme-yanılma* uygulaması olması ve teorik modal parametrelerin referans değerleri olarak kullanılacak deneysel modal davranış parametrelerine ihtiyaç duyduğu dikkate alınmalıdır. Yani; deneme-yanılma yoluyla sonlu elemanlar model kalibrasyonu yapılacaksa bu durumda ilgili tarihi yapı için deneysel olarak dinamik kimliklendirme çalışması yapılması zorunlu bir hal almaktadır. Deneysel olarak dinamik kimliklendirme çalışması yapılması her zaman mümkün olmayabilir. Zira bu tür çalışmalar özel sensör, yazılım ve tecrübeli uygulamacı gerektiren uygulamalardır. Bu durumda, tarihi yığma yapılar için *nispeten* daha güvenilir sonlu eleman modeli oluşturulması amacıyla daha pratik ve uygulanabilir yöntemlere gereksinim duyulduğu açıktır.

Yapı karakteristiği olarak tanımlanan modal davranış yapı kütle ve rijitliğine; teorik olarak hesaplanan bu değerler de modele tanımlanan yığma yapı malzeme fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlıdır. Tarihi yığma yapılar için hazırlanan sonlu eleman modellerine tanımlanan malzeme özellikleri bu bakımdan önem arz etmektedir. Gerek Türkiye’de gerekse dünyanın pek çok ülkesinde tarihi yığma yapı mekanik özelliklerinin tayini için tahribatlı yöntemler kullanılmasına yasal olarak izin verilmemektedir. Bu durumda, heterojen yapıda olan tarihi yığma yapı malzeme özelliklerinin tahribatsız olarak tayini konusu gündeme gelmektedir. Tarihi yığma yapı malzeme özelliklerinin tahribatsız olarak belirlenmesi amacıyla kullanılacak yöntem arayışları ve bu amaçla yapılan uygulamaları konu edinen Özdoğan (2018), Kocaman vd (2019) gibi çalışmalar literatürdeki yerlerini almıştır. Bu çalışmalarda amaç tahribatsız yöntemlerle tayin edilen malzeme mekanik özellikleri üzerinden hesaplanan teorik modal davranış parametrelerinin deneysel değerlere yaklaşmasını sağlayacak şekilde bir malzeme mekanik özelliği belirleme yönteminin ortaya konulmasıdır. Bu durumda yığma yapı modelleme tekniğinin de hesaplamaları etkilediğinin altı çizilmelidir.

Bu tez çalışmasının amacı da Özdoğan (2018) çalışmasında takip edilen tahribatsız yöntemle benzer şekilde tarihi yığma yapı mekanik özelliklerinin tayini ve yöntemin geçerliğinin teorik ve deneysel modal davranış parametreleri üzeri tarihi Emir Saltuk Kümbeti üzerinde doğrulanmasıdır.

Bu bölümde, çalışmanın öznesi olan tarihi Emir Saltuk Kümbeti’ nin bulunduğu Erzurum ilinin depremselliği ve kültürel mirasın zenginliği üzerinden çalışmanın amacı ve gerekliliği üzerinde bilgi ve değerlendirmeler sunulacaktır.

1.1. Amaç ve Kapsam

Bu tez çalışmasının temel amacı tarihi yığma yapı mekanik özelliklerinin tahribatsız uygulamalarla belirlenmesi amacıyla kurgulanan bir yöntemin mevcut bir tarihi yapı üzerinden araştırılmasıdır. Çalışma kapsamında ele alınan ve üzerinde incelemeler yapılan eser Erzurum İli şehir merkezindeki Üç Kümbetler alanında bulunan ve yaklaşık olarak 12. yüzyıl başına tarihlenen Emir Saltuk Kümbeti’ dir.

Tarihi yapıların kendine münhasır özelliklerinden dolayı dokunulmazlıkları olduğundan bu yapılardan tahribatlı uygulamalarla karot alıp laboratuvar ortamında test etmek ve malzeme mekanik özelliklerini tayin etmek Türkiye koşullarında genel olarak mümkün değildir. Bu mecburi koşullar mühendisleri tarihi yığma yapı mekanik özelliklerini tahribatsız olarak elde edebildikleri uygulamaları kullanmak durumunda bırakmaktadır. Schmidt darbe çekici ve ultrases geçiş hızı tayini yöntemlerinin bu amaçla sıklıkla kullanılan yöntemlerden olduğunu ifade etmek mümkündür.

Bu tez çalışması kapsamında Schmidt darbe çekici ile Emir Saltuk Kümbeti' ni oluşturan doğal taşlardan alınan sertlik okumaları üzerinden taş basınç dayanımının eldesi ve sonrasında Eurocode 6 (1996), DBYBHY (2007) ve TBDY (2018) mevzuatı uyarınca duvar basınç dayanımlarının hesaplanması üzerinde durulmuştur. Bu amaçla temininin kolay ve ucuz olması nedeniyle uygulamada sıklıkla tercih edilen beton Schmidt çekici kullanılmıştır. Ancak, kullanılan çekiç için sertlik-basınç dayanımı kalibrasyonu beton için verilmektedir. Bu nedenle, beton Schmidt çekici ile doğal taş üzerinden alınan darbe çekici okumaları için ayrıca kalibrasyon bağıntıları kullanılması gerektiği açıktır.

Çalışma kapsamında incelenen Emir Saltuk Kümbeti' nin inşasında andezit, bazalt ve kamber taşı kullanıldığı tespit edilmiştir. Özdoğan (2018) çalışmasında andezit ve bazalt türü doğal taşlar için beton Schmidt çekici darbe değeri ile basınç dayanımlarının elde edilmesinde kullanılmak üzere kalibrasyon bağıntıları önerilmiştir. Ancak, yöresel kamber taşı için benzer bir bağıntı bulunmadığı gibi erişilebilen literatürde bu taşın fiziksel ve mekanik özelliklerini konu alan bir çalışmaya erişim sağlanamamıştır. Bu nedenle, tez çalışmasının ilk aşamalarında kamber taşı üzerinde deneysel çalışmalar yapılmış ve Schmidt darbe çekici uygulamaları için bir sertlik-basınç dayanımı kalibrasyon bağıntısı üretilmiştir.

Kümbet yapısı üzerinde Schmidt darbe çekici okumaları alınmış ve taş basınç dayanımı değerleri elde edildikten sonra yığma duvar basınç dayanımı ve elastik modül değerleri hesaplanmıştır. SAP2000 (2016) yazılımı kullanılarak makro modelleme tekniği ile kümbet yapısı için sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve yukarıda özetlenen yöntemle elde edilen malzeme mekanik özellikleri modele tanımlanmıştır. Sonlu

elemanlar modeli üzerinde teorik modal analiz yapılarak mod şekilleri ve modal frekanslar elde edilmiştir.

Modelleme aşmasında yapılan kabuller, yığma yapı sistemlerinin heterojen yapıda olması, vb. nedenler; oluşturulan sonlu elemanlar modelinin mevcut yapıyı temsil kabiliyetini önemli ölçüde sorgulanır kılmaktadır. Pek çok kabul üzerine kurgulanan ve geçerliliği *nispeten* kabul gören bir yöntemle sağlaması yapılmayan modeller üzerinde yapılacak yapısal analiz sonuçlarının uygulamacıyı, araştırmacıyı teknik olarak yanıltılabileceği açıktır. Modelin bir nevi doğrulanması, test edilebilmesi yapıya özel, karakteristik bir parametre ya da parametreler üzerinden yapılabilir ki; bu noktada sıklıkla başvuru parametreler mod şekli, modal frekans ve sönüm değerleri olarak tanımlanan dinamik davranış parametreleridir. Bu parametrelerin tahribatsız olarak “gerçek yapı” üzerinde deneysel bir şekilde elde edilmesi mümkündür ki; Operasyonel Modal Analiz yöntemi bu amaçla kullanılan bir yöntemdir.

Bu tez çalışmasında da teorik modal analiz sonucunda elde edilen dinamik davranış parametreleri Emir Saltuk Kümbeti üzerinde yapılan Operasyonel Modal Analiz uygulaması neticesinde elde edilen deneysel dinamik davranış parametreleri ile karşılaştırılmıştır. Bu uygulama ile sonlu elemanlar modeline tanımlanan malzeme karakteristiklerinin elde edilmesinde kullanılan yöntemin geçerliliğinin dinamik davranış parametreleri üzerinden irdelenmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışmasının amacı Emir Saltuk Kümbeti yapısının sismik davranışının incelenmesi *değildir*. Burada temel gaye; kümbet yapısı için nispeten daha güvenilir bir sonlu eleman modeli oluşturulması amacıyla modele tanımlanacak malzeme mekanik özelliklerinin tahribatsız olarak elde edilmesi amacıyla kurgulanan yöntemin Operasyonel Modal Analiz uygulaması ile sağlamasının yapılmasıdır. Çalışma, sadece basit planlı bir kümbet yapısını kapsamaktadır.

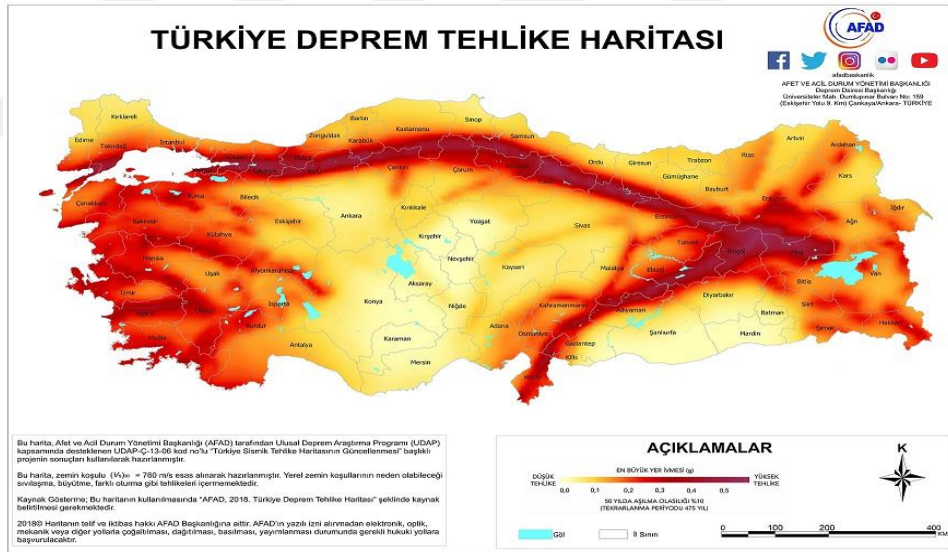
Takip eden başlıklar altında Anadolu da hüküm sürmüş medeniyetler ve bıraktığı eserlerden, Türkiye ile bölgenin depremselliğinden ve tarihi yapılardan ve özelde de tez konusunun öznesi, temel materyali olan Emir Saltuk Kümbeti hakkında bilgi sunulmaktadır.

1. GİRİŞ

1.2. Türkiye Depremselliği

Deprem yer merkezinde meydana gelen kabuk hareketi olarak adlandırılmaktadır. Depremi ani olması ve sonucunda büyük can ve mal kaybına sebep olması açısından insanlığı korkutan büyük doğal afetlerden birisidir (Sür 1993). Anadolu Coğrafyası da sismik olarak dünyanın en aktif coğrafyalarından biri olarak kabul edilmektedir.

Türkiye coğrafi olarak önemli deprem kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya deprem kuşağında bulunmaktadır. Türkiye coğrafyası Afrika-Arap ve Avrasya Plakaları arasında yer almaktadır. Bu plakalar sıkışarak Anadolu Plakasını sıkıştırmakta ve harekete zorlamaktadır (Sür 1993). Anadolu’ da oluşan depremler ise bu plaka hareketlerinin oluşturduğu diğer plaka sınırlarında meydana gelmektedir. Bu sınırlarda ise Kuzey Anadolu Fay Hattı, Doğu Anadolu Fay Hattı, Güneydoğu Anadolu Bindirme Kuşağı ve Ege Graben Sistemi oluşmaktadır (Özmen ve Nurlu 1999).



Şekil 1.1. Türkiye Deprem Haritası (Anonim 2019a)

Anadolu Coğrafyasında 1900-1999 yılları arasında yaklaşık 100 yıllık periyot içerisinde 131 adet hasarlı deprem meydana gelmiştir. Bu yüz yıllık periyotta ortalama her 8 ayda bir deprem meydana geldiği izlenimi oluşturmaktadır (Özmen ve Nurlu 1999). Meydana gelen bu depremler çok sayıda insan ve mal kaybına neden olmuştur. Ülkemizdeki deprem riski de Şekil 1.1’de gösterildiği gibi fay hatları göz önüne alınarak AFAD tarafından haritalandırılmıştır. Tarihi yapıları bu hasar bırakan depremlerden

1. GİRİŞ

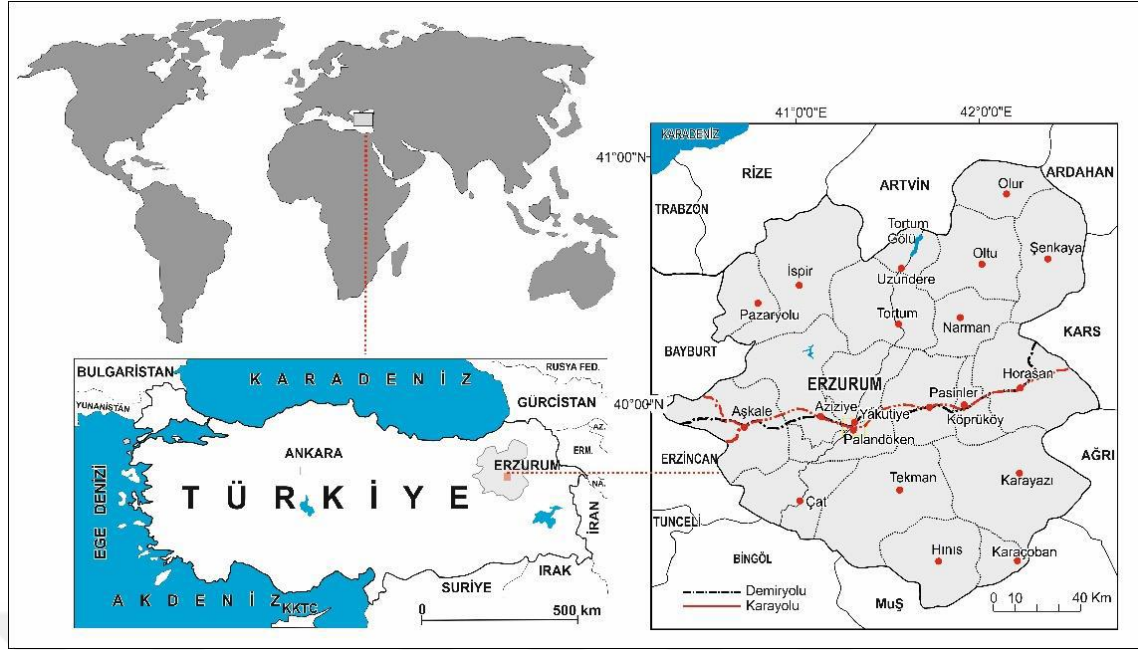
korumak inşaat mühendisliği disiplininin görev alanlarından birisi olduğu düşünülmektedir.

Şekil 1.1’de verilen deprem haritasına bakıldığı zaman Türkiye Coğrafyası ’nın deprem bakımından riskli ve tehlikeli bir konumu işgal ettiği görünmektedir. Bu da çok sık meydana gelebilecek ve geçmişte de meydana gelmiş olan çok ağır hasarlar bırakabilen can ve mal kaybına neden olan şiddetli depremler olabileceğini aklımıza getirmektedir. Depremler engel olunamaz doğal bir oluşum olduğu için her zaman hazırlıklı olmalıyız. Deprem ile yaşamayı öğrenmeli ve yapılan binaların buna göre yapılması sağlanmalıdır. Anadolu coğrafyasında da mevcut bulunan tarihi yapılar bahsi geçen depremlere maruz kalmaktadır. İnşaat mühendisleri olarak bizlerinde bu yapıların gelecek nesillere bir bütün olarak olabildiğince aktarılması için çalışması gerektiği düşünülmektedir. Genel olarak kısaca Türkiye Depremselliğinden bahsettikten sonra özelde de tez konumuz olan Emir Saltuk Kümbeti’ nin bulunduğu mevki olan Erzurum İlinin depremsellik durumunu anlatmak bu açıdan faydalı olacaktır.

1.3. Erzurum Bölgesi Depremselliği

Erzurum İli Türkiye’ nin yedi bölgesinden biri olan yaklaşık 150.000 Km²’lik alana sahip Doğu Anadolu Bölgesinde bulunmaktadır (Malekzadeh 2007). Şekil 1.2’de de görüldüğü gibi ülkemizin doğusunda ve Asya Kıtası Toprakları’ nda yer almaktadır. Matematiksel konumu ise 39°10'- 40°57' kuzey enlemleriyle 40°15'-42°35' doğu boylamları arasındadır (Kuşcu vd 2019).

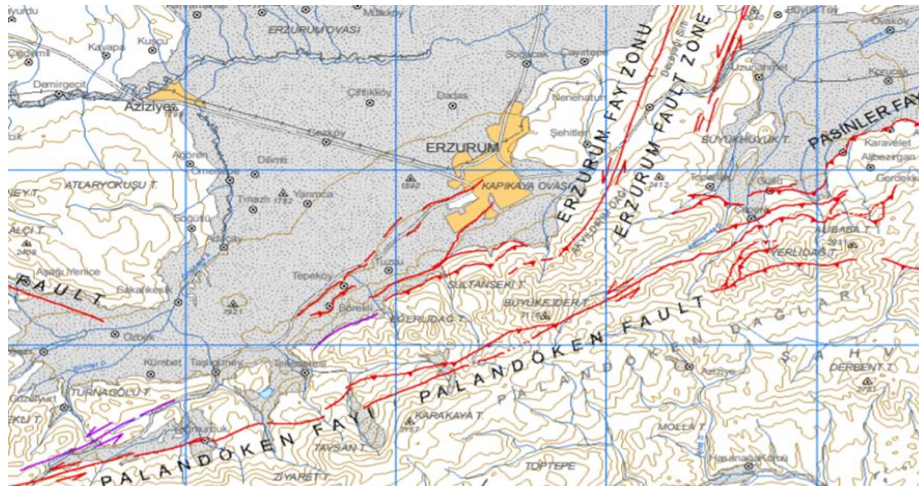
1. GİRİŞ



Şekil 1.2. Erzurum ili lokasyon haritası (Kuşcu vd 2019)

Bölge Alp-Himalaya dağ sisteminde yer almakta olan yüksek bir platodur. Bölgenin bu yüksekliğe ulaşabilmesi için yaklaşık 13 milyon yıl geçmiştir. Kuzey doğusunda bulunan Avrasya Levhası ve güneyinde bulunan Arabistan Levhasının çarpışması ile yükselme başlamıştır (Malekzadeh 2007).

Anadolu'nun en çok yükseltisine sahip olan bu bölgenin en önemli aktif fayları kuzeydoğu-güneybatı ve güneydoğu-kuzeybatı doğrultusundaki doğrultu atılımlı faylar ve doğu-batı doğrultusundaki ters faylardır (Malekzadeh 2007).



Şekil 1.3. Erzurum ili bölgesel fay hatları (Anonim 2012)

Şekil 1.3’de görüldüğü üzere Erzurum coğrafyasında mevcut bulunan fay hatları kuzeydoğu-güneybatı ve güneydoğu-kuzeybatı doğrultusundadır. Sismolojik olarak oldukça etkin olan bölgedeki Erzurum İlindeki mevcut faylar diri faylardır. Erzurum ilinde bulunan bu faylar Doğu Anadolu Faz Zonu’ nda kalmaktadır (Kuşcu vd 2019). Bölge normal faylar ile şekillenen bir yapıda değildir. Ters ve sol yönlü doğrultu atımlı faylar ile şekillenmiştir. Bu sebeple karmaşık şekilde dinamik bir bölgedir (Kuşcu vd 2019).

Sismik olarak oldukça hareketli ancak aynı zamanda kadim bir şehir olan Erzurum birçok medeniyete ev sahipliği yapmış ve medeniyetlerin günümüze kadar bıraktığı çokça tarihi eseri bünyesinde barındıra gelmektedir. Bu eserlerin pek çoğu bölgede meydana gelen depremlerden dolayı ya tamamen yıkılmış ya da kısmi olarak hasar görmüştür. Bunların bazıları onarılarak gün yüzüne çıkarılmış ve bazıları da onarım aşamasındadır. Bölgede meydana gelen ve yapılara ağır hasarlar veren 19.yy’ a ait tarihsel depremlerin bazıları 1843, 1852 ve 1859 tarihlerinde meydana gelmiştir. Yıkıcılıkları nedeniyle şehir hafızasında yer edinmiş bu tarihi depremlere kısaca bir değinmekte yarar görülmektedir.

Kronolojik olarak bahsedeceğimiz depremlerden ilki 1843 depremidir. Türk-İran sınır görüşmeleri sebebi ile bölgeyi ziyaret eden İngiliz Seyyah Robert Curzon 27 Ekim 1843 tarihinde Erzurum da bir depremin meydana geldiğini söylemektedir. Curzon depremin çok şiddetli olduğunu belirtmektedir. Meydana gelen deprem sonucunda şehirde bulunan birçok ev, işyeri, hamam ve bazı camilerin hasar gördüğünü ayrıca eski kale duvarlarının yıkıldığından bahsetmektedir. Ayrıca Çifte Minareli Medrese’ nin minarelerinden birinin tepesinin yok olduğundan bahsetmektedir (Küçükuşurlu ve Çelik 2014).

Robert Curzon deprem meydana geldiğinde bulunduğu evin büyük bir gemi gibi fırtınada sallanırcasına sallandığını, bulunduğu odanın bir kısmının çöktüğünü ve ortalığın toz dumana karıştığını söyleyerek deprem anını tasvir etmeye çalışmıştır. Deprem sonucunda doğanın sanki de felç olduğunu ve ahalinin büyük bir korkuya kapıldığını ayrıca ömrünce böyle bir deprem ile karşılaşmadığını söylemektedir (Yapıcı 2015).

Erzurum da meydana gelen diğer bir deprem ise 1852 depremidir. Deprem 14-15 Temmuz 1852 tarihinde vuku bulmuştur (Küçükuğurlu ve Çelik 2014). Şehir ve kale depremden zarar görmüştür. Dış kalenin batısında bulunan burçlar ve duvar korkulukları yıkılmıştır. Ayrıca bitişiğinde bulunan askeri kışlanın birçok koğuşu hasar görmüş ve bazıları kullanılamaz hale gelmiştir. İç kalede ise duvar yıkılmaları olmuştur (Küçükuğurlu ve Çelik 2014). Bu deprem hakkında dönemin gazetesi olan Ceride-i Havadis' te ramazan ayı içerisinde Erzurum ve çevresinde aralıklarla deprem meydana geldiği söylenmiştir. Bu da birçok depremin peş peşe meydana geldiğini göstermektedir (Yapıcı 2015). Deprem Cami-i Kebir (Ulu-cami), Lalapaşa, Cennetzade ve Hasanbasri adındaki önemli tarihi camilerin bazılarının yıkımına bazılarının ise hasar görmesine neden olmuştur (Bal 2018).

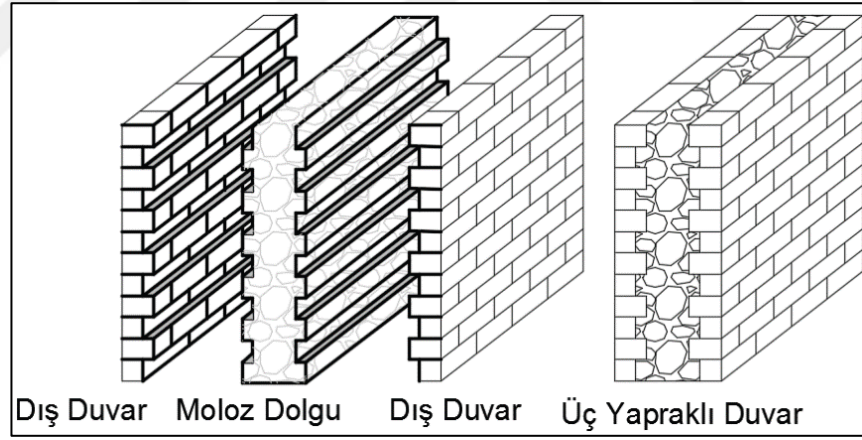
19. yüzyıla ait bir diğer deprem ise 1859 depremidir. Deprem 2 Haziran 1859 Perşembe Günü saat 03.00 ile 04.00 arasında meydana gelmiş ve yaklaşık olarak 15 sn kadar sürmüştür. 15 dakika sonra ikinci bir deprem meydana gelmiş ve ilkinin göre daha yıkıcı olmuştur. Deprem sonrasında yaklaşık 600 kişi vefat etmiş ve 1400 civarı ev ile 800 civarı dükkân tamamen yıkılmıştır (Bal 2018). Depremde Morgov Kışlasının yarısının tamamen yıkıldığı kalan yarısında ise oldukça çok hasar meydana geldiği dönemin Erzurum Valisi Arif Paşa tarafından Anadolu Ordu-yu Hümayun Müşiri Abdülkerim Paşa'ya bildirilmiştir (Küçükuğurlu 2014). 1859 depreminin sonuçları 1843 ve 1856 depremlerine göre daha yıkıcı olmuş ve vefat sayısı daha fazla olmuştur. Erzurum ili ve çevresini önemli ölçüde etkileyen ve çok sayıda tarihi yapıyı hasar almasına neden olan 19.yy depremlerden bahsettikten sonra tarihi yapıların sismik davranışları hakkında bilgi sunmak uygun olacaktır. Zira tez çalışmasının temel gayesi; Erzurum gibi sismik olarak aktif olan bölgelerde bulunan tarihi yapıların korunması ve geleceğe güvenle devredilmesi alanındaki çalışmalara katkı sunmaktır.

1.4. Tarihi Yapıların Sismik Davranışlarının İncelenmesi

Dünya coğrafyasında yaşamış olan kadim toplulukların günümüze kadar ulaşan birçok tarihi yapıları bulunmaktadır. Bu yapılar genel olarak yığma yapı kültürü ile oluşturulmuştur. Yapı malzemesi olarak doğal taşlar, tuğlalar ve bazılarında da kerpiç kullanılmıştır. Yapı taşlarını birleştirmek ve binayı inşa etmek için çimento harcı dışında

birçok farklı bağlayıcı malzemeler kullanılmıştır. Günümüz yığma yapılarında ise daha çok tuğla, briket, bims ve gaz beton gibi yapı taşları kullanılmakta, bağlayıcı olarak ise daha çok çimento karışumlu harç kullanılmaktadır.

Anadolu coğrafyasında da günümüze ulaşan çok miktarda tarihi yapı bulunmaktadır. Ülkemizdeki tarihi yapılarda ekseriyetle doğal taş ve pişmiş tuğla kullanılmıştır. Yapıyı oluşturan blokları bağlamak için ise kireç özlü horasan harcı da denilen bir bağlayıcı harç kullanıldığını ifade etmek mümkündür. Tarihi yığma yapılarda günümüz yığma yapılarına nazaran daha kalın duvarlar kullanıldığı bilinmektedir. Örneğin Erzurum Lala Mustafa Paşa Camii taşıyıcı duvarlarının ortalama kalınlığının 180 cm olduğu Kocaman vd (2019) çalışmasında ifade edilmektedir. Bu noktadan hareketle; tarihi yığma yapıların günümüz yığma yapılarına göre duvarlar daha masif olduğu söylenilebilir. İncelenen pek çok tarihi yığma yapının muhtelif kalınlıklarda ve Şekil 1.4’ görüldüğü üzere üç yapraklı duvar kesiti ile inşa edildiğini ifade etmek mümkündür.



Şekil 1.4. Üç yapraklı yığma yapı duvarı (Kocaman vd 2019)

Bulunduğumuz coğrafya sismik olarak çok aktif bir coğrafya olduğundan kültür mirasımızı korumak için dinamik davranışların nispeten güvenilir teknik yaklaşımlar ile belirlenmesi gerekmektedir (Kocaman vd 2019). Yapıda kullanılan malzemenin mekanik özellikleri belirlenirken birçok zorluk yaşanmaktadır. Tarihi yapıdan tahribatlı yöntemlerle numune alma, karot alma, olanağı genellikle bulunmadığından tahribatsız yöntemler kullanılarak malzeme özelliği tayin edilmeye çalışılmaktadır. İlgili yapının sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan teorik analizinde ise birçok kabul yapılmaktadır. Bu

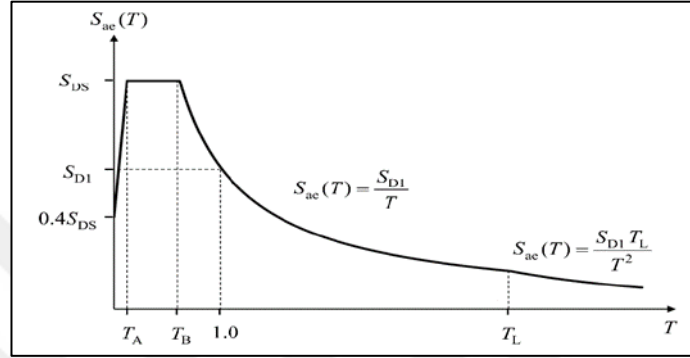
da yapılan modelin gerçeği temsil kabiliyetinden uzaklaşmasına neden olmaktadır. İşte bu noktada sonlu eleman modeli üzerinden teorik olarak hesaplanan dinamik davranış parametreleri üzerinden bir model güvenilirlik kontrolü yapılması sıklıkla yapılan bir uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapının deneysel olarak elde edilen dinamik davranış parametrelerinin teorik modelden hesapla elde edilen değerlerle kıyaslanması ve sonlu elemanlar modelinin modal analiz neticesinde deneysel dinamik davranış parametrelerine yakın değerler verecek şekilde güncellenmesi yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir. Tarihi yapıların dinamik davranış parametrelerinin deneysel olarak elde edilmesi amacıyla Operasyonel Modal Analiz uygulaması sıklıkla tercih edilmektedir. Shabani et al. (2022), Aslay ve Okuyucu (2019), Kocaman vd (2019) ve Costa et al. (2016) bu alanda yapılan örnek çalışmalar olarak değerlendirilebilir. Operasyonel modal analiz yönteminin tarihi yapıların dinamik davranışlarının deneysel olarak elde edilmesi amacıyla tercih edilmesinin en önemli nedeni olarak yöntemin titreşim kaynağı olarak ortam titreşimlerini kullanması olduğu ifade edilebilir.

Operasyonel modal analiz sonucunda tarihi yığma yapının dinamik kimliklendirme çalışmasının yapılması amaçlanır ki; bu noktada frekans ve periyot gibi kavramlar ön plana çıkmaktadır. Yapılar deprem gibi bir dinamik yük karşısında harmonik bir hareket yapmaktadır. Bu harmonik hareket sonucunda yapının birim saniyede yapmış olduğu tekrar eden hareket sayısına frekans ve harmonik bir hareketin tam bir turu için geçen süreye ise periyot denilmektedir. Frekans değeri ile periyot değeri arasında ters bir orantı bulunmaktadır.

Yapının doğal titreşim periyodu yapının karakteristiği olup sismik zorlamalar durumunda yapının maruz kalacağı ivmeyi belirleyen yapıya ait en önemli parametredir. Tarihi yapıların sismik davranışlarının incelenmesi amacıyla oluşturulan sonlu eleman modelinin yapının mevcut durumundaki doğal titreşim periyodunu verecek nitelikte olması bu bakımdan önemlidir. Ulusal mevzuatımız olarak kabul edilen TDBY (2018) tarihi yığma yapıları kapsamamaktadır. Bu nedenle, tarihi yığma yapıların sismik davranışları incelenirken muhtelif yabancı mevzuatla birlikte, TDBY (2018) uyarınca elde edilen deprem spektrumları da kullanılmaktadır. Elastik deprem spektrumları yapının inşa edildiği zemin türüne, bölgenin depremselliğine bağlı olarak hazırlanmış yapının periyoduna bağlı olarak depremde maruz kalacağı ivmeleri hesaplamaya yarayan

1. GİRİŞ

periyot-spektral ivme grafikleri olarak tanımlanabilmektedir. TBDY (2018)' de belirtildiği haliyle parametrik değerler üzerinden elastik tasarım spektrumu Şekil 1.5' te sunulmaktadır. Bina türünde bir yapı bulunduğu bölge için hesaplanan elastik tasarım spektrumu üzerinde, doğal titreşim periyoduna bağlı olarak konum alır. Aldığı konuma bağlı olarak depremde maruz kalması öngörülen spektral ivme hesaplanır. Bu bakımdan yapı periyodu, bu çalışma özelinde ise tarihi yığma yapı periyodu sismik davranışın incelenmesi bakımından önem arz eden bir parametredir.



Şekil 1.5. Yönetmelikte belirtilen tasarım için kullanılacak ivme spektrumu (TBDY 2018).

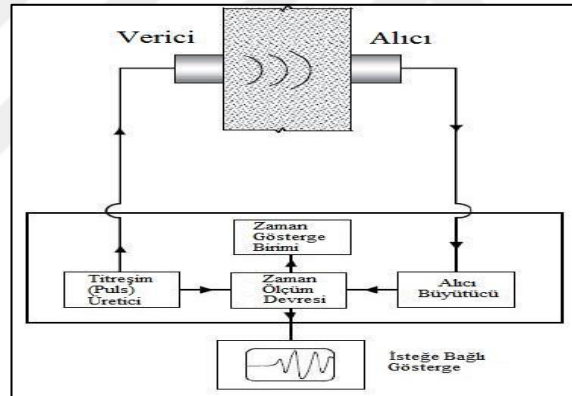
Mevcut yapılar için durum tespiti ve sismik davranış inceleme çalışmaları yapılırken belirtilenler dışında yapıyı oluşturan yapı malzemelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin bilinmesi de gerekmektedir. Bu çerçevede tarihi yapılara bakılınca akla asırlık yapılar gelmektedir. Bu yapılar çevresel etkiler ve insani etkiler sonucunda ilk durumuna nazaran dayanım kaybına uğradığı söylenebilmektedir. Bu sebeple yapıyı oluşturan yapı bloklarının ocakta alınan örneklerine göre dayanım olarak daha düşük olacağı düşünülmektedir. Ocaktaki taş ile yapı da kullanılan taş arasında bağlantı kurabilmek için de tahribatsız bir yöntem olan Schmidt Çekici sertlik yöntemi kullanılabilir ki; bu tez çalışmasında da bu yöntem uygulanmıştır. Bu tez çalışmasında incelenen tarihi yapı özelinde kullanılmış olan yöresel kamber taşı üzerinde; her iki durum için alınan sertlik değerleri ile ocaktan alınan numunenin kırım sonucu elde edilen basınç dayanımı kullanılarak karşılaştırmalı bir inceleme yapılmıştır.

Tarihi yapıların test edilebilirliği hakkındaki diğer bir problem ise bağlayıcı olarak kullanılan harçtır. Tarihi yapıların dokunulamamazlığı nedeni ile yapılardan uygun bir miktarda harç alarak test etmek mümkün değildir. Yapının tahrip edilmesi bir yana; tarihi

1. GİRİŞ

yapıdan mekanik test yapılacak ölçülerde harç numunesi alınması son derece zor bir işlemdir. Tarihi yapılarda kullanıldığı bilinen harç ise genellikle horasan harcı dediğimiz harçtır. Literatürde belirtilen çalışmalarda horasan harcı için basınç dayanımı 5.5 MPa ve birim hacim ağırlığı için ise 17,6 kN/m³ olarak kabul yapılmıştır. Çekme dayanımının ise basınç dayanımının yaklaşık %5' i olarak kabul edilmektedir (Kocaman vd 2019).

Tarihi yapı yığma duvarları üzerinde belirsizliğe neden olan bir başka husus ise üç yapraklı duvarın merkezinde yani ikinci tabakasında bulunan moloz duvardır. Moloz duvarın test edilmesi ve duvardan numune alınması tarihi yapılarda *genellikle* olanaksızdır. Bu sebeple tahribatsız bir yöntem olarak kullanılan ve çalışma prensibi Şekil 1.6'da gösterilen ultrases yöntemi ile bir fikir edinilebileceği düşünülmüş ve bu tez çalışmasında bir uygulaması da yapılmıştır.



Şekil 1.6. Ultrases geçiş hızı tayini cihazı çalışma prensibi (Aksoy ve Karaton 2019)

Yukarıda bahsedilen yöntem ve teknikler ile yapıyı oluşturan malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri tespit edildikten sonra sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan modelde tanımlanmaktadır. Oluşturulan model üzerinde teorik modal analiz çalışması yapıldıktan sonra dinamik karakteristiğini ortaya koyan mod şekli, periyot ve frekans değerleri elde edilmektedir. Güvenilir olduğu kabul edilen bir sonlu eleman modeli üzerinde tarihi yapı sismik davranışının incelenmesi amacıyla dinamik analizler yapılmakta, ayrıca yapının mevcut durumu hakkında fikir yürütülebilmektedir. Nihayetinde gerekli görülmesi halinde projelendirme çalışmaları yapılarak tarihi yığma yapıya yapısal ve yapısal olmayan müdahaleler yapılmaktadır. Müdahale kararının saha incelemeleri ile birlikte sonlu elemanlar modeli üzerindeki analiz sonucunda alındığı

dikkate alındığında, tarihi yapılar için mümkün olduğu kadar güvenilir sonlu eleman modelleri oluşturma'nın önemi kendiliğinden ortaya çıkmaktadır ki; bu tez çalışmasının temel amacı da bu alandaki teknik bilgi birikimine katkı sunmaktır.

Tarihi yapıların sismik davranışlarının iyileştirilmesi amacıyla yapılan uygulamalara örnek olarak tarihi yığma yapıların hasar durumlarına göre uygulanan ve yapı elemanlarını güçlendirme amacı taşıyan FRP yani Fiber Takviyeli Polimerler uygulamaları ile zemin yalıtımı amacıyla uygulanan yani kauçuk izolatör ve sürtünme esaslı sismik izolatör kullanımı örnek olarak gösterilebilir (Aydın vd 2007).

Yığma yapıların sismik davranışlarının incelenmesi hususunda genel bir bilgi sunulduktan sonra Ülkemizde bulunan yığma yapılardan ve günümüze miras bırakan geçmiş medeniyetlerden bahsetmenin uygun olacağı düşünülmektedir.

1.5. Türkiye ve Ev Sahipliği Yaptığı Medeniyetler

Anadolu, sahip olabilmek için üzerinde birçok medeniyetin savaştığı kadim bir topraktır. İklimi, verimli toprakları ve bulunduğu konum sebebi ile Anadolu topraklarına birçok medeniyet sahip olmak istemiştir. Bu verimli toprakları elde etmek için birçok savaş meydana gelmiştir. Bu sebeple Anadolu toprakları üzerinde birçok medeniyetin hâkimiyeti söz konusudur. Hâkimiyetleri sürecinde de her medeniyet yaşamak için gerekli olan birçok yapı inşa etmişlerdir. Bunları bir kısmı günümüze ulaşmakta ve bir kısmı ise yeni yeni gün yüzüne çıkmaktadır. Bu bölümde, tez çalışmasının önemini vurgulamak amacıyla, Anadolu hâkimiyeti sürdüren medeniyetlerden ve bu medeniyetlerin bırakmış olduğu eserlerden bahsedilecektir.

Anadolu toprakları dünyanın ilk yerleşim yerlerindendir. İnsanlığın hayatını sürdürebilmek adına avcılık ve toplayıcılık yapmakta iken tarım ve hayvancılığa geçişi ve uygulamasına dair izlere Anadolu topraklarının hemen hemen her köşesinde rastlamak mümkündür. Ayrıca Anadolu tarih boyunca dini, kültürel ve ticari açıdan geçmişi çok eskiye dayanan önemli kültürlerden biridir. Şekil 1.7'de görüldüğü üzere bu kadim coğrafyada Göbeklitepe gibi Çatalhöyük birçok kadir yerleşimler mevcuttur (Anonim 2019b).

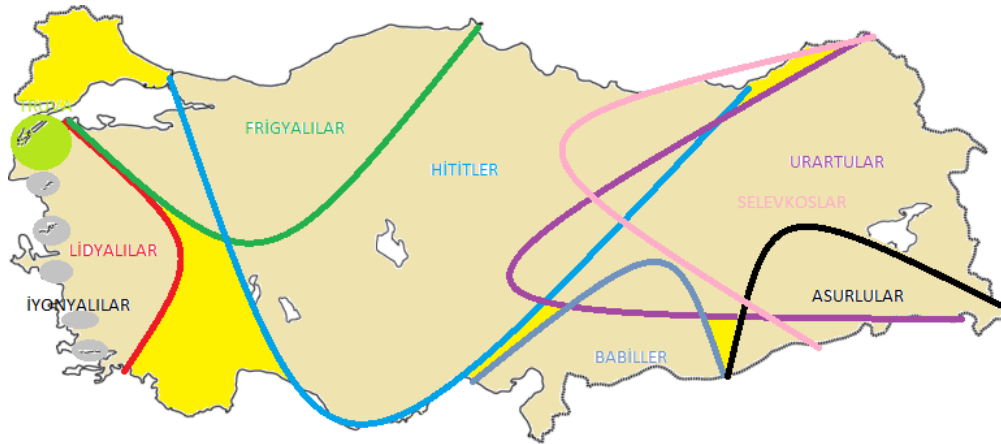
1. GİRİŞ



Şekil 1.7. Anadolu Coğrafyası ilk yerleşimler (Anonim 2019b)

İnsanlık tarihinin başlangıcı olarak sayılan taş devri dönemine ait yerleşimler Göbeklitepe, Karain, Beldibi, Çatalhöyük, Çayönü, Hacılar gibi bölgelerde bulmak mümkündür. Tunç çağında ise Karaz Kültürü etki göstermiştir. Bu dönemde Hatti, Hitit, Hurri, Asur gibi medeniyetler ortaya çıkmıştır. Hemen akabinde demir çağı devletleri diye adlandırılan Geç Hititler, Frigya ve Urartular tarih sahnesinde yer almaktadır. Frigya'nın masallara konu olmuş en tanınmış kralı ise Kral Midas'tır. Ayrıca başkentleri ise Gordion' dur (Anonim 2021a).

Klasik dönemde ise Anadolu' nun batısında Lidya, Ahameniş ve İyonya devletleri görülmektedir. Helenistik döneme bakıldığında Makedonya, Selevkoslar ve Partlar görülmektedir. Akla ilk gelen isim ise Büyük İskender' dir (Anonim 2021a).



Şekil 1.8. İlk dönem Anadolu Medeniyetleri

1.6. Saltuklular

Günümüz çağına bakıldığı zaman araştırılabilecek bilim alanı ve araştırma yapan bilim insanı sayısı oldukça fazladır. Elde edilen bilimsel çıktılara rahatlıkla ulaşabilmekte ve üretilen bilgi muhafaza edilebilmektedir. Lakin Saltuk Oğullarının yaşamış olduğu Orta Çağ Dünyasında Bilim ile uğraşan bilim insanlarının sayısının günümüze göre daha kısıtlı olması ve elde edilen bilginin muhafazasının daha zor olması sebebi ile tarihsel bir vaka hakkındaki bilgi, çağımıza daha zor ulaşmakta ve çelişkiler içermektedir.

İmam Gazali Endülüs’ te çıkan bir kitabın üç ay gibi uzun bir süre de Selçuklu Ülkesine ulaşabildiğini ve buna çok üzüldüğünü söylemektedir (Taşyürek 2016). Bu da bilgi ağı ve ulaşımının ne kadar kısıtlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca Orta Çağ Dünyasında yaşanan savaşlar, depremler ve diğer felaketler var olan bilgi kaynaklarının tahribatına yol açmıştır ve günümüze birçoğu ulaşamamıştır.

İlhanlı Hükümdarı Hülagü Bağdat’ a girdiğinde kütüphane ve saraylarda bulunan bütün kitapları yok ettiği kaynaklarda geçmektedir. Kitapların Dicle Nehrine atıldığı hatta Dicle Nehrinin günlerce kan ve mürekkep aktığı söylenilmektedir. (Anonim 1991). Bu durum ortaçağ dünyasında meydana gelen ilmi tahribata örnek gösterilebilir.

Saltuklu Beyliği’nde de yukarıda bahsettiğimiz sebepler zuhur etmektedir. Büyük Selçuklu Devletinin gölgesinde kalması, Gürcüler ile yaşanan savaşlar nedeniyle bu beylik hakkındaki bilgiler oldukça kısıtlıdır ve bazı bilgiler ise net değildir. Saltuklu Beyliği ile Gürcülerin arasında meydana gelen savaşlar sonucunda Gürcü üstünlüğü ile biten her muharebenin nihayeti talan ve yağma olmuştur (Söylemez 2019). Bu da tarihi belge, kitap ve kitabelerin yok olması ile sonuçlanmıştır.

Türkler tarihte yaşamış oldukları olayları kayıt altına pek alamamışlardır. Bu sebeple tarihimizle ilgili önemli bilgiler genellikle yabancı kaynaklardan elde edilebilmektedir. Örneğin Asya Hun Tarihi için Çin kaynaklarından bilgi alınabilmektedir. Göktürkler için ise Çin ve Bizans kaynaklarından alınabilmektedir. Ayrıca yazılı bir doküman dan farklı olarak mimari özellikleri veya maddi kalıntıları var

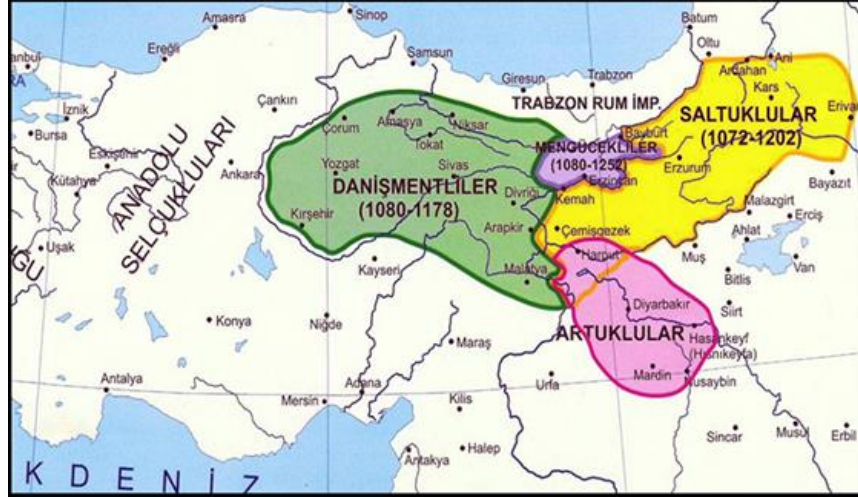
ise bunlardan da bilgi alınabilmektedir. İlk Türkler daha çok göçebe yaşantı sürdükleri için mimari özelliklerden pek bir bilgi çıkarılamamaktadır. Orhun Kitabeleri gibi yazıtlardan ve Pazırık Kurganı gibi mezarlardan bilgi alınabilmektedir (Taşağıl 2020). Bu da bize gösteriyor ki bir toplumun yazılı bir kaynaktan başka; yazıt, mezar, sikke ve ev, han, hamam, saray gibi tarihi yapıları o toplumun kültürü ve tarihi hakkında bizlere bilgi vermektedir.

Saltuklular hakkında ise dönemde basılan sikkeler ve yaptırılan tarihi yapılar önemli bilgiler vermektedir. Ayrıca Ermeni, Süryani ve Gürcü kronikleri de dönem hakkında bilgi vermektedir (Söylemez 2019).

Tarih 1071 Yılı'nı gösterdiğinde Selçuki Ordusu ve Bizans Ordusu savaşmak için Malazgirt Ovası'nda karşı karşıya gelmişlerdir. Bizans ordusunun Selçuklu ordusuna nazaran sayıca katbekat daha fazla olduğu söylenmektedir. Ancak sayıca düşük olan Selçuklu Ordusu askerlerinin daha disiplinli ve aralarındaki bağın daha kuvvetli olduğu kaynaklarda geçmektedir. Buna karşı Bizans ordusunun büyük çoğunluğu paralı, belli bir amacı olmayan değişik milletlere mensup askerlerin teşkil ettiği bir ordu olduğu söylenilebilmektedir. Bu sebeplerin Selçuklu Ordusunun savaşı kazanmasında en büyük etkenlerden olduğu söylenilebilir. Savaşın sonucu Selçuklular lehine olmuş ve Diyar-ı Rum' un kapısı Türklere açılmıştır. Malazgirt Savaşında Sultan Alparslan'ın yanında savaşanlardan birinin de Saltuklu Beyliğinin kurucusu Emir Saltuk olabileceğinden bahsedilmektedir (Merçil 2006).

Zafer sonrası Sultan, beraberinde çarpışan emirlerine Anadolu ya akınlar yapmalarını istemiş ve fethedilen yerin kendilerine ikta olacağını ve bu iktanın babadan oğula geçeceğini söylemektedir. İşte bu emirlerden biri de Erzurum ve çevresine akınlar düzenleyip burayı iradesi altına alan Emir Saltuk idi (Özdoğan 2008).

Beylik 1080 Emir Ebu'l-Kâsım Saltuk tarafından Erzurum'da kurulmuştur (Gürbüz 2002). Bazı kaynaklarda Ebu'l-Kâsım Saltuk ile Emir Saltuk ayrı kişiler olarak zikredilir ve beyliğin kuruluşu 1072 olarak da tarihlendirilir. Ancak beyliğin kurucusunun Saltuk olduğunu ve Saltuklu Beyliği isminin kurucusuna atfedildiği her iki durum içinde kanıtlayıcı bir durumdur. Beyliğin işgal ettiği sınırlar Şekil 1.10' da gösterilmiştir.



Şekil 1.10. İlk dönem Anadolu Beylikleri (Anonim 2020)

Beylik Saltuk Bey den sonra Emir Ali, Emir Ziyaeddin Gazi, Emir İzzettin II. Saltuk, Emir Nasiruddin Muhammed ve Emir Melik Şah tarafından yönetilmiştir. Hatta bir dönem Mama Hatun tarafından da idare edildiği söylenilmektedir (Gürbüz 2002). Saltuklu Beyliğini diğer beyliklerden ayıran önemli iki özelliğinin; Anadolu da kurulan ilk Türk beyliği olması ve iktidar sürecinde hanım bir hükümdarın bulunması olarak düşünülebilir.

Anadolu Selçuklu Sultanı Rükneddin Süleyman Şah tarafından 25 Mayıs 1202 Yılında Saltuklu Beyliği'ne son verilmiştir (Özkan 2016). Bu dönem zarfında Beylik arkasında birçok tarihi eser bırakmıştır. Bunlardan biri de, bu tez çalışmasının öznesi olan, Emir Saltuk Kümbeti' dir. Erzurum ili çevresinde hâkimiyet kurmuş olan Beyliğe ait diğer eserlerden bahsetmek yerinde olacaktır.

1.7. Saltuklu Beyliği'nin Hükmettiği Coğrafyadaki Bırakmış Olduğu Tarihi Yapılar

Malazgirt Savaşı'ndan sonra Sultan Alparslan'ın emri ile savaşa katılan emirler ve beyler Anadolu' ya akınlar düzenlemiş ve bazı yerleri ele geçirmişlerdir. Bu ele geçirdikleri yerler vergi dışı kendilerine ve nesillerine ikta olarak bırakılmıştır. Zaferden sonra Mengücek Gazi Erzincan Kemah ve çevresini, Danişment Gazi Sivas ve çevresini alırken Emir Saltuk Gazi ise Erzurum ve çevresini zapt etmiştir. Saltukluların egemenlik sürdüğü Erzurum ve çevresine önemli tarihi eserler bırakmıştır.

Saltuklular Erzurum merkez olmak üzere Pasinler, İspir, Oltu, Tortum, Micengirt, Bayburt, Kars ve Tercan da hüküm sürmekteydi (Özkan 2016). Erzurum' un batısında bulunan ve bugün ki Erzincan İline haiz Tercan İlçesinde bulunan Mama Hatun Türbesi Nasuriddin Muhammed' in kız kardeşi ve İzzettin Saltuk' un kızı olan Melike Mama Hatun tarafından yaptırılmıştır. Yine aynı bölgede yani Tercan da Mama Hatunun yaptırdığı Mama Hatun Kervansarayı ve Mama Hatun Hamamı ve camisi bulunmaktadır (Gürbüz 2002). Diğer gösterişli eserlerden biride Erzurum Ulu Camii'dir. Saltuklu Emirlerinden Nasuriddin Muhammed tarafından 1179-80 tarihinde yaptırılmıştır (Özkan 2016). Erzurum da bilinen ilk Saltuklu eseri ise Kale Mescidi 'dir. Kitabesi olmamak ile birlikte tepsi minare referans alınarak eserin Saltuklu Emiri Emir Gazi tarafından 1124-1132 yılları arasında yaptırıldığı kabul edilmektedir (Gürbüz 2002). Diğer bir mescit ise Sultan Melik Mescididir. Günümüz Erzurum' unda Üç Kümbetlerin yanında bulunan Gürcü Mehmet Camiinin yerinde bulunmaktaydı. Mescidin tamamen harap olması üzerine yerine Sadrazam Gürcü Mehmet Paşa 1648 yılında Gürcü Mehmet Camii yaptırılmıştır (Gürbüz 2002).

Bir diğer eser ise Erzurum Kalesinde mevcut bulunan Saat Kulesi' dir. Yapı, Tepsi Minare, Kesik Kule veya Minare Kule olarak ta adlandırılmaktadır. Ancak en çok kullanılan isimleri Tepsi Minare ve Saat Kulesi'dir. Kesme taş ve tuğladan inşa edilmiş 21 m yüksekliğinde görkemli bir yapıdır (Gürbüz 2002).

Çalışmanın asıl konusu olan diğer bir tarihi yapı ise Emir Saltuk Kümbeti 'dir. Bu eser günümüzde Erzurum Üç Kümbetler bölgesi adıyla anılan yerde bulunmaktadır. Kendisinden ayrı 3 kümbet daha bulunmaktadır. En gösterişli ve en büyüğü Emir Saltuk Kümbeti' dir. Kümbetin, Saltuklu Emirlerinden Emir İzzettin II. Saltuk' a ait olduğu düşünülmektedir.

Bu çalışma, yukarıda önemi ve kültür mirasımıza katkıları sunulmaya çalışılan Saltuklu Devleti' ni ve medeniyetini tanıtmak amacıyla 2020 yılını Saltuklu Yılı ilan eden Erzurum Yakutiye İlçe Belediyesi' nin katkılarıyla Saltuklu Yılı etkinlikleri kapsamında hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında Emir Saltuk Kümbeti üzerinde tarihi yığma yapı malzeme karakterizasyonunun tahribatsız uygulamalarla tayinini içeren bir yöntemin irdelemesi yapılmıştır. Kümbet yapısının inşasında kullanılan doğal taşlar incelenmiş;

yöresel kamber taşı üzerinde kapsamlı malzeme karakterizasyonu çalışmaları yapılarak yığma duvar mekanik özelliklerine geçiş yapılmış ve bu özellikler sonlu eleman modeline tanımlanmıştır. Kümbet yapısının operasyonel modal analiz çalışmasıyla dinamik davranış parametreleri elde edilmiş ve sonlu eleman modeli üzerinden elde edilen değerlerle kıyaslamalar yapılmıştır. Çalışmanın amacı, tahribatsız yöntemlerle yığma yapı malzeme karakteristiklerinin nispeten güvenilir bir şekilde belirlenmesine dair bir yöntemin irdelenmesi ve alınan sonuçların operasyonel modal analiz uygulaması sonuçları üzerinden sağlamlasının yapılmasıdır.

Takip eden bölümde konuya ilişkin literatür özetlerinin bir derlemesi sunulmaktadır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Tez çalışmasının amacının ve gerekliliğinin ortaya konulması, literatürde dolduracağı boşluğun vurgulanması ve elde edilen sonuçların bilimsel değerinin benzer çalışmalarla kıyaslama suretiyle tartışılabilmesi için kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Bu bölümde, tez çalışması dahilinde erişilebilen literatürse yapılan tarama sonucu konuyla ilişkili olduğu düşünülen çalışmalar kendi içerisinde gruplandırılarak alt başlıklar dahilinde özetlenmiştir.

2.1. Saltuklu Tarihi ve Emir Saltuk Kümbeti

Tez çalışması kapsamında Emir Saltuk Kümbeti üzerinde dinamik kimliklendirme çalışması yapılmıştır. Çalışma Erzurum ili Yakutiye Belediyesi 2020 Saltuklu Yılı etkinlikleri kapsamında gerçekleştirildiğinden çalışmanın önemine vurgu yapılması bakımından Saltuklu Beylik tarihi ve Emir Saltuk Kümbeti üzerinde incelemeleri konu edinen çalışmalardan örnekler sunulmasında yarar görülmektedir.

Gürbüz (2002), Saltuklu beyliğinin genel, siyasi, coğrafi ve askeri özelliklerinden bahsedilmiştir. Ayrıca Erzurum’ da ve civar beldelerde inşa edilmiş tarihi yapılar anlatılmıştır. Erzurum Üç Kümbetler mevkiinde bulunan en büyük kümbetin Emir Saltuk’ a ait olduğu dile getirilmiştir.

Bozhüyük (2007), Erzurum şehir merkezinde bulunan tarihi eserler incelenmiştir. Trafik, çevre kirliliği, gürültü ve hava kirliliği gibi çevresel etmenlerin bu tarihi eserler üzerindeki etkisi konu edinilmiş. Sonuç olarak tarihi eserlerin muhatap olduğu genel sorunlar irdelenmiş ve çevrelerindeki olması gereken peyzaj düzenlemeleri ele alınmıştır.

Özdoğan (2008), Osmanlı Devleti hâkimiyetine girene kadar Erzurum ve çevre bölgeleri anlatılmış ve Saltuklular, yöneticileri ve mimarisinden bahsedilmiştir. Emir Saltuk Kümbetinin İzzeddin Saltuk’ a ait olabileceği söylenilmiştir. Ayrıca Erzurum’ un birçok medeniyete ev sahipliği yaptığı ve Türk ve İslam kültürünün bölgede yayılmasına önemli katkıda bulunulduğundan bahsetmiştir.

Dikmen (2015), Erzurum da kurulmuş olan Saltuklu Beyliğinin hükümdarlarından olan İzzeddin Saltuk döneminde meydana gelen olaylar ve Kafkasya üzerindeki politikasından bahsedilmiştir. Ayrıca Saltuklara ait mimariden bahsedilmiş olup üç kümbetler diye adlandırılan kümbetlerden en büyüğünün İzzeddin Saltuk' a ait olduğundan bahsedilmektedir.

Özkan (2016), Saltuklu tarihinden ve yaşamış olduğu coğrafyada ki bırakmış olduğu tarihi eserlerden söz etmiştir. Ayrıca bu tarihi yapıların mimarisine, figürlerine, süslemelerine, malzeme ve teknik özelliklerine değinmiştir.

Yakar vd (2016), Erzurum Yakutiye İlçesinde mevcut bulunan Emir Saltuk Kümbetinin Fotogrametrik rölöve çalışması yapılmış ve tarihi yapı üç boyutlu olarak modellenmiştir. Yapının üç boyutlu modellenmesi Photomodeler programı ile yapılmıştır.

İşler (2017), Erzurum'un coğrafi konumunu açıklamış olup tarihsel olarak kalkolitik dönemden başlayıp günümüze kadar ki tarihi süreci anlatmıştır. Anıt mezarlar türbeler ve kümbetler hakkında bilgi vermiştir. Yakutiye ilçesinde bulunan mevki olarak üç kümbetler diye geçen dört kümbetin sanat tarihi açısından önemini vurgulayan sanat tarihi raporu oluşturmuştur. Anadolu' da bulunan diğer türbe ve kümbetler Erzurum'daki üç kümbetler ile kıyaslanmış ve benzerlikleri ön plana çıkarılmıştır.

Kara (2017), Saltuklu Beyliği dönemine ait olduğu düşünülen, hâkimiyet sürdüğü coğrafyada ki tarihi yapılar üzerinde bulunan kitabeleri incelemiştir. Bu kitabeleri dil ve üslup açısından incelemiştir.

Kayhan (2018), Malazgirt Savaşı'nın kazanılmasından sonra Anadolu da kurulmuş olan ilk Türk Beliklerinin komşu oldukları Ermeniler ile ilişkileri incelenmiştir. Bu dönemde Ermenilerin Türk Hâkimiyetinde mutlu ve huzurlu yaşadığına vurgu yapılmıştır.

Söylemez (2019), Erzurum da hâkimiyet gösteren Saltuklu Beyliğinin kuruluşu, Gürcüler ile olan mücadeleleri ve bırakmış olduğu tarihi eserler tahlil edilmiştir. Saltuklu Beyliğinin özellikle güçlü olduğu dönemlerde Gürcülere karşı önemli zaferler kazanması, Gürcülerin Anadolu içlerine kadar girmelerini önlemiş ve böylece Anadolu'daki diğer Türk Beyliklerinin zarar görmesinin engellendiği sonucuna varılmıştır.

2.2. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi

Erkmen (2022), Erzurum ilinde Üç Kümbetler mevkiinde gerçekleştirmiş olduğu çalışmada Anonim-2 isimli mezar yapısının sonlu elemanlar modelini makro modelleme ile ve SAP2000 yazılımını kullanarak oluşturmuştur. Gerçekleştirdiği çalışmada Operasyonel modal analiz ile yapının deneysel modal parametrelerini elde ederek tahribatsız olarak oluşturdukları ve yeni bir yaklaşımla bu parametrelerin çeşitli yönetmeliklerin hesap yöntemlerinden faydalanılarak elde edilmesi kontrol edilmiştir.

Ercan (2010), İzmir İlinde mevcut olan Vezir Su Kemer ve Urla' da bulunan Taş Köprü tarihi yapıları modellenmiş, operasyonel modal analiz yapılmış, malzeme özellikleri belirlenmiş ve deprem davranışları incelenmiştir. Yapıyı oluşturan bağlayıcı taşlar ve kullanılan harç hakkında bilgi verilmiştir. Yapı modeli ile yapının gerçek halinin örtüştüğü ve modelin yapıyı belirgin olarak temsil ettiği görülmüştür.

Birinci (2010), Tarihi köprülerde sonlu eleman yöntemi ile oluşturulan modeller için alınan verilerin bazılarında eksiklik olmasından dolayı zorunlu olarak bazı kabuller yapılmaktadır. Bu kabullerin güvenilirliği araştırılmış olup modelde iyileştirmeye gidilmiş ve gerçek davranış sergileyen en iyi modelin oluşturulması amaçlanmıştır.

Çarhoğlu vd (2014), SAP2000 programı kullanılarak Kars Kümbet Camisi modellenmiş olup 20 farklı deprem kaydı uygulanarak yapıda meydana gelen basınç-çekme gerilmeleri ve deformasyonlar bulunarak aralarında kıyas yapılmıştır. Neticede x ve y yönünde meydana gelen çekme-basınç gerilmelerinin birbirine yakın olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Hökelekli (2015), Manisa da mevcut olan Hafsa Sultan Camii ve Minaresi modellenerek operasyonel modal analiz yapılmıştır. 1999 Kocaeli deprem iveme değerleri kullanılmış, lineer ve non-lineer deprem analizi yapılmıştır. Abaqus ve Artemis yazılımları kullanılmıştır. Teorik ve deneysel veriler arasında farklılık olduğu görülmüş ve kalibrasyon yapılmış. Bu işleme mütekabil elastisite modülü 1500 MPa dan 770 MPa' a kalibre edilmiştir.

Çalık vd (2016), Trabzon İlinin Akçaabat İlçesinde mevcut olan Dürbinar Cami' ye ait betonarme kubbenin oturmuş olduğu taş duvarlara dinamik etkisi ölçülmüş, restorasyon sonrası mevcut olan betonarme kubbenin kaldırılarak orijinal ahşap örtülü hale getirilmesinden sonra alınan ölçümler sonucunda yapısal davranışları karşılaştırılmıştır. Yöntem olarak çevresel titreşim testi yöntemi yapıya uygulanmıştır. Tarihi yığma yapılara yapılacak olan yenilme çalışmalarında yapının durağan veya hareketli durumlar için risk oluşturulacak müdahalelere gidilmemesi sonucuna varılmıştır.

Dabanlı (2016), İstanbul İlinde mevcut bulunan Nur-u Osmaniye Camii restorasyon sürecinde incelenmiş ve yapının deprem performansı hakkında çalışılmıştır. Yapıda kullanılan tüm malzemeler ve yapının taşıyıcı sistemi oluşturmak için uygulanan yapım teknikleri tanıtılmıştır. Yapının bulunduğu bölgenin geçirmiş olduğu depremlerden ve yapının restorasyon süreçlerinde bahsedilmiştir.

Çoruhlu vd (2017), Doğu Karadeniz de bulunan farklı özelliklerdeki 30 tane tarihi köprü SAP2000 de modellenerek operasyonel modal analiz yapılmış elde edilen mod şekilleri ve titreşim frekanslar ile çoklu regresyon yöntemi kullanılarak yapısal davranış kontrolü sağlayacak formül elde edilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak taş kemer köprülerin frekans hesapları için formül oluşturulmuştur.

Gani (2017), Davutpaşa Kışlasının Makro modellenmesi yapılmış ve yapıya operasyonel modal analiz uygulanarak yapının mevcut durumu sergilenmiştir. Sayısal ve ampirik çalışmalar sonucunda müşabih özelliklere sahip yığma binalar için mod şekillerinin benzer olduğu ve yatayda ki salınımlar şeklinde meydana geldiği görülmüş, bu tarz binalar da düşey yönde bir salınım meydana gelmediği söylenilmiştir.

Kocaman (2017), Erzurum Yakutiye Medresesi ve Lala Paşa Camii tarihi yapıların malzeme özellikleri tayin edilmiştir. Ayrıca yapılar makro yöntemle modellenerek deneysel ve teorik mod şekilleri ve frekans değerleri tespit edilmiştir. 92 Erzincan deprem kaydı uygulanarak yapılar da oluşabilecek muhtemel hasarlar tahmin edilmiştir.

Aslay (2017), Erzincan İli Değirmenliköy’de mevcut bulunan kilise apsisinin 1939 Erzincan Depremindeki davranışı incelenmiştir. İnceleme sonucunda yapının kemerlerinde ve tonozlarda hasar olabileceği tahmin edilmektedir. Ayrıca yapıda bir apsis olabileceği kanaatine varılmış ve bu apsisin deprem veya diğer çevresel etkenler ile yapıdan ayrıldığı ve zamanla yıkıldığı varsayımı yapılmıştır.

Güneş (2017), Operasyonel modal analiz ile yığma yapıların niteliksel dinamik özelliklerinin tespitini yapmıştır. SAP2000 ve Artemis programları kullanılmıştır. Yığma yapıların deneysel ve teorik modellenmesi sonucu elde edilen çıkarımların karşılaştırılması yapılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda aralarında farklılıklar olduğu sonucuna varılmıştır. Bu farklılıkların sebebinin ise yapılan kabuller olduğu söylenilmektedir.

Youssof (2018), İzmir Selçuk İlçesinde mevcut bulunan İsa Bey Camii avlu duvarlarının dinamik dataları operasyonel modal analiz ile değerlendirip dinamik mizacı tahmin edilmiştir. Üzerinde çalışılan duvarın hasar sonucunda göçmesi beklenen bölge için farazi hasar limitleri belirlenmiştir. Çalışma bulguları sonucunda her bir tarihi yığma yapının kendine özgü bir güçlendirme çalışmasının yapılabileceği belirtilmiştir.

Günaydın (2018), Deneysel operasyonel modal analiz yöntemi ile onarımı yapılmakta olan Trabzon İskender Paşa Camii Minaresinin dinamik nitelikleri belirlemiştir. Çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında ilgili caminin minaresinin onarılmasından sonra oluşturulacak modelin daha kullanılabilir olması ve hali hazırdaki yapının davranışı için daha kat-i bir sonuç elde edilebilmesi hedeflenmiştir.

Öksüz (2019), 3D ANSYS 16.0 programı kullanılarak Rize Timisvat Köprüsü makro modelleme yaklaşımı ile modellenmiş olup dinamik analiz yapılmıştır. Oluşturulan modele analizler için 1999 Kocaeli Depremi Düzce İstasyonu ve 1992 Erzincan depremi Erzincan İstasyonu kayıtları uygulanmış, oluşan çekme gerilmeleri, basınç gerilmeleri ve azami yer değiştirmeler tespit edilmiştir.

Alpaslan (2019), Ordu ve Sivas arasında mevcut bulunan Sarpdere Köprüsü modellenmiş ve operasyonel modal analiz yapılmıştır. Yapının mevcut durumunda ki modal parametreler referans parametrelerle karşılaştırılarak hasarın yeri ve hasar derecesi belirlenmiştir.

Kocaman vd (2019), Operasyonel modal analiz uygulanarak Erzurum Lala Paşa Camii taşıyıcı elemanlarının malzeme özelliklerinin belirlenmesi çalışması yapılmıştır. 1992 Erzincan Deprem kayıtlarının kullanılarak dinamik analiz yapılmış ve yapıda meydana gelen göçmeler tahlil edilmiştir. Yapılan deprem analiz sonucunda sırasıyla minarede, son cemaat yerinde, küçük kubbelerde ve en sonunda yapının tamamında ciddi hasarlar meydana gelebileceği söylenilmiştir.

Asalay ve Okuyucu (2019), Erzincan Değirmenli Köyü Kilisesi' nin makro modellenme ile oluşturulan yapısal modeline operasyonel modal analiz uygulanmış ve deprem kayıtları uygulanarak dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. İncelenen kilisenin apsisi ile ana gövde arasında hasar olduğu ve bu hasarın apsisi ana gövdeden ayırmış olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Altıok (2019), Manisa da mevcut olan Lala Mehmet Paşa Camii ve İbrahim Paşa Camilerine ait minarelerin zemin ile münasebetleri göz önüne alınarak lineer ve non-lineer analizleri yapılmış ve dinamik etkiler sonucunda ki deprem davranışları incelenmiştir. Deneysel çalışmalar için operasyonel modal analiz yöntemi, teorik çalışmalar için ise Abaqus programı kullanılmıştır. Yapılan çalışma da minarelerin zayıf olan bölgeleri tespit edilmiş ve bu bölgelerin güçlendirilmesi önerilmiştir.

Hökelekli (2020), tarihi bir minarenin zemine mesnetlenmesi durumunun esnek ve ankastre olarak kabullenmesi ile elde edilen sonuçlar ile yapının zemin ile ilişkisi irdelenmiştir. Yığma minarelerin dinamik davranışlarının belirlenmesinde zemin ilişkileri ve düşey yer hareketinin önemi bildirilmektedir. Elde edilen sonuçların yüksek çıkma sebebinin ise malzeme davranışlarının doğrusal kabul edilmesinden kaynaklandığı sonuçlarına varılmıştır.

Kılıç vd (2020), Kırklareli Hızır Bey Cami Minaresini kabuk (shell) ve çubuk eleman şeklinde iki ayrı model oluşturarak DBYBHY 2007 ve TBDY 2018 deprem yönetmeliklerine göre analiz yapmış olup oluşan taban kesme kuvvetini ve tepe noktası deplasmanlarını karşılaştırmıştır.

Sözen vd (2020), Niksar Yılanlı (Leylekli) Köprüsü üzerinde reel deprem kaydı kullanarak doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılarak üzerinde mütalaa yapılmıştır. Köprünün mevcut yapısının değiştirilmesi sonucunda deprem performansının olumlu yönde etkilenebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan tüm analizlerde simetrik olmayan köprü modelinin diğer durumlara göre daha az zorlandığı tespit edilmiştir.

Türker ve Yanık (2020), Sonlu eleman yöntemi ile modellenen İlyas Bey Camii deprem yükü, rüzgâr yükü ve öz zati yükü altında analiz edilerek minarede meydana gelen deformasyonlar basınç, çekme ve kayma gerilmeleri bulunmuştur. Dinamik ölçümler ise çevresel titreşim testi ile bulunmuştur. Teorik model ile deneysel model farkı başlangıçta %12,06 iken kalibrasyon sonucu % 3,67'ye kadar düşürülmüştür.

2.3. Tahribatsız Malzeme İnceleme Yöntemleri

Tez çalışması kapsamında yığma duvar mekanik özelliklerinin tahribatsız yöntemlerle tayini üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu nedenle, bu bölümde tahribatsız yöntemlerle malzeme incelemelerini konu edinen çalışmalara ulaşmak amacıyla yapılan literatür taraması neticesinde erişilen çalışmalardan örnekler sunulmaktadır.

Siyahi (1986), 7 günlük ve 28 günlük toplam 120 adet küp beton numunesi kullanılarak ultrases yöntemi ile basınç dayanımları bulunmak istenmiştir. Ayrıca ilgili beton örneklerinin kalitesi ve yaşı bu yöntem ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Basınç mukavemeti ile ultrases geçiş hızı arasında bir bağlantı kurulmuştur.

Erdal (2002), Beton basınç dayanımlarının tahribatsız yöntemler ile tespit edilmesi üzerine araştırma yapılmıştır. Yöntem olarak Schmidt çekici kullanılmıştır. Sonuç olarak Schmidt çekicinden elde edilen sertlik değerlerinin basınç dayanımına uyarlanmasında % 5,4 lük bir yaklaşıklık elde edildiği belirlenmiştir.

Gülmez (2005), Isparta ve Burdur şehirlerinde bulunan bazı tarihi yığma yapılara ait tuğla, taş gibi yapısal malzemelerin özellikleri incelenmiştir. Tahribatsız deneyler için Schmidt çekici ve ultrases hızı yöntemlerini kullanmıştır. Deney sonuçlarına göre tarihi yapıların dayanımının günümüz yapılarına nazaran birçoğuna göre daha fazla olduğu yorumu yapılmıştır.

Tavlı (2017), Özel üretimli 60x60 cm boyutlarındaki 3 farklı beton örneği üzerinden donatı ve hasar tespiti çalışması yapılmıştır. Hasarsız yöntemlerden biri olan ultrases ve ultrasonik tomografi yöntemi kullanılmıştır. Bu iki yöntemin sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak ultrasonik tomografinin ultrases yöntemine göre daha avantajlı olduğu ve sonuçların daha yakınsak çıktığı neticesine ulaşılmıştır.

Özdoğan (2018), Schmidt çekici kullanarak yığma duvarların mekanik özelliklerinin tespit edilmesi amacı ile elde edilen bağıntı yardımıyla makro modellenmiş olan Erzurum Kadana Camii üzerinde yapılan çalışma da yapıda kullanılan malzemenin ortalama sertlik değeri, elastisite modülü tahmin edilebilmiştir. Ayrıca ultra ses yöntemi ile malzemenin basınç dayanımı ve elastisite modülü hakkında anlamlandırılabilir sonuçlar elde edilmiştir.

Aksoy ve Karaton (2019), Diyarbakır Ulu cami üzerinde tahribatsız yöntemler kullanılarak malzeme tayini yapılmıştır. Yöntem olarak L tipi Schmidt çekici ve ultrases kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda yapıda kullanılan malzemelerin özellikleri belirlenmiştir.

Gürbüz (2019), Nevşehir ve Kayseri illerinde bulunan kırmızı ve beyaz İgnimbiritlerin Schmidt çekici yöntemi ile dayanımları araştırılmıştır. L tipi Schmidt çekici kullanılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen bulguların dayanım sonuçları için anlamlı ifadeler verdiği kanaatine varılmıştır.

Kocaman vd (2020), Erzurum Tortum İlçesi Pehlivanlı Mahallesi'nde bulunan Kireçli köprüsü ile İspir İlçesi'nde bulunan Kız Köprüsü' nün yapımında kullanılan malzeme özelliklerini tahribatsız yöntemler ile tayin edilmesi amaçlanmıştır. İlgili malzemelerin mekanik özelliklerinin tayininin yapılması için Schmidt çekici ve ultrasonik ses yöntemlerini kullanmışlardır.

Karaman (2020), Schmidt çekici yöntemi ile kayaların yüzey sertliğinin pürüzlülük ile ilişkisini araştırmıştır. Doğal, yüzeyi taşlanmış ve kesilmiş örnekler alınarak pürüzlülük durumuna göre aralarına kıyas yapılmıştır. Sonuç olarak kesilmiş yüzeylerin pürüzlülüğünün daha düşük olması sertliğin fazla olmasına ve alınan ölçümler arası standart sapmanın daha düşük olmasına sebep olduğu kanaatine varılmıştır. Pürüzlülüğü daha az olan malzemeler için elde edilen sonuçlar arasında ki standart sapmanın düşük olması elde edilen sonuçların daha gerçekçi olduğu ve Schmidt çekici vurulacak yüzeylerin pürüzlülüğün azami derecede giderilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

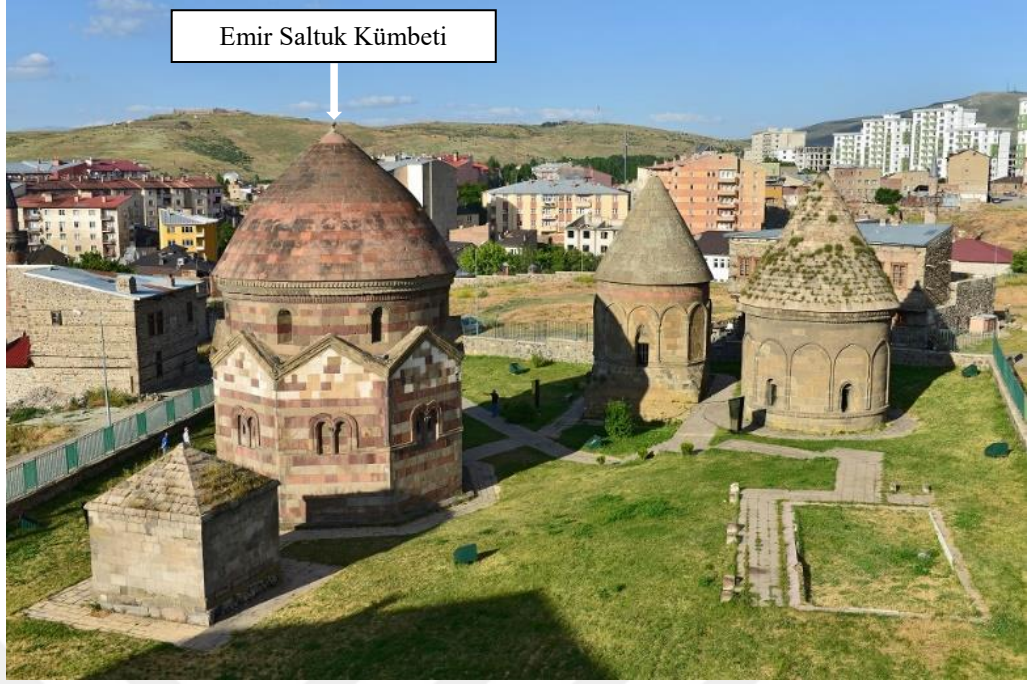
Bu bölümde, tarihi Emir Saltuk Kümbeti dinamik kimliklendirme çalışmasının materyali olan Emir Saltuk Kümbeti ile çalışma sürecinde kullanılan yöntemler hakkında bilgi sunulmaktadır. Kümbet yapısında kullanılan yapı taşlarının fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde izlenilen yol ve yöntemler ele alınacak; ilgili tarihi yapının sonlu eleman modelinin oluşturulması ve operasyonel modal analiz uygulaması hakkında açıklamalar yapılmaktadır.

Tarihi yapılar bulunduğu coğrafyada yaşayan geçmiş kültür ve medeniyetler için bizlere önemli bilgiler veren rehber gibidirler. Tarihi yapıda mevcut bir kitabe var ise banisi hakkında ve dönem hakkında bilgi verebildiği gibi mimarisi, sanatı ve mühendisliği hakkında da önemli bilgiler vermektedir. Tarihi bir yapı incelenirken tarihsel, sanatsal, mimari ve mühendislik özelliklerin bir bütün olarak incelenmesinin uygun olabileceği düşünülmektedir. Bu sebeple; çalışma kapsamında İnşaat Mühendisliği disiplini açısından incelenecek olan Emir Saltuk kümbeti hakkında *teknik bilgi* sunulması gereklidir.

3.1. Emir Saltuk Kümbeti ve Mimarisi

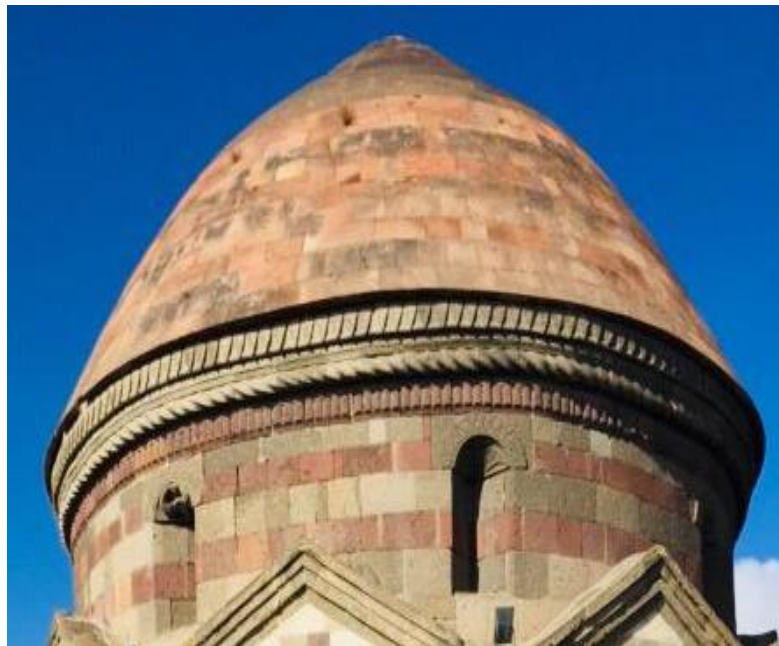
Tarihi yapılar, mezarlar, abideler bölgenin tarihi ve kültürel geçmişi hakkında günümüzü aydınlatmaktadır. Aynı zamanda bu yapılar ilgili toplumun tarihi kimlik belgesi niteliğindedir. Ahlat Mezar taşları, mevcut bulunan kümbetler, kervansaraylar, medreseler, köprü ve su kemerleri bizim için Anadolu'nun tapu senetleridir.

Saltuklu Beyliği hüküm sürdüğü süre zarfından Erzurum ve çevresinde önemli eserler bırakmıştır. Bunlardan biri de Şekil 3.1'de genel görüntüsü sunulan Üç Kümbetler alanındaki Emir Saltuk Kümbeti' dir. Şekil 3.1' de görüldüğü üzere bulunduğu alanda kendisinden ayrı üç kümbet daha bulunmaktadır. Yani toplamda dört kümbeti bölge ihtiva etmektedir. Bunlardan en büyük ve gösterişlisi Emir Saltuk Kümbeti' dir.



Şekil 3.1. Erzurum Üç Kümbetler Bölgesi genel görünümü ve Emir Saltuk Kümbeti

Kümbetler anıt mezar özelliği göstermektedir. Silindir veya çokgen gövdeli külah örtülü bir yapıdır. Toprağın alt kısmında mezar odası bulunmaktadır. Kümbetler genellikle dönemin ünlü şahsiyetlerinin, hükümdarlarının ve ilim adamlarının defin edildiği yerlerdir. Üst örtüsünün Şekil 3.2’de gösterildiği gibi külah şeklinde olmasının göçebe yaşam tarzından kalan çadır yapısından esinlenerek yapılmış olabilmesi kaynaklarda geçmektedir (Kara 2017).



Şekil 3.2. Emir Saltuk Kümbeti külah şeklindeki üst örtüsü

Emir Saltuk Kümbeti üzerinde herhangi bir kitabe bulunamadığı için banisi hakkında net bir bilgi bulunamamaktadır. Lakin kuvvetle muhtemel Emir İzzettin II. Saltuk' a ait olduğu ve 12. yy başında inşa edildiği ifade edilmektedir (Dikmen 2015).

Emir Saltuk Kümbeti iki kattan oluşup (Gürbüz 2002) yapısında çeşitli geometrik özellik ve süs ihtiva etmektedir. Alt katında mezar odası bulunmakta olup kümbetin hemen girişinden birkaç merdivenle buraya inilebilmektedir (Gürbüz 2002). İkinci kat ise içten moloz taş dıştan ise kırmızı, beyaz ve gri tonlardaki renkleri muhtevasında bulunduran kesme taşlar ile örülmüştür (Özdoğan 2008). Ana gövde sekizgen olup devamı silindir bir kasnak şeklindedir (Bozhüyük 2007). Kümbet iç duvarı Şekil 3.3'te görüldüğü gibi dış duvara göre daha özensiz örülmüştür.



Şekil 3.3. Emir Saltuk Kümbeti içten görünüm

Kümbetin kapısı ise kuzeye bakan yüzeyindedir. Kapı üzerinde bulunan bezemeli taş lento ise Şekil 3.4 ve 3.5'te gösterildiği gibi hasarlıdır. Her bir yüzeyin tepesinde üçgen bir başlık bulunmaktadır. Üçgen başlıkların tepe noktasının hemen altına gelebilecek şekilde dördü açık ve dördü kapalı olmak kaydı ile toplam sekiz tane çiftler pencere bulunmaktadır (Özgen 2009).

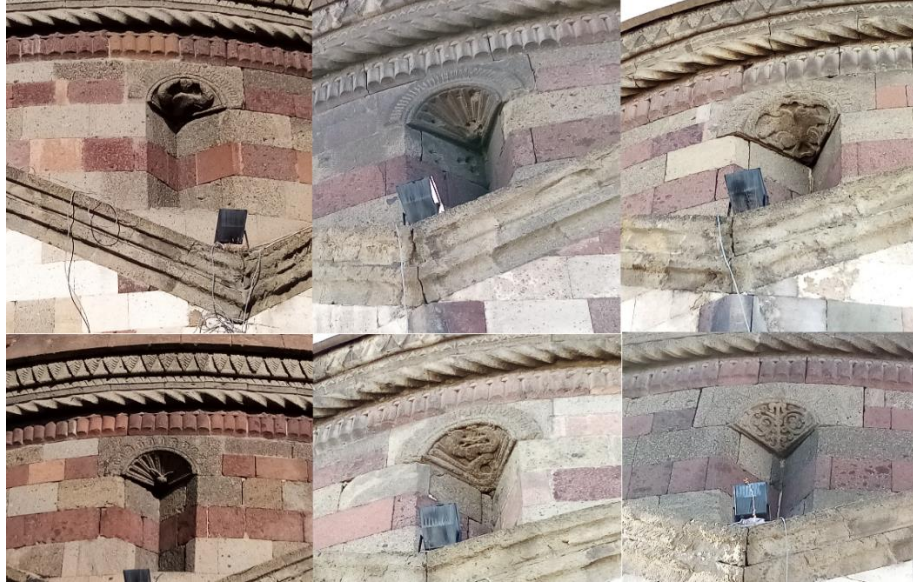


Şekil 3.4. Kumbetin kuzey yönünde bulunan kapı ve üzerindeki lento



Şekil 3.5. Kumbet üzerinde bulunan açık ve kapalı çiftli pencereler

Sekizgen gövdeli kumbetin plan genişliği 14 m, silindir gövde genişliği 12 m ve külah dâhil toplam yüksekliği ise zeminden itibaren 18 m' dir. Duvar kalınlığı ise ortalama 1,5 m' dir. Gövde ile külahın bağlandığı silindirik gövde üzerinde ise Şekil 3.6'da gösterildiği gibi her iki üçgen başlığı ortalayacak şekilde sekiz adet duvar içine doğru yapılmış oyuklar yani nişler bulunmaktadır. Nişler düz değildir. Bir yüzeyi olmayan içeriye doğru girintili üçgen prizma şeklinde düşünülebilir. Her bir nişin üst başlığında değişik hayvan tasviri yapılmış kabartmalar bulunmaktadır (Özkan 2016).



Şekil 3.6. Silindirik gövdedeki nişler ve üzerlerindeki hayvan kabartmaları

Üst örtüsü ise iç tarafı kubbeli külah şeklindedir. Lakin külah ne konik ne de kubbe tarzındadır. Konik ve kubbe ölçülerine sahip hafif bombeli külah denilebilir (Yakar vd 2016). Örtü külahının uç kısmında ise topuz bir âlem bulunmaktadır. Kümbet 1956 yılına ait onarımdan önce Şekil 3.7’de görüldüğü gibi hasarlıdır. Yapı 1956 yılında Milli Eğitim Bakanlığı tarafından onarılırken külah tamamen sökülmüş ve betonarme ile güçlendirilip tekrar örülmüştür (İşler 2017). Bu onarım esnasında örtü külahın geometrik yapısı bozulmuş olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 3.7. Üç Kümbetler bölgesi restorasyon öncesi görünümü (Özkan 2016)

Emir Saltuk Kümbeti inşasında tek tür taş kullanılmamış, yapı andezit, bazalt ve yöresel kamber taşı kullanılarak inşa edilmiştir. İlaveten Erkmen (2022) çalışmasında kapsamlı bir şekilde alınan ve mekanik özellikleri çalışılan yöresel Sivişli taşının da eser miktarda kullanılmış olduğunu ifade etmek mümkündür. Tez çalışması kapsamında *beton* Schmidt darbe çekici uygulaması ile doğal taşların basınç dayanımının eldesi ve sonrasında duvar mekanik özelliklerine geçişi içeren bir yöntem takip edilmiştir. Beton Schmidt darbe çekici kullanılarak andezit ve bazalt türü doğal kayaların basınç dayanımı tahminine ilişkin yeni kalibrasyon bağıntıları Özdoğan (2018) çalışmasında sunulmuş ve bu çalışma kapsamında da kullanılmıştır. Ancak, yapı dış cephesindeki kesme taş duvar inşasında kullanılmış olan yöresel kamber taşı hakkında erişilebilen literatür ve diğer teknik kaynaklarda güvenilir bir teknik bilgiye ulaşmak mümkün olmamıştır. Bu nedenle, deneysel çalışmaların birinci safhasını yöresel kamber taşı üzerinde yapılan fiziksel ve mekanik incelemeler ile beton Schmidt çekici kullanımı durumunda kamber taşı için sertlik-basınç dayanımı kalibrasyon bağıntılarının türetilmesini içeren çalışmalar oluşturmuştur. Takip eden safhalarda duvar mekanik özelliklerinin eldesine yönelik çalışmalar, sonlu elemanlar modelinin oluşturulması ve teorik modal analizler ile operasyonel modal analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

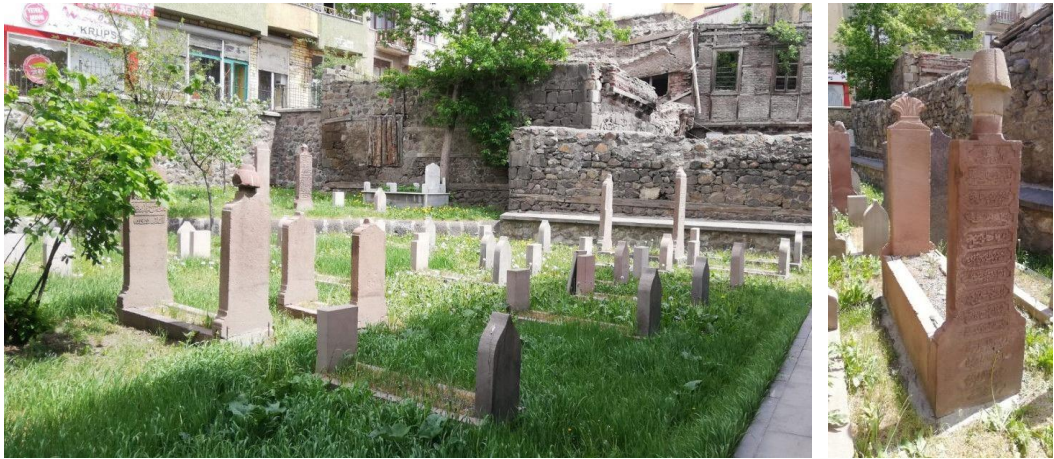
3.2. Kamber Taşı Üzerinde Yapılan Malzeme Karakterizasyonu Çalışmaları

Emir Saltuk Kümbeti yapı taşı olarak kırmızı kamber taşı, andezit ve eser miktarda da bazalttan oluşmaktadır. Yapısal özellik olarak kırmızı kamber taşının özellikleri pek bilinmediğinden taş ocağından alınan kamber taşı örnekleri üzerinde gerekli çalışmalar yapılmış fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 3.8’ de kümbet dış cephesinde kamber taşı kullanımına ilişkin bir görsel sunulmaktadır.



Şekil 3.8. Emir Saltuk Kümbeti Muhtevastındaki Kırmızı Kamber Taşları

Yapılan araştırma neticesinde kamber taşının kırmızı rengi nedeniyle Erzurum ili ve çevresinde yığma yapılarda süsleme amacıyla kullanıldığı ancak sıklıkla çeşme ve mezar taşı imalatı için tercih edildiği öğrenilmiştir. Şekil 3.9’ da Erzurum Narmanlı Camii haziresinde bulunan ve çoğunluğu Osmanlı-Rus harplerinde Osmanlı cephesinde savaştan Çeçen asker ve paşalara ait olan ve kamber taşından imal edilen mezar taşları görülmektedir. Söz konusu cami haziresinin Emir Saltuk Kümbeti’ ne olan uzaklığı yaklaşık 300 m’ dir.



Şekil 3.9. Erzurum Narmanlı Camii haziresindeki kamber taşından imal edilmiş mezar taşları (Anonim 2021b).

Koyu kırmızı ve gri tonlarındaki kamber taşı Erzurum iline 24 km mesafede Dumlu Dağı' nın doğu eteklerinde yer alan Kırmızıtaş Mahallesi' ndeki ocaklardan çıkarılmaktadır. Yöreden çıkarılan taşın ithafen, önceki adı Kamber Köyü olan bölge zaman sonra isim değiştirerek Kırmızıtaş Mahallesi adını almıştır. Bu tez çalışması kapsamında kamber taşı ocaklarına erişilmesi ve numune alınması yerel taş ustalarından Özkan YAPAR beyefendinin yardımlarıyla mümkün olmuştur. Öncelikle taş ocağına gidilmiş, kamber taşı kütlelerinden beton Schmidt çekici kullanılarak sertlik okumaları alınmış ve sertlik okumaları alınan kayalardan TS 699/T1 (2016) kodlu “Doğal yapı taşları - İnceleme ve laboratuvar deney yöntemleri” standardına uygun olarak 70x70x70 mm ebatlarında numuneler kesilmiştir. Şekil 3.10'da gösterilen kütle halindeki kamber taşından alınan kırmızı kamber taşı numuneleri göre Şekil 3.11'de görüldüğü gibi makine ile kestirilmiştir. İşlem sonucunda elde edilen küp numuneler Şekil 3.12'de gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Kırmızı Kamber Taşının kesilmeden önce ocaktaki hali



Şekil 3.11. Kırmızı Kamber Taşının Makinada Kesilmesi



Şekil 3.12. Kesildikten sonra elde edilen kamber taşı numuneleri

Temin edilen küp numuneler TS 699/T1 (2016) uyarınca gerekli deneyleri yapmak üzere Erzurum Teknik Üniversitesi Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi Yapı Laboratuvarı' na getirilmiştir. Tüm deneyler adı geçen laboratuvarda yapılmıştır.

3.2.1. Kamber taşının birim hacim ağırlığının belirlenmesi

70x70x70 mm ebatlarında kesilen numunelerin boyutları ölçülmüş ve bazı taşların bazı boyutlarında fark olduğu tespit edilmiştir. 40 adet kadar kesilen numunelerin 32 adeti için ölçümler yapılmış ve Çizelge 3.1'deki ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Her bir numunenin ebatları Şekil 3.13'deki gibi ölçülmüş, ağırlıkları ise Şekil 3.14'deki gibi ölçülerek çizelgeye kaydedilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçlarından boyutlar çarpılarak numunelerin hacimleri hesap edilmiş ve hassas teraziden elde edilen kuru ağırlıklarının bu hacimlere bölünmesi ile de numunelerin birim hacim ağırlıkları hesap edilmiştir. İncelenen kamber taşı numuneleri için ortalama birim hacim ağırlık $2.415,70 \text{ kg/m}^3$ olarak bulunmuştur.



Şekil 3.13. Kamber taşı numune boyutlarının kontrol edilmesi



Şekil 3.14. Kamber taşı numunelerin birim ağırlık için kütle ölçümleri

İlgili literatürde kamber taşı için birim hacim ağırlık verisine erişim sağlanması mümkün olamamıştır. Bu nedenle kamber taşı için elde edilen $2.415,70 \text{ kg/m}^3$ değerinin kamber taşı konu edinen başka çalışmalar ile kıyaslanması mümkün olmamıştır. Ancak, Atalay (1983) çalışmasında kamber taşının çıkarıldığı Dumlu Dağı eteklerindeki bölgenin tamamen volkanik kayaç kütlelerinden ibaret dağlık bir alan olduğu ifade edilmektedir. Kamber taşı numunelerinin müracaat edilen uzman jeologlar tarafından gözle yapılan muayenesinden kayacın başkalaşım ya da tortul kayaç olmadığı, magmatik kayaçlardan volkanik kayaç sınıfından bir kayaç olduğu çıkarımı yapılmıştır. Magmanın soğuma ve katılaşma işleminin yerkabuğu yüzeyinde ya da yüzeye yakın yerlerde meydana gelmesi durumunda oluşan kayaçlara volkanik kayaç adı verilmektedir ki; bazalt bu tür kayaçlara

3. MATERYAL ve YÖNTEM

örnek verilen bir kayaç türüdür (Anonim 2021c). Bazaltın birim hacim ağırlığı (Anonim 2019c) kaynağında 3.000 kg/m^3 ; Erişiş vd (2019) çalışmasında ise $2.605\text{-}2.869 \text{ kg/m}^3$ aralığında verilmektedir. Bu durumda, incelenen kamber taşının $2.415,70 \text{ kg/m}^3$ birim hacim ağırlık ile volkanik bazalt kayacından daha hafif olduğu çıkarımı yapılmaktadır.

Çizelge 3.1. Kamber taş numuneleri boyut, ağırlık ve birim hacim ağırlık değerleri

Numune No	En (cm)	Boy (cm)	Yükseklik (cm)	Ağırlık (gr)	Birim Hacim Ağırlık (Kg/m^3)
K-1	7	7	6	738	2.510,2
K-2	7	7	6,5	787	2.471,0
K-3	7	7	6	707,3	2.405,8
K-4	7	7	7	797,2	2.324,2
K-5	6	7	7,5	698,9	2.218,7
K-6	7,5	6	7	719,7	2.284,8
K-7	7	6	7	710,2	2.415,6
K-8	6	7	7	709,6	2.413,6
K-9	7	7	7	841,3	2.452,8
K-10	6	7	7	694,4	2.361,9
K-11	6	7	7	708,7	2.410,5
K-12	7	7	7	804,7	2.346,1
K-13	7	7	7	848,6	2.474,1
K-14	7	7	7	852,8	2.486,3
K-15	7	7	7	805,4	2.348,1
K-16	7	7	7	815,1	2.376,4
K-17	6,5	7	6,5	778,8	2.633,3
K-18	6	7	7	697,8	2.373,5
K-19	7	7	7	804,4	2.345,2
K-20	7	7	7	856,6	2.497,4
K-21	7	6,5	7	785	2.464,7
K-22	7	7	7	898	2.618,1
K-23	6	7	7	728,2	2.476,9
K-24	6	7	7	721,8	2.455,1
K-25	7	7	7	808,6	2.357,4
K-26	7	7	6	733,2	2.493,9
K-27	7	7	6	699,8	2.380,3
K-28	8	7	6	798,8	2.377,4
K-29	7	7	7	819,4	2.388,9
K-30	6	7	7	684,3	2.327,6
K-31	6	7	7	698,2	2.374,8
K-32	6	7	7	716,8	2.438,1
Ortalama					2.415,7

3.2.2. Kamber taşı porozite tayini

Porozite deneyi malzemedeki boşluk oranını ve malzemenin su emme oranını bulmak için yapılmaktadır. TS 699/ T1 (2016) uyarınca 70x70x70 mm boyutların da düzgün dört adet küp şeklinde kamber taşı numunesi uygulama için seçilmiştir. Seçilen örnekler önce yıkanıp iyice temizlenmiştir. Daha sonra bir yüzeyleri 4 eşit parçaya bölünebilecek şekilde tebeşir ile Şekil 3.15'deki gibi çizilmiştir. İçerisi temiz bir kaba yerleştirilen numuneler dörtte birine gelebilecek şekilde kap su ile doldurulmuştur. Bir saat aralıklar ile numunelerin önce yarısına kadar sonra dörtte üçüne ve en son tamamı su içerisinde kalacak şekilde su ilave edilmiştir. Bu işlemler sonucunda oda sıcaklığında numuneler 45 saat boyunca su içerisinde bekletilmiştir.



Şekil 3.15. Kamber taşı numunelerinin porozite tayini amacıyla su içinde bekletilmesi

Su içerisinde 45 saat bekletildikten sonra kamber taşı numuneleri çıkarılarak yüzeyleri temizlenmiş ve Şekil 3.16'daki gibi hassas terazide tartılmıştır. Bu tartım sonucu; kamber taşı numunelerinin doymuş haldeki kütlelerini vermektedir. Yapılan bu ölçüm işlemi bir gün aralıklar ile tekrarlanmıştır. Ölçüm farkları irdelenmiş olup aralarındaki farkın % 0,1 mertebelerinde olduğu gözlemlenmiş ve ölçülen kütlenin değişmez olduğu kabulü yapılmıştır.



Şekil 3.16. Suyu doygun haldeki kamber taşı numunelerinin ölçülmesi

Elimizde mevcut bulunan dört adet kamber taşı numuneleri için tüm prosedür tekrarlanmıştır. Daha sonra tüm numuneler için su içerisindeki ağırlıklarının ölçülmesine geçilmiştir. Her bir numunenin su içerisindeki ağırlıklarının ölçülmesi için Şekil 3.17’ de görünen Arşimet Terazisi kullanılmıştır. Numuneler delikli kovanın içerisine konularak terazinin altında bulunan kancaya asılmıştır. En altta bulunan kısma su konulmuştur. Terazide bulunan kol yardımı ile numuneler tamamı su içerisinde kalacak şekilde batırılmıştır. Terazide meydana gelen ağırlık değişimleri izlenmiştir. Ağırlığın stabil olduğu anda meydana gelen ölçüm değeri doygun haldeki kamber taşı numunelerinin su içerisindeki ağırlığı olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3.17. Arşimet terazisi ile kamber taşı numuneleri üzerinde yapılan ölçümler

Sonraki aşamada kamber taşı numunelerinin kuru ağırlıklarının ölçülmesine geçilmiştir. Numuneler temizlendikten sonra Şekil 3.18’de görüldüğü gibi 110 °C’ deki etüve atılıp kuruması beklenmiştir. Yaklaşık olarak 20 saat etüvde bekletilen numuneler çıkarılarak ağırlıkları ölçülmüştür. Ölçümden sonra numuneler tekrar etüve bırakılmıştır.

4 saat daha etüvde bekleyen numuneler çıkarılarak tekrar ölçülmüş ve iki ölçüm arasında binde bir oranında bir fark olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçta elde edilen ağırlık değişmez kütle olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.18. Kamber taşı numunelerinin kurutulma amacıyla etüve yerleştirilmesi

Elde edilen ölçüm sonuçları TS 699/ T1 (2016) standardında belirtilen formüllere uygulanarak numunelerin hacimce ve kütlece su emme oranları hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 3.2’ de toplu halde sunulmuştur. Hesaplamalarda Eşitlik (3.1) ve (3.2)’de belirtilen formüller kullanılmıştır. Sonuç olarak bulunan yüzde cinsinden hacimce su emme oranı numunelerin porozite değerini vermektedir.

Kütlece su emme oranı;

$$S_k = ((G_d - G_k)/G_k) * 100 \quad (3.1)$$

Hacimce su emme oranı;

$$S_h = ((G_d - G_k)/(G_d - G_{ds})) * 100 \quad (3.2)$$

Burada; S_k yüzde cinsinden kütlece su emme oranını, G_d numunelerin gram cinsinden doymuş haldeki kütlesini, G_k değişmez kütleye kadar gram cinsinden kurutulmuş numunenin kütlesini, S_h yüzde hacimsel su emme oranını, G_{ds} ise gram cinsinden doymuş haldeki numunenin su içindeki kütlesini temsil etmektedir.

Çizelge 3.2. Kamber taşı numunelerine ait ölçümler ve kütlece-hacimce su emme oranları

Numune No	Numune Hacmi (cm ³)	Doygun kuru yüzey ağırlık G _d (gr)	Sudaki Ağırlık G _{dk} (gr)	Tane (Kuru) Ağırlık G _k (gr)	Kütlece Su Emme Oranı S _k	Hacimce Su Emme Oranı (Porozite) S _h (%)
1	343	878,1	488,9	847,9	3,56	7,76
2	343	814,2	445,4	760,9	7,00	14,45
3	343	832,4	445,7	779,2	6,83	13,76
4	343	842,2	451,2	729,4	15,46	28,85
ORTALAMA					8,21	16,2

Çizelge 3.2 incelendiğinde kamber taşı için ortalama kütlece su emme oranının 8,21 olduğu görülmektedir. Ortalama hacimce su emme oranının yani porozitenin (boşluk oranının) kamber taşı için % 16,20 olduğu görülmüştür. Erişilebilen literatürde kamber taşı için bu değerin kıyaslanabileceği bir çalışmaya ulaşılamamıştır. Volkanik kayalardan bazalt için Erişiş vd (2019) çalışmasında kütlece su emme değerinin %0,06-0,84, efektif porozite değerinin ise %1,5 – 5,6 aralığında olduğu rapor edilmektedir. Bu değerler üzerinden yapılan kıyaslama; kamber taşının bazalt türü kayalara oranla daha yüksek poroziteye ve buna bağlı olarak daha düşük birim hacim ağırlığa sahip olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

3.2.3. Schmidt darbe çekici uygulaması ile kamber taşı basınç dayanımının tayini

Schmidt darbe çekici yöntemi 1948 tarihinde yönteme adını vermiş olan Schmidt eliyle geliştirilmiştir (Altıok 2019). Schmidt çekici yöntemi yapıda kullanılan malzeme özelliklerinin tespit edilmesi için kullanılan, tahribat oluşturmeyen bir yöntemdir. Genellikle laboratuvar ortamında beton numuneler üzerinde kullanılan bir kontrol ve keşif aletidir (Özdoğan 2018). Schmidt darbe çekici yöntemin detaylı bir şekilde tartışıldığı Kolek (1958) çalışmasında, Schmidt çekici ile tahribatsız bir şekilde beton dayanımı eldesi beton yüzeyinin sertliği kullanılarak basınç dayanımının kestirimi esasına göre çalıştığı belirtilmektedir. Bu çalışmada kullanılan Schmidt sertlik çekici üzerinde betonun basınç dayanımı ve Schmidt çekicinin içerisindeki yayın geri sıçraması değeri üzerinden hesaplanan sertlik değerleri arasındaki korelasyonu gösteren grafikler bulunmaktadır. Bu korelasyonlarda, Schmidt çekicinin beton elemana vuruş yönü de belirtilmektedir. Yöntem ile elde edilen beton basınç dayanımının kırım

sonuçlarına göre doğruluğunun % 60 ile % 70 arasında değiştiği ifade edilmektedir (Anonim 2021d).

Malzemelerin mekanik özelliklerinin tayin edilmesi için kullanılan yöntemlerden biri olan Schmidt çekici yöntemi, malzemenin sertlik düzeyini belirlemede maden mühendisliği, jeoloji mühendisliği ve inşaat mühendisliği disiplinlerinin ortak olarak kullandığı bir yöntemdir (Karaman 2020). İnşaat mühendisliği araştırmalarında ise betonarme yapılarda ve yığma yapılarda Schmidt çekici yöntemi kullanılmaktadır. Yığma yapılarda kullanılan doğal taşlardan yola çıkarak oluşturdukları duvarın basınç dayanımının bulunmasında fikir oluşturabilmektedir.

Schmidt çekici malzeme yüzeyinin sertliği hakkında bilgi verir. Sertlik ise malzemenin yüzeyine etki eden bir kuvvete karşı ilgili malzemenin göstermiş olduğu mukavemet olarak ifade edilebilir. Bu da bize malzemenin basınç dayanımı hakkın da bilgi verebilir (Hökelekli 2015).

Kullanılan doğal taşlar üzerinde *beton* Schmidt çekici uygulaması ile elde edilen taş yüzeyinin sertlik değerinden basınç dayanımının eldesine yönelik bir çalışma (Özdoğan 2018) tarafından yapılmıştır. Schmidt sertlik çekici yönteminde uygulama yapılacak doğal taş yüzeyinin iyice pürüzsüz olması esas olup mümkünse yüzeyde dar bir alan zımparalanmalıdır. Zira, malzeme yüzeyinin içyapı özelliklerinden farklı olmaması ve yüzeyin pürüzsüz olması gerekmektedir (Hökelekli 2015). Uygulamada N, L ve P tipi Schmidt çekici kullanılmaktadır. Bu yöntemde malzemeye vurulma anında içerisinde ki mekanizmanı geri tepmesi sonucu üzerinde bulunan ölçüm belirteci sayesinde ölçülen nümerik miktar, malzemenin sertlik değerini vermektedir (Ercan 2010). Geri sıçrama miktarı ile sertlik doğru orantılıdır. Yığma yapılarda malzeme özellik tayini yapılırken ekseri N tipi çekiç kullanılmaktadır. Uygulama yüzeyinde alçı, sıva veya farklı bir kaplama türü var ise kazınması ve direkt ilgili yapı malzemesine uygulanması gerekmektedir (Ercan 2010). Uygulamanın yapılacağı yüzeye genellikle 9 veya 25 vuruş yapılarak ortalamaları alınmaktadır (Kocaman vd 2020). Bu çalışmada kamber taşı üzerinde gerçekleştirilen tüm uygulamalarda Şekil 3.19'da görülen N tipi beton Schmidt çekici kullanılmıştır.



Şekil 3.19. Proceq marka N tipi Schmidt çekici

Burada N tipi beton Schmidt çekicinin doğal taşlar üzerinde kullanımı hususunun aydınlatılması gerekmektedir. Piyasada gerek beton ve gerekse kayaç için ayrı ayrı Schmidt sertlik çekicileri bulunmaktadır. Ancak, kullanım kolaylığı ve maliyeti nedeniyle beton Schmidt sertlik çekici hemen hemen tüm laboratuvarlarda bulunmaktadır. Tez çalışmasının bu bölümdeki amacı, kamber taşı için beton Schmidt sertlik çekici ile alınacak sertlik okumaları üzerinden taş basınç dayanımı veren kalibrasyon bağıntılarının üretilmesidir. Ocaktan alınan kamber taşı numuneleri üzerinde öncelikle sertlik okumaları alınmış, sonrasında kırım yapılarak taş basınç dayanımları elde edilmiştir. Bu ikili veri seti kullanılarak kamber taşı için beton Schmidt sertlik çekici kullanılarak sertlik-basınç dayanımı bağıntıları elde edilmeye çalışılmıştır. Bu bağıntılar elde edildikten sonra Emir Saltuk Kümbeti duvarlarında bulunan kamber taşları üzerinden sertlik okumaları alınmış ve taş basınç dayanımları tahribatsız olarak hesaplanmıştır. Benzer uygulamada andezit ve bazalt grubu kayaçlar için Özdoğan (2018) tarafından sunulan kalibrasyon bağıntıları kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında Kırmızıtaş Mahallesi taş ocaklarından temin edilen kamber taşı küp numunelerinin tüm yüzeylerine Schmidt çekici uygulanmış ve ortalama sertlik değerleri elde edilerek sonuçları Çizelge 3.3'te sunulmuştur. Uygulama toplam 32 numuneye yapılmıştır. Tüm numuneler üzerinden yatay vuruş neticesinde elde edilen ortalama sertlik değeri 41,71 olarak hesaplanmıştır. Takip edilen bölümlerde kalibrasyon bağıntıları üretilmesi amacıyla kırım sonuçları ile sertlik değerlerinin birlikte incelendiği çalışmanın detayları sunulacaktır.

Çizelge 3.3. Kamber taşı numunelerine ait yüzey sertlik değerleri

Numune No	En (cm)	Boy (cm)	Yükseklik (cm)	Ağırlık (gr)	Schmidt (sertlik)		
					1.YÜZEY	2.YÜZEY	3.YÜZEY
K-1	7	7	6	738	44	35	33
					40	44	35
					Ortalama: 38,50		
K-2	7	7	6,5	787	47	51	47
					30	38	45
					Ortalama: 43,00		
K-3	7	7	6	707,3	51	41	41
					45	51	33
					Ortalama: 43,67		
K-4	7	7	7	797,2	37	34	34
					46	38	40
					Ortalama: 38,17		
K-5	6	7	7,5	698,9	38	47	34
					55	37	46
					Ortalama: 42,83		
K-6	7,5	6	7	719,7	50	36	44
					37	50	44
					Ortalama: 43,50		
K-7	7	6	7	710,2	50	44	38
					52	42	44
					Ortalama: 45,00		
K-8	6	7	7	709,6	50	50	34
					40	40	44
					Ortalama: 43,00		
K-9	7	7	7	841,3	41	39	31
					35	32	41
					Ortalama: 36,50		
K-10	6	7	7	694,4	48	39	34
					41	46	45
					Ortalama: 42,17		
K-11	6	7	7	708,7	44	47	46
					44	48	43
					Ortalama: 45,33		
K-12	7	7	7	804,7	40	30	42
					34	40	34
					Ortalama: 36,67		
K-13	7	7	7	848,6	44	30	34
					35	49	53
					Ortalama: 40,83		
K-14	7	7	7	852,8	35	51	36
					32	44	50
					Ortalama: 41,33		
K-15	7	7	7	805,4	44	50	41
					49	35	52
					Ortalama: 45,17		
K-16	7	7	7	815,1	44	45	41
					30	40	41
					Ortalama: 40,17		
K-17	6,5	7	6,5	778,8	30	51	38
					35	38	40
					Ortalama: 38,67		
K-18	6	7	7	697,8	47	38	38
					54	40	30
					Ortalama: 41,17		
K-19	7	7	7	804,4	33	42	42
					39	34	37
					Ortalama: 37,83		

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çizelge 3.3'ün devamı

K-20	7	7	7	856,6	52	46	54
					41	38	50
					Ortalama: 46,83		
K-21	7	6,5	7	785	30	44	32
					50	38	32
					Ortalama: 37,67		
K-22	7	7	7	898	38	38	40
					40	52	45
					Ortalama: 42,17		
K-23	6	7	7	728,2	53	36	45
					39	50	36
					Ortalama: 43,17		
K-24	6	7	7	721,8	53	48	42
					45	38	44
					Ortalama: 45,00		
K-25	7	7	7	808,6	50	32	43
					34	30	41
					Ortalama: 38,33		
K-26	7	7	6	733,2	46	52	37
					48	43	41
					Ortalama: 44,50		
K-27	7	7	6	699,8	52	50	49
					52	34	38
					Ortalama: 45,83		
K-28	8	7	6	798,8	42	46	44
					51	44	52
					Ortalama: 46,50		
K-29	7	7	7	819,4	32	33	33
					34	33	
					Ortalama: 27,50		
K-30	6	7	7	684,3	47	43	32
					54	50	46
					Ortalama: 45,33		
K-31	6	7	7	698,2	35	48	38
					51	42	32
					Ortalama: 41,00		
K-32	6	7	7	716,8	52	51	38
					52	51	40
					Ortalama: 47,33		

3.2.4. Kamber taşı numuneleri üzerinde ultrases geçiş hızı ölçümleri

Malzeme özelliklerinden olan basınç dayanımı ve elastik modül tespitinde kullanılan tahribatsız yöntemlerden birisi de ultrases geçiş hızı yöntemidir. Daha detaylısı ise ultrasonik tomografi yöntemidir. Ultrases geçiş hızı yöntemi ile sahada ölçüm alınabildiği gibi laboratuvar ortamında çalışma yapılacak numuneler üzerinde de ölçüm yapılabilmektedir. Çalışma kapsamında Emir Saltuk Kümbeti taşıyıcı duvarları üzerinde bu yöntem uygulanmış ancak bir sonuç alınamamıştır. Ancak, kamber taşı malzeme karakterizasyonu çalışmasını teknik olarak zenginleştirme adına bu yöntem kamber taşı numuneleri üzerinde denenmiştir. Çalışmada, Şekil 3.20'de gösterilen Proceq marka

3. MATERYAL ve YÖNTEM

ultrases ölçüm cihazı kullanılmıştır. Saha ölçümleri ise Şekil 3.21’deki gösterildiği gibi yapılmıştır.



Şekil 3.20. Proceq marka ultrases ölçüm cihazı ile kamber taşı numuneleri üzerinde ultrases geçiş hızı ölçümleri.



Şekil 3.21. Emir Saltuk Kümbeti duvarlarına ultrases geçiş hızı tayini uygulaması

Titreşim frekansı 20 Khz’den fazla olan ses dalgalarına ultra ses denilmektedir (Tangüner 2007). Yöntemin temel çalışma prensibi; incelenecek numunenin karşılıklı iki yüzeyi arasında; bir yüzden gönderilen ultra ses dalgalarının diğer yüzeye ulaşma süresi üzerinden ultra ses dalgalarının numune içerisinde yayılma hızının tayini ve buna bağlı olarak geliştirilmiş kalibrasyon bağıntıları kullanılarak malzemenin basınç dayanımı ve elastik modül gibi mekanik özelliklerinin tespit edilmesinden ibarettir.

Çalışma kapsamındaki ultra ses hızı tayini deneyleri için Proceq marka ultra ses hızı ölçüm cihazı kullanılmıştır. Cihazın çalışma öncesi kontrolleri yapıldıktan sonra temas eden yüzeylerde boşluk olmaması için jel sürülerek beton numunenin karşılıklı olacak şekilde bir yüzeyine ultra sesi oluşturan verici prob, diğer yüzeyine malzeme içinden geçen ses dalgalarını alan bir alıcı prob yerleştirilmiştir. 70x70x70 mm boyutlarındaki kamber taşı numunesi içinden geçen sesin geçiş zamanı ve buna bağlı olarak ultra ses dalgası geçiş hızı tespit edilmiştir. Cihaz hafızasına kayıtlı muhtelif kalibrasyon bağıntıları üzerinden incelenen numunenin basınç dayanımı ve elastik modülü tahribatsız olarak elde edilmeye çalışılmıştır. Ultrases geçiş hızı deneyi uygulanan üç adet kamber taşı numunesine ait basınç dayanımı ve elastik modül sonuçları Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Kamber taşı numunelerine ait ultrases geçiş hızı deneyi neticesinde hesaplanan basınç dayanımı ve elastik modül değerleri.

Numune No	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastik Modülü (MPa)
1	44,1	8.810
2	20,7	4.077
3	22,6	4.503
Ortalama:	29,1	5.796,7

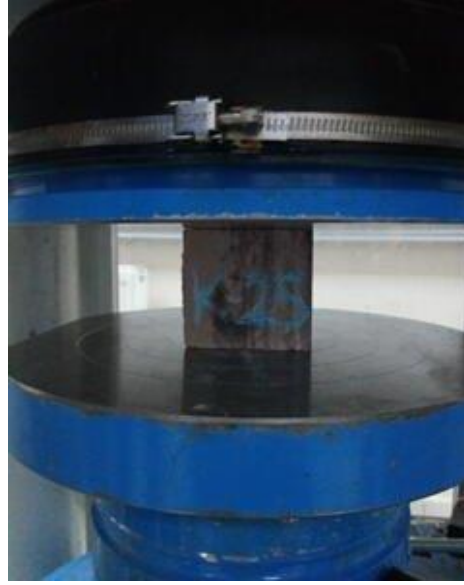
Bu kapsamda incelenen kamber taşı numuneleri için ortalama basınç dayanımı 29,1 MPa, elastik modül ise 5.796,7 MPa olarak tayin edilmiştir. Toplam üç adet numune üzerinde yapılan bu çalışmanın ultrases geçiş hızı tayini amacıyla kullanılan cihazda tanımlı olan kalibrasyon bağıntılarından kamber taşı için en yakın basınç dayanımı değeri veren bağıntının tayini amacıyla yapıldığı ifade edilmelidir.

Çalışmanın sonraki aşamalarında incelenen tüm kamber taşı numuneleri üzerinde öncelikle Schmidt sertlik çekici ile sertlik okumaları, sonrasında ultra ses geçiş hızı tayini ve nihayetinde eksenel basınç dayanımı tayini deneyleri yapılmış ve sonuçlar toplu halde değerlendirilmiştir.

3.2.5. Kamber taşı numuneleri üzerinde aksel basınç dayanımı deneyleri

Eksenel basınç dayanımı bir malzemenin taşıyabileceği en büyük aksel basınç gerilmesidir ve malzemenin en önemli mekanik özelliklerinden birisidir. Doğal taşlar aksel basınç dayanımı yüksek, buna karşın çekme dayanımı nispeten oldukça düşük malzemelerdir. Bu nedenle, doğal taşlardan imal edilen tarihi yapılarda doğal taşların aksel basınç etkisi altında çalışmasını temin edecek şekilde malzeme kullanımının tercih edildiği görülmektedir. Örneğin, taşıyıcı duvarlar statik durumda tamamen aksel basınca maruz kalacak şekilde çalışırken açıklıklar geçilirken tercih edilen kemer, tonoz gibi eğrisel formlu elemanlarla kullanılan taşın basınç etkisi altında çalışması ve açıklıkların bu şekilde geçilmesi sağlanmaktadır. Eksenel basınca maruz kalan yığma birimlerin aksel basınç dayanımının; kullanılan malzemelerin aksel basınç dayanımlarına bağlı olduğu açıktır. Bir başka ifadeyle, doğal taş ve harç kullanılarak imal edilmiş yığma bir duvarın aksel basınç dayanımı ve elastik modülü kullanılan harç ve doğal taşın aksel basınç dayanımına bağlıdır. Bu nedenle, tarihi yığma yapı duvarlarının mekanik özellikleri belirlenirken kullanılan taşın aksel basınç dayanımı büyük önem arz etmektedir.

Kamber taşı malzeme karakterizasyonu amacıyla taş ocağından getirilen taş blokları TS 699/T1 (2016)' a uygun bir şekilde 70x70x70 mm boyutlarında küp numuneler olarak kesilmiş ve aksel basınç dayanımı testine tabi tutulmuşlardır. Kamber taşına ait numuneler öncelikle Schmidt sertlik çekici ve ultrases geçiş hızı deneylerine tabi tutulduktan sonra Şekil 3.22'de gösterildiği gibi 3.000 kN yükleme kapasiteli UTEST aksel basınç yükleme gövdesine yerleştirilmiştir. Numunelere 1 MPa/sn hızla yük kontrollü aksel basınç dayanımı testi yapılmış ve deney numune kırılana kadar devam edilmiştir.



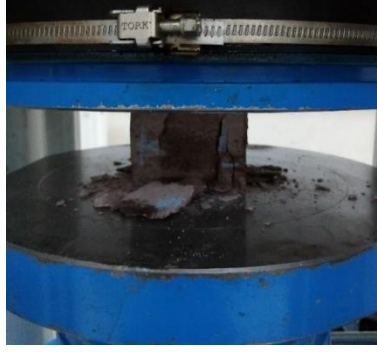
Şekil 3.22. Kamber taşı numunelerine eksenel basınç deneyi uygulaması

Eksenel basınç testi süresince numuneye uygulanan gerilme ile yüklemeye paralel yöndeki boy değişimi yükleme cihazının kontrol yazılımı üzerinden takip edilmiş ve deneylerden elde edilen örnek bir yük-deformasyon eğrisi Şekil 3.23’de sunulmuştur. Numunelerin tamamına yakınının köşelerden ezilme ve kırılma uğradığını ifade etmek mümkündür. Bu tür mekanik bir davranışa küp numune köşelerindeki gerilme yığılmalarının yol açtığı söylenebilir.



Şekil 3.23. Kamber taşı numunesine ait eksenel basınç deneyi ekran görüntüsü

Kamber taşı numunelerinin eksenel basınç dayanımına ulaştıkları anda yüksek ses eşliğinde gevrek bir şekilde kırıldığı gözlemlenmiş ve Şekil 3.24’te kırım sonrası bir kamber taşı görüntüsü örnek olarak sunulmuştur. Bazı numuneler üzerinde çatlaklar meydana gelirken bazılarının ise tamamen ezildiği görülmüştür. Deney süresinde bilgisayar ekranından kaydedilen veri takip edilmiş ve genel olarak kamber taşı numunelerinin kırılma anına kadar doğrusal bir davranış sergiledikleri gözlemlenmiştir.



Şekil 3.24. Kamber taşı numunesi eksenel basınç testi sonrası görüntüsü

Toplam 25 adet kamber taşı numunesinin ait ultrases geçiş hızı deneyi, Schmidt sertlik çekici deneyi ve eksenel basınç dayanımı deneyi sonuçları Çizelge 3.5'te toplu halde sunulmaktadır.

Çizelge 3.5. Kamber taşı numunelerine üzerinde gerçekleştirilen deneylerin toplu sonuçları.

Numune	Eksenel Basınç Dayanımı (MPa)			Schmidt Çekici Sertlik Değeri
	Eksenel Basınç Deneyi (Tahribatlı)	Ultrases Geçiş Hızı Deneyi (Tahribatsız)	Fark (%)	
K-1	120	85	29	39
K-2	62	48	23	43
K-3	102	85	17	44
K-4	50	34	32	38
K-5	87	70	20	43
K-6	59	64	8	44
K-7	94	70	26	45
K-8	88	65	26	43
K-9	61	37	39	37
K-10	104	64	38	42
K-11	59	41	31	45
K-12	46	69	50	37
K-13	105	41	61	41
K-14	77	65	16	41
K-15	53	49	8	45
K-16	59	37	37	40
K-17	60	45	25	39
K-18	65	61	6	41
K-19	42	50	19	38
K-20	30	64	113	47
K-21	76	44	42	38
K-22	30	71	137	42
K-23	63	67	6	43
K-24	55	71	29	45
K-25	31	41	32	38

Çizelge 3.5 incelendiğinde ultrases geçiş hızı deneyi ile elde edilen basınç dayanımı değerleri ile kırım sonucu elde edilen eksenel basınç dayanımı değerleri

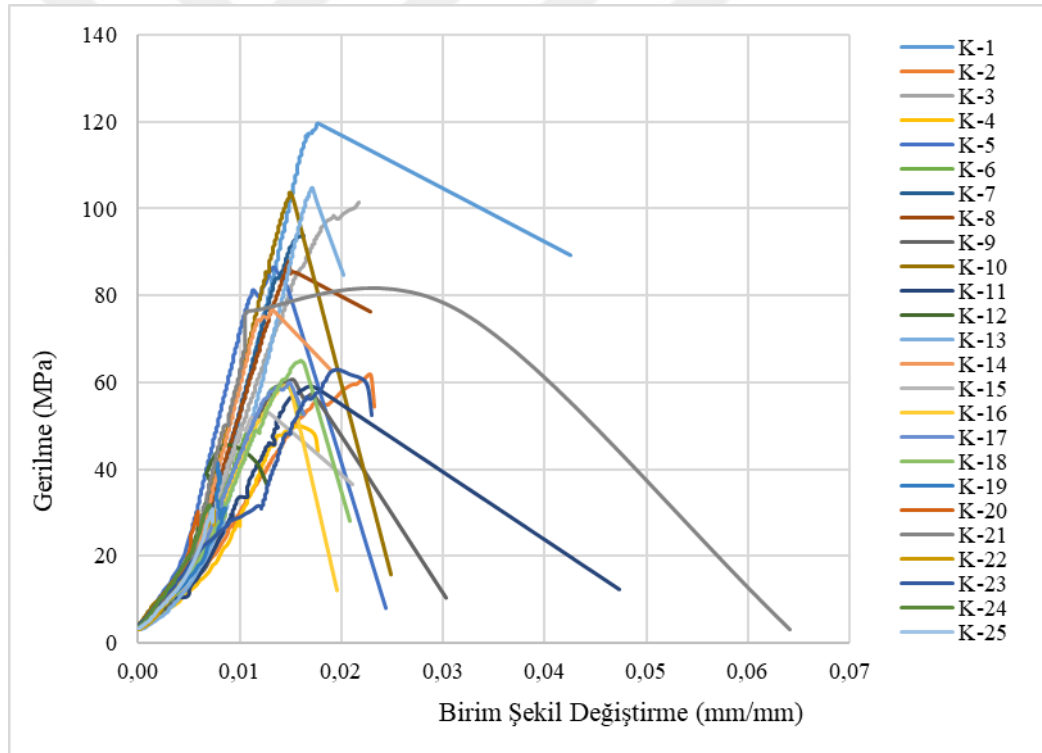
arasında anlamlı bir ilişki kurulamadığı açıkça görülmektedir. Çizelge 3.5' in fark sütununda sunulan değerler ultra ses geçiş hızı deneyi sonucu elde edilen eksenel basınç dayanımı ile kırım sonucu elde edilen basınç dayanımı arasındaki farkı ifade etmektedir. Fark değerleri incelendiğinde %6-%137 aralığında değişen oldukça büyük değerler olduğu görülmektedir. Bu durum, kamber taşı için ultra ses geçiş hızı-eksenel basınç dayanımı ilişkilerini temsil eden kalibrasyon bağıntılarına ihtiyaç duyulduğunu açıkça göstermektedir. Ultra ses geçiş hızı deneyi, ayrıca, Emir Saltuk Kümbeti duvarları üzerinde yapılmışsa da herhangi bir ses hızı değeri elde edilememiştir. Bu sonucun duvar içerisindeki boşluklu yapı nedeniyle ortaya çıktığı düşünülmektedir. Ayrıca, ultrases geçiş hızı deneyi neticesinde elde edilen sonuçlar ile Porozite ve birim hacim ağırlık arasında da anlamlı bir ilişki kurulamamıştır.

Bu bölümde yapılan çalışmanın temel gayesinin kamber taşı için beton Schmidt sertlik çekici ile alınan sertlik değerleri ile eksenel basınç dayanımı değerleri arasında bir kalibrasyon bağıntısı ortaya konulması olduğu bir kez daha hatırlatılmalıdır. Bu bağıntı oluşturulduktan sonra Emir Saltuk Kümbeti dış cephesindeki kamber taşları üzerinden sertlik okumalarının alınarak eksenel basınç dayanımı değerlerinin eldesi ve devamında yığma duvar basınç dayanımı ve elastik modül değerlerinin hesaplanması yoluna gidilmesi planlanmıştır. Bu nedenle, Çizelge 3.5' te sunulan kırım sonucu elde edilen eksenel basınç dayanımı değerleri ile Schmidt sertlik değerleri arasındaki ilişki detaylı bir şekilde çalışılmış ve takip eden ana bölümde detayları sunulmuştur.

3.3. Kamber Taşı Elastisite Modülün Hesaplanması

Doğada mevcut bulunan belirli boyutlara sahip her cisim belirli bir yük altında şekil değiştirmeye maruz kaldığı bilinmektedir. Uygulanan kuvvetin yönü ve miktarına göre bu şekil değiştirme enine ve boyuna doğru kısalma veya uzama şeklinde değişebilmektedir. Kimi cisimlerin dayanımının düşük olması hasebiyle şekil değiştirmesi gözle görülür, çok rahat fark edilir derecede iken daha mukavim cisimlerin şekil değiştirmesi çıplak gözle fark edilemeyecek kadar az olduğu söylenilebilir. Ancak bu şekil değiştirmede göstermez, her cisim belirli yük altında şekil değiştirmeye maruz kalmaktadır.

Şekil değiştirme elastik şekil değiştirme ve plastik şekil değiştirme olmak üzere iki türdür. Cisim bir dış yük ile yüklendiğinde şekil değiştirmeye maruz kalıyor ve ilgili yük kaldırıldığı zaman cisim eski şekline geri dönebiliyor ise bu şekil değiştirme elastik, eski haline dönemiyor ise bu şekil değiştirmeye plastik şekil değiştirme denilmektedir. Elastik modül ise malzemenin eksenel şekil değiştirmeye karşı gösterdiği direncin bir ölçüsü olup malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı üzerinden muhtelif yöntemlerle hesaplanan bir malzeme karakteristiğidir (Onaran 1997). Çalışmanın bu bölümünün konusu kamber taşı malzeme karakterizasyonu olduğundan incelenen taş numuneler üzerinde elastik modül hesaplamalarının yapılması gerekli görülmüştür. Bu amaçla kamber taşı numunelerinin eksenel basınç etkisi altındaki gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Şekil 3.25’de kamber taşına ait 25 numunenin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği toplu halde sunulmaktadır.



Şekil 3.25. Kamber taşı numunelerine ait gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri

Şekil 3.25’ te sunulan gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde neredeyse numunelerin tamamının %1 - %2 aralığındaki eksenel birim şekil değiştirme değerlerine ulaştıkları anda maksimum gerilme taşıdıkları; yani eksenel basınç dayanımına ulaştıkları görülmektedir. Gevrek davranış gösteren kamber taşı

numunelerinin deney başlangıcından eksenel basınç dayanımına ulaştıkları ana kadar doğrusal bir hat takip ettiklerini ifade etmek mümkündür.

Elastik bölgedeki maksimum gerilmeye sonucunda cisimde meydana gelen maksimum şekil değiştirmeye elastik modül adı verilmektedir. Elastik modül hesabı için elastik bölgede bulunan maksimum gerilme maksimum şekil değiştirmeye bölünerek bulunmaktadır. Bu hesaplama ise Hooke Kanunu olarak bilinmekte ve aşağıda sunulan Bağıntı (3.1) ile hesaplanmaktadır.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.1)$$

Burada; E elastik modülü, σ gerilmeyi, ε ise birim şekil değiştirmeyi temsil etmektedir.

Hooke Kanunu gereği elastik modülün gerilme ile doğru, birim şekil değiştirme ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Yani farklı iki cisim için düşünüldüğünde aynı yük yani gerilme altında iken daha az şekil değiştiren cismin elastik modülü daha fazladır bu da bize bu cismin diğerinden daha mukavim ve daha rijit olduğunu gösterebilmektedir.

TS 699/T1 (2016) standardı doğal taşlar için elastik modülün Şekil 3.25' te sunulan grafikler üzerinden Doğrusal Bölge Eğimi, Sekant Modülü ve Tanjant modülü olmak üzere üç farklı yöntem ile bulunabileceğini belirtmektedir. Bu yöntemlere çalışma kapsamında kısaca değinmenin faydalı olacağı düşünülmektedir.

I. Sekant Modülü: Birim şekil değiştirme – gerilme grafiği göz önüne alındığında grafik başlangıç değeri ile cismin maksimum basınç gerilmesinin belirli bir yüzdesindeki gerilme ve bu gerilmeye karşılık gelecek birim şekil değiştirme bulunmaktadır. Elde edilen bu gerilmenin o noktadaki birim şekil değiştirmeye bölünmesi ile de cismin elastik modülü hesaplanmaktadır. Bu yöntemle elde edilen modüle Sekant modülü denilmektedir. Eurocode EN 1992-1-1 (2004) Avrupa standardına göre azami basınç dayanımının % 40'ına tekabül eden değer alınmıştır (Eurocode 2 1992).

II. Tanjant Modülü: Tanjant Modülü yönteminde ise cisme ait gerilme – birim şekil değiştirme grafiğine bakılarak maksimum basınç dayanımı tespit edilmektedir. Bu basınç dayanımına ait belirli yüzdelerdeki bölgeler dikkate alınmaktadır. Elde edilen doğrusal bölgenin eğimi ilgili cismin elastik modülünü vermektedir. Bu çalışma kapsamında maksimum gerilmenin % 40'ı ile % 60' ı arasındaki bölgenin eğimi ile çalışılmıştır.

III. Doğrusal Bölge Eğimi: Cisim için oluşturulan gerilme – birim şekil değiştirme grafiğine bakılmaktadır. Grafikteki elastik bölgeye ait doğrunun eğimi cisme ait elastik modülü vermektedir.

Kamber taşı numuneleri için elastik modül değerleri TS 699/T1 (2016)' da belirtilen üç farklı yöntem için de hesaplanmış olup sonuçlar Çizelge 3.6'da toplu halde sunulmuştur.

Çizelge 3.6. Kamber taşı numuneleri için TS 699/T1 (2016) uyarınca hesaplanan elastik modül değerleri.

Numune No	Eksenel Basınç Dayanımı (MPa)	Sekant Modülü (MPa)	Tanjant Modülü (MPa)	Doğrusal Bölge Eğimi (MPa)
K-1	120	4.650	7.975	3.349
K-2	62	2.482	3.855	2.966
K-3	102	4.278	5.950	5.628
K-4	50	2.187	4.272	3.250
K-5	87	5.214	11.981	7.269
K-6	59	3.155	5.760	4.292
K-7	94	4.284	5.133	6.485
K-8	88	4.198	7.594	5.983
K-9	61	2.818	4.932	4.376
K-10	104	4.884	8.743	7.303
K-11	59	2.637	5.289	3.536
K-12	46	3.272	4.573	5.323
K-13	105	3.920	9.254	6.693
K-14	77	4.146	1.137	6.422
K-15	53	3.098	4.003	4.522
K-16	59	3.112	5.183	4.102
K-17	60	3.149	5.949	4.305
K-18	65	3.034	5.431	4.217
K-19	42	2.439	4.415	3.894
K-20	30	2.773	5.869	4.220
K-21	76	4.289	8.467	6.863
K-22	30	2.522	3.820	3.590
K-23	63	2.637	2.729	2.975
K-24	55	3.508	5.790	4.223
K-25	31	2.482	3.971	3.613
ORTALAMA	67	3.407	5.683	4.776

Çizelge 3.6 incelendiğinde aynı özelliklere sahip küp numuneler için hesaplanan elastik modül değerlerinin birbirinden ortalama değer olarak farklı sonuçlar verdiği görülmektedir. Hesaplanan modüller arasında en büyük değer ortalama 5.683 MPa ile tanjant modülünde çıkarken, en küçük değer 3.407 MPa ile sekant modülünde hesaplanmıştır. Modül değerlerinin eksenel basınç dayanımı ile birlikte değerlendirilmesi durumunda ise; eksenel basınç dayanımı yüksek olan numunelerde hesaplanan modül değerlerinin de diğer numunelere kıyasla daha yüksek olduğunu ifade etmek mümkündür.

3.4. Kamber Taşı Duvar Blok Deneyleri

Tarihi yığma yapıların malzeme özelliklerinin tayinini içeren ulusal bir mevzuat olmadığı daha önce belirtilmişti. Bu nedenle, muhtelif mevzuatın yeni yapılacak yığma yapılar ile ilgili bölümleri çoğunlukla örnek alınarak tarihi yığma yapı malzeme karakteristikleri üzerinde çalışma yapılması yoluna gidilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında kamber taşı mekanik özelliklerinin tayini konusunda kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Her ne kadar tez dahilinde kullanılmayacak olsa da; kamber taşı kullanılarak imal edilen bloklar üzerinde eksenel basınç dayanımı tayini amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı, ileride sadece kamber taşı kullanılarak yığma yapı yapılması durumunda ya da tamamı kamber taşı ile imal edilmiş mevcut bir yapı için inceleme yapılması halinde kısıtlı da olsa referans niteliğinde teknik bilgi ortaya konulmasıdır.

DBYBHY (2007)' de duvar basınç dayanımı elde edilmesi için duvar blok deneyi verilerinin kullanılması önerilmiştir. Ancak, gerek DBYBHY (2007) ve gerekse erişim sağlanan ilgili muhtelif mevzuatta duvar blok numunelerinin boyutları ve özellikleri hakkında teknik bilgiye ulaşılamamıştır. Bu nedenle, kamber taşı küp numuneleri kullanılarak ikili ve üçlü blok numuneler hazırlanmıştır. Taşlar arasına kamber taşı ocağı yakınında bulunan kil kullanılarak üretilen harç çok ince bir tabaka halinde sürülmüştür. Kilin bölgedeki pek çok yığma yapıda harç imalatında kullanıldığı öğrenilmiş ve bu nedenle deney numuneleri üretilirken kil içerikli harç kullanılmıştır. Harç üretilirken öncelikle blok halindeki kil ezilerek ince toz haline getirilmiş, sonrasında su ile karıştırılarak kil harcı üretilmiştir. Numune üretimi ve eksenel basınç dayanımı deneyine ilişkin görsel materyal Şekil 3.26' da toplu halde sunulmaktadır.



Şekil 3.26. Kamber taşı ile kil harcı kullanarak bloklar hazırlama ve eksenel basınç dayanımı deneyinden görüntüler.

Kil esaslı harcın basınç dayanımının elde edilmesi amacıyla Şekil 3.27’de görüldüğü şekilde 5x5x5 cm ölçülerinde küp numuneler hazırlanmıştır. 28 gün sonra prizini almış olan kil harcı kalıplardan çıkarılmış ve teste tabi tutulmak istenmiş ancak çıkarır çıkarmaz dağıldığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple herhangi bir basınç dayanımı elde edilememiş ve harcın eksenel basınç dayanımı ~1 MPa olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.27. Basınç dayanımı tayini amacıyla hazırlanan killi harç numuneleri

Kamber taşı ve kil harcı ile üretilen ikili ve üçlü blok numunelere aksel basınç dayanımı testi yapılmış ve Çizelge 3.7’de belirtilen sonuçlar elde edilmiştir. Numuneler test esnasında kenarlardan ve orta kısımlardan göçmeye başlamıştır. Üçüncü sırada belirtilen üçlü numune basınç mukavemeti değeri hatalı olduğu için hesaba katılmamıştır.

Çizelge 3.7. Kamber taşı blokları fiziksel ve mekanik özellikleri

Bloklar	Basınç Mukavemeti (MPa)	Ağırlık (g)	Boyut (cm)	Hacim (cm ³)	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Harç Kalınlığı (cm)
K- 2 li - 1	39	1.500,6	7x7x13,5	661,5	22,68	0,1
K- 2 li - 2	36	1.377,4	6,5x6,5x12,5	528,1	26,08	0,1
K-3 lü - 1	X	2.154,8	7x7x19	931,0	23,19	0,1
K- 3 lü - 2	26	2.413,6	7x7x22	1.078,0	22,39	0,1

Çizelge 3.7 incelendiğinde, ikili blokların ortalama basınç dayanımının 37,5 MPa ve üçlü blok basınç dayanımının ise 26 MPa olduğu görülmektedir. Bloklar üzerinde farklı basınç dayanımı değerlerinin elde edilmiş olması beklenen bir sonuçtur. Zira üçlü bloklar kesit özellikleri yaklaşık aynı olmakla beraber ikili bloklara oranla daha yüksek ve dolayısıyla daha narin elemanlardır; narinlik etkisi ile daha az yük taşımaları doğal bir sonuç olarak değerlendirilmektedir. Çizelge 3.6’ da incelenen kamber taşları için ortalama aksel basınç dayanımı 67 MPa olarak sunulmaktadır. Üçlü blok basınç dayanımının tekil taş basınç dayanımının 0,39 katı, ikili bloklarda ise bu değerin 0,56 katı olduğu görülmektedir.

3.5. Emir Saltuk Kümbeti Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Tarihi yığma yapı davranışının bilgisayar ortamında yapılacak analizler üzerinden incelenmesi amacıyla yapıyı temsil eden sonlu eleman modeli oluşturulmakta ve model üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu tez çalışmasının amacı gerçek yapıyı temsil kabiliyeti yüksek bir sonlu eleman modeli oluşturma çalışmaları için tahribatsız bir yığma yapı malzeme mekanik özellikleri tayini yönteminin irdelenmesidir. İncelenen yöntemin geçerliliği sonlu elemanlar modeli üzerinde teorik olarak hesaplanan modal davranış parametreleri ile operasyonel modal analiz uygulaması ile deneysel olarak yapı üzerinde belirlenen modal davranış parametrelerinin kıyaslanması ile ortaya konulacaktır. Bu nedenle, öncelikle Emir Saltuk Kümbeti için teorik modal analiz çalışmalarında

kullanılacak bir sonlu eleman modelinin oluşturulması gereklidir. Bu bölümde, bu amaçla yapılan çalışmanın detayları hakkında bilgi sunulmaktadır.

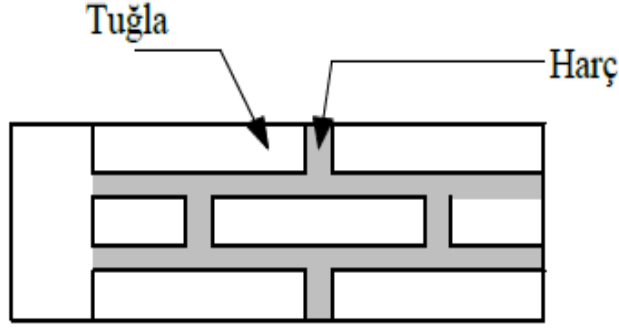
3.5.1. Yığma yapı modelleme yöntemleri

Yapıların bazı teknik ve yöntemler ile bilgisayar ortamında incelenebilmeleri adına tasarlanmasına yapısal modelleme adı verilmektedir. Günümüzde çeşitli bilgisayar programları ile her türlü yapı için modelleme yapılabilmektedir. Tarihi yığma yapılar ise bu bakımdan özel ve önem arz eden yapılar olarak değerlendirilmektedirler. Bu nedenle, yapısal analiz için sonlu eleman modelleri oluşturulurken dikkatle çalışılmalı ve uygun olan modelleme tekniği benimsenerek model kurgulanmalıdır.

Lourenço (1996) çalışmasında yığma yapıların sonlu eleman modelleri oluşturulurken benimsenebilecek üç ayrı modelleme tekniğini literatüre sunmuştur. Bunlar mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme olarak sıralanmıştır. Bu tekniklere kısaca değinilmesinde yarar görülmektedir.

Mikro Modelleme:

Bu yöntemde yapıyı oluşturan yığma birim, harç ve ara yüzey elemanlarının bütün özellikleri tespit edildikten sonra her eleman ayrı ayrı modellenmektedir. Şekil Mikro modelleme tekniği çok ayrıntı içerdiğinden bu yöntemle yığma yapı modellemesi çok meşakkatli olup uzun zaman gerektirmektedir. Elde edilen modelin analiz süresi uzundur ve yüksek kapasite gerektiren bilgisayar gereksinimi duymaktadır. Bu sebepler ile bütünsel bina analizleri için pek tercih edilmemektedir. Ancak bir yapının özel olarak yoğunlaşılması gereken herhangi bir bölümü için kullanılması uygundur. Şekil 3.28’de mikro modelleme tekniğinin şematik bir gösterimi sunulmaktadır.



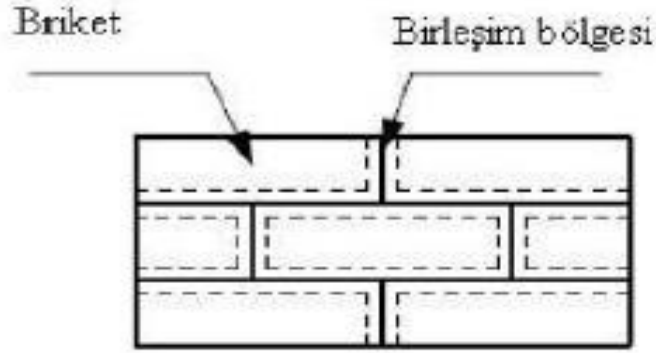
Şekil 3.28. Mikro modelleme tekniği (Lourenço 1996)

Şekil 3.28’de görüldüğü şekilde yığma yapının mikro modelleme tekniği ile modellenmesi yığma birimi meydana getiren yapı taşı ve harç için ayrı ayrı fiziksel ve mekanik özellik tayinini zorunlu kılmaktadır. Mikro modelleme yöntemi yapıda oluşabilecek çatlakların ve yapı taşları ile harç arasındaki geçiş yüzeylerinde meydana gelebileceği varsayılmaktadır (Hökelekli 2015).

Basitleştirilmiş Mikro Modelleme:

Bu modelleme yönteminde ise yapı taşları arasındaki harç tabakasına ait kalınlık ihmal edilmekte ve bu kalınlık harcın bağladığı yapı taşlarına yarı yarıya bölüştürülerek genişletilmektedir. Yapıyı oluşturan bloklar ile harç birbirinden ara yüzey çizgileri ile ayrılmaktadır ve bu sayede oluşacak çatlakların elde edilen bu ara yüzeylerde oluşabileceği kabul edilmektedir.

Bu yöntemde yapıda kullanılan harca ait Poisson oranı dikkate alınmamaktadır. Elde edilen sonuçlar mikro modellemeye göre farklıdır. Bu sebeple basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi kullanıldığı modele ve yapılan analize bağlı olarak nispeten hatalı sonuçlar verebilmektedir (Lourenço 1996). Ancak oluşabilecek hataların ihmal edilebilecek kadar az olduğu söylenebilir. Şekil 3.29’ da basitleştirilmiş mikro modelleme yönteminin şematik olarak gösterimi sunulmaktadır.

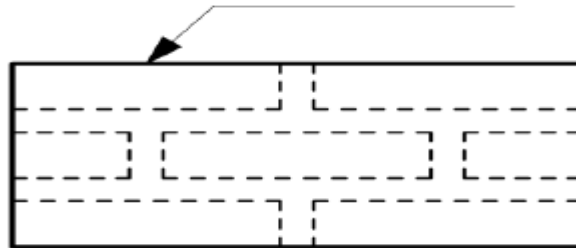


Şekil 3.29. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği (Lourenço 1996)

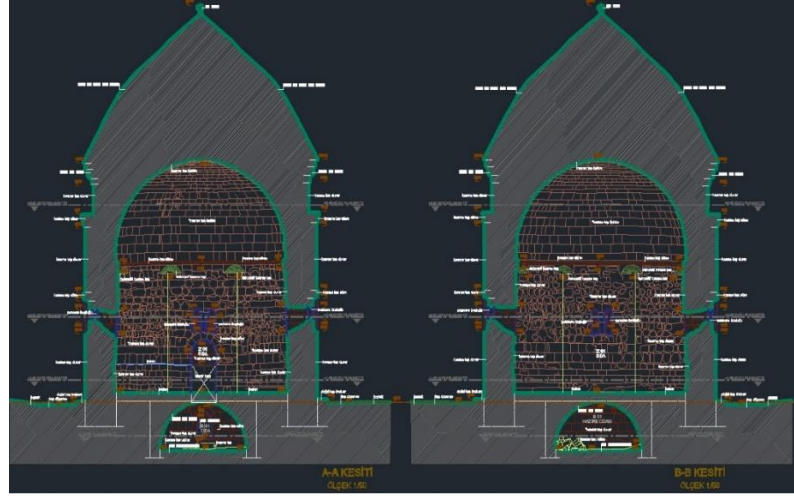
Makro Modelleme:

Bu modelleme tekniğinde harç ile yapı bloğu bir bütün gibi düşünülerek modellenmektedir. Yığma yapı birimi homojen bir malzeme olarak kabul edilerek malzeme özellikleri belirlenmekte ve sonlu eleman modeline tanımlanmaktadır. Heterojen yapıyı yığma birim homojen bir yapı olarak kabul edildiğinden bilinmeyen sayısı düşürülerek analizin daha kolay yapılması hedeflenmektedir. Bu modelleme tekniği tarihi yığma yapı çalışmalarında tercih edilen bir yöntemdir. Her ne kadar yığma birimler homojen olarak kabul edilerek model hacmi ve analiz süresi düşürülmüş olsa da; heterojen yapıdaki yığma birimin homojen bir elemana indirgenmesi ve malzeme özelliklerinin tayin edilmesi de bir o kadar zor bir çalışmadır. Bu tez çalışmasının amacı da makro modelleme tekniği ile oluşturulan tarihi yığma yapı sonlu eleman modeli için nispeten güvenilir bir homojenleştirme işlemi ile yığma birim mekanik özelliklerinin tayin edilmesine olanak sağlayan bir yöntemin irdelenmesidir. Makro modelleme tekniğinin şematik olarak gösterimi Şekil 3.30’ da sunulmaktadır.

Kompozit Malzeme

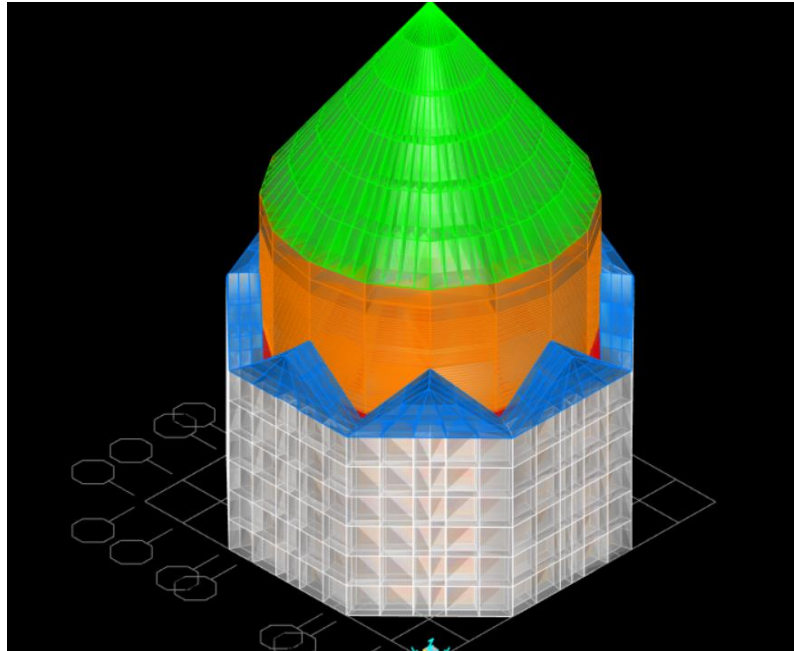


Şekil 3.30. Makro modelleme tekniği (Lourenço 1996)



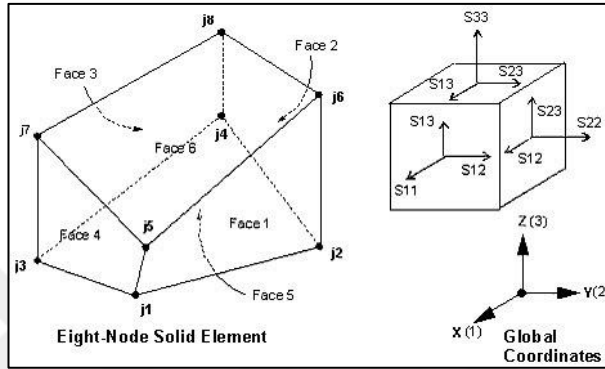
Şekil 3.32. Emir Saltuk Kümbeti rölöve kesit görüntüleri

Modelleme yapılırken rölövedeki ölçü değerlerine sadık kalınmıştır. Koordinat değerleri de üç eksenli olarak bu değerlere göre girilmiştir. Daha sonra oluşturulan koordinat değerlerine göre yapının taşıyıcı elemanları olan duvarlar katı eleman olarak modellenmiştir. Yapıya ait fiziksel ve mekanik özelliklere ait değerler tüm bileşenler için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Üst örtü ayrıca çalışılmış; kümbet yapısına münhasır olarak içyapısı kubbe ve dış yapısı koni şeklinde modellenmiştir. Sonlu eleman katı modeli Şekil 3.33'te gösterildiği gibi oluşturulmuştur.



Şekil 3.33. Emir Saltuk Kümbeti SAP2000 (2016) yazılımı ile oluşturulan sonlu eleman modeli.

Emir Saltuk Kümbeti sonlu eleman modeli Şekil 3.34’ te sunulan üç boyutlu sekiz noktalı katı elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Model toplam 4964 katı eleman (solid element) ve 6495 düğüm noktasından (joint) oluşmaktadır. Özdoğan (2018) çalışmasına referansla modellemede kullanılan tekil katı eleman hacminin 1 m^3 ’ ün altında olacak şekilde çalışma yapılmıştır. Oluşturulan sonlu eleman modeli üzerinde yığma birimlere muhtelif malzeme özellikleri tanımlanarak teorik modal analizler yapılmıştır.



Şekil 3.34. Üç boyutlu sekiz noktalı katı eleman (SAP2000 2016)

3.6. Emir Saltuk Kümbeti Dinamik Kimliklendirme Çalışması

Tarihi Emir Saltuk Kümbeti yapısının dinamik kimliklendirme çalışmasında operasyonel modal analiz yöntemi kullanılmıştır. Bu bölümde öncelikle operasyonel modal analiz uygulaması hakkında teknik bilgi sunulmakta ve devamında Emir Saltuk Kümbeti üzerinde yapılan çalışmanın teknik detaylarına yer verilmektedir.

3.6.1. Operasyonel modal analiz

Yapının mod şekillerini belirlemek için yapılan deneysel ve teorik çalışmalar modal analiz olarak ifade edilmektedir. Modal analiz neticesinde yapının mod şekilleri, modal frekansları ve sönüm oranları gibi dinamik davranış karakteristikleri elde edilir (Ercan 2010).

Mevcut bir yapının modal davranış parametrelerinin deneysel olarak yerinde belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmaların bütününe *deneysel modal analiz* adı verilmektedir.

Deneysel olarak dinamik kimliklendirme ya da bir diğer ifade ile deneysel modal analiz çalışmaları yapının kendisini zorlayan titreşimlere verdiği tepkilerin incelenmesi esasına dayanmaktadır. Deneysel modal analiz uygulamaları incelenen yapıyı tahrik eden titreşim kaynağının türüne göre iki alt alana ayrılmaktadır. Yapı titreşimleri, kuvvet fonksiyonu belirli bir kaynak tarafından oluşturulup devamında dinamik davranış parametrelerinin çalışılmasını esas alan yöntemle Geleneksel (Deneysel) Modal Analiz adı verilmektedir. Eğer yapı fonksiyonu bilinmeyen kuvvetler tarafından tahrik edilip verdiği tepki üzerinden modal davranış parametreleri elde ediliyorsa bu yöntem operasyonel modal analiz olarak adlandırılmaktadır (Boru ve Kutanis 2015).

İncelenen yapının dinamik kimliklendirme çalışmasının yukarıda sıralanan iki yöntemden hangisi ile yapılacağına kararı incelenen yapının hacimsel büyüklüğü, çevresel koşulların durumu gibi birtakım sebeplere bağlı olarak verilmektedir. Geleneksel modal analizde yapının teknik özellikleri belirli bir titreşim kaynağından gelen titreşimlerle harekete zorlanması esastır. Çok büyük hacimli olmayan yapıların dinamik karakteristikleri deneysel olarak belirlenirken teknik özellikleri belli olan titreşim kaynakları ile üretilen zorlanmış titreşimler ile yapı tahrik edilebilmektedir. Yapının kaynağı belli bir başka ifadeyle üretilen etkinin zaman bağlı değişimi bilinen titreşimlere verdiği tepki ölçümleri üzerinden orta ve küçük hacimli yapıların dinamik davranış parametreleri deneysel olarak elde edilebilmektedir.

Ancak, incelenen yapının mevcut titreşim kaynakları ile (sarsıcılar, çekiçler, vb.) tahrik edilemeyecek büyük hacimli yapılar olması ya da tarihi yığma yapılar gibi sarsıcı etkisinde hasar görme potansiyeli olan yapılar olması durumunda geleneksel modal analiz uygulamasından sonuç alınması mümkün olmayabilmektedir. İncelenen yapının köprü, baraj, vb. büyük hacimli bir yapı olması durumunda yapının kaynağı bilinen bir etki ile titreşime zorlanmasının ciddi zorlukları ve yüksek maliyeti olması geleneksel modal analiz dışında bir yöntemin kullanımını zorunlu kılmaktadır (Chauhan 2008). Bu durumda operasyonel modal analiz uygulaması gündeme gelmektedir.

Tahribatsız deneysel bir uygulama olan operasyonel modal analiz ile kaynağı bilinmeyen, yani titreşimin zamana bağlı fonksiyonunun elde olmadığı, çevresel suni bir müdahale ile yapının tahrik edilmesi neticesinde elde edilen yapı tepkilerinin analizi sonucunda dinamik davranış parametreleri elde edilebilmektedir. Uygulama kaynağı

bilinen zorlanmış titreşim etkileri altında bir çalışma gerektirmediğinden oldukça pratiktir. Operasyonel modal analiz yöntemi hasarsız bir yöntemdir ve yapı kullanımdayken uygulaması yapılabilmektedir. Bu sebeple tarihi yığma yapıların dinamik kimliklendirme çalışmalarında sıklıkla tercih edilmektedir.

Operasyonel modal analiz uygulamasında yapının kaynağı belirsiz titreşimlere verdiği tepkinin uygun noktalara yerleştirilen sensörler ile ölçülmesi esastır. Sensörler ile yer değiştirme, hız ve ivme ölçümü mümkündür. Ancak, aralarında en çok tercih edileni ivme ölçümleridir. Sensör yerleşim planı çıkarılmadan önce yapının sonlu eleman modeli üzerinde teorik modal analizinin yapılması ve buradan hesaplanan mod şekillerinin çalışılması önem arz etmektedir. Uygun sensör yerleşim planı dahilinde alınan tepki ölçümleri genel olarak bir veri toplama sisteminde toplanır ve bu veri üzerinden dinamik davranış parametrelerinin eldesi amacıyla analizler yapılır (Hökelekli 2015).

Bu çalışma kapsamında incelenen yapı olan Emir Saltuk Kümbeti tarihi bir yığma yapıdır ve bu nedenle dinamik kimliklendirme çalışmasında operasyonel modal analiz yöntemi tercih edilmiştir. Tarihi yığma yapılarda operasyonel modal analiz uygulaması aşağıda sıralanan amaçlarla yapılabilmektedir (Okuyucu 2022; Güneş 2017; Alpaslan 2019).

- Mevcut yapının dinamik davranış parametrelerinin eldesi ve sonlu eleman model kalibrasyonu
- Mevcut yapının yapı sağlığı takibinin yapılması
- Mevcut yapıda hasar tespiti yapılması

Foti et al. (2012), Sánchez-Aparicio et al. (2014) ve Genç vd (2019) çalışmaları tarihi yığma yapı sonlu eleman modellerinin operasyonel modal analiz çalışmaları neticesine kalibrasyonunu konu edinen çalışmalara örnek olarak gösterilebilir. Gentile and Saisi (2007), Gentile and Saisi (2011), Conde et al. (2017), Bautista-De Castro et al. (2018) ve Kanbur (2022) çalışmaları muhtelif tarihi yığma yapılarda yapı sağlığı takibi ve hasar tespiti çalışmalarında operasyonel modal analiz uygulamasının kullanıldığı örnekler olarak literatürdeki yerlerini almışlardır.

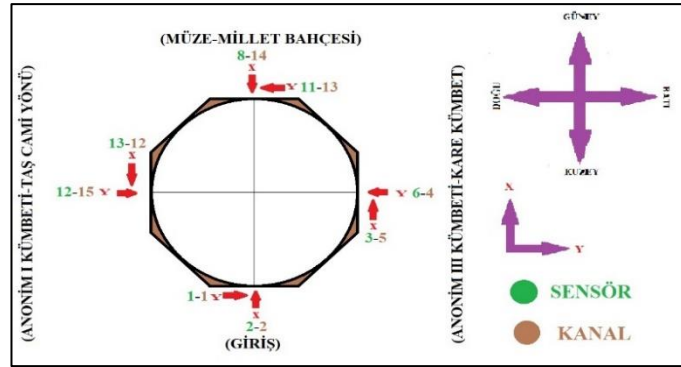
Bu tez çalışması kapsamında yapılan operasyonel modal analiz uygulamasının amacı yapının dinamik davranış parametrelerinin deneysel olarak elde edilmesidir. Operasyonel modal analiz uygulamasında yapının ortam titreşimlerine verdiği tepkiler ivmeölçer sensörler yardımıyla ölçülmüş ve veri toplama sistemi üzerinden kaydedilmiştir. Dinamik davranış parametrelerini doğru bir şekilde belirlenebilmesi için yapının ortam titreşimlerine verdiği tepkilerin teknik açıdan uygun yapı noktalarından alınması gereklidir. Bu nedenle, saha çalışması öncesi sonlu eleman modeli üzerinde teorik modal analiz yapılması ve mod şekillerinin hesaplanması gerekir. Teorik olarak hesaplanan mod şekilleri ve yapının mevcut durumu dikkate alınarak bir sensör yerleşim planı çıkarılır.

Karar verilen ölçüm şekline bağlı olarak bir noktada bir ya da birden fazla eksen için ivme ölçümü alınabilmektedir. Bu durumda tek, iki ya da üç eksenli ivmeölçer sensörler kullanılabilmektedir. Sensörlerin yapı ile sıkı bir temas halinde olması esastır. Bu amaçla mekanik bağlantı yapılması tercih edilmekle birlikte, tarihi yığma bir yapıda delme/vidalama gibi bir uygulamanın yapılamayacağı açıktır. Bu nedenle, Şekil 3.35'te yakın plan görüntüsü verilen tek eksenli bir ivmeölçer kümbet yapısına sıcak silikon uygulaması ile bağlanmış ve sonrasında yüksek mukavemetli plastik bantlarla ayrıca yapıya tutturulmuştur.



Şekil 3.35. Tek eksenli ivmeölçer örneği

Tez çalışması kapsamında kullanılan tek eksenli ivmeölçerler yapıya Şekil 3.36' da sunulan sensör yerleşim planı dâhilinde Şekil 3.37' de gösterildiği şekilde kovalı merdiven yardımıyla bağlanmıştır.





Şekil 3.38. Dinamik veri toplama sistemi

İvmeölçer sensörlerin çalışma mekanizması esasen sensör içerisindeki direnç mekanizması üzerindeki değişikliğe istinaden meydana gelen voltaj çıkışı farkı üzerine kuruludur. Veri toplama sistemi tarafından bilinen bir voltaj değeri ile beslenen sensörde titreşim hareketiyle birlikte meydana gelen direnç değişimi çıkış voltajını değiştirir ve bu fark sensöre özel bir kalibrasyon katsayısı ile çarpılarak ivme değerine dönüştürülür. Burada, analog verinin dijital veriye dönüştürülmesi söz konusudur ve veri toplama sistemi bu çalışmayı yapan sistemdir. Ölçülen verinin kaydı ve çalışmanın takibi amacıyla TestLab Network (2020) veri toplama sistemi yazılımı kullanılmıştır.

Tüm sensörlerin eş zamanlı ölçüm alması ve aynı birim sistemi üzerinde kayıt alması operasyonel modal analiz çalışmasında önemli bir husustur. Tepki ölçüm süresi de dikkat edilmesi gereken bir başka parametredir. Operasyonel modal analiz uygulaması ile dinamik kimliklendirme çalışması sürecinde, kayıt için teorik olarak hesaplanan doğal titreşim periyodunun ortalama 500 katı sürenin yeterli olacağı literatürde yer almaktadır (Okuyucu 2020). Ancak, tarihi yapılar için bu sürenin yeterli olmaması muhtemeldir. Bu nedenle, Emir Saltuk Kümbeti uygulamasında toplam 8 adet tek eksenli ivmeölçer sensörle 100 Hz ve 200 Hz ölçüm frekansları ile ölçüm birimi “g” olacak şekilde 10 dakika süreli ölçümler alınmıştır. Toplamda 13 ölçüm alınmış ve kaydedilmiştir. Ölçümlerin biri hatalı diğer on ikisi sağlıklı ölçümlerdir. Ölçüm verisi üzerinde gerekli kontroller yapıldıktan sonra veri dinamik davranış parametrelerinin analizi için Artemis Modal Pro (2018) yazılımında işlenmiştir. Bu çalışmaya ilişkin detaylar takip edilen bölümde sunulmaktadır.

Ülkemizde kültür ve tabiat varlıkları 2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu (1983) ile koruma altındadır. Bu nedenle, tarihi bir yapı üzerinde saha çalışması yapılmadan önce yasal izinlerin alınması gerektiğinin altı çizilmelidir. Zira tarihi kültür mirasımız ortak kamu malıdır ve kişilerin özel tasarrufu dâhilinde bu yapılar üzerinde herhangi bir iş, işlem, çalışma yapılması yasal olarak mümkün değildir. Bu nedenle, Emir Saltuk Kümbeti üzerinde çalışma yapılmadan evvel Erzurum İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü’nden, Erzurum Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu Müdürlüğü’nden ve Erzurum Yakutiye Belediye Başkanlığı’ndan yasal izinler alınmıştır. Yasal izin süreçleri tamamlandıktan sonra çalışma başlamış, sahaya gidilmiş ve yapı yerinde incelenmiştir. Bu süreçte, tüm lojistik destek Yakutiye Belediye Başkanlığı tarafından sağlanmıştır.

3.6.2. Operasyonel modal analiz veri işleme çalışması

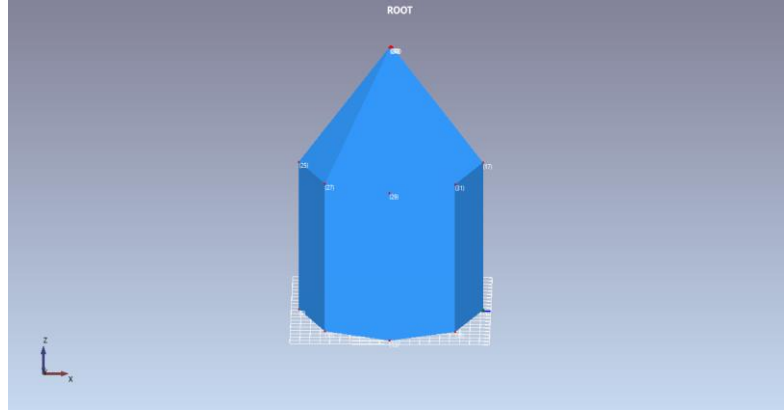
Emir Saltuk Kümbeti’ nin ortam titreşimlerine verdiği tepkiler ivme cinsinden ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Bu veri, Artemis Modal Pro (2018) yazılımında beş aşamalı bir çalışma sonucunda analiz edilerek dinamik davranış parametreleri deneysel olarak elde edilmiştir. Bu aşamaları sırası ile;

- Model oluşturma
- Ölçülen verinin sisteme yüklenmesi
- Verinin modele tanımlanması
- Veri analiz aşaması
- Analiz sonuçlarının doğrulanması

şeklinde (Okuyucu 2020). Veri işleme basamakları aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Model oluşturma:

Artemis Modal Pro (2018) yazılımı ile yapılacak analiz çalışmasında ki ilk iş yapı modeli oluşturmaktır. Analize esas model Şekil 3.39’da gösterildiği gibi oluşturulmuştur. Bu aşamada yapının geometrik ölçülerine sadık kalınmıştır.

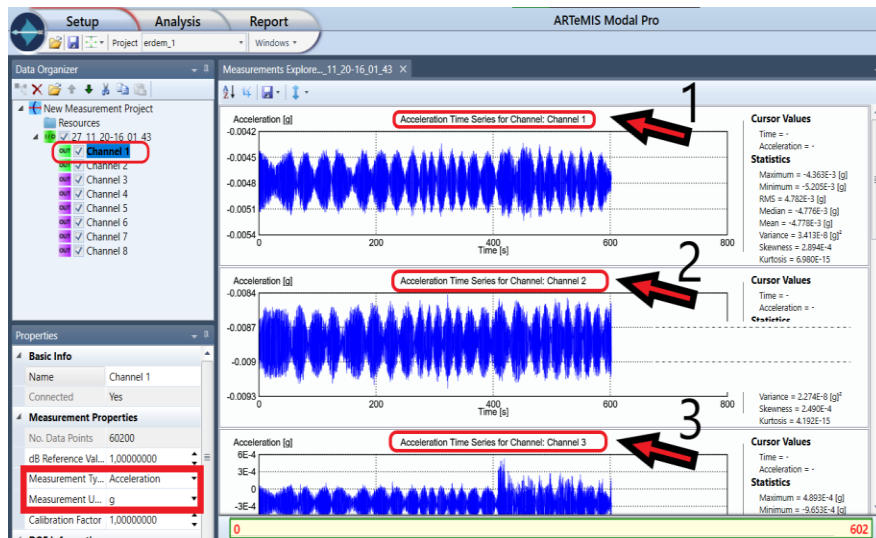


Şekil 3.39. Artemis Modal Pro (2018) yazılımında oluşturulan analize esas model görüntüsü.

Kümbet yapısının külah kısmına herhangi bir sensör bağlanmamıştır. Yazılım da külah kısmı sabit olarak tanımlanmaktadır. Bu sebep ile mod şekillerini daha net görebilmek amacı ile ilerleyen kısımlarda mod şekilleri sadece gövde üzerinde incelenmiştir. İkinci basamak ise verilerin sisteme yüklenmesidir.

Ölçülen verinin sisteme yüklenmesi:

Geometrik model oluşturulduktan sonra ivmeölçerlerden alınan her bir ivme kaydı yazılıma tanıtılmıştır ve Şekil 3.40'da gösterildiği gibi ivme-zaman serileri elde edilmiştir. 10' ar dakika olarak belirlenen ölçüm süreleri bu aşamada alınan kayıt üzerinden tekrar teyit edilmiştir.

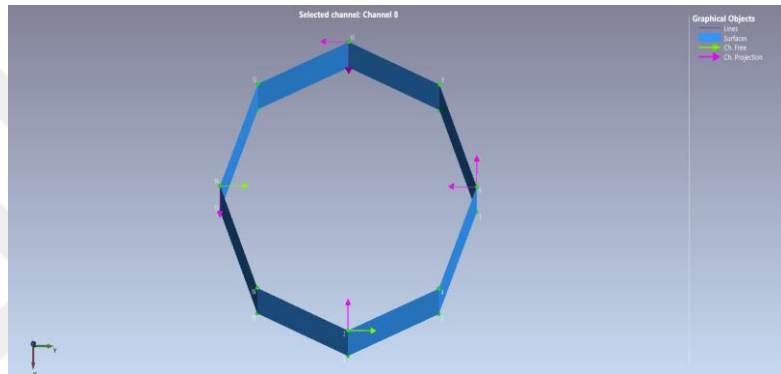


Şekil 3.40. İvme veri kayıtlarının Artemis Modal Pro (2018) yazılımına tanıtılması

Veriler sisteme yüklendikten sonra diğer bir basamak olan verilerin modele tanıtılması aşamasına geçilmiştir.

Verinin modele tanımlanması:

Yapılan her ölçüm için ivme kayıtları programa tanıtılmıştır. Ölçüm türü olarak ivme, yer çekimi ivmesi ise “g” olarak seçilmiştir. Saha çalışmasında elde edilen kroki referans alınarak basit model üzerine ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Her bir ivmeölçer Şekil 3.41’deki gibi modele tanıtılmıştır.



Şekil 3.41. İvme kayıt dosyalarının sensör yerleşim planı uyarınca modele uygulanması

İvme kayıtlarının analize esas modele tanımlanmasından sonra veri analiz aşamasına geçilmiştir.

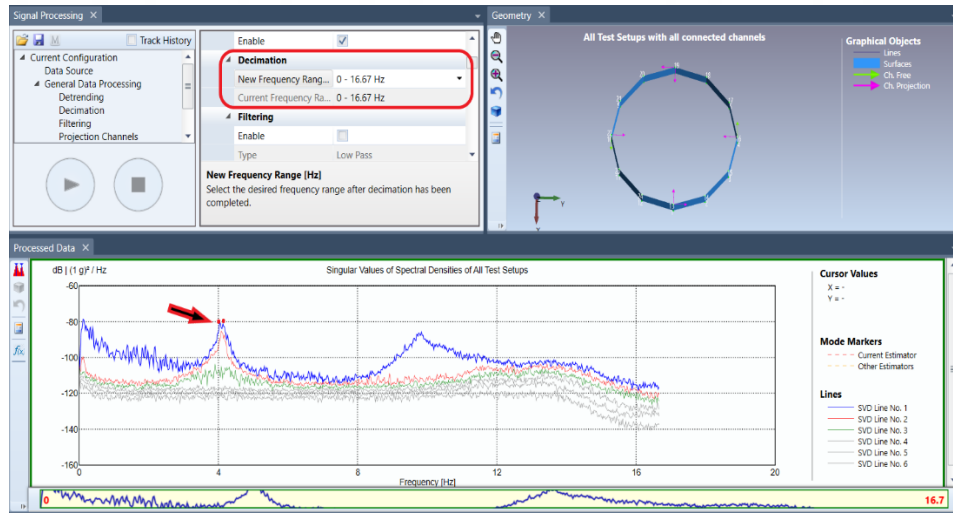
Veri analizi aşaması:

Modal parametrelerin tayin edilebilmesi için Artemis Modal Pro (2018) programında birçok analiz yöntemi sunulmuştur. Bu yöntemler frekans tanım alanı ve zaman tanım alanında çalışan yöntemler olmak üzere iki çeşittir. Yöntemlerin temelinde farklı algoritmaların Fourier dönüşümleri yapılarak elde edilen matematiksel denklemlerin kullanılmasıyla oluşmuştur (Erkmen 2022). Yapıdan alınan ölçümlerde tekrar eden mod şekil ve frekansları yazılımda belirtilen beş farklı yöntem ile analiz edilmiştir. Bu analiz türleri Çizelge 3.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.8. Operasyonel modal analize esas analiz türleri

Analiz Türü Kısaltması	Analiz Türü	Ayrıştırma Yöntemi
FDD	Frekans Alanında Ayrıştırma	Frekans Tanım Alanında
EFDD	Geliştirilmiş Frekans Alanında Ayrıştırma	Frekans Tanım Alanında
CFDD	Eğri Uyumlu Frekans Alanı Ayrışması	Frekans Tanım Alanında
SSI-UPC	Stokastik Alt Alan Tanımlama- Ağırlıksız Temel Bileşen	Zaman Tanım Alanında
SSI-UPCX	Stokastik Alt Alan Tanımlama- Genişletilmiş Ağırlıksız Temel Bileşen	Zaman Tanım Alanında

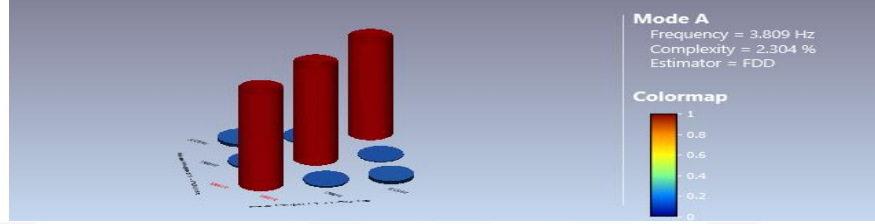
Artemis Modal Pro (2018) yazılımında veri analizi neticesinde esasen spektral yoğun fonksiyonları ve bu fonksiyonların grafikleri elde edilmektedir. Spektral yoğunluk grafikleri yapıda oluşan titreşimlerin hangi frekans düzeyinde yoğunlaştığını göstermektedir (Erkmen 2022). Kümbet yapısı örneğinde olduğu gibi, spektral yoğunluk fonksiyonları üzerinde elde edilen pik noktalar ayırt edilemeyecek şekilde birbirine çok yakın olabilmektedir. Bu nedenle, yapılacak analizin frekans aralığının, teorik modal analiz sonuçları dikkate alınarak, doğru bir şekilde belirlenmesi önem arz etmektedir. Örnek bir spektral yoğunluk fonksiyonu grafiği Şekil 3.43’ te sunulmaktadır.

**Şekil 3.42.** Örnek bir spektral yoğunluk fonksiyonu grafiği (Erkmen 2022)

Şekil 3.42’de gösterildiği gibi spektral yoğunluk grafiğinden 0-16.67 Hz frekans aralığı kullanılarak pik noktalar elde edilmiştir. Bu noktalar, yapının mod şekillerine ait frekans değerlerini temsil etmektedirler. Ancak, analiz sonucu elde edilen mod şekillerinin ayrıklığının incelenmesi esastır. Bu nedenle, operasyonel modal analiz uygulamasının son aşaması olan analiz sonuçlarının doğrulanması işlemi yapılır.

Analiz sonuçlarının doğrulanması:

Yapılan analizler sonucunda elde edilen analiz verilerinin doğruluğu ve güvenilirliği önemli hususlardan biridir. Modal davranışın analiz sonuçlarının güvenilirliği modal güvence kriteri ile değerlendirilir. Analiz sonucunda Şekil 3.43’de gösterildiği gibi modal güvence kriteri değerlerine ilişkin sütun grafikler elde edilir.



Şekil 3.43. Modal güvence kriteri değerleri için örnek bir sütun grafiği

Pastor et al. (2012)’ ye göre modal güvence kriteri mod şekillerinin birbirinden bağımsız olup olmama durumlarını tespit etmek amacı ile kullanılan istatistiksel bir göstergedir. Elde edilen mod şekillerinin ayrıklığını doğrulamak amacıyla; analiz sonucunda modal güvence kriteri matrisindeki değerlerinin diyagonal doğrultuda 1 kenar değerlerin ise 0’a yakın olması istenmektedir. Şekil 3.43’te de görüldüğü gibi analiz sonucunda elde edilen mod şekillerinin diyagonal doğrultuda 1, kenar değerlerde ise 0 olması incelenen mod şekillerinin birbirinden ayrık olmasının bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Materyal ve metot bölümünde Emir Saltuk Kümbetinde kullanılan kamber taşının fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmış ve bazı bulgular elde edilmiştir. Elde edilen bu bulgular ışığında kümbet üzerinde bu bölüm de uygulamalar yapılmıştır. Tarihi bir yığma yapı olan Emir Saltuk kümbeti modellenmiş ve üzerinde teorik analiz yapılmıştır. Saha çalışmalarından elde edilen deneysel analiz sonuçları ile karşılaştırılmış ve bir sonuca ulaşılmıştır.

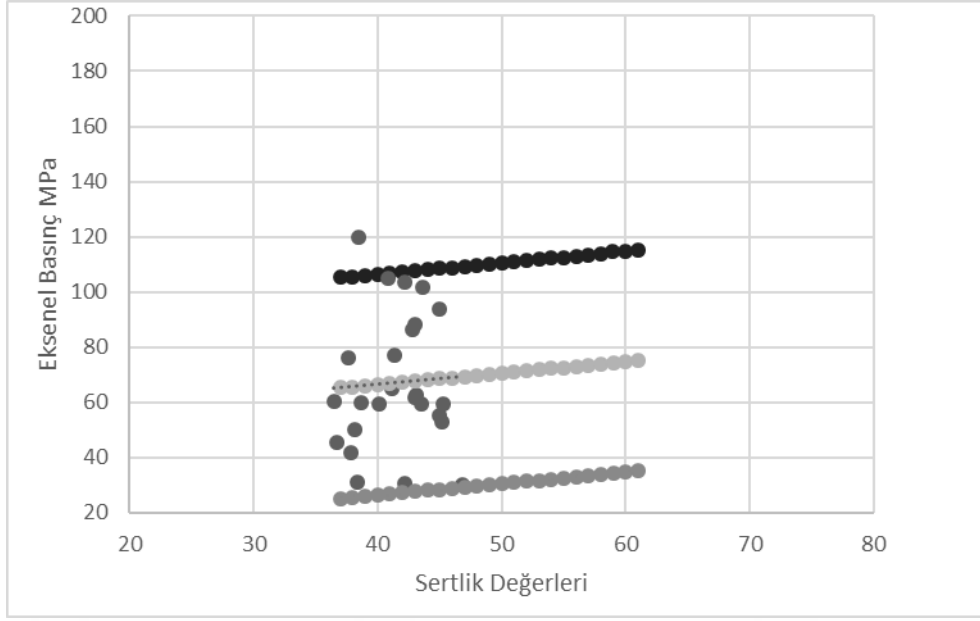
4.1. Emir Saltuk Kümbeti Duvar Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Kümbete ait mekanik ve fiziksel özelliklerin belirlenmesi için yapıyı oluşturan yapı taşlarına Schmidt çekici ile yüzey sertlik deneyleri uygulanmıştır. Laboratuvar ortamında maden sahasından elde edilen numuneler üzerine basınç dayanım testi ve Schmidt çekici ile yüzey sertlik testi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bir kalibrasyon oluşturulmuş ve elastik modül elde edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen yapıya ve yapıyı oluşturan yapı elemanlarına ait fiziksel ve mekanik özellikler bu bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

4.1.1. Kamber taşı basınç dayanımı-Schmidt sertlik değerleri arasındaki bağıntı

Emir Saltuk Kümbetinin teorik analizde kullanılmak üzere muhtevasında bulundurduğu kamber taşının elastik modülünün bulunması için yüzey sertliği ile basınç mukavemeti arasında bir bağıntı oluşturulması ve bu bağıntıdan elde edilen nümerik sonuç ile duvar elastik modülüne gidilmesi gerekliliği zuhur bulmuştur.

Bu sebep ile 25 adet kamber taşı küp numunesi laboratuvar ortamında Schmidt çekici deneyine maruz bırakılmıştır. Daha sonra her bir numune üzerinde eksenel basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Elde edilen sertlik değerleri ve basınç mukavemetleri not edilerek aralarında Şekil 4.1'deki dağılım elde edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.1. Kamber taşı yüzey sertliği-basınç dayanımı dağılımı

Kamber taşı numunelerine ait sertlik değeri ve basınç dayanımı dağılımına bakıldığından değerlerin belirli bir alanda toplandığı görülmektedir. Bu sebep ile dağılıma doğrusal bir eğri uydurarak dağılımı sınırlayan maksimum ve minimumu temsil eden iki farklı eğri uydurulmuştur. Oluşturulan eğrilerden elde edilen eşitlikler eşitlik (4.1), (4.2) ve (4.3) şeklindedir.

Elde edilen eğri denklemleri;

$$f_{cmin} = 0,4112 * R_v + 10,02 \quad (4.1)$$

$$f_{cort} = 0,4112 * R_v + 50,04 \quad (4.2)$$

$$f_{cmax} = 0,4112 * R_v + 90,01 \quad (4.3)$$

şeklinde bağıntılardır. Bu bağıntılardan herhangi bir kamber taşı için elde edilecek eksenel basınç dayanımı ortalama, maksimum ve minimum şeklindedir. Bağıntıda belirtilen f_c eksenel basınç dayanımını, R_v ise saha da Şekil 4.2'deki gibi düşey uygulanan Schmidt çekici deneyinin sonucu olan yüzey sertliğini belirtmektedir. Bu bağıntı sayesinde sahada yapıya Schmidt çekici uygulanarak elde edilen değerlerin

ortalaması alınıp bağıntıda yerine yazılarak yapıdaki kamber taşına ait eksenel basınç dayanımı değerine ulaşılmaya çalışılmıştır.

Kamber taşı Emir Saltuk Kümbetinin sadece dış duvarında bulunmaktadır. Sahada kamber taşına ait Schmidt çekici uygulanmış ve ortalama sertlik değeri 39,888 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sertlik değeri ile ilgili bağıntı kullanılarak kamber taşına ait eksenel basınç dayanımı minimum 26,40 MPa, maksimum 106,40 MPa olarak hesaplanmıştır. Ortalama basınç dayanımı ise 66,44 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.2. Emir Saltuk Kümbeti dış duvarlarına Schmidt çekici uygulaması

Vasanelli et al. (2016) İtalya'nın Güney kesimlerinde bulunan Barok mimari tarzına uygun olarak yapılmış binalarda süslemede kullanılan ve mahalli olarak bulunabilen Lecce taşı üzerinde tahribatlı ve tahribatsız birçok deney yapmışlardır. Yapılan bu deneyler ile taşın mekanik özellikler tetkik edilmiştir. 16. Yüzyılda inşa edilmiş ve günümüze kadar birçok kere restore edilmiş bir yapıdan kalkerit grubuna ait Lecce doğal taşı örneklerinden alınmış ve bölgede mevcut olan bir ocaktan da Lecce taşı örneği alınmış ve deneyler gerçekleştirmişlerdir. Taş numunelerinin bir kısmı 70 mm boyutlarına sahip kübik, bir kısmı ise 28 mm çap ve 28 mm yüksekliğe sahip silindirik şekilde elde edilmiştir. Numuneler üzerinde eksenel basınç dayanımı ve Schmidt sertlik deneyleri yapılmıştır. Ulaşılan veriler arasında bir ilişki kurulmuş ve aralarında bir bağıntı elde edilmiştir. Bu ilişkilerden elde edilen ilişkilerde kübik numuneler üzerinde regresyon katsayısı 0,37, silindirik numuneler üzerindeki regresyon katsayısı ise 0,76 olarak

bulunmuş ve numune kullanımında ölçeği küçük olanların tercih edilmesi söylenmiştir. Bu çalışma kapsamında yalnızca kübik geometriye sahip numuneler kullanılmış, silindirik numune kullanımı yapılmamıştır. Numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlarda Schmidt sertlik değeriyle eksenel basınç dayanımı arasında doğrusal bir bağıntı oluşturulmuştur. Dağılımdan elde edilen doğrusal bağıntının regresyon katsayısı 0,05, polinomsal ve üstel fonksiyon ile elde edilen bağıntılar için regresyon katsayısı ise sırasıyla 0,11 ve 0,07 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerlerin Schmidt sertliği ile eksenel basınç dayanımı arasında kurulan matematiksel ilişkinin anlamlı olmadığını göstermektedir. Bu sebep ile elde edilen ilişkide dataların dağılımını sınırlandırarak bir alt ve üst sınır belirleyen doğrusal bağıntılar türetilerek elde edilen ilişkide sertlik değerleri için üç farklı değer hesaplama yoluna gidilmiş ve buradan da üç farklı basınç dayanımı elde edilmiştir.

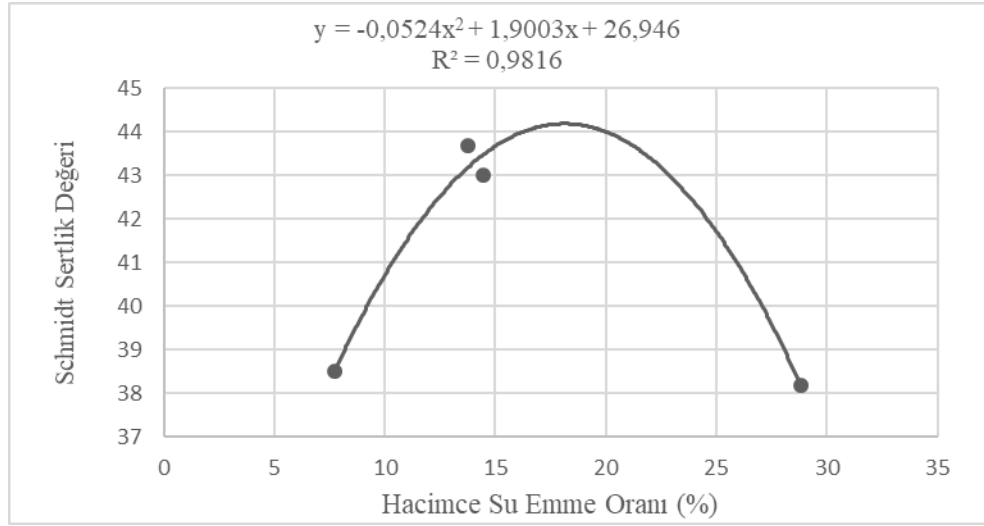
4.1.2. Schmidt sertlik değerleriyle porozite arasındaki bağıntı

Kamber taşı numunelerine önceki bölümlerde porozite deneyi yapılmış ve dört adet numuneye ait hacimce su emme oranları belirlenmiştir. Mevcut olan dört kamber taşı numunesinin Schmidt yüzey sertlik değerleri dikkate alınarak hacimce su emme oranları arasında bir bağıntı oluşturulmaya çalışılmıştır. Çizelge 4.1’de ilgili kamber taşı numunelerine ait hacimce su emme oranı-ortalama yüzey sertlik değeri tablosu verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kamber taşı numunelerine ait porozite ve sertlik değerleri

Numune	Porozite Oranı (%)	Ortalama Schmidt Değeri
1	7,8	38,5
2	14,5	43,0
3	13,6	43,7
4	28,9	38,2

Mevcut bulunan bu dört numune için Şekil 4.3’deki gibi bir grafik oluşturulmuş ve verilen doğrultusunda bir eğri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu eğriden ise porozite ve sertlik arasında eşitlik (4.4)’deki gibi anlamlı bir bağıntı elde edilmiştir.



Şekil 4.3. Hacimce su emme oranı – Schmidt sertlik değeri arasındaki ilişki

Elde edilen grafik için oluşturulan eğri denklemi;

$$R_v = -0,0524x^2 + 1,9003x + 26,946 \quad (4.4)$$

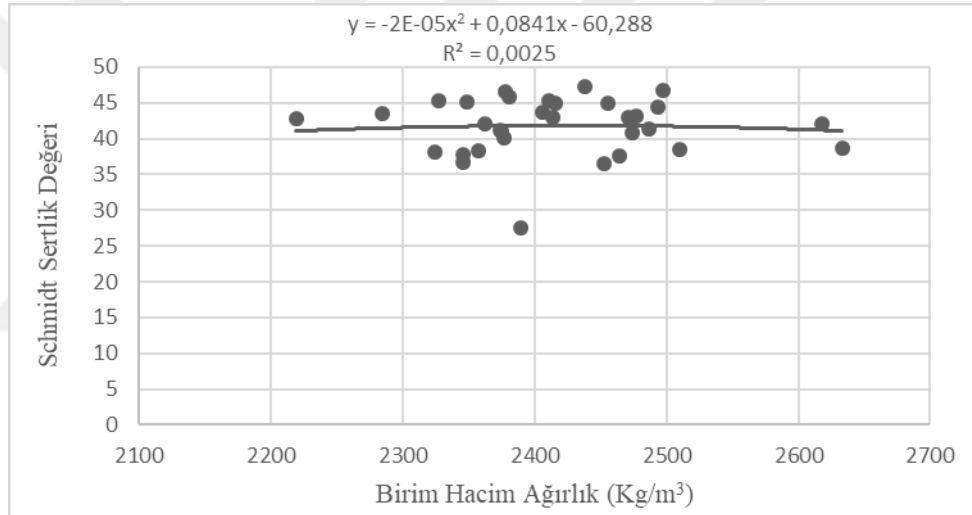
Eşitlik (4.4)'deki gibi elde edilmiştir. Mevcut denklemde ki “x” hacimce su emme oranını yani poroziteyi vermekte, R_v ise Schmidt sertlik değerini temsil etmektedir. Oluşturulan eğrinin R^2 değeri 0,9816 olarak hesaplanmıştır. Bu değer 1'e yakınlığı göz önüne alındığında dağılımın ne kadar güvenilir olduğu görülmektedir. Elde edilen bu dağılım porozite ve sertlik arasındaki ilişki için kullanılabilir olması şeklinde terennüm edilebilir. Ancak numune sayısının az olması nedeni ile oluşturulan ilişkinin sağlıklı olmadığı düşünülebilir. Oluşturulan ilişki bahsi geçen iki kavram arasındaki ilişkinin irdelenebilmesi için kurulmuştur.

Tahribatsız yöntemler olan Schmidt sertlik ve ultrases geçiş hızı ile porozite arasındaki ilişkiyi Fort et al. (2013) çalışmalarında incelemiştir. Çalışmalarına orta İspanya'da bulunan granit örneklerinde deneyler yapıldığı bilgisi verilmiştir. Örneklerin yaklaşık olarak 1300 yıllık tarihi yapılardan ve ilgili yapıların yapım sürecinde taş ocağı olarak kullanıldığı tahmin edilen yerden temin edildiği söylenmektedir. İncelemeler sonucunda bütün örneklerin ortalama olarak %3,3 ile %3,5 oranları arasında bir porozite değerine sahip oldukları ve Schmidt sertlikleri ile ultrases geçiş hızı değerleri arasındaki ilişkilerin incelendiği görülmektedir. Birbirinden farklı yaşlara sahip örneklerin Schmidt sertlik okumalarıyla yaşları arasındaki ilişkiyi gösteren bağıntının regresyon katsayısının

0,81 olduğu ultrases geçiş hızı değerleri ile de 0,99 olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca düşük örneklerin düşük poroziteye sahip olmasının sebebi olarak bu değerler gösterilmektedir. Fort et al. (2013) çalışmasının bu tez çalışmasında belirtilen Schmidt sertlik değeri ile porozite arasındaki bağlantıyı destekler nitelikte bir çalışma olduğu değerlendirilebilmektedir.

4.1.3. Schmidt sertlik değerleriyle birim hacim ağırlık arasındaki bağıntı

Kamber taşına ait 32 numunenin birim hacim ağırlıkları ile Schmidt yüzey sertlikleri arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır. İlgili veriler kullanılarak Şekil 4.4'deki dağılım elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Schmidt sertlik değeri – birim hacim ağırlık arasındaki ilişki

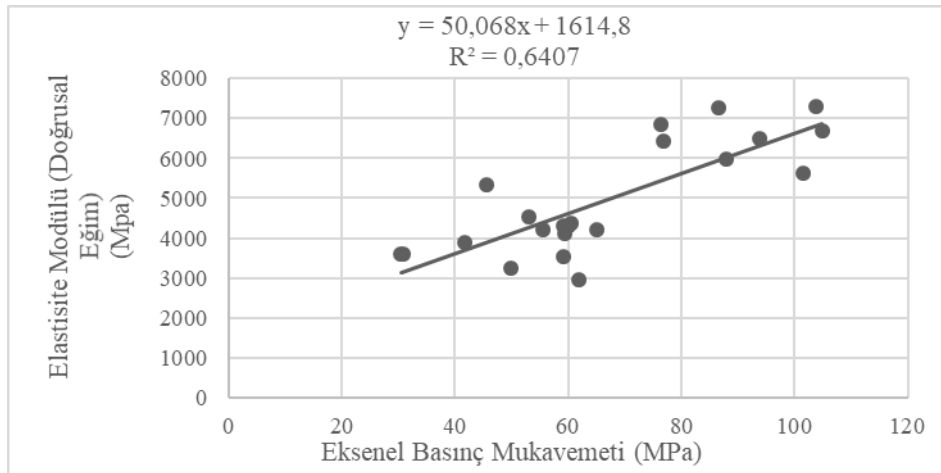
Şekil 4.4'deki oluşturulan eğriye ait R^2 değeri 0,0025 olduğu ve buna istinaden “r” değerinin 0,05 olduğu hesaplanmıştır. Uydurulmuş olan en ideal denkleme ait 0,05 korelasyon sayısının 1 den çok uzak olduğu ve kabul edilebilir sınırlarda olmadığı yani güvenli olmadığı görülmüştür. Ayrıca regresyon katsayısının (R^2) 0,70 ile 0,99 arasında olması elde edilen fonksiyonun dağılımı güvenli bir şekilde temsil edebileceği düşünüldüğünde kurulan ilişkiden doğacak denklemin dağılımı güvenli bir şekilde temsil etmediği görülmüştür. Bu sebeple sağlıklı bir bağıntı oluşturulamadığından Schmidt sertlik değeri ile birim hacim ağırlık arasında bir bağıntı oluşturulamayacağı kanaatine ulaşılmıştır.

Aydın ve Basu (2005) 40 adet silindir şeklinde kesilmiş granit örneklerde N tipi Schmidt sertlik çekici kullanarak elde ettikleri değerleri ve kuru haldeki birim hacim ağırlık değerleri arasındaki ilişkileri incelemişler ve elde edilen bağıntının regresyon katsayısının 0,92 olduğunu bulmuşlardır. Elde edilen bu iki ölçüm için oluşturulan ilişkinin, bu çalışmadaki uygulama sonucunun tam tersine, anlamlı olduğunu söylemişlerdir.

4.1.4. Elastik modül ile basınç mukavemeti arasındaki bağlantı

Bu kısımda kamber taşı numunelerine ait elastik modüller ile yine aynı numunelere ait eksenel basınç dayanımları arasında bir bağıntı kurulmaya çalışılmıştır. Bu bağıntı sayesinde eksenel basınç dayanımı bilinen bir kamber taşı numunesinin Elastisite modülüne yaklaşık bir şekilde gidilmesi hedeflenmiştir.

Kamber taşı numunelerinin eksenel basınç dayanımları ile doğrusal eğim, sekant modülü ve tanjant modülünden elde edilen elastik modülleri kullanılarak bir grafik çizilmiş ve elde edilen datalar ile bir eğri oluşturulmuş ve bu eğri denklemi meydana getirilmiştir. Öncelikle Şekil 4.5’de gösterilen doğrusal eğim yöntemi ile elde edilen elastik modüle yönelik çalışma yapılmıştır.



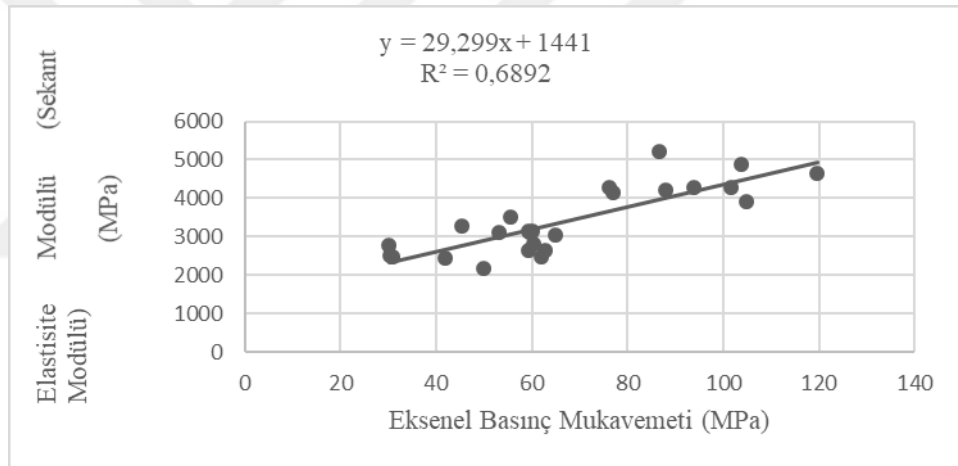
Şekil 4.5. Kamber taşı numunesine ait elastik modül (Doğrusal Eğim) ve eksenel basınç dayanımı arasındaki ilişki.

Regresyon katsayısının (R^2) 0,70 ile 0,99 arasında olması elde edilen fonksiyonun dağılımı güvenli bir şekilde temsil edebileceği düşünüldüğünde kurulan ilişkiden doğan

denklemin dağılımı güvenli bir şekilde temsil edemediği görülmüştür. Şekil 4.5’de elde edilen dağılım için oluşturulan eğri denklemi eşitlik (4.5)’ deki gibi $y = 50,068x + 1614,8$ şeklindedir. Buradaki “y” elastik modülü “x” ise basınç dayanımını temsil etmektedir. Dağılım regresyon katsayısı $R^2 = 0,6407$ olduğu ve yeterli güvenlikte olmadığı görülmüştür. Ancak güvenli sonuç için alt sınır olan 0,70 değerine yakın bir değer aldığından güvenilirliği düşük bir ilişki kurulabilir. Sonuç olarak;

$$E = 50f_c + 1615 \quad (4.5)$$

Eşitlik (4.5)’deki gibi bir bağıntı elde edilmiştir. f_c basınç dayanımını E elastik modülü göstermektedir. Birimleri ise MPa’dır. Sırasıyla sekant ve tanjant modülleri ile elde edilen denklemler aynı yöntem ile bulunmaktadır.

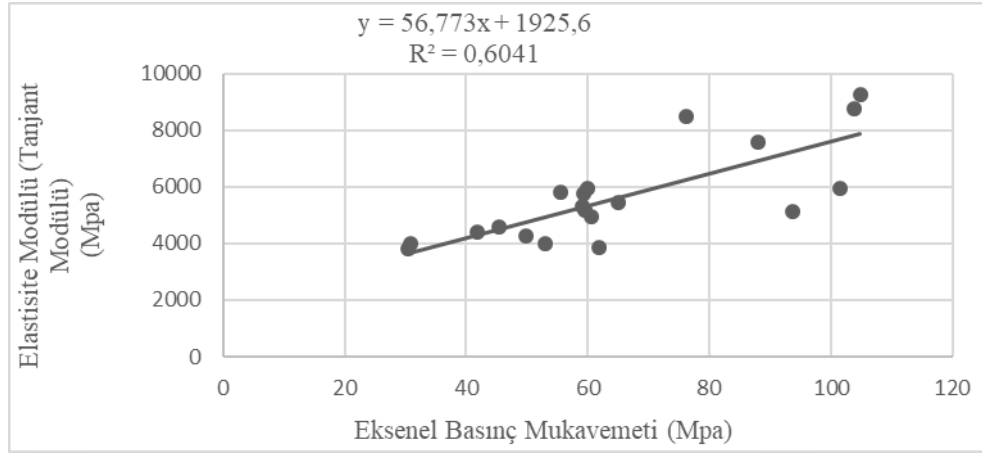


Şekil 4.6. Kamber taşı numunesine ait elastik modül (sekant modülü) ve eksenel basınç dayanımı arasındaki ilişki.

Şekil 4.6’da sekant modülü yöntemi ile bulunan kamber taşı numunesine ait elastik modül ile eksenel basınç dayanımı bağıntısı verilmektedir. Oluşturulan eğriden elde edilen denklem eşitlik (4.6)’daki gibi $y = 29,299x + 1441$ şeklindedir. Dağılımın regresyon katsayısı ise $R^2=0,6892$ olarak bulunmuş ve düşük güvenirlilikli olduğu görülmüştür. Sonuç olarak;

$$E = 30f_c + 1441 \quad (4.6)$$

eşitlik (4.6)'daki gibi bir bağıntı elde edilmiştir. Son olarak tanjant modülünden elde edilen elastik modül ile oluşturulan bağıntıya bakılacak olursa;



Şekil 4.7. Kamber taşı numunesine ait elastik modül (tanjant modülü) ve eksenel basınç dayanımı arasındaki ilişki.

Şekil 4.7’de tanjant modülü yöntemi ile bulunan kamber taşı numunesine ait elastik modül ile eksenel basınç dayanımı bağıntısı verilmektedir. Oluşturulan eğriden elde edilen denklem eşitlik (4.7)’deki gibi $y = 56,773x + 1925,6$ şeklindedir. Dağılımın regresyon katsayısı ise $R^2 = 0,6041$ olarak bulunmuş ve düşük güvenilirlikli olduğu görülmüştür. Sonuç olarak;

$$E = 57f_c + 1926 \quad (4.7)$$

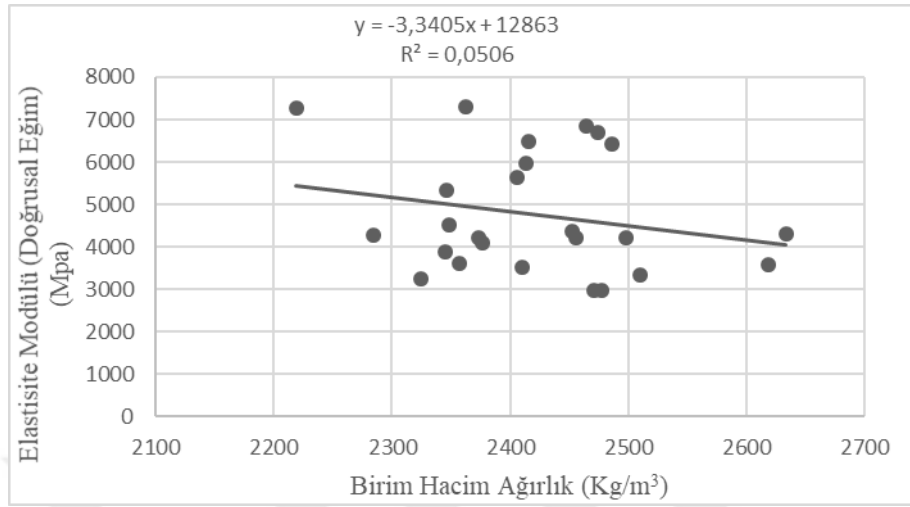
eşitlik (4.7)’deki gibi bir bağıntı elde edilmiştir.

4.1.5. Elastik modül ile birim hacim ağırlık arasındaki bağlantı

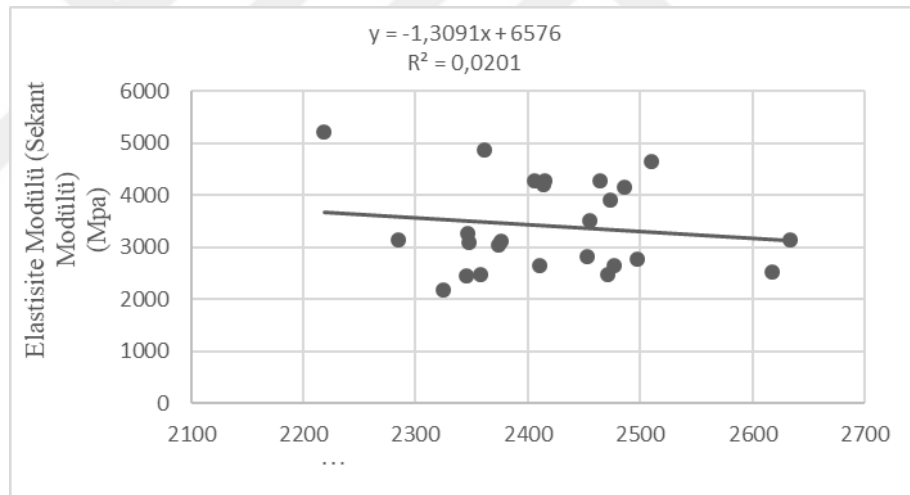
Bu bölümde ise kamber taşı numunelerine ait doğrusal bölge eğim, sekant modülü, ve tanjant modülü yöntemleri ile elde edilmiş elastisite modülleri ile yine aynı numunelere ait birim hacim ağırlıkları arasında bağıntı kurulmaya çalışılmıştır. Yine sırası ile doğrusal eğim sekant ve tanjant modülü yöntemlerine göre birim hacim ağırlık grafikleri Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’daki gibi çizdirilmiş ve oluşturulan eğim denkleminde göre aralarında bir bağıntı elde edilmeye çalışılmıştır. Ancak elde edilen dağılımlardan oluşturulan en güvenilir fonksiyonların “ R^2 ” değerleri sırasıyla 0.0506, 0.0201 ve 0.058 olarak bulunmuştur. “ R^2 ” değerlerinin kabul edilebilirlik sınırları

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

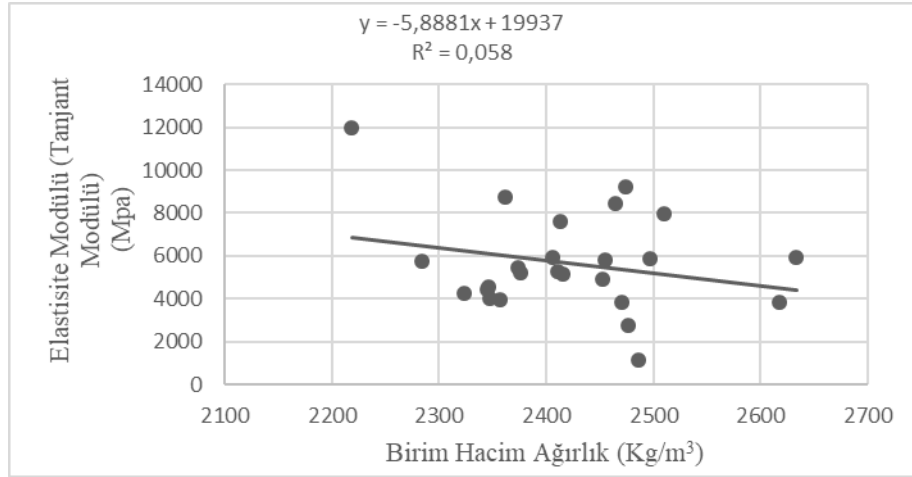
içerisinde olmaması sebebi ile kamber taşına ait numunelerin elastik modülleri ile birim hacim ağırlıkları arasında bir bağıntı kurulamaması sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.8. Kamber taşı numunesine ait elastik modül (Doğrusal Eğim) ve birim hacim ağırlık arasındaki ilişki.



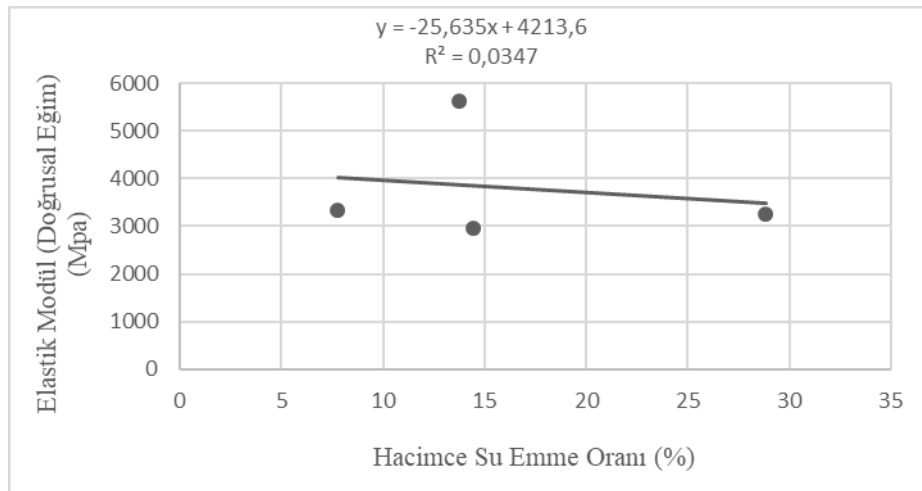
Şekil 4.9. Kamber taşı numunesine ait elastik modül (Sekant Modülü) ve birim hacim ağırlık arasındaki ilişki.



Şekil 4.10. Kamber taşı numunesine ait elastik modül (Sekant Modülü) ve birim hacim ağırlık arasındaki ilişki.

4.1.6. Elastik modül ile porozite arasındaki bağlantı

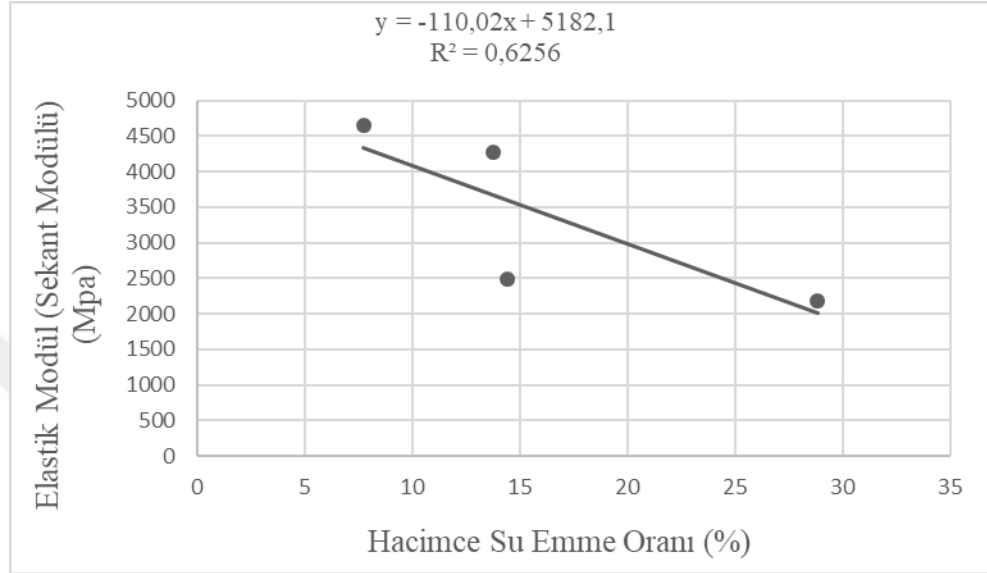
Son olarak bu bölümde kamber taşına ait dört numune üzerine yapılan porozite deneyi sonu elde edilen hacimce su emme oranları ile bu dört numuneye ait doğrusal eğim, sekant modülü ve tanjant modülü yöntemleri ile elde edilen Elastisite modülleri arasında bir bağlantı kurulmaya çalışılmıştır. İlk önce doğrusal eğim yöntemi ile elde edilen elastik modül ile hacimce su emme oranı arasında Şekil 4.11’deki gibi bir ilişki kurulmuş ancak kurulan bu ilişkinin “ R^2 ” değerinin 0,0347 olduğu görülmüştür. Regresyon katsayısının çok düşük olması sebebi ile iki parametre arasında güvenilir bir ilişki kurulamayacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.11. Kamber taşı numunesine ait elastik modül (Doğrusal Eğim) ve porozite arasındaki ilişki.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Sekant ve tanjant modülleri arasında daha sağlıklı bir ilişki kurulduğu gözlemlenmiştir. Sekant ve tanjant modülleri ile hacimce su emme arasında kurulan ilişki sonucunda elde edilen “R²” değerleri sırasıyla 0,6256 ve 0,474’ tür. Bu parametreler arasında kurulan ilişki, oluşturulan eğri denklemi ve R² değerleri Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de gösterilmiştir.

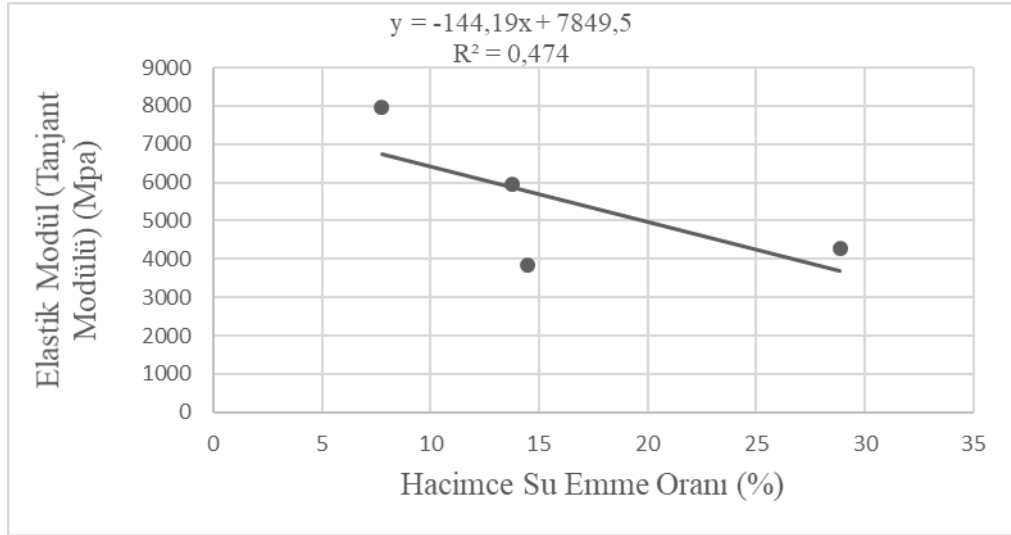


Şekil 4.12. Kamber taşı numunesine ait elastik modül (sekant modülü) ve porozite arasındaki ilişki.

Şekil 4.12’de gösterilen ilişki sonucunda elde edilen eğrinin denklemi eşitlik (4.8)’deki gibi $y = -110,02x + 5182,1$ şeklindedir. “R²” değeri 0,6256 olarak hesaplanmıştır. Güvenirliği düşük olarak görülmüştür. Bu bağıntı sonucunda sekant modülü ile bulunan elastik modül ile porozite arasında;

$$E = -110W + 5180 \quad (4.8)$$

eşitlik (4.8)’deki gibi bağıntı elde edilmiştir. “W” poroziteyi yani hacimce su emme oranını temsil etmektedir.



Şekil 4.13. Kamber taşı numunesine ait elastik modül (tanjant modülü) ve porozite arasındaki ilişki.

Şekil 4.9’da gösterilen ilişki sonucunda elde edilen eğrinin denklemini eşitlik (4.9)’daki gibi $y = -144,19x + 7849,5$ şeklindedir. “R²” değeri 0,474 olarak hesaplanmıştır. Güvenirliğinin çok düşük olduğu görülmüştür. Bu bağıntı sonucunda tanjant modülü ile bulunan elastik modül ile porozite arasında;

$$E = -145W + 7850 \quad (4.9)$$

eşitlik (4.9)’daki gibi bağıntı elde edilmiştir. “W” poroziteyi yani hacimce su emme oranını temsil etmektedir.

4.1.7. Kümbet yapısı üzerinde sertlik okumalarının alınması

İlgili mercilerden gerekli izinler alınarak saha çalışması için Üç Kümbetler mevkiine gidilmiştir. Emir Saltuk Kümbeti iç ve dış duvarlarından Şekil 4.14’de görüldüğü gibi beton Schmidt sertlik çekici sertlik okumaları alınmıştır. Bu okuma sonucunda elde edilen değerlerle ilgili kalibrasyon bağıntıları kullanılarak yapının inşasında kullanılmış doğal taşlar için tahribatsız bir şekilde basınç dayanımı çıkarımları yapılmıştır.

Yapının iç duvarlarının tamamına yakını bazalt taşından oluşmaktadır. Dış duvarlarında ise bazalt, andezit ve kırmızı kamber taşı bulunmaktadır. Dış duvar

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

muhtevasında ise oransal olarak bakıldığında % 22 bazalt, % 36 andezit ve % 42 kırmızı kamber taşı bulunmaktadır. İç ve dış duvar sertlik değerleri ayrı ayrı kaydedilmiştir.



Şekil 4.14. Emir Saltuk Kümbeti duvarlarına Schmidt uygulaması

Emir Saltuk Kümbeti taşıyıcı duvarlarından alınan tüm sertlik okumalarının ortalama değerleri hesaplanarak Çizelge 4.2’de toplu olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Emir Saltuk Kümbeti taşıyıcı duvarlarından Schmidt çekici deneyi ile elde ortalama sertlik değerleri.

	Bazalt	Andezit	Kamber
İç Duvar	28,19	X	X
Dış Duvar	38,65	35,97	40

Çizelge 4.2’deki gibi elde edilen yapıyı oluşturan taşlar için ortalama sertlik değerleri kullanılarak Eşitlik (4.1), Eşitlik (4.2) ve Eşitlik (4.3)’teki bağıntılar kullanılarak kamber taşı için minimum, maksimum ve ortalama basınç dayanımı değerleri hesaplanmıştır. Bazalt ve andezit taşları için ise Özdoğan (2018) tezinde türetilen aşağıdaki formüller kullanılmıştır.

Bazalt taşı için;

$$f_c = 0,00012 * R_v^{3,43} \quad (4.10)$$

Andezit taşı için;

$$f_c = 1,1 * R_v^{0,97} \quad (4.11)$$

Belirtilen (4.10) ve (4.11) eşitlikleri kullanılarak elde edilen sertlik değerleri ile her bir taşın basınç mukavemeti ayrı ayrı hesaplanmıştır. Taşlara ait basınç mukavemetlerinden yola çıkarak DBYBHY (2007), Eurocode 6 (1996) ve TBDY (2018)' e göre belirtilen bağıntılar ile yığma duvar basınç dayanımları hesaplanmıştır ve yönetmeliklerde belirtilen muhtelif diğer bağıntılar ile yığma elastik modülleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3. Schmidt sertlik değerleri kullanılarak formülasyonlar ile elde edilen taş basınç mukavemeti değerleri.

	İç Duvar	Dış Duvar
Bazalt Basınç Mukavemet(MPa) ($f_c = 0,00012 * R_v^{3,43}$)	11,30	33,35
Andezit Basınç Mukavemet(MPa) ($f_c = 1,1 * R_v^{0,97}$)	X	35,54
Kamber Min. Basınç Mukavemet(MPa) ($f_{cmin} = 0,4112 * R_v + 10$)	X	26,45
Kamber Ort. Basınç Mukavemet (MPa) ($f_{cort} = 0,4112 * R_v + 50,041$)	X	66,49
Kamber Maks. Basınç Mukavemet (MPa) ($f_{cmax} = 0,4112 * R_v + 90$)	X	106,45

Çizelge 4.2'de gösterilen sertlik değerleri kullanılarak Eşitlik (4.1), Eşitlik (4.2), Eşitlik (4.3), Eşitlik (4.10) ve Eşitlik (4.11)'de belirtilen bağıntılar yardımı ile Çizelge 4.3'de gösterilen taşlara ait basınç dayanımları bulunmuştur. Buna göre Emir Saltuk Kümbeti' nin iç duvarlarında kullanılan bazalta ait basınç dayanımı 11,30 MPa, dış duvarlarında kullanılan bazalta ait basınç mukavemeti 33,35 MPa ve andezitin basınç mukavemeti 35,54 olarak bulunmuştur. Kamber taşının ise minimum, ortalama ve

maksimum değerleri olmak üzere sırasıyla 26,45 MPa, 66,49 MPa ve 106,45 MPa olarak bulunmuştur. Dış duvar bazalt değerleri ile iç duvar bazalt değerlerinin farklı olması; yüzeylerinin farklı olması, boşluklu yapılarının farklı olması ve türlerinin farklı olması şeklinde düşünülmektedir. Yaptığımız ölçümler taşlara ait yüzey sertlik ölçümleridir. Sertlikten basınç dayanımına geçerken yapılan hatanın oldukça yüksek olabileceği literatürde sıklıkla belirtilen bir durumdur. Bu sebeple ölçüm ve hesaplamalarda hata payı bulunmaktadır. Elde ettiğimiz yapı taşlarına ait basınç mukavemetleri ile bir sonraki bölümde DBYBHY (2007), Eurocode 6 (1996) ve TBDY (2018)'de belirtilen formülasyon ve kabuller ile duvar basınç dayanımı ve elastik modül hesaplamaları yapılacaktır.

Pinto et al. (2021) 13. yüzyılda başlanan ve 16. yüzyılın sonlarına doğru tamamlanan bir Portekiz sarayının 8 farklı duvarı için kalite tespiti hedeflenmiştir. İlgili çalışmada tahribatsız bir yöntem olan Schmidt çekici okumaları ile beraber tahribatlı bir muayene yöntemi olan flat-jack (düz krik) uygulaması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda Schmidt okumalarının tarihi yığma yapılar da yapıya ait taşın kalitesinin tayininde anlamlı sonuçlar verdiği söylenmiştir. Emir Saltuk Kümbeti iç ve dış duvarlarında ayrı ayrı aynı tür taşlar için yapılan sertlik okumalarını farklılık göstermesi Pinto et al. (2021) çalışmasının sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir.

4.1.8. Yığma duvar basınç dayanımı ve elastik modül belirlenmesi

Bu bölümde Schmidt sertlik deneyi ile bulmuş olduğumuz taş basınç dayanımlarını kullanarak duvar basınç dayanımları ve elastik modülleri hesaplanmıştır. İç ve dış duvarlar için DBYBHY (2007), Eurocode 6 (1996) ve TBDY (2018) yönetmeliklerine göre ayrı ayrı hesaplanmıştır. Elde edilen elastik modüller dış duvar yapısında bulunan ve %22 bazalt, %36 andezit ve %42 kamber taşı bulunma oranlarına göre oranlanarak teorik modal analizde uygulanacak elastik modül elde edilmiştir. Üç yönetmelikten elde edilen iç ve dış duvara ait değerler aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

İç Duvar;

İç duvar yalnızca bazalt taşından ibarettir. Bu minvalde İlk önce Eurocode 6 (1996)' da belirtilen (4.12)'deki denklem ile yaptığımız hesaplamada duvar basınç dayanımı;

$$f_k = K * f_b^\alpha * f_m^\beta \quad (4.12)$$

$$f_k = 0,5 * 11,29^{0,7} * 1^{0,3} = 2,728 \text{ MPa} \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Bağıntıda (4.12)'de belirtilen f_b , taşın basınç dayanımını, f_m ise bağlayıcı olarak kullanılan harcın basınç dayanımını temsil etmektedir. Harç basıncı ise materyal yöntemde belirtildiği gibi 1 MPa olarak alınmıştır. K rijitlik sabitini temsil etmektedir ve yönetmelik doğrultusunda 0,4 - 0,6 arasında bir değer öngörülmekte ve bu sebeple 0,5 alınmıştır. α ve β değerleri ise yapıyı oluşturan duvarların örülme şekline göre belirlenen sabitlerdir. Eğer yığma yapı düzgün örülü bir duvar yapısına sahipse sırası ile 0,70 ve 0,30 olarak, düzensiz bir örgüye sahip ise 0,65 ile 0,25 değerleri alınmaktadır (Eurocode 6 1996). Çalışma konusu olan Emir Saltuk kümbeti genel olarak düzgün örülü bir duvar yapısına sahip olduğundan dolayı α ve β değerleri sırası ile 0,70 ve 0,30 alınarak duvar basınç dayanımı hesaplanmış ve iç duvara ait basınç dayanımı 2,73 MPa olarak bulunmuştur.

Duvar elastik modülü ise Eurocode 6 (1996)' da sunulan ve Bağntı (4.13)' deki denklem ile hesaplanan elastik modül;

$$E = 200 * f_k \quad (4.13)$$

$$E = 200 * 2,728 = 546 \text{ MPa} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

İç duvar yapısı sadece bazalttan oluştuğu için herhangi bir oranlama yapılmadan Eurocode 6 (1996)'ya göre basınç dayanımı 2,73 MPa, elastik modülü ise 545,6 MPa olarak hesaplanmış ve teorik modal analiz için kullanılmıştır.

DBYBHY (2007)'ne göre duvarlar için emniyet basınç gerilmesi hesaplanırken yapıyı oluşturan malzemeler için herhangi bir deney yapılmamış ise duvar basınç gerilmesinin hesaplanması için yönetmelikte belirtilen katsayı ile malzeme basınç dayanımı çarpılmaktadır (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007). Bu sebep ile bazalt taşına ait basınç dayanımı denklem (4.14)'deki gibi 0,5 ile çarpılarak;

$$f_k = f_b * 0,5 \quad (4.14)$$

$f_k = 11,29 * 0,5 = 5,645 \text{ MPa}$ olarak hesaplanmıştır.

Duvara ait elastik modül ise DBYBHY (2007)' de elastik modül hesabı için eşitlik (4.15)' e göre;

$$E = 200 * f_k \quad (4.15)$$

$E = 200 * 5,645 = 1.129 \text{ MPa}$ olarak hesaplanmıştır.

Böylece DBYBHY (2007)'ye göre duvar basınç dayanımı 5,645 MPa olarak, elastik modül ise 1.129 MPa olarak hesaplanmıştır.

Diğer bir yönetmelik olan TBDY (2018)'e göre duvar basıncını hesaplamak için ilgili yönetmelikte belirtilen yığma taşıyıcı duvarların karakteristik basınç dayanımları yönetmeliğin 246. Sayfasındaki tablodan taş basınç dayanımına denk gelen aralıkta iterasyon yapılarak hesaplanmıştır. Bu minvalde iç duvarda kullanılan bazalt için basınç dayanımı $f_k = 3,16 \text{ MPa}$ olarak alınmıştır. Aynı yönetmelikte belirtilen ve Eşitlik (4.16)'da (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018) gösterilen elastik modül formülasyonuna göre elastik modül ise eşitlik (4.16)'ya göre;

$$E = f_k * 750 \quad (4.16)$$

$E = 3,16 * 750 = 2.370 \text{ MPa}$ olarak bulunmuştur.

Dış Duvar;

Dış duvarda da yukarıda belirtilen üç yönetmelik kullanılarak ayrı ayrı duvar basınç mukavemeti ve elastik modül hesaplanmıştır. İlk önce Eurocode 6 (1996)'ya göre hesap yapılmış olup bazalt ve andezit için Özdoğan (2018)'dan alınan basınç dayanımları kullanılmış, kamber taşı için ise bu çalışma kapsamında elde edilen basınç dayanımları kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar Eşitlik (4.10) ve Eşitlik (4.11)'e göre ise aşağıdaki gibidir.

Bazalt taşı için;

$$f_k = 0,5 * 33,35^{0,7} * 1^{0,3} = 5,82 \text{ MPa}$$

$$E = 200 * 5,82 = 1.164 \text{ MPa} \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Andezit taşı için;

$$f_k = 0,5 * 35,54^{0,7} * 1^{0,3} = 6,09 \text{ MPa}$$

$$E = 200 * 6,09 = 1.218 \text{ MPa} \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Kamber taşı için;

Minimum basınç dayanımına göre;

$$f_k = 0,5 * 26,45^{0,7} * 1^{0,3} = 4,95 \text{ MPa}$$

$$E = 200 * 4,95 = 990 \text{ MPa} \text{ olarak,}$$

Ortalama basınç dayanımına göre;

$$f_k = 0,5 * 66,49^{0,7} * 1^{0,3} = 9,44 \text{ MPa}$$

$E = 200 * 9,44 = 1.888 MPa$ olarak,

Maksimum basınç dayanımına göre;

$$f_k = 0,5 * 106,45^{0,7} * 1^{0,3} = 13,12 MPa$$

$E = 200 * 13,12 = 2.624 MPa$ olarak bulunmuştur.

Kümbet dış duvarı farklı üç taştan meydana geldiği için elastik modülü kamber taşının üç farklı durumu için %22 bazalt, %36 andezit ve %42 kamber taşı oranına binaen aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$E_{min} = (0,22 * 1.164) + (0,36 * 1.218) + (0,42 * 990) = 1.110 MPa$$

$$E_{ort} = (0,22 * 1.164) + (0,36 * 1.218) + (0,42 * 1.888) = 1.488 MPa$$

$$E_{max} = (0,22 * 1.164) + (0,36 * 1.218) + (0,42 * 2.624) = 1.797 MPa$$

olarak hesaplanmıştır.

Diğer bir yönetmelik olan (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007)'ye göre taş basınç dayanımlarının yüzde otuzu alınarak Eşitlik (4.14)'deki gibi duvar basıncına ve oradan da denklem (4.15)'daki gibi elastik modüle geçilmiş ve aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Bazalt taşı için;

$$f_k = 33,35 * 0,5 = 16,675 MPa \quad \text{olarak duvar basıncı,}$$

$E = 200 * 16,675 = 3.335 MPa$ olarak da elastik modül bulunmuştur.

Andezit taşı için;

$$f_k = 35,54 * 0,5 = 17,77 \text{ MPa} \quad \text{olarak duvar basıncı,}$$

$$E = 200 * 17,77 = 3.554 \text{ MPa} \quad \text{olarak da elastik modül bulunmuştur.}$$

Kamber taşı için;

Minimum basınç dayanımına göre;

$$f_k = 26,45 * 0,5 = 13,225 \text{ MPa} \quad \text{olarak duvar basıncı,}$$

$$E = 200 * 13,225 = 2.645 \text{ MPa} \quad \text{olarak da elastik modül bulunmuştur.}$$

Ortalama basınç dayanımına göre;

$$f_k = 66,49 * 0,5 = 33,245 \text{ MPa} \quad \text{olarak duvar basıncı,}$$

$$E = 200 * 33,245 = 6.649 \text{ MPa} \quad \text{olarak da elastik modül bulunmuştur.}$$

Maksimum basınç dayanımına göre;

$$f_k = 106,448 * 0,5 = 53,224 \text{ MPa} \quad \text{olarak duvar basıncı,}$$

$$E = 200 * 53,224 = 10.644,8 \text{ MPa} \quad \text{olarak da elastik modül bulunmuştur.}$$

Kümbet dış duvarı üç farklı taştan meydana geldiği için elastik modülü kamber taşının üç farklı durumu için %22 bazalt, %36 andezit ve %42 kamber taşı oranına binaen aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$E_{min} = (0,22 * 3.335) + (0,36 * 3.554) + (0,42 * 2.645) = 3.124 \text{ MPa}$$

$$E_{ort} = (0,22 * 3.335) + (0,36 * 3.554) + (0,42 * 6.649) = 4.806 MPa$$

$$E_{max} = (0,22 * 3.335) + (0,36 * 3.554) + (0,42 * 10.644,8) = 7.598 MPa$$

olarak hesaplanmıştır.

Diğer bir yönetmelik olan TBDY (2018)'e göre duvar basıncını hesaplamak için ilgili yönetmelikte belirtilen yığma taşıyıcı duvarların karakteristik basınç dayanımları yönetmeliğin 246. Sayfasındaki tablodan taş basınç dayanımına denk gelen aralıkta iterasyon yapılarak hesaplanmıştır. Bu minvalde dış duvarda kullanılan bazalt için basınç dayanımı $f_k = 6,67 MPa$, andezit için basınç dayanımı $f_k = 6,71 MPa$, minimum kamber için basınç dayanımı $f_k = 5,61 MPa$, ortalama kamber için basınç dayanımı $f_k = 13,3 MPa$ ve maksimum kamber için duvar basınç dayanımı $f_k = 21,29 MPa$ olarak alınmıştır. Aynı yönetmelikte belirtilen ve denklem (4.16)'da (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018) gösterilen elastik modül formülasyonuna göre elastik modül ise;

Bazalt taşı için;

$$E = 6,67 * 750 = 5.002,50 MPa \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Andezit taşı için;

$$E = 6,71 * 750 = 5.032,50 MPa \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Kamber taşı için;

$$E_{min} = 5,61 * 750 = 4.207,50 MPa$$

$$E_{ort} = 13,3 * 750 = 9.975 MPa$$

$$E_{max} = 21,29 * 750 = 15.967,50 MPa \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Kümbet dış duvarı üç farklı taştan meydana geldiği için elastik modülü kamber taşının üç farklı durumu için %22 bazalt, %36 andezit ve %42 kamber taşı oranına binaen aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$E_{min} = (0,22 * 5.002,5) + (0,36 * 5.032,5) + (0,42 * 4.207,5) = 4.679 \text{ MPa}$$

$$E_{ort} = (0,22 * 5.002,5) + (0,36 * 5.032,5) + (0,42 * 9.975) = 7.102 \text{ MPa}$$

$$E_{max} = (0,22 * 5.002,5) + (0,36 * 5.032,5) + (0,42 * 15.967,5) = 9.619 \text{ MPa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca Özdoğan (2018)'a göre bazalt ortalama birim hacim ağırlığı $\gamma_{ort} = 2.622,50 \text{ Kg/m}^3$, andezit ortalama birim hacim ağırlığı $\gamma_{ort} = 2.345 \text{ Kg/m}^3$ ve bu çalışma kapsamında bulunmuş olan kamber taşı ortalama birim hacim ağırlığı $\gamma_{ort} = 2.415,70 \text{ Kg/m}^3$ şeklindedir. Birim hacim ağırlık % 22 bazalt, %36 andezit ve % 42 kamber taşı oranına binaen aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\gamma_{yapi} = (0,22 * 2.622,50) + (0,36 * 2.345) + (0,42 * 2.415,70) = 2.435,74 \text{ Kg/m}^3$$

şeklindedir. Moloz birim hacim ağırlığı ise 2.000 Kg/m^3 olarak alınmıştır.

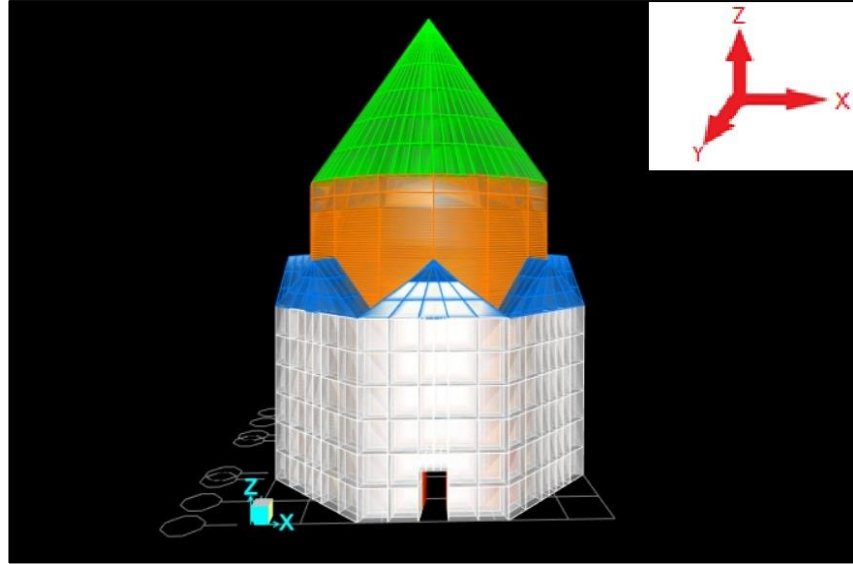
Çizelge 4.4. Yönetmeliklere göre elde edilen basınç dayanımları ve elastik modüller

Basınç Dayanımı ve Elastik Modüller (MPa)	Eurocode6 (1996)	DBYBHY (2007)	TBDY (2018)
Dış Duvar Basınç Dayanımı (Bazalt)	5,82	16,68	6,67
Dış Duvar Basınç Dayanımı (Andezit)	6,09	17,77	6,71
Minimum Dış Duvar Basınç Dayanımı (Kamber)	4,95	13,23	5,61
Ortalama Dış Duvar Basınç Dayanımı (Kamber)	9,44	33,25	13,30
Maksimum Dış Duvar Basınç Dayanımı(Kamber)	13,12	53,22	21,29
Dış Duvar Elastik Modülü (Bazalt)	1.164,00	3.335,00	5.003,00
Dış Duvar Elastik Modülü (Andezit)	1.218,00	3.554,00	5.033,00
Minimum Dış Duvar Elastik Modülü (Kamber)	990,00	2.645,00	4.208,00
Ortalama Dış Duvar Elastik Modülü (Kamber)	1.888,00	6.649,00	9.975,00
Maksimum Dış Duvar Elastik Modülü (Kamber)	2.624,00	10.645,00	15.968,00
Minimum Dış Duvar Elastik Modülü (Bina)	1.110,00	3.124,00	4.679,00
Ortalama Dış Duvar Elastik Modülü (Bina)	1.488,00	4.806,00	7.102,00
Maksimum Dış Duvar Elastik Modülü (Bina)	1.797,00	7.598,00	9.618,60
İç Duvar Basınç Dayanımı (Bazalt)	2,73	5,65	3,16
İç Duvar Elastik Modülü (Bazalt)	546,00	1.129,00	2.370,00
Moloz Duvar Elastik Modülü	500,00	500,00	500,00

Çizelge 4.4’de gösterilen değerler teorik modal analiz için kullanılmış olan değerlerdir. Üç ayrı yönetmelik için ayrı analiz yapılmıştır.

4.2. Teorik Modal Analiz Sonuçları

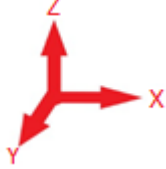
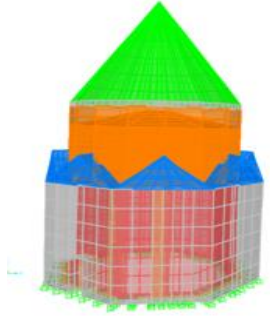
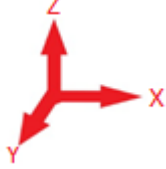
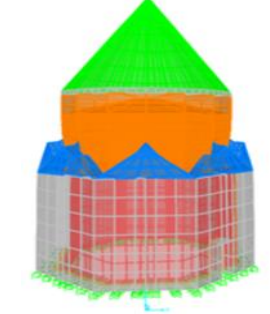
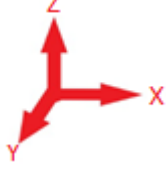
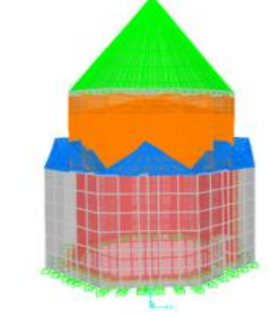
Teorik modal analiz için SAP2000 (2016) analiz programı kullanılmış ve makro modelleme yöntemi ile Emir Saltuk Kümbeti sonlu elemanlar modeli Şekil 4.15’deki gibi oluşturulmuştur. Model toplamda 6495 düğüm noktası ve 4964 katı elemandan oluşmaktadır ve Şekil 4.15’deki gibi aynı eksen takımı üzerine oturtulmuştur. Oluşturulan model üzerinde Çizelge 4.4’te sunulan malzeme özellikleri dikkate alınarak teorik modal analizler yapılmış ve operasyonel modal analizden elde edilen sonuçlarla ile kıyaslanmıştır.



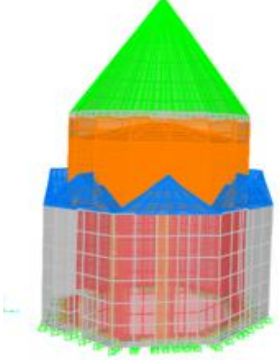
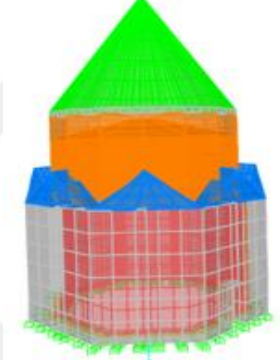
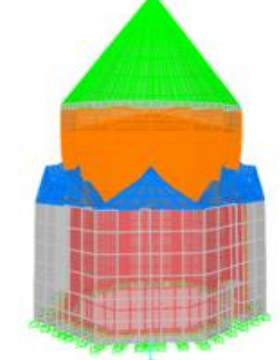
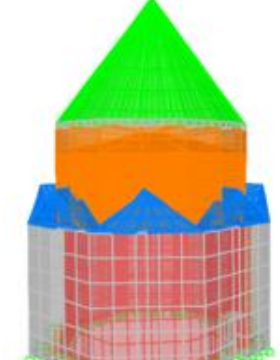
Şekil 4.15. SAP2000 (2016) yazılımı kullanılarak oluşturulan ve teorik modal analize esas sonlu elaman modeli ekran görüntüsü.

Teorik modal analiz sonucunda yapıya ait ilk mod şekli x yönünde yatay öteleme, ikinci mod şekli y yönünde yatay öteleme, üçüncü mod da ise z ekseninde kubbe çökmesi ve dördüncü mod da ise z ekseninde burulma hareketi meydana geldiği gözlemlenmiştir. Modal parametrelerin elde edilmesi için Eurocode 6 (1996), DBYBHY (2007) ve TBDY (2018) yönetmelikleri kullanılarak elde edilen ve Çizelge 4.4’te sunulan elastik modül değerleri kullanılmıştır. Teorik modal analiz sonucunda elde edilen mod şekilleri ve frekanslar Çizelge 4.5, Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

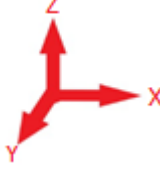
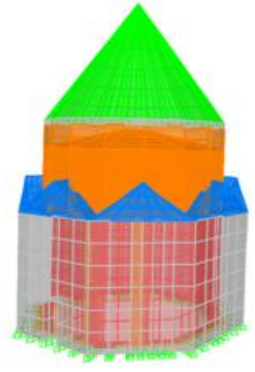
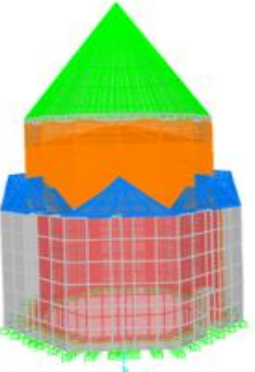
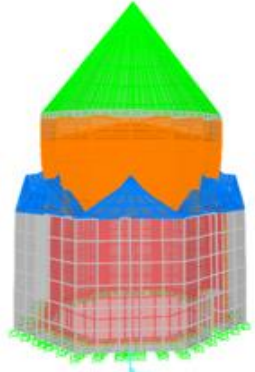
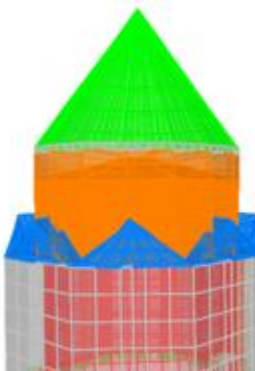
Çizelge 4.5. Eurocode 6 (1996)' da önerilen yöntemle elde edilen azami elastik modül değeri kullanılarak hesaplanan teorik modal analiz sonuçları.

Mod	Eksen Takımı	Frekans	Mod Şekli	
1		3,555	Y eksenî yönünde yatay öteleme	
2		3,571	X eksenî yönünde yatay öteleme	
3		7,223	Z eksenî yönünde kubbe hareketi	
4		8,205	Z eksenî yönünde burulma	

Çizelge 4.6. DBYBHY (2007)' de önerilen yöntemle elde edilen azami elastik modül değeri kullanılarak hesaplanan teorik modal analiz sonuçları.

Mod	Eksen Takımı	Frekans	Hareket Yönü	Mod Şekli
1		4,967	Y eksenı yönünde yatay öteleme	
2		4,989	X eksenı yönünde yatay öteleme	
3		9,979	Z eksenı yönünde kubbe hareketi	
4		11,642	Z eksenı yönünde burulma	

Çizelge 4.7. TBDY (2018)'de önerilen yöntemle elde edilen azami elastik modül değeri kullanılarak hesaplanan teorik modal analiz sonuçları.

Mod	Eksen Takımı	Frekans	Hareket Yönü	Mod Şekli
1		7,845	Y eksenî yönünde yatay öteleme	
2		7,870	X eksenî yönünde yatay öteleme	
3		15,707	Z eksenî yönünde kubbe hareketi	
4		18,359	Z eksenî yönünde burulma	

Bu çalışma kapsamında kullanılan DBYBHY (2007), TBDY (2018), Eurocode 6 (1996) yönetmeliklerinde belirtilen formülasyonlar ile elde edilen elastik modüllerin ilgili analiz programına aktarılması sonucunda ulaşılan frekans değerleri toplu olarak Çizelge 4.8’de belirtilmiştir.

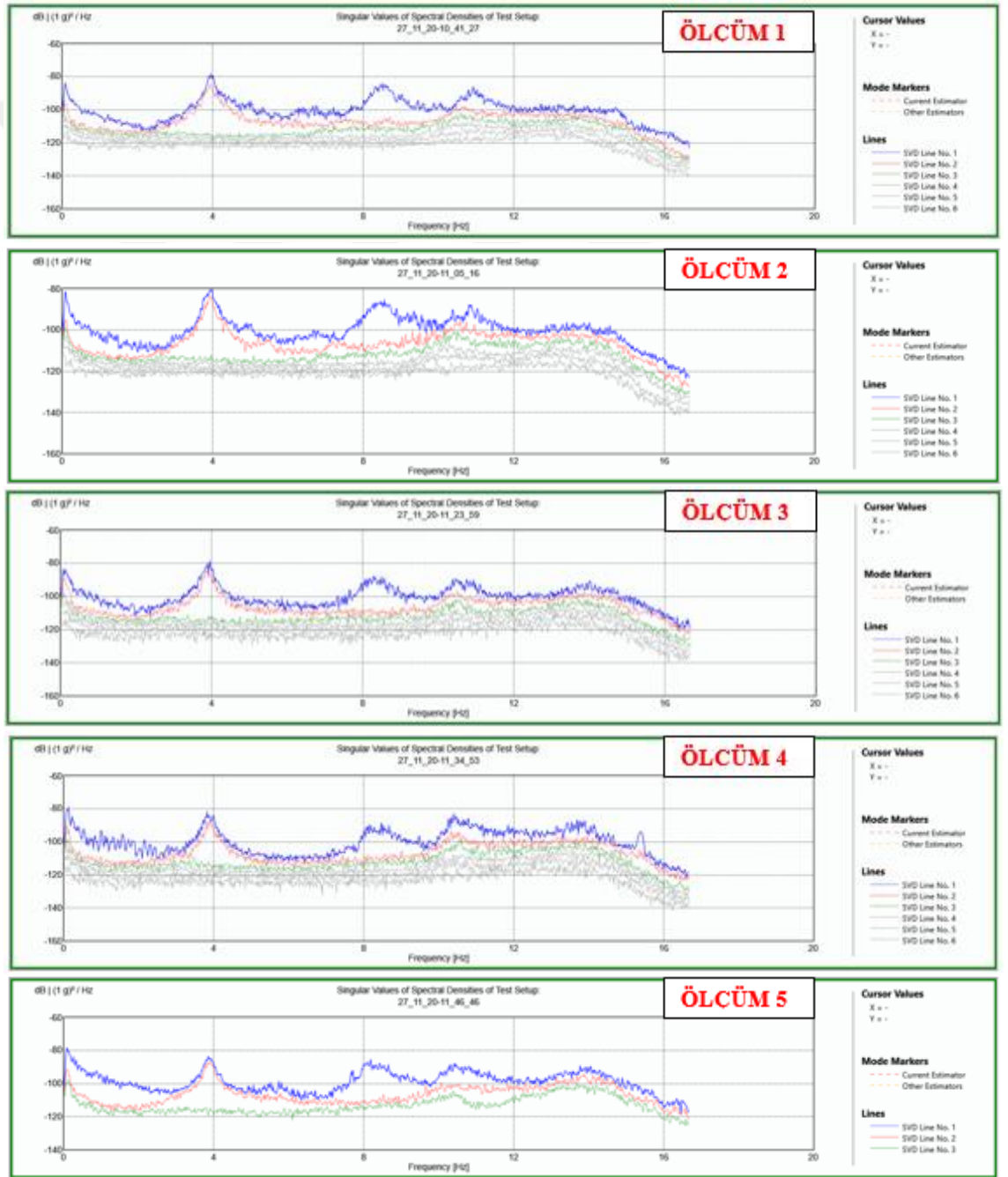
Çizelge 4.8. Kullanılan yönetmelikler ile elde edilen teorik analizlerin mod değerleri

Frekans Değerleri		DBYBHY (2007)	TBDY (2018)	Eurocode 6 (1996)
		Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)
F_c Kamber taşı - minimum	Mod 1	4,678	5,827	2,924
	Mod 2	4,696	5,846	2,936
	Mod 3	9,489	11,802	5,937
	Mod 4	10,795	13,370	6,648
Frekans Değerleri		DBYBHY (2007)	TBDY (2018)	Eurocode 6 (1996)
		Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)
F_c Kamber taşı - ortalama	Mod 1	5,593	6,914	3,291
	Mod 2	5,616	6,936	3,305
	Mod 3	11,266	13,939	6,692
	Mod 4	13,057	16,058	7,552
Frekans Değerleri		DBYBHY (2007)	TBDY (2018)	Eurocode 6 (1996)
		Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)
F_c Kamber taşı - maksimum	Mod 1	6,791	7,845	3,555
	Mod 2	6,816	7,870	3,571
	Mod 3	13,494	15,707	7,223
	Mod 4	15,998	18,359	8,205

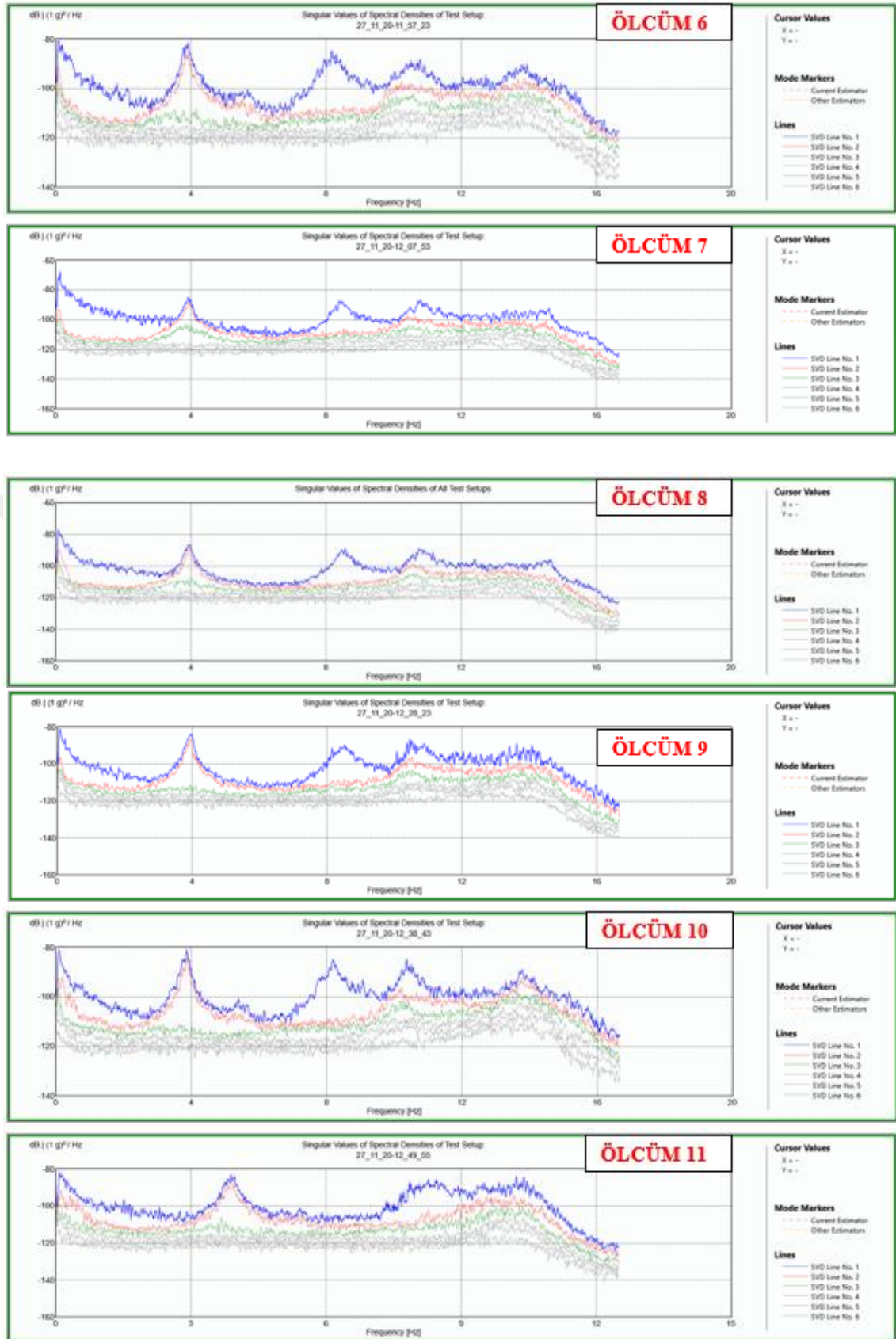
Çizelge 4.8’ in daha teknik bir şekilde değerlendirilebilmesi için iki önemli hususun açıklanmasında yarar görülmektedir. Burada, F_c ile temsil edilen değer ilgili doğal taşın Schmidt sertlik çekici uygulaması neticesinde tayin edilen eksenel basınç dayanımıdır. Kümbet yapısında kullanılan andezit ve bazalt türü kayaların sertlik okumaları üzerinden basınç dayanımlarının eldesin de Özdoğan (2018)’ da sunulan bağıntılar kullanılarak çalışma yapılmıştır. Ancak; bu çalışma kapsamında malzeme karakterizasyonu yapılan kamber taşı için durum farklıdır. Kamber taşı için bir tek sertlik-basınç dayanımı fonksiyonu üretilmemiş ilgili veri alt sınır (minimum), üst sınır (maksimum) ve ortalama değerlerini temsil eden 3 ayrı bağıntı üretilmiştir. Çizelge 4.36’ nın birinci sütununda F_c kısaltmasının yanındaki minimum, maksimum ve ortalama ifadeleri sadece kamber taşı basınç dayanımı tayininde hangi bağıntının kullanıldığını betimlemek amacıyla kullanılmıştır.

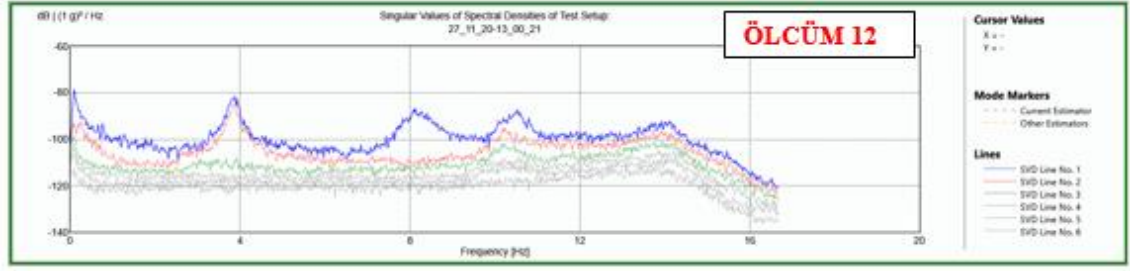
4.3. Emir Saltuk Kümbeti Operasyonel Modal Analiz Sonuçları

Emir Saltuk Kümbeti' nin ortam titreşimlerine verdiği tepki ölçümleri alındıktan sonra veri Artemis Modal Pro (2018) yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Toplam 12 ölçüm üzerinde bu analizler yapılarak spektral yoğunluk fonksiyon grafikleri oluşturulmuş ve Şekil 4.16' da toplu halde sunulmuştur. Teorik modal analizden elde edilmiş olan modal frekans değerleri de dikkate alınarak net bir mod şekli yakalayabilmek adına frekans aralığı 0 – 16,67 Hz olarak belirlenmiştir.



4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA





Şekil 4.16. Emir Saltuk Kümbeti için hesaplanan spektral yoğunluk fonksiyon grafikleri

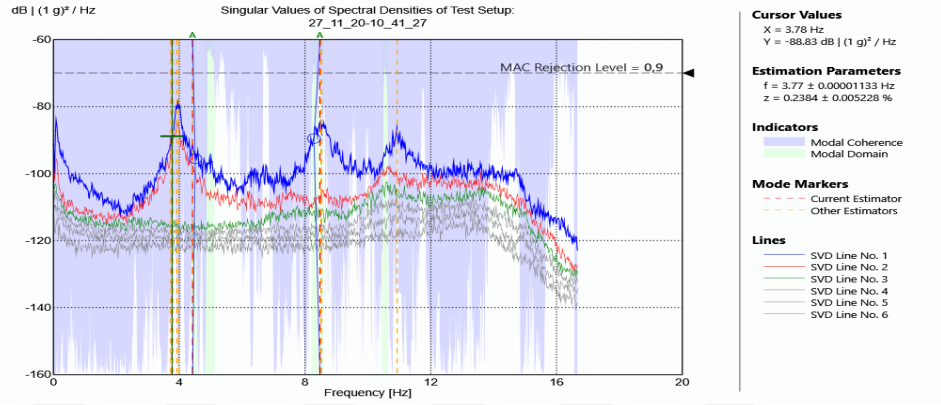
Şekil 4.16’ da toplu halde sunulan spektral yoğunluk fonksiyon grafikleri üzerinde yapılan çalışma kapsamında hem frekans tanım alanı tekniği ile hem de zaman tanım alanı tekniği ile modal değerler belirlenmiştir. Frekans tanım alanında FDD, EFDD, CFDD, zaman tanım alanında ise SSI-UPC ve SSI-UPCX yöntemleri kullanılmıştır. Toplamda on iki ölçüm yapılmış ve her biri beş farklı yöntem ile analiz edilmiştir. Bu şekilde kümbet yapısı için toplam 60 adet deneysel dinamik kimliklendirme sonucu elde edilmiştir. Literatürde de sıkça kullanılan frekans tanım alanı için EFDD, zaman tanım alanı için ise SSI-UPC analiz yöntemleri ile elde edilen veri kullanılmış ve diğer sonuçlar Ek 1’de toplu halde sunulmuştur.

Parametreler belirlendikten sonra yapılan analizin doğruluğu, güvenilirliği ve aykırılığının çalışılması amacıyla modal güvence kriteri değerleri hesaplanmıştır. Pastor et al. (2012)’ne göre modal güvence kriteri değerlerine bakıldığında çapraz köşegen yani diyagonal oluşturan değerlerin 1’ e yakın olması ve kenardaki değerlerin ise sıfıra yakın olması mod şekillerinin ayrıklığının bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Yapılan inceleme neticesinde tüm analiz sonuçlarından elde edilen mod şekillerinin güvenilir, geçerli ve ayık olduğunu görülmektedir.

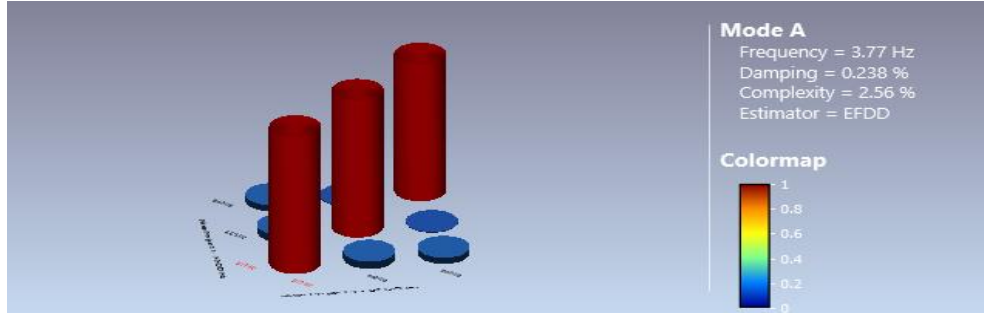
4.3.1. Kümbet yapısı EFDD analiz sonuçları

ÖLÇÜM 1

Ölçüm 1 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.17, Şekil 4.18’ de ve Çizelge 4.9’ da görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayrık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.17. Ölçüm 1’e ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



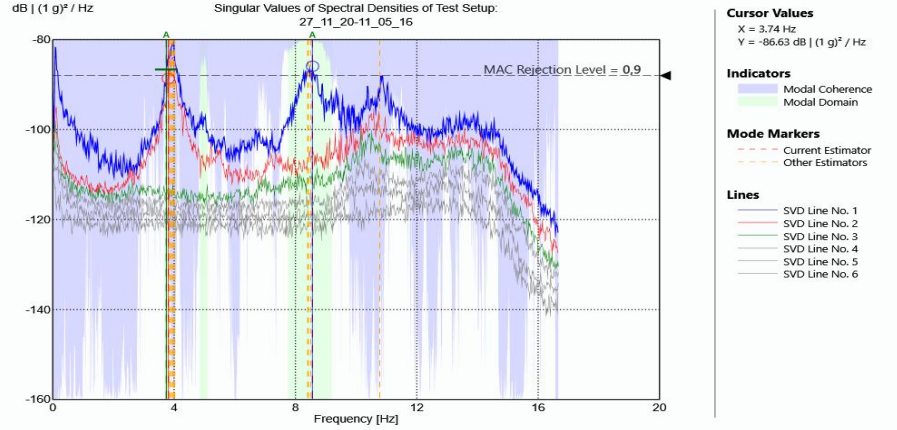
Şekil 4.18. Ölçüm 1’e ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği

Çizelge 4.9. Ölçüm 1’e ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.

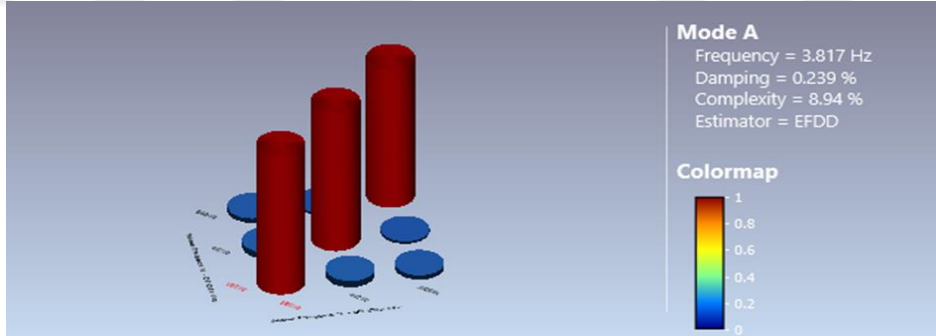
FREKANS (Hz)	3,77	4,425	8,475
3,77	1	0,05314	0,04483
4,425	0,05314	1	0,005059
8,475	0,04483	0,005059	1

ÖLÇÜM 2

Ölçüm 2 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.19, Şekil 4.20’de ve Çizelge 4.10’da görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayırık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.19. Ölçüm 2’ye ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



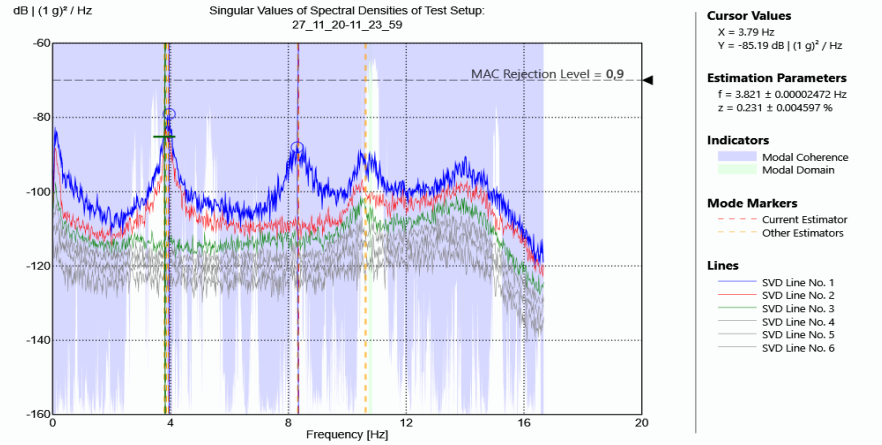
Şekil 4.20. Ölçüm 2’ye ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği

Çizelge 4.10. Ölçüm 2’ye ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.

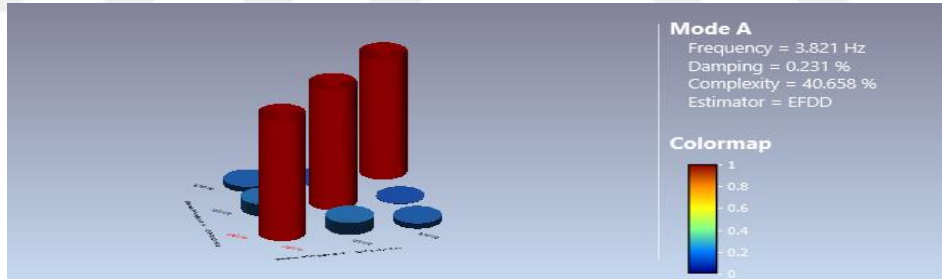
FREKANS (Hz)	3,817	4,02	8,426
3,817	1	0,04527	0,0317
4,02	0,04527	1	0,01716
8,426	0,0317	0,01716	1

ÖLÇÜM 3

Ölçüm 3 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.21, Şekil 4.22’ de ve Çizelge 4.11’ da görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayrık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.21. Ölçüm 3’e ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



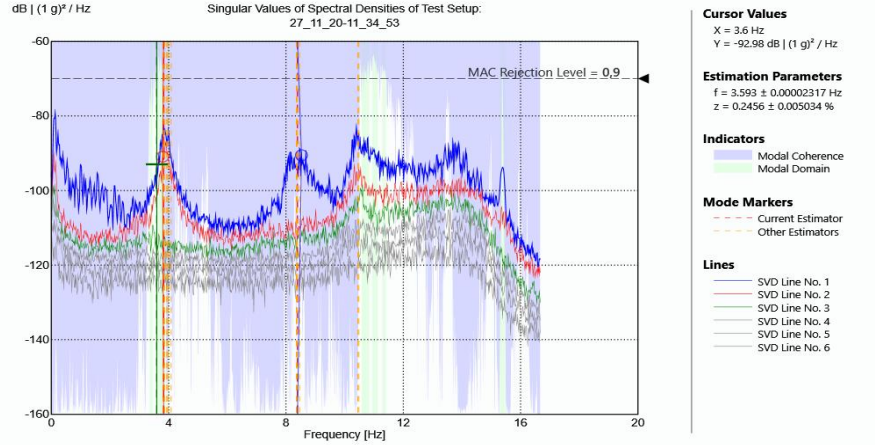
Şekil 4.22. Ölçüm 3’e ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği

Çizelge 4.11. Ölçüm 3’e ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri

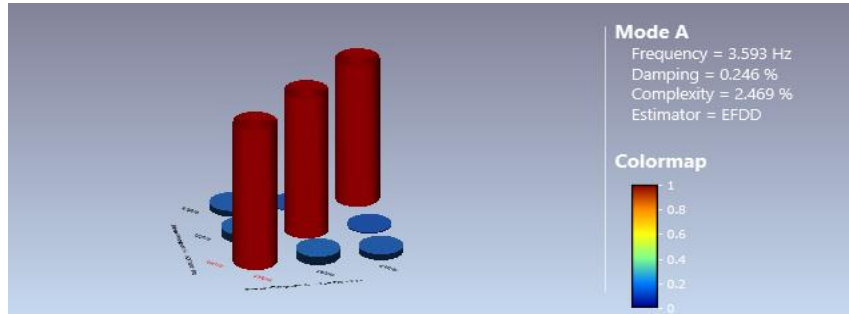
FREKANS (Hz)	3,821	3,953	8,343
3,821	1	0,09882	0,04431
3,953	0,09882	1	0,003746
8,343	0,04431	0,003746	1

ÖLÇÜM 4

Ölçüm 4 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.23, Şekil 4.24’ de ve Çizelge 4.12’ de görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayırık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.23. Ölçüm 4’e ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



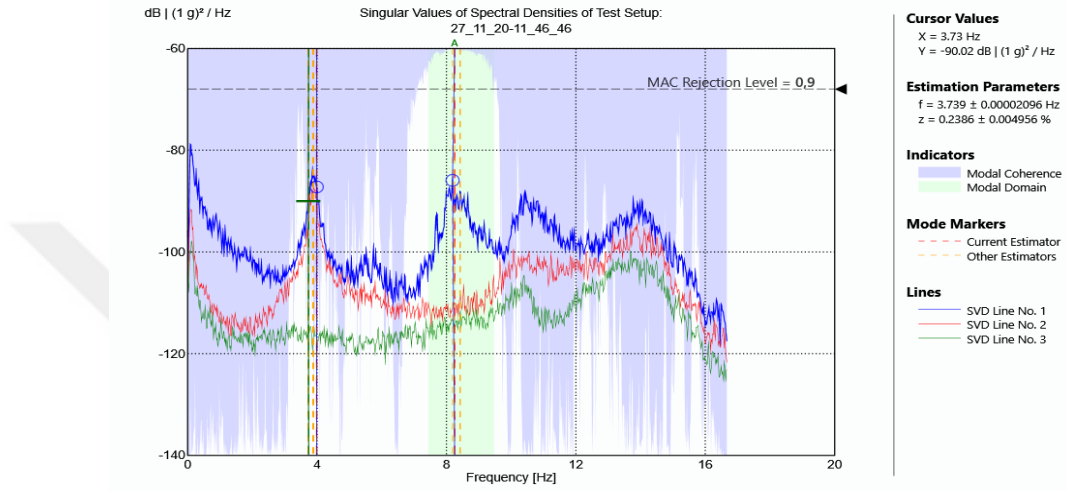
Şekil 4.24. Ölçüm 4’e ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği

Çizelge 4.12. Ölçüm 4’e ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri

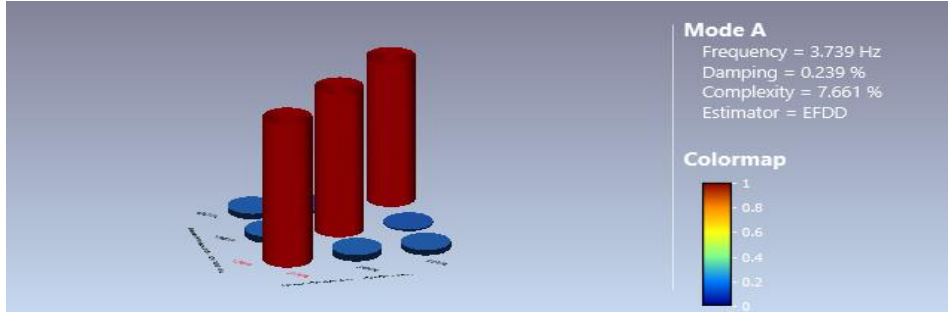
FREKANS (Hz)	3,593	3,828	8,392
3,593	1	0,05958	0,04201
3,828	0,05958	1	0,06931
8,392	0,04201	0,06931	1

ÖLÇÜM 5

Ölçüm 5 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.25, Şekil 4.26' da ve Çizelge 4.13' de görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayırık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.25. Ölçüm 5'e ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



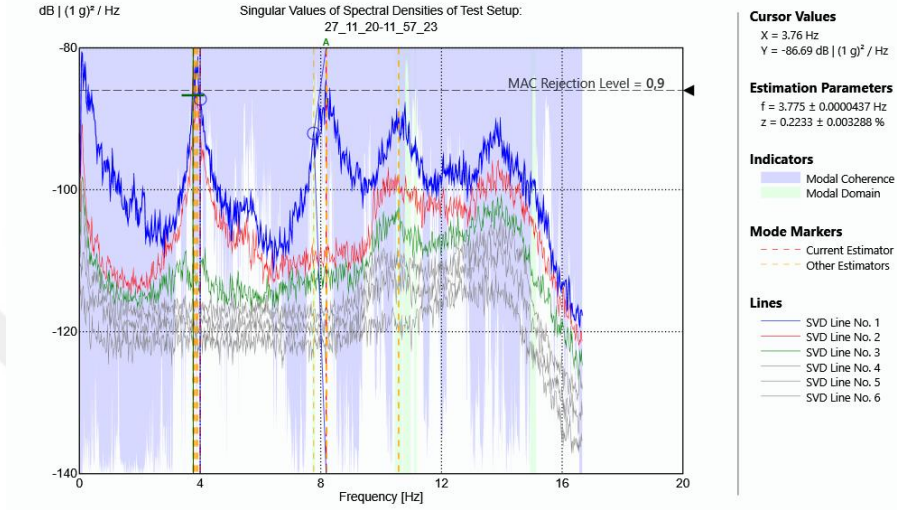
Şekil 4.26. Ölçüm 5'e ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği

Çizelge 4.13. Ölçüm 5'e ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri

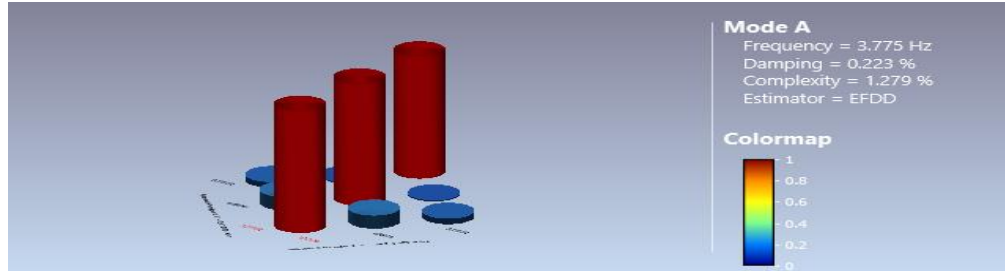
FREKANS (Hz)	3,739	3,988	8,253
3,739	1	0,04519	0,03782
3,988	0,04519	1	0,01093
8,253	0,03782	0,01093	1

ÖLÇÜM 6

Ölçüm 6 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.27, Şekil 4.28’ de ve Çizelge 4.14’de görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayırık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.27. Ölçüm 6’ya ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



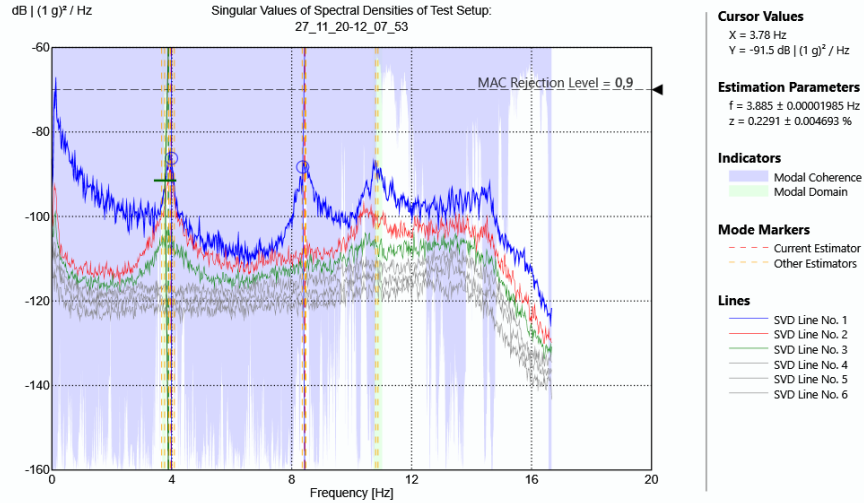
Şekil 4.28. Ölçüm 6’ya ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği

Çizelge 4.14. Ölçüm 6’ya ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.

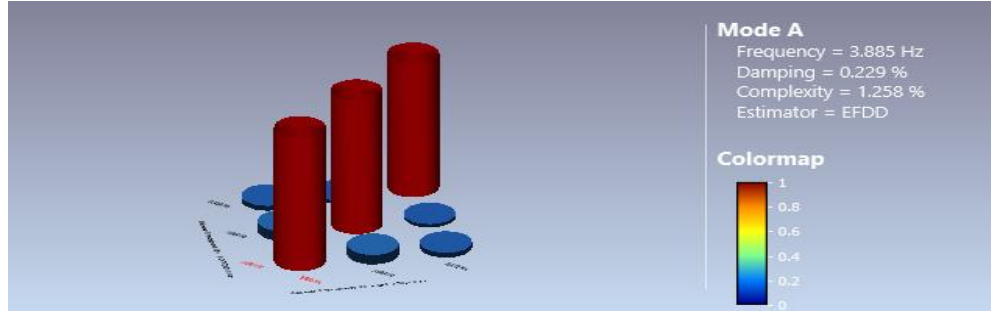
FREKANS (Hz)	3,775	4,004	8,178
3,775	1	0,1071	0,04522
4,004	0,1071	1	0,00773
8,178	0,04522	0,00773	1

ÖLÇÜM 7

Ölçüm 7 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.29, Şekil 4.30' da ve Çizelge 4.15' de görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayırık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.29. Ölçüm 7'ye ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



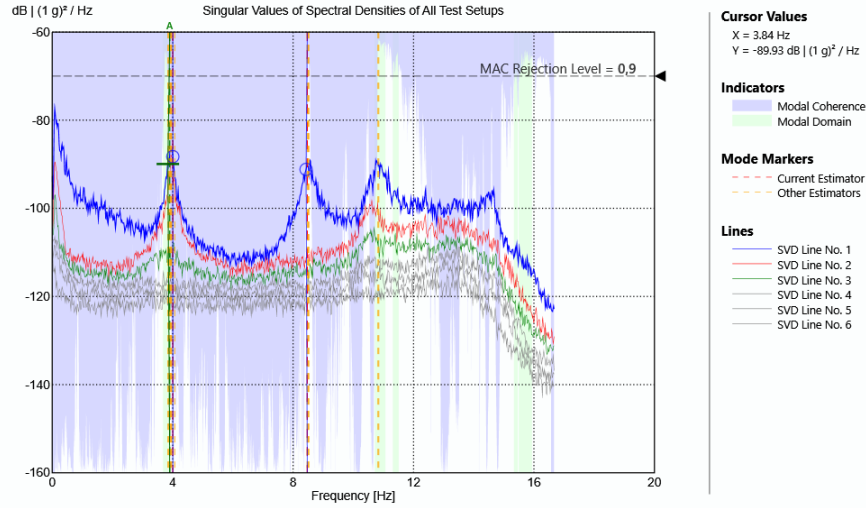
Şekil 4.30. Ölçüm 7'ye ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği

Çizelge 4.15. Ölçüm 7'ye ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.

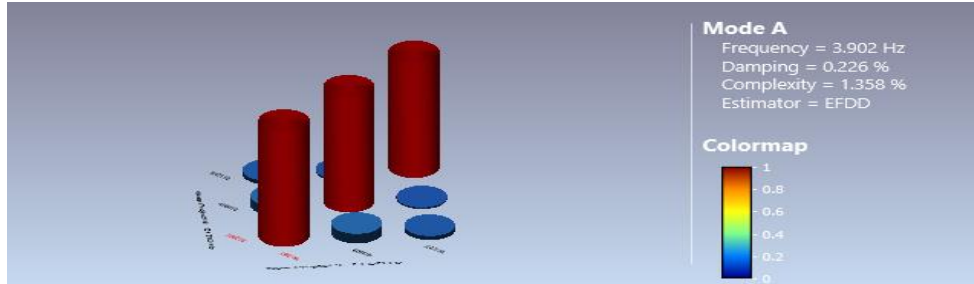
FREKANS (Hz)	3,885	3,984	8,432
3,885	1	0,0709	0,03659
3,984	0,0709	1	0,02467
8,432	0,03659	0,02467	1

ÖLÇÜM 8

Ölçüm 8 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.31, Şekil 4.32’ de ve Çizelge 4.16’ da görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayrık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.31. Ölçüm 8’e ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



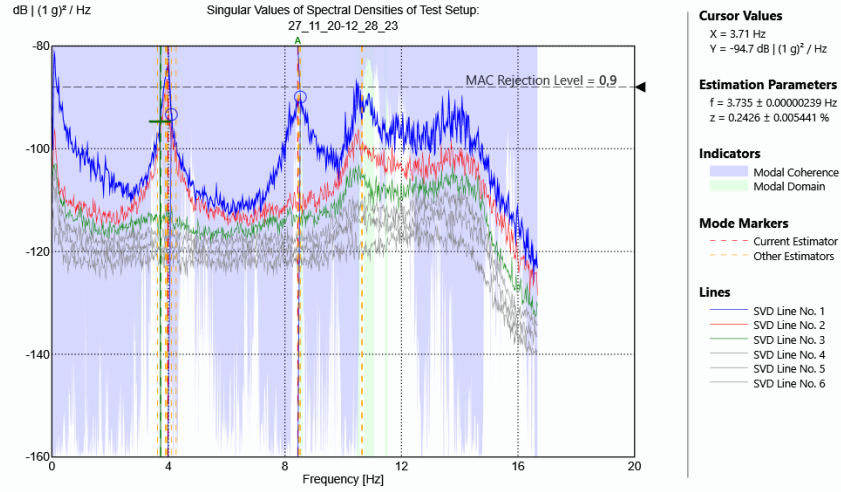
Şekil 4.32. Ölçüm 8’e ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği

Çizelge 4.16. Ölçüm 8’e ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri

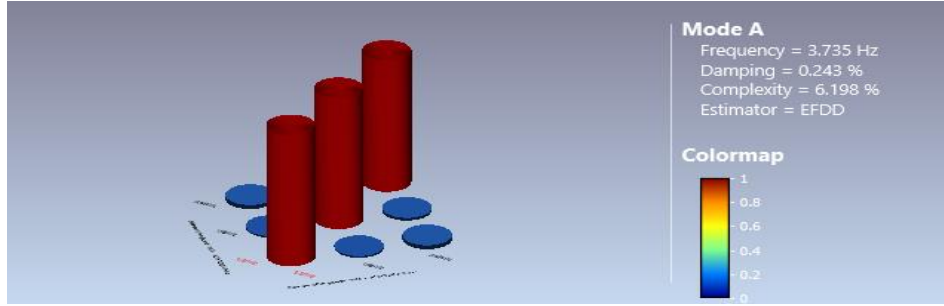
FREKANS (Hz)	3,902	4,004	8,471
3,902	1	0,08202	0,03439
4,004	0,08202	1	0,01358
8,471	0,03439	0,01358	1

ÖLÇÜM 9

Ölçüm 9 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.33, Şekil 4.34’de ve Çizelge 4.17’de görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayırık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.33. Ölçüm 9’a ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



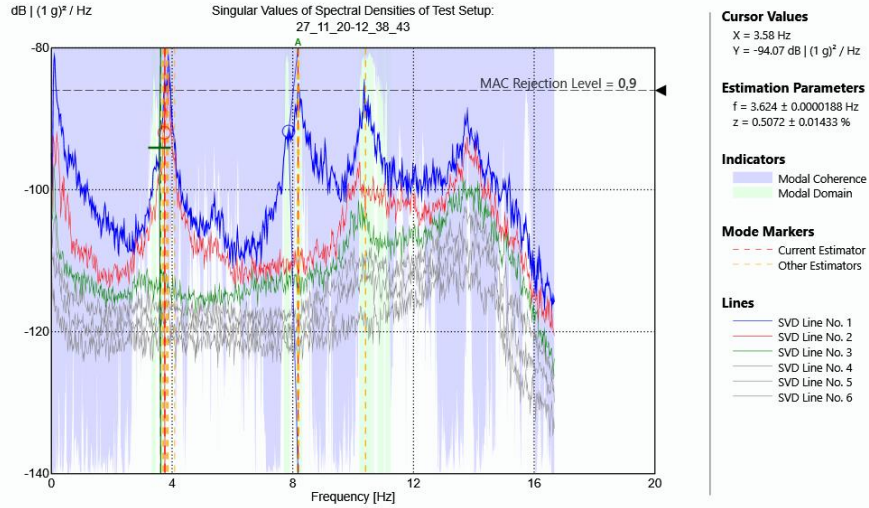
Şekil 4.34. Ölçüm 9’a ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği

Çizelge 4.17. Ölçüm 9’a ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri

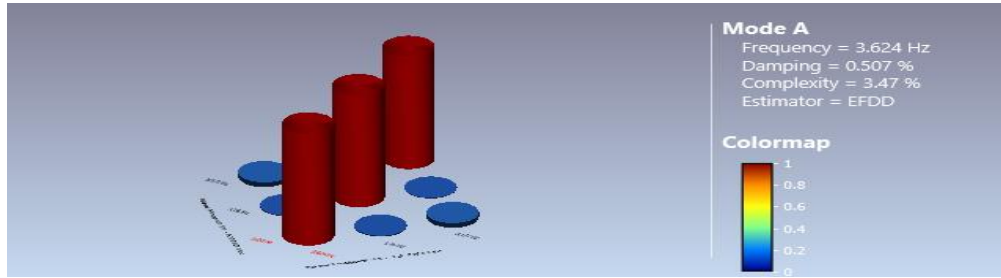
FREKANS (Hz)	3,735	3,986	8,444
3,735	1	0,01219	0,02972
3,986	0,01219	1	0,01976
8,444	0,02972	0,01976	1

ÖLÇÜM 10

Ölçüm 10 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.35, Şekil 4.36' da ve Çizelge 4.18' de görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayırık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.35. Ölçüm 10'a ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



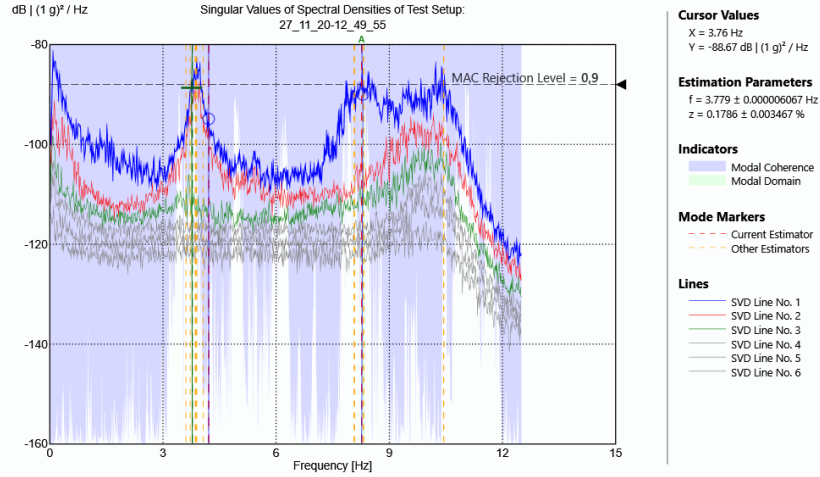
Şekil 4.36. Ölçüm 10'a ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği

Çizelge 4.18. Ölçüm 10'a ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.

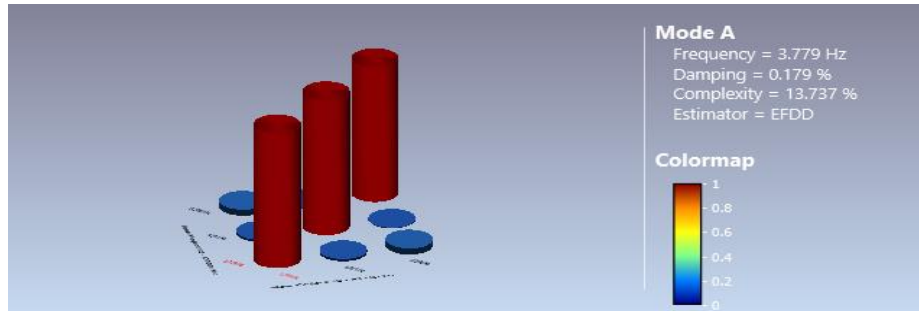
FREKANS (Hz)	3,624	3,76	8,177
3,624	1	0,00768	0,04052
3,76	0,00768	1	0,00529
8,177	0,04052	0,00529	1

ÖLÇÜM 11

Ölçüm 11 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.37, Şekil 4.38’ de ve Çizelge 4.19’da görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayırık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.37. Ölçüm 11’e ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



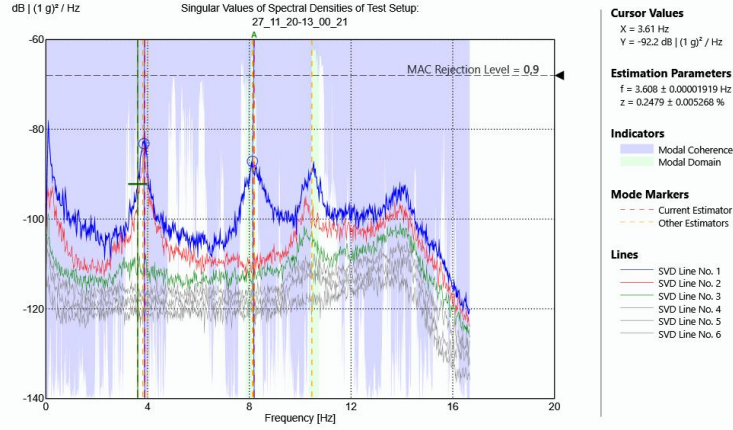
Şekil 4.38. Ölçüm 11’e ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği

Çizelge 4.19. Ölçüm 11’e ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.

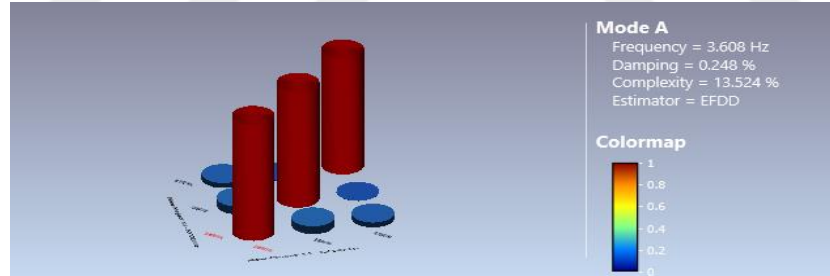
FREKANS (Hz)	3,779	4,211	8,268
3,779	1	0,01657	0,04501
4,211	0,01657	1	0,005067
8,268	0,04501	0,005067	1

ÖLÇÜM 12

Ölçüm 12 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.39, Şekil 4.40' da ve Çizelge 4.20'de görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayırık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.39. Ölçüm 12'ye ait EFDD analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



Şekil 4.40. Ölçüm 12'ye ait MAC değerlerine ilişkin EFDD analiz grafiği

Çizelge 4.20. Ölçüm 12'ye ait EFDD analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.

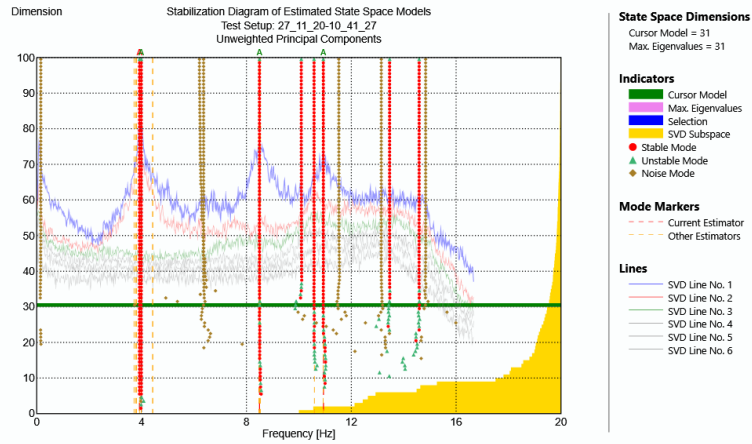
FREKANS (Hz)	3,608	3,884	8,192
3,608	1	0,0673	0,042
3,884	0,0673	1	0,001129
8,192	0,042	0,001129	1

Yapıya ait kütle ve rijitlik değerleri yapının frekans değerlerini etkilemektedir. Kütle ile rijitlik frekans değerlerini etkileyen bağımlı değişkenlerdir. Emir Saltuk Kümbeti'nden alınan ölçüm sonuçlarına binaen oluşturulmuş EFDD analizleri neticesinde frekans değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

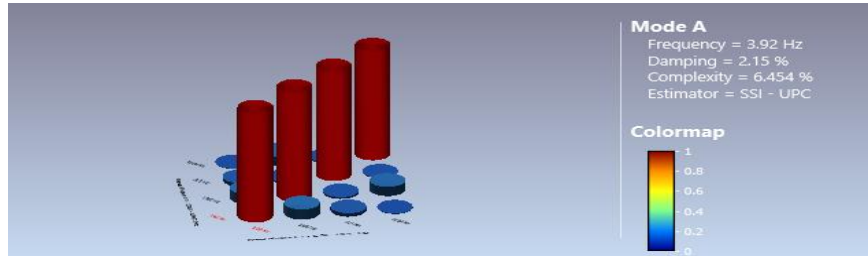
4.3.2. Kümbet yapısı SSI-UPC analiz sonuçları

ÖLÇÜM 1

Ölçüm 1 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.41, Şekil 4.42’de ve Çizelge 4.21’de görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayrık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.41. Ölçüm 1’e ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



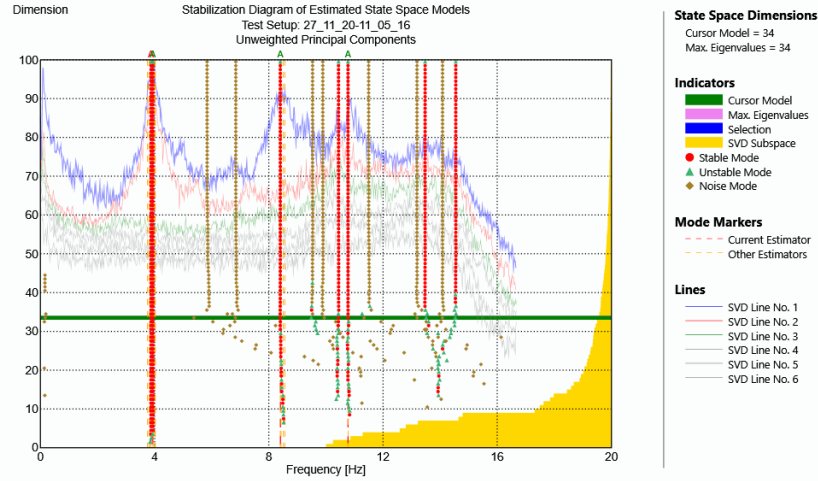
Şekil 4.42. Ölçüm 1’e ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği

Çizelge 4.21. Ölçüm 1’e ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.

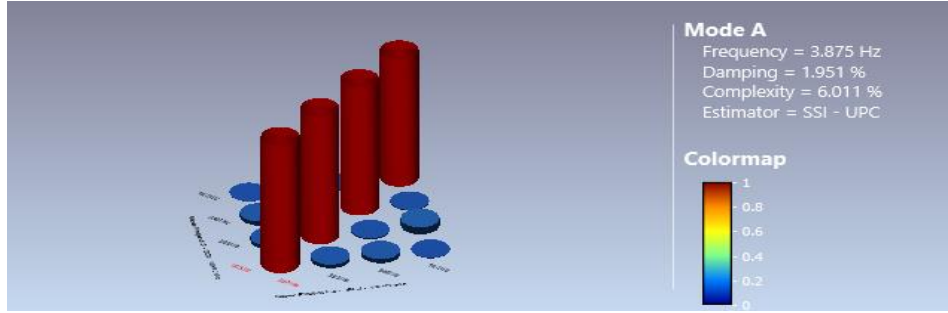
FREKANS (Hz)	3,92	3,987	8,5	10,94
3,92	1	0,09387	0,03241	0,003679
3,987	0,09387	1	0,01488	0,08477
8,5	0,03241	0,01488	1	0,004981
10,94	0,003679	0,08477	0,004981	1

ÖLÇÜM 2

Ölçüm 2 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.43, Şekil 4.44' de ve Çizelge 4.22' de görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayırık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.43. Ölçüm 2'ye ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



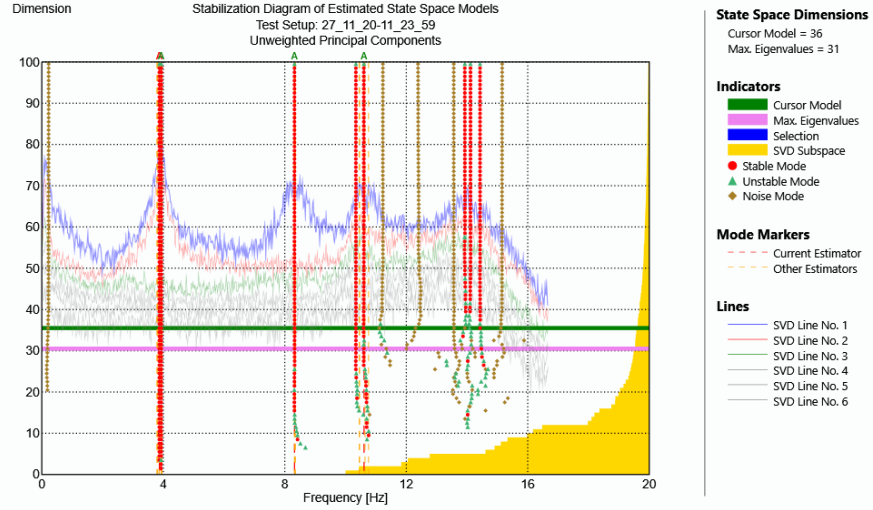
Şekil 4.44. Ölçüm 2'ye ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği

Çizelge 4.22. Ölçüm 2'ye ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.

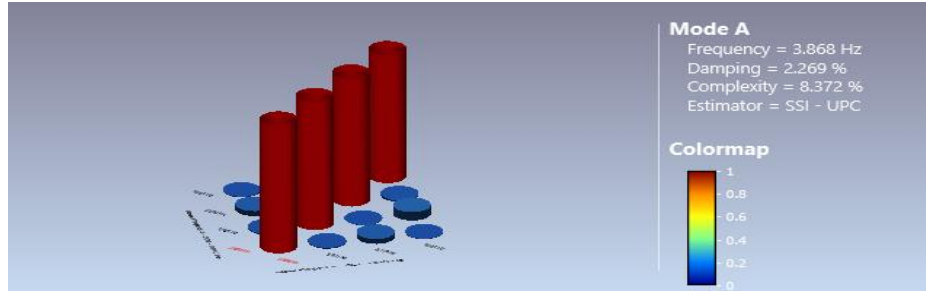
FREKANS (Hz)	3,875	3,938	8,407	10,78
3,875	1	0,02848	0,03119	0,003106
3,938	0,02848	1	0,008227	0,05557
8,407	0,03119	0,008227	1	0,005314
10,78	0,003106	0,05557	0,005314	1

ÖLÇÜM 3

Ölçüm 3 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.45, Şekil 4.46’ de ve Çizelge 4.23’ de görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayrık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.45. Ölçüm 3’e ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



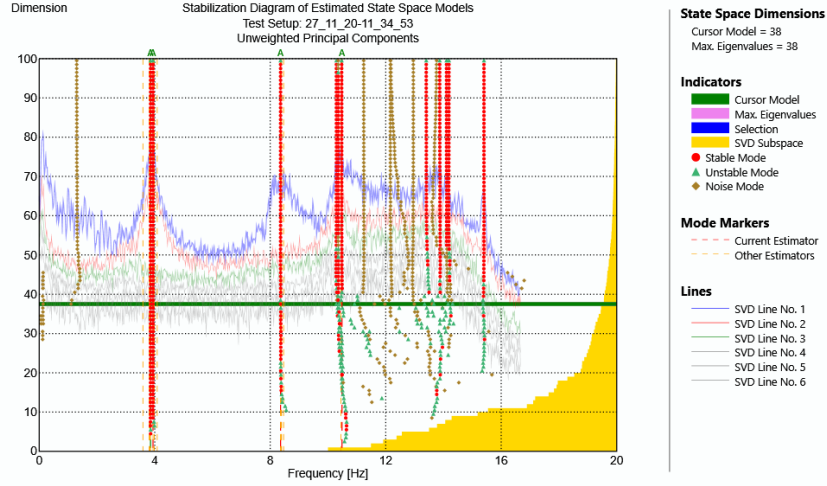
Şekil 4.46. Ölçüm 3’e ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği

Çizelge 4.23. Ölçüm 3’e ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.

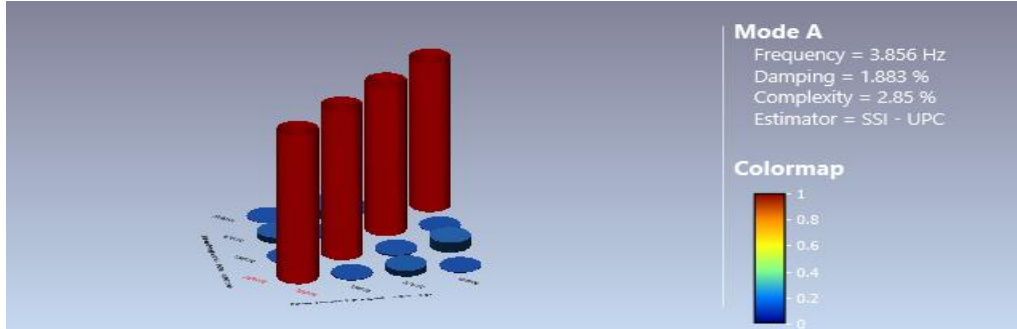
FREKANS (Hz)	3,868	3,931	8,319	10,61
3,868	1	0,007143	0,03837	0,004722
3,931	0,007143	1	0,00093	0,06583
8,319	0,03837	0,00093	1	0,01041
10,61	0,004722	0,06583	0,01041	1

ÖLÇÜM 4

Ölçüm 4 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.47, Şekil 4.48’de ve Çizelge 4.24’ de görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayrık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.47. Ölçüm 4’e ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



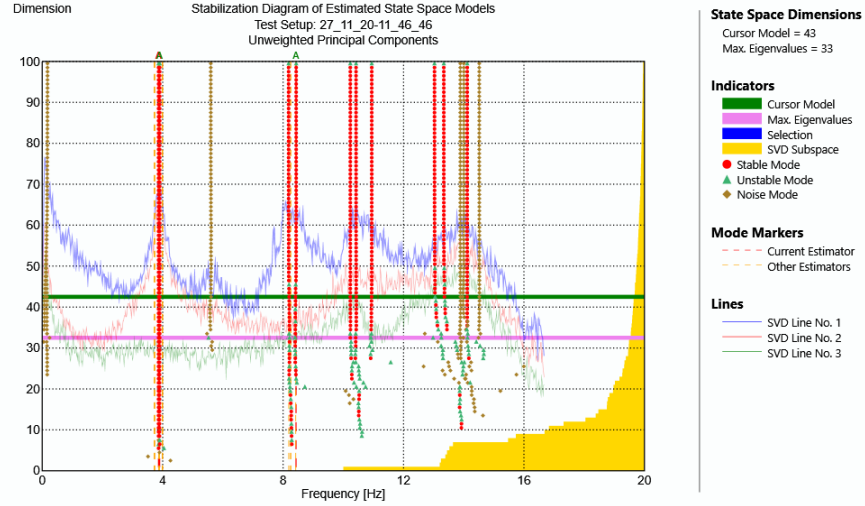
Şekil 4.48. Ölçüm 4’e ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği

Çizelge 4.24. Ölçüm 4’e ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.

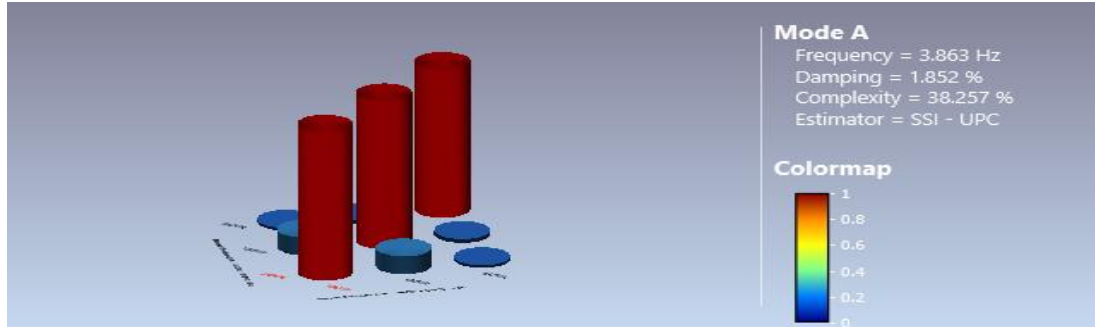
FREKANS (Hz)	3,856	3,941	8,36	10,49
3,856	1	0,005954	0,03925	0,00271
3,941	0,005954	1	0,008206	0,06657
8,36	0,03925	0,008206	1	0,001507
10,49	0,00271	0,06657	0,001507	1

ÖLÇÜM 5

Ölçüm 5 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.49, Şekil 4.50’de ve Çizelge 4.25’ de görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayrık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.49. Ölçüm 5’e ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



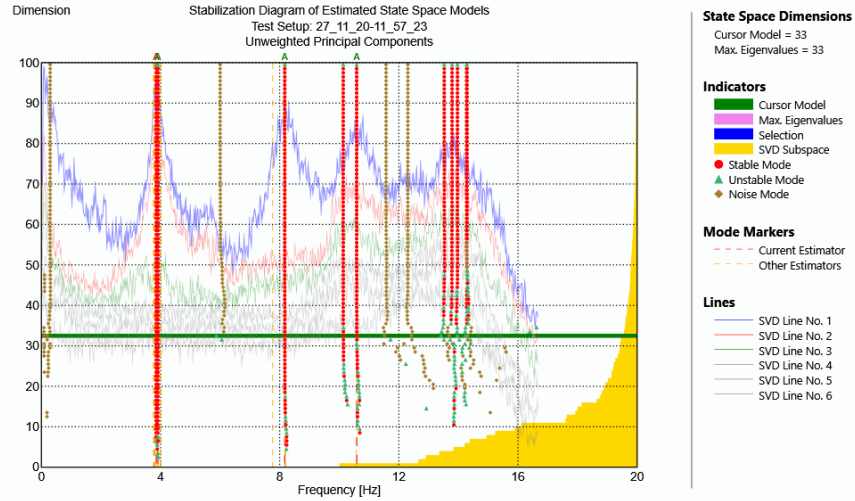
Şekil 4.50. Ölçüm 5’e ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği

Çizelge 4.25. Ölçüm 5’e ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.

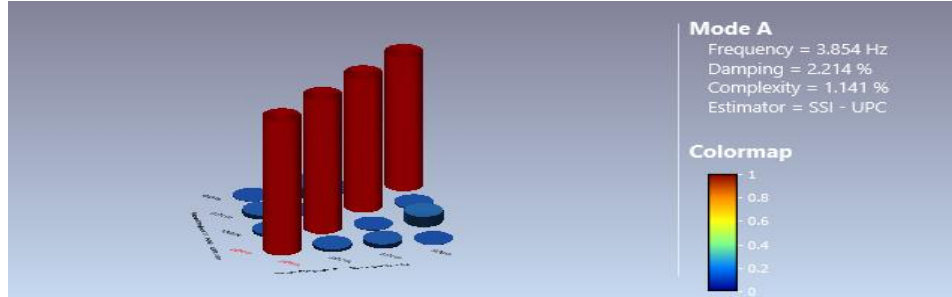
FREKANS (Hz)	3,863	3,899	8,429
3,863	1	0,121	0,01828
3,899	0,121	1	0,02589
8,429	0,01828	0,02589	1

ÖLÇÜM 6

Ölçüm 6 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.51, Şekil 4.52’ de ve Çizelge 4.26’ da görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayrık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.51. Ölçüm 6’ya ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



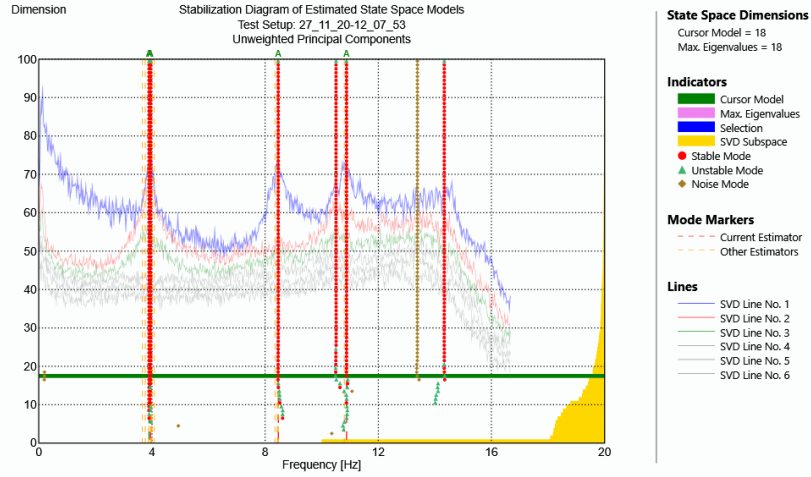
Şekil 4.52. Ölçüm 6’ya ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği

Çizelge 4.26. Ölçüm 6’ya ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.

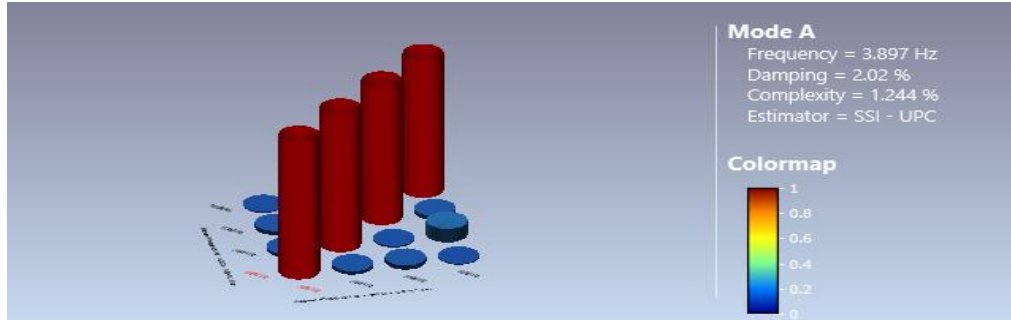
FREKANS (Hz)	3,854	3,912	8,171	10,59
3,854	1	0,01968	0,03214	0,002289
3,912	0,01968	1	0,003414	0,07717
8,171	0,03214	0,003414	1	0,008613
10,59	0,002289	0,07717	0,008613	1

ÖLÇÜM 7

Ölçüm 7 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.53, Şekil 4.54’de ve Çizelge 4.27’de görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayrık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.53. Ölçüm 7’ye ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



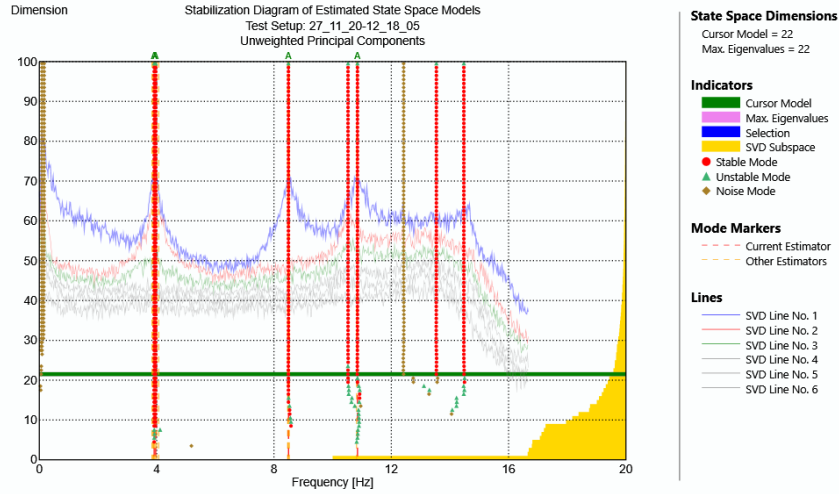
Şekil 4.54. Ölçüm 7’ye ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği

Çizelge 4.27. Ölçüm 7’ye ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.

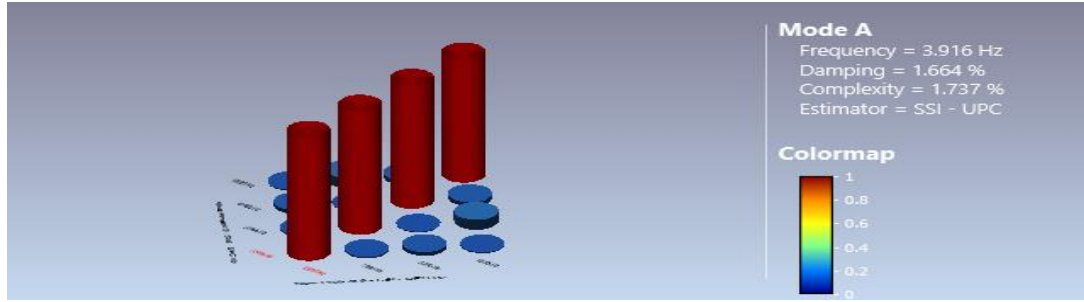
FREKANS (Hz)	3,897	3,949	8,466	10,88
3,897	1	0,02293	0,02978	0,007858
3,949	0,02293	1	0,009921	0,09918
8,466	0,02978	0,009921	1	0,02984
10,88	0,007858	0,09918	0,02984	1

ÖLÇÜM 8

Ölçüm 8 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.55, Şekil 4.56’da ve Çizelge 4.28’de görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayrık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.55. Ölçüm 8’e ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



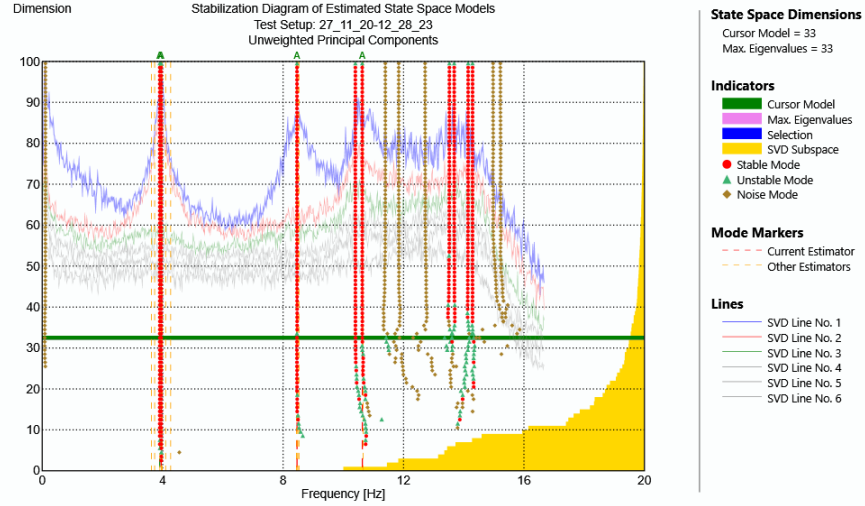
Şekil 4.56. Ölçüm 8’e ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği

Çizelge 4.28. Ölçüm 8’e ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.

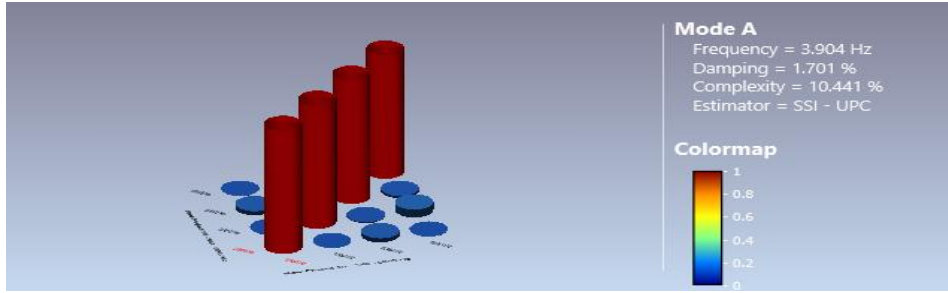
FREKANS (Hz)	3,916	3,966	8,495	10,85
3,916	1	0,01048	0,03016	0,00766
3,966	0,01048	1	0,004609	0,08174
8,495	0,03016	0,004609	1	0,03257
10,85	0,00766	0,08174	0,03257	1

ÖLÇÜM 9

Ölçüm 9 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.57, Şekil 4.58’de ve Çizelge 4.29’da görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayrık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.57. Ölçüm 9’a ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



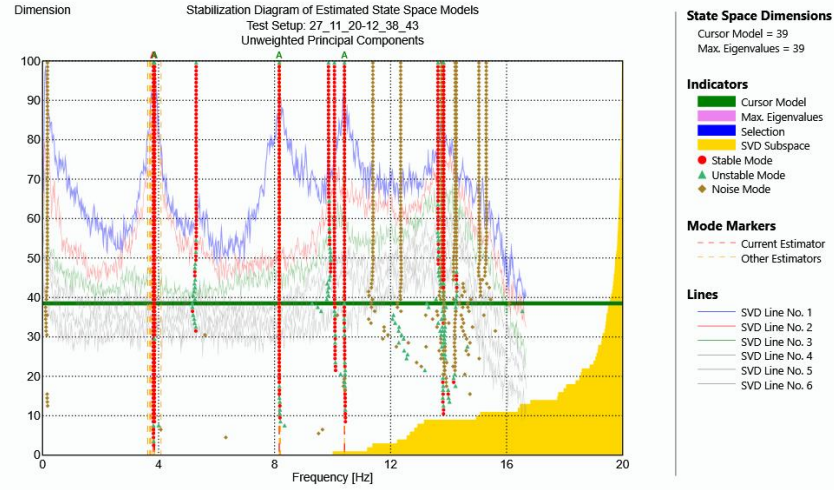
Şekil 4.58. Ölçüm 9’a ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği

Çizelge 4.29. Ölçüm 9’a ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.

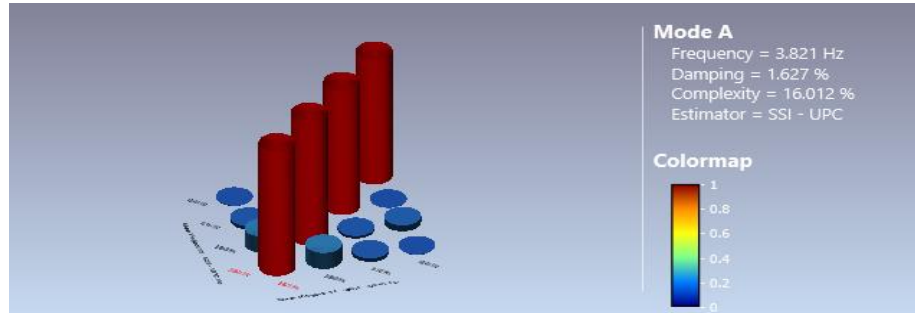
FREKANS (Hz)	3,904	3,952	8,462	10,63
3,904	1	0,000719	0,03339	0,000359
3,952	0,000719	1	0,007417	0,06346
8,462	0,03339	0,007417	1	0,01704
10,63	0,000359	0,06346	0,01704	1

ÖLÇÜM 10

Ölçüm 10 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.59, Şekil 4.60'de ve Çizelge 4.30'da görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayrık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.59. Ölçüm 10'a ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



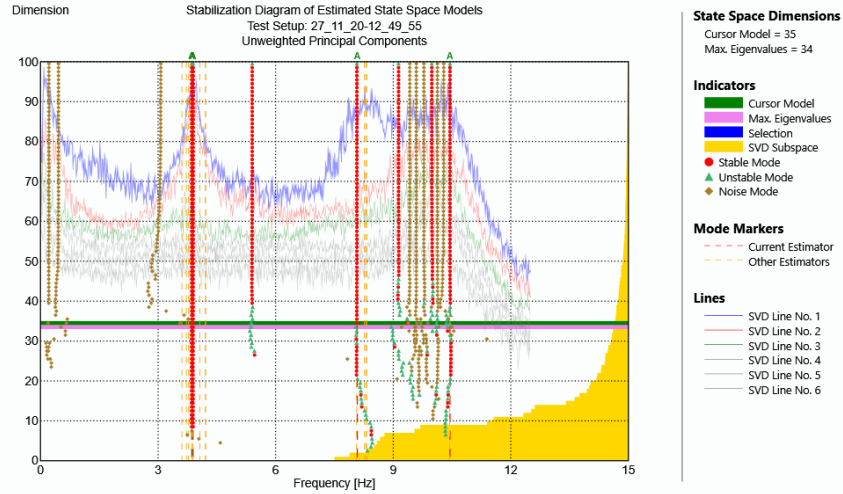
Şekil 4.60. Ölçüm 10'a ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği

Çizelge 4.30. Ölçüm 10'a ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.

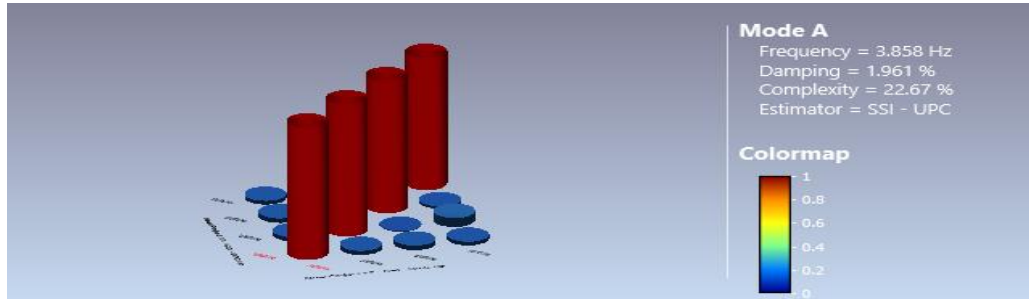
FREKANS (Hz)	3,821	3,863	8,16	10,41
3,821	1	0,128	0,02736	0,002359
3,863	0,128	1	0,01964	0,04774
8,16	0,02736	0,01964	1	0,000315
10,41	0,002359	0,04774	0,000315	1

ÖLÇÜM 11

Ölçüm 11 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.61, Şekil 4.62’de ve Çizelge 4.31’de görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayırık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.61. Ölçüm 11’e ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



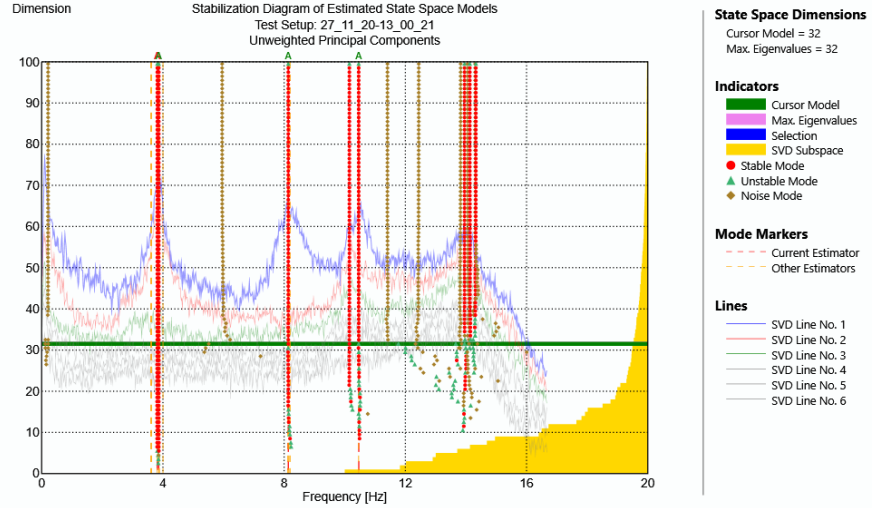
Şekil 4.62. Ölçüm 11’e ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği

Çizelge 4.31. Ölçüm 11’e ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.

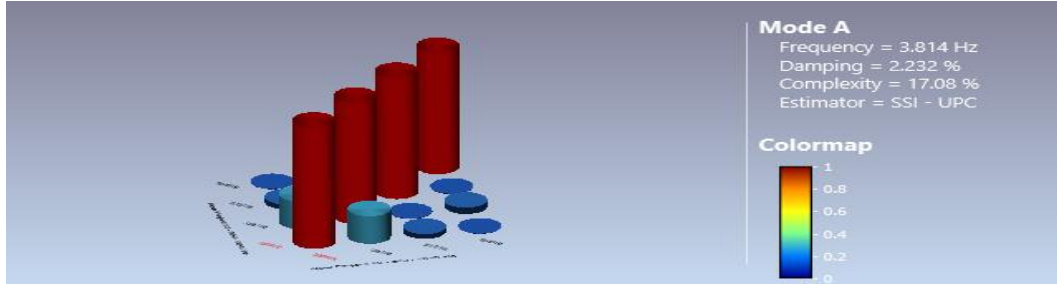
FREKANS (Hz)	3,858	3,893	83083	10,45
3,858	1	0,03044	0,03471	0,02748
3,893	0,03044	1	0,005704	0,06867
83083	0,03471	0,005704	1	0,01586
10,45	0,02748	0,06867	0,01586	1

ÖLÇÜM 12

Ölçüm 12 sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.63, Şekil 4.64’de ve Çizelge 4.32’de görüldüğü üzere diyagonal değerlerin 1 olduğu kenar değerlerin ise sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen mod değerlerinin güvenilir ve birbirinden ayırık olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.63. Ölçüm 12’ye ait SSI-UPC analiziyle belirlenen spektral yoğunluk grafiğindeki mod değerleri görüntüsü.



Şekil 4.64. Ölçüm 12’ye ait MAC değerlerine ilişkin SSI - UPC analiz grafiği

Çizelge 4.32. Ölçüm 12’ye ait SSI-UPC analizi ile elde edilen mod şekillerine ait MAC verileri.

FREKANS (Hz)	3,814	3,863	8,137	10,46
3,814	1	0,2276	0,03975	0,001787
3,863	0,2276	1	0,004161	0,05208
8,137	0,03975	0,004161	1	0,003894
10,46	0,001787	0,05208	0,003894	1

Yapıya ait kütle ve rijitlik değerleri yapının frekans değerlerini etkilemektedir. Kütle ile rijitlik frekans değerlerini etkileyen bağımlı değişkenlerdir. Emir Saltuk Kümbeti'nden alınan ölçüm sonuçlarına binaen oluşturulmuş SSI-UPC analizleri neticesinde frekans değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

4.3.3. Operasyonel modal analiz sonucunda elde edilen mod şekilleri ve frekans değerleri

Emir Saltuk Kümbeti üzerinde 8 adet tek eksenli ivmeölçer ile yapılan toplam 12 adet tepki ölçümü sonucunda elde edilen frekanslar Çizelge 4.33'de verilmiştir. Analizler tüm yöntemler için tekrarlanmış olup toplamda 60 adet analiz yapılmıştır.

Çizelge 4.33. Operasyonel modal analiz neticesinde elde edilen modal frekans değerleri

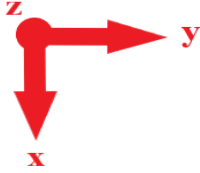
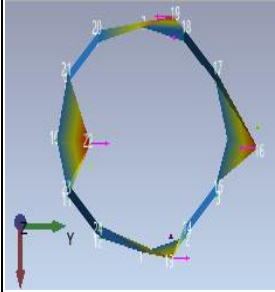
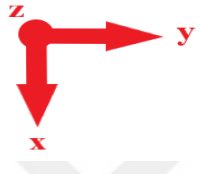
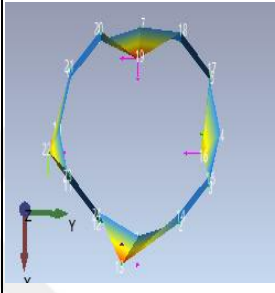
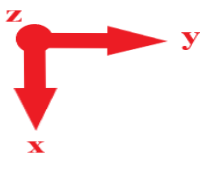
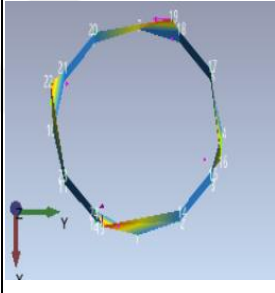
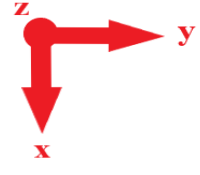
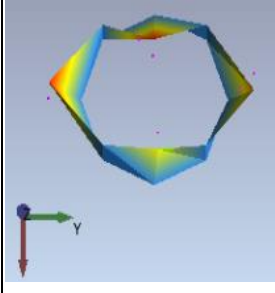
ANA LİZ TÜR Ü	MODAL ANALİZ FREKANS DEĞERLERİ (Hz)													
	M od	Ölçü m 1	Ölçü m 2	Ölçü m 3	Ölçü m 4	Ölçü m 5	Ölçü m 6	Ölçü m 7	Ölçü m 8	Ölçü m 9	Ölçü m 10	Ölçü m 11	Ölçü m 12	Ortala ma
FDD	1	3,81	3,74	3,79	3,81	3,73	3,81	3,76	3,87	3,97	3,71	3,72	3,61	3,79
	2	3,99	3,81	3,96	3,99	4,00	3,91	4,00	3,91	4,10	4,09	4,21	3,87	4,00
	3	8,53	8,56	8,32	8,46	8,19	7,76	8,35	8,46	8,53	8,19	8,30	8,12	8,33
EFDD	1	3,77	3,82	3,82	3,59	3,74	3,78	3,89	3,90	3,74	3,62	3,78	3,61	3,77
	2	4,43	4,02	3,95	3,83	3,99	4,00	3,98	4,00	3,99	3,76	4,21	3,88	4,01
	3	8,48	8,43	8,34	8,39	8,25	8,18	8,43	8,47	8,44	8,18	8,27	8,19	8,35
CFDD	1	3,71	3,97	3,79	3,82	3,73	3,76	3,66	3,84	3,62	3,62	3,61	3,61	3,74
	2	4,42	4,02	3,95	4,09	3,99	4,00	4,09	4,07	4,26	3,70	4,07	4,00	4,06
	3	8,52	8,50	8,34	8,38	8,25	8,21	8,46	8,53	8,49	8,21	8,32	8,19	8,38
SSI- UPC	1	3,92	3,88	3,87	3,86	3,86	3,85	3,90	3,92	3,90	3,82	3,86	3,81	3,88
	2	3,99	3,94	3,93	3,94	3,90	3,91	3,95	3,97	3,95	3,86	3,89	3,86	3,93
	3	8,50	8,41	8,32	8,36	8,43	8,17	8,47	8,50	8,46	8,16	8,03	8,14	8,35
	4	10,94	10,78	10,61	10,49	x	10,59	10,88	10,85	10,63	10,41	10,45	10,46	10,66
SSI- UPCX	1	3,92	3,87	3,87	3,86	3,86	3,85	3,90	3,92	3,90	3,82	3,86	3,81	3,88
	2	3,99	3,94	3,93	3,94	3,90	3,91	3,95	3,97	3,95	3,86	3,89	3,86	3,93
	3	8,50	8,40	8,32	8,36	8,42	8,17	8,45	8,49	8,46	8,16	8,06	8,14	8,35
	4	10,93	10,78	10,64	10,45	x	10,57	10,80	10,82	10,66	10,41	10,44	10,46	10,65

Çizelge 4.33 incelendiğinde analiz sonuçlarında elde edilen frekans değerlerinin birbirlerine son derece yakın olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan farklı 12 ölçüm için yapıya ait modal değerlerin yakınsaklık göstermesi analiz sonucunda elde edilen dinamik değerlerin güvenilir şekilde tespit edildiğinin bir kanıtı olarak kabul edilmektedir. Yapılan tüm analizlerin sonucunda, belirlenen mod şekillerinin güvenilirliği modal

güvenlik kriteri analizi ile kontrol edilmiştir. Emir Saltuk Kümbeti' ne uygulanan operasyonel modal analiz çalışması sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli ile bu mod şekillerine ait modal frekans değerlerinin genel ortalaması Çizelge 4.34'te sunulmuştur. Deneysel olarak elde edilen mod şekilleri ile teorik modal analizden elde edilen mod şekilleri aynı eksene oturtularak incelenmiştir.



Çizelge 4.34. Emir Saltuk Kümbeti için operasyonel modal analiz sonucunda deneysel olarak elde edilen mod şekilleri ve ortalama frekanslar.

Mod	Eksen Takımı	Genel Ortalama Frekans	Hareket Doğrultusu	Mod Şekli
1		3,811	Y yönünde yatay öteleme	
2		3,986	X yönünde yatay öteleme	
3		8,351	Z ekseni etrafında burulma	
4		10,655*	Kubbe Çökmesi	

*Sadece SSI-UPC ve SSI-UPCX analizlerinden elde edilen frekans değerlerinin genel ortalaması

Yapılan analizler sonucunda birinci ve ikinci mod şekline ait frekans değerlerinin, *beklendiği şekilde*, oldukça yakın olduğu görülmektedir. Zira, yapı sekizgen planlı ne kapı açıklığı dikkate alınmadığında neredeyse tamamen simetrik bir forma sahiptir. Bu nedenle öteleme hareketi olarak tayin edilen ilk iki mod şeklinin modal frekanslarının da yakın olması beklenen bir durumdur. Birinci mod şeklinin Y yönünde yatay öteleme,

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

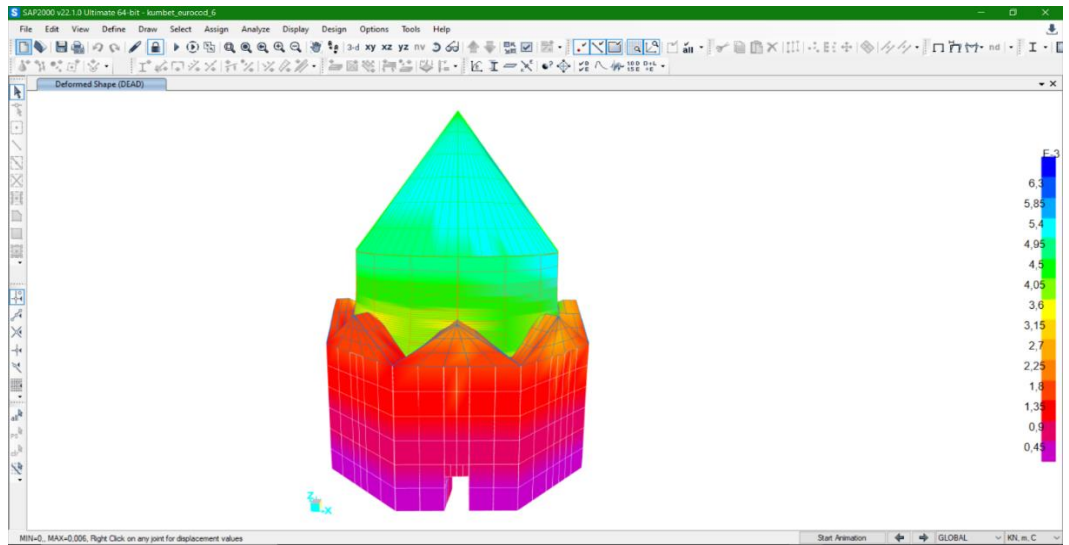
ikinci mod şeklinin X yönünde yatay öteleme, üçüncü mod şeklinin eksenin etrafında burulma ve dördüncü mod şeklinin kubbe çökmesi şeklinde hareket ettiği görülmüştür. Deneyisel modal analiz sonucu elde edilen mod şekillerinin teorik modal analiz sonucu elde edilen mod şekilleri ile uyumlu olduğunu ifade etmek mümkündür.

Frekans değeri yapıya ait kütle ve yapının rijitliğine bağlıdır. Bu değerlerin zaman içerisinde değişebilmesi mümkündür. Bu sebeple yapı üzerinde periyodik olarak yapılacak operasyonel modal analiz çalışması ile yapı sağlığının takibinin mümkün olduğu düşünülmektedir.

4.4. Emir Saltuk Kümbet Yapısı Yer Değiştirme Analizi

Statik Analiz Sonucu Elde Edilen Yer Değiştirmeler:

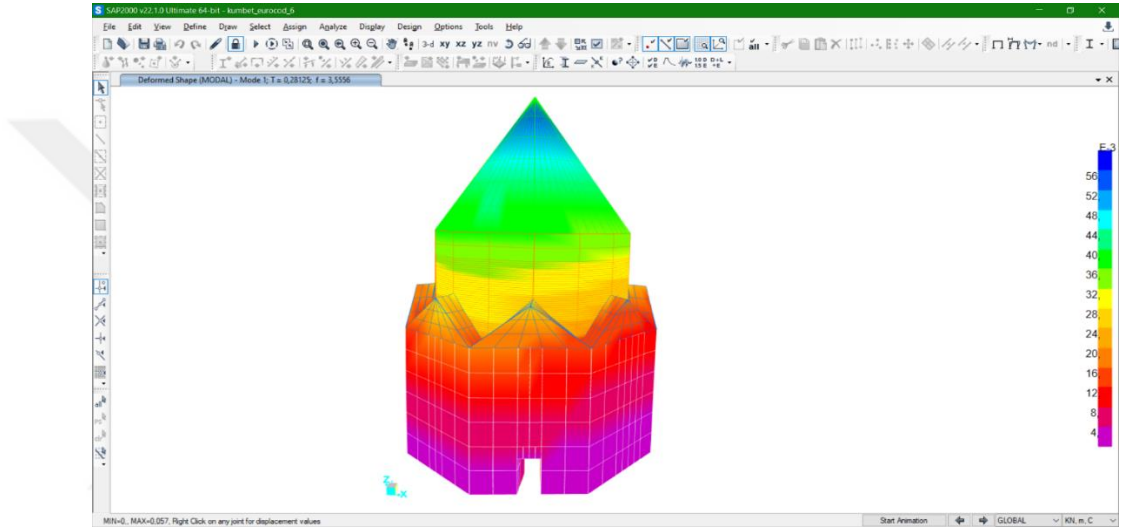
Emir Saltuk Kümbeti yapısının kendi ağırlığı altında yapılan statik analizi neticesinde maksimum yer değiştirmenin kümbetin külah kısmında, düşey ekseninde meydana geldiği görülmüştür. Kümbetin en üst kotunda meydana gelen maksimum yer değiştirme, çökme hareketi şeklinde 6 mm olarak hesaplanmıştır. Yer değiştirme Şekil 4.65’te verilmiştir. Söz konusu analizin mevcut yapıyı temsil kabiliyeti en yüksek model üzerinde yapıldığı ifade edilmelidir.



Şekil 4.65. Emir Saltuk Kümbeti’ nin öz ağırlığı altında maksimum yer değiştirme değerleri.

Modal Analiz Sonucu Elde Edilen Yer Değiştirmeler:

İlgili abidevi mezar yapısının, deneysel modal analizle en yakın sonuç veren modeli üzerinde gerçekleştirilen teorik modal analizi sonucunda maksimum modal yer değiştirmenin kümbetin külah kısmında, öteleme şeklinde 57 mm olduğu hesap edilmiştir. Kümbet yapısının yüksekliğinin 18 m olduğu göz önüne alınırsa; bu değer %0,32 değerinde yanal ötelemeye karşılık geldiği hesaplanmıştır. Emir Saltuk Kümbeti yapısının modal yer değiştirme dağılımı Şekil 4.66’da verilmiştir.



Şekil 4.66. Emir Saltuk kümbetinin modal analiz ile elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri.

4.5. Kümbet Yapısına Ait Doğal Titreşim Periyodunun Hesaplanması

Yapılar gerçek durumda çok serbestlik dereceli sistemlere sahiptir. Lakin yapılacak çözümlerde yapı tek serbestlik dereceli sisteme dönüştürülerek çözümlemeler yapılmaktadır. Chopra (2015) tek serbestlik dereceli bir sistemin periyodunun hesaplanabilmesinde Eşitlik (4.17)’nin kullanılabileceğini söylemiştir.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (4.17)$$

Eşitlik (4.17)’de belirtilen “T” periyodu, “m” yapı kütlesini ve “k” yapı rijitliğini temsil etmektedir. Yapıya ait rijitliği ise eşitlik (4.18)’den bulunabilmektedir.

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (4.18)$$

Eşitlik (4.18)' deki rijitlik hesabında “E” elastik modülü, “I” atalet momentini ve “L” yapı yüksekliğini temsil etmektedir. Eşitlik (4.19)' da gösterilen atalet momenti formülü ile silindirik kabulü yapılmış ve atalet momenti hesaplanmıştır. Sonra ise (4.17), (4.18) ve (4.19) eşitlikleri kullanılarak Çizelge 4.35'deki yapıya ait değerler ile periyot hesabı yapılmıştır.

Çizelge 4.35. Yapıya ait fiziksel ve mekanik özellikler

Ağırlık (W)	Kütle (m)	Elastik Modül (E)*	Atalet Momenti (I)
8462,31 kN	862,62 kNs ² /m	17,97x10 ⁵ kN/m ²	753,78 m ⁴

*Seçimi yapılan elastik modül Eurocode 6 (1996) yönetmeliği doğrultusunda maksimum değerler ile elde edilmiştir.

$$I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi(12,2^4 - 9,08^4)}{64} = 753,78 \text{ m}^4 \quad (4.19)$$

$$k = \frac{3 \cdot 17,97 \cdot 10^5 \cdot 753,78}{18^3} = 696781,20 \text{ kN/m}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{862,62}{696781,20}} = 0,22 \text{ sn} \text{ olarak bulunmuştur.}$$

OMA sonucunda elde edilen titreşim periyodu ise yaklaşık 0,28 sn kadardır. Bayülke (2011)' ye göre yağma yapılar için doğal titreşim periyodu *kat sayısı x (0,05-0,07)* arasındadır. Kümbet yapısının toplam yüksekliği yaklaşık 18 m civarındadır. Bu durumda Bayülke (2011)' ye göre yapı doğal titreşim periyodunun 0,25-0,35 sn arasında olduğu söylenebilir. Deneysel periyot değeri 0,28 sn iken el hesabında bulunan değer yaklaşık olarak 0,22 sn civarındadır. Doğal titreşim periyodu deneysel sonuç için Chopra (2015)' ya göre yaklaşık % 27,27'lik hata ile Bayülke (2011)' ye göre ise 0,25 sn değeri için % 12'lik hata ile hesaplanmıştır.

4.6. Deneysel ve Teorik Modal Analiz Sonuçlarının İrdelenmesi

Bu bölümde Emir Saltuk Kümbeti'ni oluşturan yapı taşlarının, Schmidt Çekici yöntemi ile elde edilmiş olan basınç dayanımı değerlerinden yola çıkılarak muhtelif yaklaşımlarla hesaplanan yığma yapı mekanik özellikleri ile sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanmış teorik modal analiz sonuçları ile deneysel olarak elde edilen modal analiz sonuçlarının karşılaştırması yapılmıştır. Bu karşılaştırmanın temel amacı; teorik modal analiz sonuçlarının reel durumda yapıyı ne kadar temsil ettiği sonucuna ulaşmaktır. Araştırmaya konu olan tüm yönetmelikler uyarınca hesaplanana yığma yapı mekanik özellikleri kullanılarak yapılan teorik analizde elde edilen veri sonuçları operasyonel modal analiz sonuçları arasında oluşan hata oranları Çizelge 4.36'da verilmiştir.

Çizelge 4.36. Teorik olarak hesaplanan modal frekans değerleri ile deneysel frekans değerleri arasındaki hata oranları.

Hata Oranları		1996 Eurocode 6 (200*fk)	2007 DBYBHY (200*fk)	2018 TBDY (750*fk)	1996 Eurocode 6 (215*fk)	2007 DBYBHY (155*fk)	2018 TBDY (375*fk)
		Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)
Fc, Minimum Değeri	Mod 1	23,28	22,75	52,90	17,52	17,63	23,54
	Mod 2	26,34	17,81	46,66	20,82	13,80	26,67
	Mod 3	28,91	13,62	41,32	23,58	10,56	29,34
	Mod 4	37,61	1,31	25,48	32,92	1,02	37,26
Hata Oranları		1996 Eurocode 6 (200*fk)	2007 DBYBHY (200*fk)	2018 TBDY (750*fk)	1996 Eurocode 6 (215*fk)	2007 DBYBHY (155*fk)	2018 TBDY (375*fk)
		Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)
Fc, Ortalama Değeri	Mod 1	13,65	46,76	81,42	7,16	36,24	9,29
	Mod 2	17,09	40,89	74,01	10,86	31,69	13,27
	Mod 3	19,87	34,91	66,91	13,86	27,06	16,54
	Mod 4	29,12	22,54	50,71	23,81	17,47	24,65
Hata Oranları		1996 Eurocode 6 (200*fk)	2007 DBYBHY (200*fk)	2018 TBDY (750*fk)	1996 Eurocode 6 (215*fk)	2007 DBYBHY (155*fk)	2018 TBDY (375*fk)
		Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)
Fc, Maksimum Değeri	Mod 1	6,72	78,20	105,82	0,29	60,61	2,94
	Mod 2	10,41	74,26	97,44	3,69	57,55	1,28
	Mod 3	13,51	61,59	88,09	7,02	47,73	5,95
	Mod 4	22,99	50,15	72,30	17,22	38,87	13,84

Çizelge 4.36' nın tez çalışmasının tamamının özeti olduğunu ifade etmek mümkündür. Hesaplanan fark değerleri tarihi Emir Saltuk Kümbeti yapısı için tahribatsız yöntemlerle elde edilen malzeme mekanik özellikleri kullanılarak oluşturulan sonlu eleman modelinin mevcut yapıyı temsil kabiliyetinin bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Çizelge 4.36' nin geneli incelendiğinde Eurocode 6 (1996)

uyarınca hesaplanmış malzeme mekanik özellikleri kullanılarak yapılan teorik modal analizden elde edilen sonuçların deneysel modal analiz değerlerine DBYBHY (2007) ve TBDY (2018) esas alınarak yapılan çalışma sonuçlarından çok daha yakın değerler verdiği görülmektedir.

Çizelge 4.36' nın daha teknik bir şekilde değerlendirilebilmesi için iki önemli hususun açıklanmasında yarar görülmektedir. Burada, F_c ile temsil edilen değer ilgili doğal taşın Schmidt sertlik çekici uygulaması neticesinde tayin edilen eksenel basınç dayanımıdır. Kümbet yapısında kullanılan andezit ve bazalt türü kayaçların sertlik okumaları üzerinden basınç dayanımlarının eldesin de Özdoğan (2018)' da sunulan bağıntılar kullanılarak çalışma yapılmıştır. Ancak; bu çalışma kapsamında malzeme karakterizasyonu yapılan kamber taşı için durum farklıdır. Kamber taşı için bir tek sertlik-basınç dayanımı fonksiyonu üretilmemiş ilgili veri alt sınır (minimum), üst sınır (maksimum) ve ortalama değerlerini temsil eden 3 ayrı bağıntı üretilmiştir. Çizelge 4.36' nın birinci sütununda F_c kısaltmasının yanındaki minimum, maksimum ve ortalama ifadeleri sadece kamber taşı basınç dayanımı tayininde hangi bağıntının kullanıldığını betimlemek amacıyla kullanılmıştır. Benzer şekilde Çizelge 4.36' da kullanılan f_k kısaltması üzerinde belirtilen teknik mevzuat uyarınca hesaplanmış yığma duvar basınç dayanımını ifade etmektedir. Çizelge 4.36 incelenirken dikkate alınması gerekli görülen bir diğer husus ise eğik harflerle yazılan son üç sütundaki hata değerleridir. Çizelge 4.36' nın ilk üç sütunundaki hata değerleri ilgili normlar uyarınca hesaplanan elastik modül değerleri içindir. Ancak, eğik harflerle yazılan son üç sütunda ilgili normlarla duvar basınç dayanımı hesabı yapıldıktan sonra deneme-yanılma yoluyla teorik ve deneysel modal frekanslar arasındaki hata oranını en düşük seviyede tutan elastik modül değerleri çalışılmıştır.

Bu tez çalışmasının amacı deneme-yanılma yoluyla tarihi yığma bir yapı için sonlu eleman model kalibrasyonu yapılması değildir. Zira bunun yapılabilmesi ancak ve ancak deneysel modal analiz sonuçlarının bilinmesi ile mümkündür. Oysa her tarihi yapıya istenildiği zaman deneysel olarak dinamik kimliklendirme yapılamayacak olması gerçeği bu tez çalışmasının çıkış noktasını oluşturmuştur. Tahribatsız bir şekilde yığma duvar mekanik özelliklerinin belirlenmesi işleminin, her ne kadar ilgili normlar tarihi yapıları kapsamasa da, çalışılan norm sınırları içerisinde kalınarak yapılması muhtelif uygulamalar için bir yöntem birliği sağlayacaktır. Bu nedenle, Çizelge 4.36' nın ilk üç

sütununun hata oranları bakımında değerlendirilmesinin teknik olarak daha gerçekçi ve geçerli olduğu düşünülmektedir.

Tüm bu hususlar çerçevesinde, Çizelge 4.36'da sunulan sonuçlar bütün olarak değerlendirildiğinde kamber taşı basınç dayanımı için maksimum sınırı sunan bağıntının, andezit ve bazalt türü taşlar için Özdoğan (2018)' da sunulan bağıntılar kullanılarak taş basınç dayanımı eldesinden sonra Eurocode 6 (1996) uyarınca yığma duvar basınç dayanımı hesabı ile elde edilen duvar basınç dayanımı ve elastik modül değerleri ile yapılan teorik modal analiz sonuçlarının deneysel modal analiz sonuçlarına duvar elastik modülünün $200 \cdot f_k$ alınması durumunda %6,72-%22,99 aralığında hata ile yaklaştığı görülmektedir. Bu çerçevede, norma uygun olarak elastik modül hesabının yapılması halinde, en büyük fark değerlerinin TDBY (2018) uyarınca yığma duvar elastik modülünün $200 \cdot f_k$ alınması durumunda %72,30 - %105,82 aralığında hata değerleri hesaplandığı görülmektedir. TDBY (2018)' nin yeni yapılacak yığma yapılar için bir norm olduğu ve yıpranmamış malzeme dayanımlarını dikkate alarak yüksek duvar elastik modülü hesaplattığı ve bu değerlerin tarihi yığma yapı için oldukça yüksek frekans değerlerinin hesaplanmasına yol açtığı düşünülmektedir. Benzer durumun hata oranları azalsa da DBYBHY (2007) için de geçerli olduğunu ifade etmek mümkündür.

Çizelge 4.36' de mod şekilleri bazında fark değerleri incelendiğinde, genel olarak ilk iki öteleme modu için hesaplanan fark değerlerinin sonraki 3. mod (kubbe çökmesi) ve 4.mod (yanal burulma) için hesaplanan değerlerden daha düşük olduğu görülmektedir. Eurocode 6 (1996) normu uyarınca maksimum kamber taşı dayanımının hesaplarda kullanılması durumunda, ilk iki öteleme modu için teorik ve deneysel frekanslar arasında fark sırasıyla %6,72 ve %10,41 olarak hesaplanmıştır. Aynı uygulama dâhilinde 3. mod (kubbe çökmesi) ve 4.mod (yanal burulma) için ise bu fark değerleri %13,51 ve %22,99 olarak belirlenmiştir. Kümbet yapısının 3. mod (kubbe çökmesi) ve 4.mod (yanal burulma) şekillerinin frekans değerlerinin sadece malzeme elastik modülüne bağlı olmaması, mesnet koşulları ve hatta lokal bağlantı şekillerine de bağlı olduğunu ifade etmek mümkündür. Bu bakımdan modelde herhangi bir değişim yapılmamış; sadece malzeme mekanik özellikleri üzerinden çalışma yapılmıştır. Aynı yöntemde duvar elastik modülü değerinin deneme-yanılma yoluyla yapılan çalışma neticesinde $215 \cdot f_k$ alınması durumunda fark değerlerinin mod şekilleri için sırasıyla %0,29, %3,69, %7,02 ve %17,21 olduğu görülmektedir. Yanal burulma hareketi olarak tayin edilen 4. mod şekli için hata

oranın hala diğer mod şekillerine kıyasla oldukça yüksek olması burulma hareketine ilişkin teorik frekans değerinin sadece malzeme mekanik özellikleri üzerinden incelenmesinin hatalı sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir.

Gerçekleştirilen çalışma sonlu eleman modelinin deneysel olarak elde edilen modal davranış parametreleri üzerinden deneme-yanılma yoluyla kalibre edilmesi şeklinde bir çalışma değildir. Bu tür çalışmaları konu edinen Foti et al (2012), Sánchez-Aparicio et al. (2014) ve Genç vd (2019) çalışmaları benzeri çok sayıda çalışmaya literatürde erişim sağlamak mümkündür. Ancak, sıralanan bu çalışmalar ve benzeri diğer pek çok çalışma bu tez çalışması kapsamında üretilen verinin karşılaştırmalı incelenmesinde doğru referans teşkil eder nitelikte çalışmalar olarak değerlendirilmemektedir. Bu tez çalışması özünde, kullanılan tahribatsız malzeme karakterizasyonu yöntemleri ile elde edilen sonuçlar üzerinden oluşturulan sonlu eleman modelinin mevcut yapıyı temsiliyet kabiliyetinin irdelenmesi üzerine kuruludur. Modelin gerçek tarihi yapıyı temsiliyet kabiliyeti ise yapısal karakteristikler olan modal davranış parametreleri üzerinden irdelenmiştir. Özdoğan (2018) çalışmasının temel yaklaşımı ve yöntemi bu tez çalışmasına benzerdir ve sonuç irdeleme bakımından referans olarak değerlendirilmiştir.

Teorik ve deneysel modal frekanslar arasında genel olarak en büyük farkın 3. mod (kubbe çökmesi) ve 4.mod (burulma) değerleri hesaplandığı ve bu farkın çeşitli hesaplamalarda %5-%45 değerleri arasında olduğu görülmektedir. Fark oranları bakımından Özdoğan (2018) çalışmasında sunulan sonuçların da benzer olduğu görülmektedir. İncelenen tarihi cami yapısı için deneysel ve teorik frekanslar beraber yorumlandığında hata payının birinci ve ikinci öteleme modu için azami %9 değerlerine ulaşırken, üçüncü mod yani burulma modu için %38 mertebelerinde olduğu görülmektedir. Üçüncü mod şeklini temsil eden frekans değerlerine ilişkin benzer sonuçların Calayır vd (2021), Kocaman vd (2019) ve Lorenzoni et al. (2017) çalışmalarında da sunulduğu görülmektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında Erzurum İli Yakutiye İlçesinde yer alan Üç Kümbetler mevkiindeki Emir Saltuk Kümbeti üzerinde teorik ve deneysel dinamik kimliklendirme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalardaki temel amaç; ultrases ve Schmidt sertlik çekici gibi tahribatsız yöntemler kullanılarak tarihi yığma yapının malzeme özelliklerini imkân dairesinde en güvenilir biçimde elde edilmesine yönelik bir metodun mütalaa edilebilmesidir.

- Emir Saltuk Kümbeti ekseriyet ile kamber taşı denilen kırmızı bir doğal taştan imal edilmiştir. Ayrıca yapıda bazalt ve andezit taşları da kullanılmıştır. Bu kayalar türlerinden bazalt ve andezit için literatürde ve çeşitli kaynaklarda teknik bilgi mevcut iken kırmızı kamber taşı için herhangi bir bilgiye ulaşılamamıştır. Bu nedenle, öncelikle Erzurum ili ve çevresinde yoğun olarak kullanımı söz konusu olan kamber taşı için malzeme karakterizasyonu çalışmaları yapılmıştır.
- Teorik analiz için oluşturulmuş olan sonlu elemanlar modelinin hazırlanmasında Emir Saltuk Kümbeti' ni oluşturan yapı malzemelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerine gereksinim duyulması hasebi ile kamber taşı üzerinde detaylı bir şekilde inceleme yapılmıştır ve malzeme karakterizasyonu oluşturulmuştur. Bu kapsamda yapıya uygulanan ve laboratuvar ortamında kamber taşı malzemesine uygulanan Schmidt sertlik deneyi sonucunda elde edilen sertlik değerleri kalibre edilmiştir ve yine laboratuvar ortamında kamber taşına uygulanan eksenel basınç dayanımı deneyi sonuçları ile ilişki kurulmuştur. Ayrıca kamber taşına ait elastisite modülü, birim hacim ağırlık ve porozite değerleri belirlenmiş ve elde edilen tüm bu fiziksel ve mekanik değerler için aralarında ilişki kurularak elde edilen fonksiyonel bağıntılar önerilmiştir. Çalışma neticesinde kamber taşının birim ağırlık bakımından volkanik bir kayalar olan bazalttan daha hafif, ancak daha gözenekli yapıda bir doğal taş olduğu sonucuna varılmıştır.
- Teorik modal analiz yapılabilmesi için SAP2000 (2016) paket programı kullanılarak makro modelleme yöntemi ile Emir Saltuk Kümbeti' ne ait sonlu

elemanlar modeli oluşturulmuştur. Elde edilen katı model üzerinde teorik analiz yapılmıştır.

- Saha çalışmalarında Emir Saltuk Kümbeti' nin operasyonel modal analiz yöntemi ile dinamik kimliklendirme çalışması yapılmış ve deneysel olarak dinamik davranış parametreleri elde edilmiştir. Tüm analizler için mod şekillerinin birbirinden ayırık ve güvenilir olduğu modal güvence kriteri değerleri üzerinden teyit edilmiştir.
- Deneysel dinamik kimliklendirme neticesinde yapının SSI-UPC yönetimi ile yapılan ayrıştırma analizleri sonucunda yanal öteleme hareketi şeklindeki ilk iki mod şekline ait frekans değerlerinin sırasıyla 3,88 Hz ve 3,93 Hz olduğu, kubbe çökmesi şeklindeki 3. mod şekline ait frekans değerinin 8,35 Hz olduğu ve yanal burulma hareketi olarak belirlenen 4. mod şekline ait frekans değerinin ise 10,66 Hz olduğu tespit edilmiştir.
- Emir Saltuk Kümbet' ini oluşturan yapı taşlarından sahada Schmidt çekici ile sertlik okuması yapılmış ve kayıt edilmiştir. Daha sonra Özdoğan (2018) çalışmasında andezit ve bazalt için, bu tez çalışması kapsamında ise kamber taşı için üretilen sertlik-basınç dayanımı bağıntıları kullanılarak doğal taş basınç dayanımları elde edilmiştir. Andezit ve bazalt türü kayalar için tek bir basınç dayanımı değeri alınırken, kamber taşı için minimum, maksimum ve ortalama değer olmak üzere üç ayrı dayanım değeri elde edilmiştir.
- Çalışma kapsamında kullanılan TBDY (2018), DBYBHY (2007) ve Eurocode 6 (1996) yönetmelikleri ile taş basınç dayanımından duvar basınç dayanımına, duvar basınç dayanımından ise elastik modül değerine geçiş yapılmıştır. Kullanılan bu üç yönetmelikten en yakın sonuç vereninin, kamber taşı basınç dayanımının maksimum değer alınması durumunda, Eurocode 6 (1996) olduğu görülmüştür. Eurocode 6 (1996) normu uyarınca hesaplanan yığma duvar mekanik özellikleri ile yapılan teorik modal analiz sonuçlarının deneysel modal analiz sonuçlarına oldukça yaklaştığı görülmüştür.
- Bu tez çalışması kapsamında incelenen Emir Saltuk Kümbeti yapısında andezit, bazalt ve kamber taşı türünden doğal taşlar kullanılmıştır. Bu nedenle, sadece bu doğal taşlar için beton Schmidt sertlik çekici uygulamalarında kullanılabilecek sertlik-eksenel basınç dayanımı ilişkileri

kullanılmıştır. Tarihi yapı çeşitliliği dikkate alındığında, farklı türdeki doğal taşlar için de benzer şekilde malzeme karakterizasyonu çalışmalarının yapılmasının gerekli olduğu düşünülmekte ve önerilmektedir.

- Tez çalışmasında uygulaması yapılan yöntemin genel sonuçlara ulaşması için bu tez çalışmasında yapılan uygulama yeterli değildir. Yöntemin geçerliliği ve kullanılabilirliğinin daha net bir şekilde ortaya konulabilmesi için yöntemin farklı yapılarda denenmesi ve sonuçlarının mütalaa edilmesi önerilmektedir.



KAYNAKLAR

- Aksoy, H. S., Karaton, M. 2019. Tarihi yığma yapıların malzeme karakteristiklerinin hasarsız yöntemlerle belirlenmesi: Diyarbakır Ulu Camii Örneği. BEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 8(1), 109-117.
- Alpaslan, E. 2019. Tarihi yığma köprü hasarlarının analitik model ve deneysel yöntemlerle belirlenmesi. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 240, Samsun.
- Altıok, T. Y. 2019. Tarihi minarelerin dinamik özelliklerinin deneysel ve nümerik yöntemler ile araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 231, Manisa.
- Anonim, 1991. Web Sitesi: <https://islamansiklopedisi.org.tr/bagdat#1-genel-bakis>, Erişim Tarihi: 10.11.2020.
- Anonim, 2007. Web Sitesi: <https://www.turkilleri.com/wp-content/uploads/2018/02/Turkiye-Turizm-Haritasi-Buyuk-Boy.jpg>, Erişim Tarihi: 30.11.2021.
- Anonim, 2012. Web Sitesi: https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/doc/yenilenmis_diri_fay_haritalari/erzurum.pdf, Erişim Tarihi: 13.11.2021.
- Anonim, 2019a. Web Sitesi <https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi>, Erişim Tarihi: 06.11.2021.
- Anonim, 2019b. Web Sitesi <https://www.anadoluyugarliklari.com/anadolu-da-ilk-yerlesimler/>, Erişim Tarihi: 30.11.2021.
- Anonim, 2019c. Web Sitesi: https://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/f7deb880ca6b4b7_ek.pdf?tipi=84&turu=X&sube=0, Erişim Tarihi: 24.02.2022.
- Anonim, 2020. Web Sitesi: <https://www.antbilgi.com/saltuklu-beyligi-hakkinda-onemli-bilgiler/>, Erişim Tarihi: 26.11.2021.
- Anonim, 2021a. Web Sitesi https://tr.wikipedia.org/wiki/Anadolu_tarihi, Erişim Tarihi: 30.11.2021.
- Anonim, 2021b. Web Sitesi: <https://www.erzurumhaber.com.tr/video/7220820/cecen-pasanin-erzurum-sevdasi>, Erişim Tarihi: 25.02.2022.

Anonim, 2021c. Web Sitesi: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/muze/kayaclar>, Erişim Tarihi: 24.02.2022.

Anonim, 2021d. Web Sitesi: <https://www.sanalsantiye.com/orneklerle-schmidt-cekici-beton-test-cekici-deneyi/>, Erişim Tarihi: 14.02.2022.

Artemis Modal Pro V. 5.0 2018. Operasyonel Modal Analiz Programı, Erzurum Teknik Üniversitesi.

Aslay, S. E. 2017. Erzincan Değirmenliköy Kilisesi'nin 1939 Erzincan depremi davranışının apsis hasarı üzerinden incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 120, Erzurum.

Aslay, S. E., Okuyucu, D. 2019. Erzincan Değirmenliköy Kilisesi apsis hasarının teknik olarak araştırılması. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35(1), 387-402.

Atalay, İ. 1983. Erzurum ovası ve çevresinin toprakları. Ege Coğrafya Dergisi, 1(1), 68-99.

Aydin, A., Basu, A. 2005. The Schmidt hammer in rock material characterization. Engineering Geology, 81(1), 1-14.

Aydın, E. Ö., Fahjan, Y. M., Çömlekçioęlu, R. 2007. Deprem bölgelerindeki tarihi kâgir yapıların güçlendirilmesinde kullanılan yeni teknikler, International Earthquake Symposium, 22-26 Ekim, Kocaeli Üniversitesi, Tam Metin Bildiri, 636-644, Kocaeli.

Bal, K. 2018. Tanzimat'tan II. Meşrutiyete Osmanlı'da Depremler (1839-1908). Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi, 6(72), 526-544.

Bautista-De Castro, Á., Sánchez-Aparicio L. J., Ramos, L. F., Sena-Cruz González, J., Aguilera, D. 2018. Integrating geomatic approaches, OMA, advanced numerical and updating methods to evaluate the current safety conditions of the historical Bôco bridge. Constr Build Mater, 158, 961-984.

Bayülke, N. 2011. Yığma yapıların deprem davranışı ve güvenliği, 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-14 Ekim, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Tam Metin Bildiri, 1-10, Ankara.

- Birinci, F. 2010. Taş kemer köprülerin sonlu eleman modellerinin operasyonel modal analiz yöntemiyle iyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 85, Trabzon.
- Boru, E. O., Kutanis, M. 2015. Çevresel titreşim kayıtları kullanılarak yapı dinamik parametrelerinin belirlenmesi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 19(1), 59-66.
- Bozhüyük, Z. R. 2007. Erzurum kent merkezindeki bazı tarihi yapı ve çevreleri üzerine görsel etki değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Peyzaj Mimarlığı Ana bilim Dalı, 105, Erzurum.
- Calayır, Y., Yetkin, M., Erkek, H. 2021. Finite element model updating of masonry minarets by using operational modal analysis method. Elsevier, 34, 3501-3507.
- Chauhan, S. 2008. Parameter estimation and signal processing techniques for operational modal analysis. PhD Dissertation, University of Cincinnati, 256, Ohio, USA.
- Chopra, A. K. 2015. Yapı Dinamiği: Teori ve Deprem Mühendisliği Uygulamaları. Palme yayınevi, 944, Ankara.
- Conde, B., Ramos, L. F., Oliveira, D. V., Riveiro, B., Solla, M. 2017. Structural assessment of masonry arch bridges by the combination of non-destructive testing techniques and three-dimensional numerical modelling application to Vilanova bridge. Engineering Structures, 148, 621-638.
- Costa, C., Ribeiro, D., Jorge, P., Arede, A., Calçada, R. 2016. Calibration of the numerical model of a stone masonry railway bridge based on experimentally identified modal parameters. Engineering Structures, 123, 354-371.
- Çalık, İ., Bayraktar, A., Türker, T. 2016. Betonarme kubbelerin taş yığma duvarlı camilerin dinamik davranışına etkisinin çevresel titreşim yöntemiyle incelenmesi. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31(3), 621-630.
- Çarhoğlu, A. I., Zabin, P. Korkmaz, K. A. 2014. Kars Kümbet Camisinin deprem davranışının incelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2(1), 189-196.
- Dabanlı, Ö. 2016. Nur-u Osmaniye Camii'nin deprem performansının belirlenmesi ve koruma önerileri. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Ana bilim Dalı, 497, İstanbul.

- DBYBHY. 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- Demir, A., Gedik, Y. H., Güneş, O., Korkmaz, K. A. 2016. Structural and seismic evaluation of historical dicle bridge in Turkey, Istanbul Bridge Conference, 8 August, Istanbul Technical University, Full Text Paper, 10, İstanbul.
- Dikmen, E. 2015. XII. Yüzyılda Erzurum ve çevresinde Saltuklu Beyliği ve II. İzzeddin Saltuk dönemi Kafkasya politikası. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ortaçağ Tarihi Ana bilim Dalı, 150, Ankara.
- Durutürk, G. 2012. Yalvaç Hamidiye Cami deprem analizi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 112, Isparta.
- Düzgün, O. A., Hatipoğlu, Y. S., Artar, M., Yurdakul, M., Öner, E. 2015. Ahmed-i Zencani Kümbeti'nin sonlu elemanlar analizi ile taşıyıcı sistem performansının belirlenmesi, 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, 1-3 Ekim, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği İnşaat Mühendisleri Odası, Tam Metin Bildiri, 201-213, Erzurum.
- Ercan, E. 2010. Tarihi yağma yapıların güvenliklerinin analitik ve deneysel yöntemlerle belirlenmesi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 211, İzmir.
- Erdal, M. 2002. Beton basınç dayanımının bazı tahribatsız test yöntemleriyle belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Ana bilim Dalı, 83, Ankara.
- Erkmen, E. 2022. Tarihi bir kümbet yapısı üzerinde dinamik kimliklendirme çalışması: Erzurum Üç Kümbetler Anonim-2 Kümbeti uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 131, Erzurum.
- Erişiş, S., Tuğrul, A., Er, S., Yılmaz, M. 2019. Bazaltik kayaların bileşim ve dokusal özelliklerinin mekanik davranışlarına etkisi. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 43(2), 259-278.
- Eurocode 2, 1992, Design of Concrete Structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, EN 1992-1-1:2004

- Eurocode 6, 1996, Design of Masonry Structures, 1995. Part 1.1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. European Committee for Standardization, ENV 1996-1-1:1995
- Fort, R., de Buergo, M. A., Perez-Monserrat, E. M. 2013. Non-destructive testing for the assessment of granite decay in heritage structures compared to quarry stone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 61, 296-305.
- Foti, D., Diaferio, M., Gianoccaro, N. I., Mongelli, M. 2012. Ambient vibration testing, dynamic identification and model updating of a historic tower. *NDT&E Int*, 47, 88–95.
- Gani, E. 2017. Tarihi Davutpaşa Kışlası'nın dinamik ölçüm destekli, yatay ve düşey yükler altında analizi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 150, İstanbul.
- Genç, A. F., Ergün, M., Günaydın, M., Altunışık, A. C., Ateş, Ş., Okur, F. Y., Mosallam, A. S. 2019. Dynamic analyses of experimentally-updated FE model of historical masonry clock towers using site-specific seismic characteristics and scaling parameters according to the 2018 Turkey building earthquake code. *Engineering Failure Analysis*, 105(10), 402-426.
- Gentile, C., Saisi, A. 2007. Ambient vibration testing of historic masonry towers for Structural identification and damage assessment. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1311–1321.
- Gentile, C., Saisi, A. 2011. Ambient vibration testing and condition assessment of the Paderno iron arch bridge (1889). *Construction and Building Materials*, 25(9), 3709–3720.
- Gülmez, S. 2005. Antik yapılarda kullanılan inşaat malzemeleri ve bu malzemelerin özelliklerinin mineralojik, petrografik, kimyasal, fiziksel, mekanik ve tahribatsız deney yöntemleri kullanılarak saptanması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 131, Isparta.
- Günaydın, M. 2018. Tarihi bir yığma minarenin onarım sonrasındaki dinamik karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(2), 381-395.
- Güneş, S. 2017. Operasyonel modal analiz tekniği ile yığma yapıların dinamik davranışının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 75, Ankara.

- Gürbüz, O. 2002. Saltuklular. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İslam Tarihi ve Sanatları Ana bilim Dalı, 195, Erzurum.
- Gürbüz, S. 2019. Nevşehir yöresindeki İğnimbiritlerin dayanımının tahmininde Schmidt geri sıçrama değerlerinin kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Ana bilim Dalı, 59, Nevşehir.
- Hökelekli, E. 2015. Manisa Hafsa Sultan Camii deprem davranışının operasyonel modal analiz yöntemiyle incelenmesi. Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 152, Manisa.
- Hökelekli, E. 2020. Yapı-zemin etkileşiminin tarihi yığma minarelerin deprem davranışına etkisi. DÜMF Mühendislik Dergisi, 11(2), 825-838.
- İşler, B. 2017. Sanat tarihi raporu. Erzurum Üç Kümbetler, Gazi Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Sanat Tarihi Bölümü, 59, Ankara.
- Kanbur, A. Y. 2022. Tek açıklıklı tarihi bir köprünün dinamik davranış parametrelerinin deneysel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 102, Erzurum.
- Kara, F. 2017. Saltuklu dönemi Erzurum kitabeleri. Türk Dünyası, Dil ve Edebiyat Dergisi, (43), 359-384.
- Karaman, K. 2020. Kaya yüzey pürüzlülüğünün Schmidt sertliği ölçümlerine etkisi. Bilimsel Madencilik Dergisi, 59(1), 15-24.
- Kılıç, İ., Bozdoğan, K. B., Aydın, S., Gök, S. G. ve Gündoğan, S. 2020. Kule tipi yapıların dinamik davranışının belirlenmesi: Kırklareli Hızırbey Camii minaresi örneği. Politeknik Dergisi, 23(1), 19-26.
- Kocaman, İ. 2017. Tarihi yığma yapıların dinamik davranışlarının hesabında gerekli malzeme özelliklerinin tayini. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 108, Erzurum.
- Kocaman, İ., Okuyucu, D., Kazaz, İ. 2019. Tarihi yapı malzeme özelliklerinin belirlenmesinde yeni bir yöntem önerisi: Lala Paşa Camii Örneği. Teknik Dergi, 30(3), 9125-9146.

- Kocaman, İ., Kazaz, İ., Özkaya, S. G. 2020. Yığma kemer köprülerde kullanılan malzeme özelliklerinin tahribatsız yöntemlerle belirlenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 22(66), 671-680.
- Kolek, J. 1958. An appreciation of the Schmidt rebound hammer. Magazine of Concrete Research, 10(28), 27-36.
- Kuşcu, İ., Kopar, İ., Bakırtaş, İ. 2019. Erzurum İlinde (Türkiye) 1907-2018 yılları arasında kaydedilen $M \geq 3.0$ depremlerin mekânsal analizi. Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 23(4) , 1607-1624.
- Küçükkuşurlu, M., Çelik, Ş. 2014. Erzurum Kalesi. Erzurum Büyükşehir Belediyesi Kültür Yayınları, (2), 154-155, İstanbul.
- Küçükkuşurlu, M. 2014. Erzurum Tabyaları ve Kışlaları. Erzurum Büyükşehir Belediyesi Kültür Yayınları, (3), 222-223, İstanbul.
- Kültür ve Tabiat Varlıkları Koruma Kanunu. 1983. Kültür ve Turizm Bakanlığı. 2863 sayılı kanun. Resmi Gazete: 23.07.1983-18113. Düstur: 5-22, 444.
- Lourenço, P. J. B. B. 1996. Computational Strategies for Masonry Structures. Phd Thesis, Delft University of Technology, Civil Engineering Department, 207, Netherlands.
- Lorenzoni, F., Valluzzi, M. R., Salvalaggio, M., Minello, A., Modena, C. 2017. Operational modal analysis for the characterization of ancient water towers in Pompeii. Procedia Engineering, 199, 3374-3379.
- Malekzade, T. 2007. İran'ın Kuzeybatısı (Azerbaycan) ve Doğu Anadolu depremselliğinin incelenmesi ve karşılaştırılması. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Ana bilim Dalı, 112, Ankara.
- Merçil, E. 2006. Müslüman Türk Devletleri Tarihi. Bilge Kültür Sanat Yayınevi, 375, İstanbul.
- Okuyucu, D. 2022. Operational Modal Analysis Method for Historic Masonry Structures: Applications, Handbook of Cultural Heritage Analysis, Edited by Sebastiano D'Amico, Valentina Venuti, Springer Nature, 01 January, Chapter in a Book, 1679-1699, Switzerland.
- Onaran, K. 1997. Malzeme Bilimi. Bilim Teknik Yayınevi, 383, Eskişehir.

- Özdoğan, D. B. 2018. Schmidt Çekici test yönteminin tarihi yığma yapılarda malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmasının araştırılması: Erzurum Kadana Camii Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 119, Erzurum.
- Özdoğan, D. 2008. Başlangıcından Osmanlı hâkimiyetine kadar Erzurum ve Çevresi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Tarih Ana bilim Dalı, 155, Elazığ.
- Özgen, S. 2009. Tarihi çevre içinde üç boyutlu çalışmaların cepheler açısından algılamaya etkisi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Ana bilim Dalı, 245, Trabzon.
- Özkan, H. 2016. Saltuklu Mimarisi. Atatürk Üniversitesi Yayınları-Güzel Sanatlar Enstitüsü Müdürlüğü Yayınları, 114-122, Erzurum.
- Özkaya, S. G. 2019. Yığma köprülerin deprem davranışlarının doğrusal olmayan statik yöntemlerle tahmini. Doktora Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 380, Erzurum.
- Özmen, B., Nurlu, M., 1999. Deprem bölgeleri haritası ile ilgili bazı bilgiler, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Haber Bülteni, 99(2-3), 32-35.
- Pastor, M., Binda, M., Harcarik, T. 2012. Modal assurance criterion. Procedia Engineering, 48, 543–548.
- Pinto, A. F., da Fonseca, B. S., Silva, D. V. 2021. Mechanical characterization of historical rubble stone masonry and its correlation with the masonry quality assessment. Construction and Building Materials, 281, 122-168.
- Sánchez-Aparicio, L. J., Riveiro, B., González-Aguilera, D., Ramos, L. F. 2014. The combination of geomatic approaches and OMA to improve the calibration of finite element models: a case of study in saint Torcato church. Construction and Building Materials, 70, 118–129.
- SAP2000, V16. 2016. Structure Analysis Program, Erzurum Teknik Üniversitesi.
- Shabani, A., Feyzabadi, M., Kioumarsi, M. 2022. Model updating of a masonry tower based on operational modal analysis: The role of soil-structure interaction. Case Studies in Construction Materials, 16(8), 1-18.

- Siyahi, B. 1986. Ultrases geçiş süresi yönteminin betona uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 53, Eskişehir.
- Sözen, Ş., Çavuş, M. 2020. Tek açıklıklı tarihi taş köprülerde form değişikliğinin köprünün sismik davranışına etkisinin değerlendirilmesi: Niksar Yılanlı (Leylekli) Köprü Örneği. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8(1), 48-59.
- Söylemez, İ. 2019. Saltukluların tarihteki yeri ve Gürcülerle mücadeleleri (1071-1202). Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Tarih Ana bilim Dalı, 65, Erzurum.
- Sür, Ö. 1993. Türkiye'nin deprem bölgeleri. Ankara Üniversitesi - Türkiye Coğrafyası Araştırma ve Uygulama Merkezi - Türkiye Coğrafyası Dergisi, 53-68.
- Tangüner, R. 2007. Uçucu küllü düşük ve yüksek mukavemetli betonların elastiklik modülünün incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 75, İstanbul.
- Taşagıl, A. 2020. Bozkırların İlk İmparatorluğu Hunlar. Yeditepe Yayınevi, 259-265, İstanbul.
- Taşyürek, M. 2016. Garip Ama Gerçek İslam Tarihi. Kahverengi Yayınevi, 64-65, İstanbul.
- Tavlı, E. 2017. Ultrasonik tomografi ve ultrases geçiş hızı yöntemiyle betonda kusur tespiti. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 71, İstanbul.
- TBDY. 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- TestLab Network. 2020. Dinamik Veri Toplama Yazılımı. Erzurum Teknik Üniversitesi.
- Türker, T., Yanık, Y. 2020. İlyasbey Camisi'nin yapısal davranışının çevresel titreşim testi ve sonlu eleman yöntemleriyle incelenmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8(2), 1431-1453.
- TS699/T1 2016. Doğal yapı taşları - İnceleme ve laboratuvar deney yöntemleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- Vasanelli, E., Calia, A., Colangiuli, D., Micelli, F., Aiello, M. A. 2016. Assessing the reliability of non-destructive and moderately invasive techniques for the evaluation of uniaxial compressive strength of stone masonry units. *Construction and Building Materials*, 124, 575-581.
- Yadollahi, M. M., Benli, A. 2015. Türkiye’ de tarihi yığma yapıların lineer olmayan sismik analiz ihtiyacı, 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, 1-3 Ekim, İnşaat Mühendisleri Odası Erzurum Şubesi, Tam Metin Bildiri, 135-144, Erzurum.
- Yakar, M., Kabadayı, A., Yiğit, A. Y., Çıkıkcı, K., Kaya, Y., Catin, S. S. 2016. Emir Saltuk Kümbeti fotogrametrik röle ve çalışması ve 3 boyutlu modellenmesi. *Geomatik Dergisi*, 1(1), 14-18.
- Yapıcı. H. 2015. Tarih boyunca Erzurum’da meydana gelen zelzeleler. *Mavi Atlas Dergisi*, (5), 14-20.
- Youssof, I. B. 2018. Türkiye’deki mevcut tarihi bir yığma yapı örneğini oluşturan duvarların düzlem dışı deprem etkileri için hasar limitlerinin irdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 54, İzmir.

EKLER

EK-1

Ölçüm 1-FDD			
FREKANS (Hz)	3,809	3,988	8,529
3,809	1	0,1687	0,03416
3,988	0,01687	1	0,009942
8,529	0,03416	0,009942	1

Ölçüm 1-CFDD			
FREKANS (Hz)	3,711	4,42	8,518
3,711	1	0,06183	0,04532
4,42	0,06183	1	0,005095
8,518	0,04532	0,005095	1

Ölçüm 1-SSI-UPCX				
FREKANS (Hz)	3,922	3,985	8,5	10,93
3,922	1	0,1546	0,03475	0,005139
3,985	0,1546	1	0,01696	0,08384
8,5	0,03475	0,01696	1	0,004896
10,93	0,005139	0,08384	0,004896	1

Ölçüm 2-FDD			
FREKANS (Hz)	3,743	3809	8,561
3,743	1	0,01789	0,03961
3809	0,01789	1	0,007722
8,561	0,03961	0,007722	1

Ölçüm 2-CFDD			
FREKANS (Hz)	3,971	4,02	8,502
3,971	1	0,07737	0,03665
4,02	0,07737	1	0,01716
8,502	0,03665	0,01716	1

Ölçüm 2-SSI-UPCX				
FREKANS (Hz)	3,874	3,938	8,401	10,78
3,874	1	0,02849	0,03119	0,003107
3,938	0,02849	1	0,008227	0,05557
8,401	0,03119	0,008227	1	0,05314
10,78	0,003107	0,05557	0,05314	1

Ölçüm 3-FDD			
FREKANS (Hz)	3,792	3,955	8,317
3,792	1	0,07501	0,04723
3,955	0,07501	1	0,005489
8,317	0,04723	0,005489	1

Ölçüm 3-CFDD			
FREKANS (Hz)	3,972	3,951	8,338
3,972	1	0,09384	0,04705
3,951	0,09384	1	0,003746
8,338	0,04705	0,003746	1

Ölçüm 3-SSI-UPCX				
FREKANS (Hz)	3,868	3,932	8,319	10,64
3,868	1	0,007379	0,03814	0,006276
3,932	0,007379	1	0,001538	0,06289
8,319	0,03814	0,001538	1	0,005799
10,64	0,006276	0,06289	0,005799	1

Ölçüm 4- FDD			
FREKANS (Hz)	3,809	3,988	8,464
3,809	1	0,04781	0,03514
3,988	0,04781	1	0,01654
8,464	0,03514	0,01654	1

Ölçüm 4-CFDD			
FREKANS (Hz)	3,82	4,085	8,384
3,82	1	0,001733	0,04372
4,085	0,001733	1	0,007366
8,384	0,04372	0,007366	1

Ölçüm 5-SSI-UPCX				
FREKANS (Hz)	3,855	3,943	8,358	10,45
3,855	1	0,006771	0,03815	0,03963
3,943	0,006771	1	0,008092	0,06324
8,358	0,03815	0,008092	1	0,0009743
10,45	0,03963	0,06324	0,0009743	1

Ölçüm 5-FDD			
FREKANS (Hz)	3,727	4,004	8,187
3,727	1	0,008632	0,0395
4,004	0,008632	1	0,01224
8,187	0,0395	0,01224	1

Ölçüm 5-CFDD			
FREKANS (Hz)	3,727	3,988	8,253
3,727	1	0,003572	0,03893
3,988	0,003572	1	0,01093
8,253	0,03893	0,01093	1

Ölçüm 5-SSI-UPCX			
FREKANS (Hz)	3,864	3,899	8,419
3,864	1	0,09682	0,01614
3,899	0,09682	1	0,03275
8,419	0,01614	0,03275	1

Ölçüm 6-FDD			
FREKANS (Hz)	3,809	3,906	7,764
3,809	1	0,05226	0,04271
3,906	0,05226	1	0,01009
7,764	0,04271	0,01009	1

Ölçüm 6-CFDD			
FREKANS (Hz)	3,76	4,004	8,209
3,76	1	0,0265	0,04174
4,004	0,0265	1	0,00773
8,209	0,04174	0,00773	1

Ölçüm 6-SSI-UPCX				
FREKANS (Hz)	3,854	3,914	8,172	10,87
3,854	1	0,0262	0,03294	0,0007205
3,914	0,0262	1	0,003413	0,07226
8,172	0,03294	0,003413	1	0,003145
10,87	0,0007205	0,07226	0,003145	1

Ölçüm 7-FDD			
FREKANS (Hz)	3,76	4,004	8,35
3,76	1	0,03618	0,035
4,004	0,03618	1	0,01951
8,35	0,035	0,01951	1

Ölçüm 7-CFDD			
FREKANS (Hz)	3,662	4,085	8,463
3,662	1	0,1067	0,04138
4,085	0,1067	1	0,003802
8,463	0,04138	0,003802	1

Ölçüm 7-SSI-UPCX				
FREKANS (Hz)	3,902	3,953	8,449	10,8
3,902	1	0,007468	0,03085	0,0003216
3,953	0,007468	1	0,01052	0,06411
8,449	0,03085	0,01052	1	0,001325
10,8	0,0003216	0,06411	0,001325	1

Ölçüm 8-FDD			
FREKANS (Hz)	3,874	3,906	8,464
3,874	1	0,09121	0,0321
3,906	0,09121	1	0,01168
8,464	0,0321	0,01168	1

Ölçüm 8-CFDD			
FREKANS (Hz)	3,841	4,069	8,526
3,841	1	0,1023	0,03773
4,069	0,1023	1	0,01142
8,526	0,03773	0,01142	1

Ölçüm 8-SSI-UPCX				
FREKANS (Hz)	3,918	3,967	8,493	10,82
3,918	1	0,0002237	0,03285	0,002108
3,967	0,0002237	1	0,005158	0,06226
8,493	0,03285	0,005158	1	0,0011
10,82	0,002108	0,06226	0,0011	1

Ölçüm 9-FDD			
FREKANS (Hz)	3,971	4,102	8,529
3,971	1	0,0365	0,02756
4,102	0,0365	1	0,009883
8,529	0,02756	0,009883	1

Ölçüm 9-CFDD			
FREKANS (Hz)	3,624	4,264	8,492
3,624	1	0,01927	0,03921
4,264	0,01927	1	0,007924
8,492	0,03921	0,007924	1

Ölçüm 9-SSI-UPCX				
FREKANS (Hz)	3,904	3,953	8,463	10,66
3,904	1	0,001044	0,03214	0,00005234
3,953	0,001044	1	0,01062	0,05812
8,463	0,03214	0,01062	1	0,004976
10,66	0,00005234	0,05812	0,004976	1

Ölçüm 10-FDD			
FREKANS (Hz)	3,711	4,085	8,187
3,711	1	0,04749	0,03522
4,085	0,04749	1	0,006322
8,187	0,03522	0,006322	1

Ölçüm 10-CFDD			
FREKANS (Hz)	3,623	3,695	8,209
3,623	1	0,03142	0,03982
3,695	0,03142	1	0,007572
8,209	0,03982	0,007572	1

Ölçüm 10 SSI-UPCX				
FREKANS (Hz)	3,821	3,862	8,16	10,41
3,821	1	0,1184	0,02772	0,002169
3,862	0,1184	1	0,01881	0,04775
8,16	0,02772	0,01881	1	0,0003285
10,41	0,002169	0,04775	0,0003285	1

Ölçüm 11-FDD			
FREKANS (Hz)	3,723	4,211	8,301
3,723	1	0,03167	0,04038
4,211	0,03167	1	0,002702
8,301	0,04038	0,002702	1

Ölçüm 11-CFDD			
FREKANS (Hz)	3,608	4,065	8,324
3,608	1	0,09899	0,05091
4,065	0,09899	1	0,0007177
8,324	0,05091	0,0007177	1

Ölçüm 11-SSI-UPCX				
FREKANS (Hz)	3,859	3,891	8,064	10,44
3,859	1	0,04611	0,0339	0,02863
3,891	0,04611	1	0,006868	0,06884
8,064	0,0339	0,006868	1	0,01596
10,44	0,02863	0,06884	0,01596	1

Ölçüm 12-FDD			
FREKANS (Hz)	3,613	3,874	8,122
3,613	1	0,06574	0,03734
3,874	0,06574	1	0,0003526
8,122	0,03734	0,0003526	1

Ölçüm 12-CFDD			
FREKANS (Hz)	3,613	4,004	8,192
3,613	1	0,06169	0,04265
4,004	0,06169	1	0,005278
8,192	0,04265	0,005278	1

Ölçüm 12-SSI-UPCX				
FREKANS (Hz)	3,812	3,863	8,141	10,46
3,812	1	0,2151	0,03786	0,0009388
3,863	0,2151	1	0,003112	0,05207
8,141	0,03786	0,003112	1	0,003957
10,46	0,0009388	0,05207	0,003957	1

