TARİHİ TOPHÂNE-İ ÂMİRE YAPISININ DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

Fuat Aktürk
181412104

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yapı Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Deprem Mühendisliği Yüksek Lisans Programı
Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Seyit Çeribaşı
İkinci Tez Danışmanı: Doç.Dr. Fuat Aras (T.C. İstanbul Medeniyet Üniversitesi)

İstanbul
T.C. Maltepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Eylül, 2020

TARİHİ TOPHÂNE-İ ÂMİRE YAPISININ DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

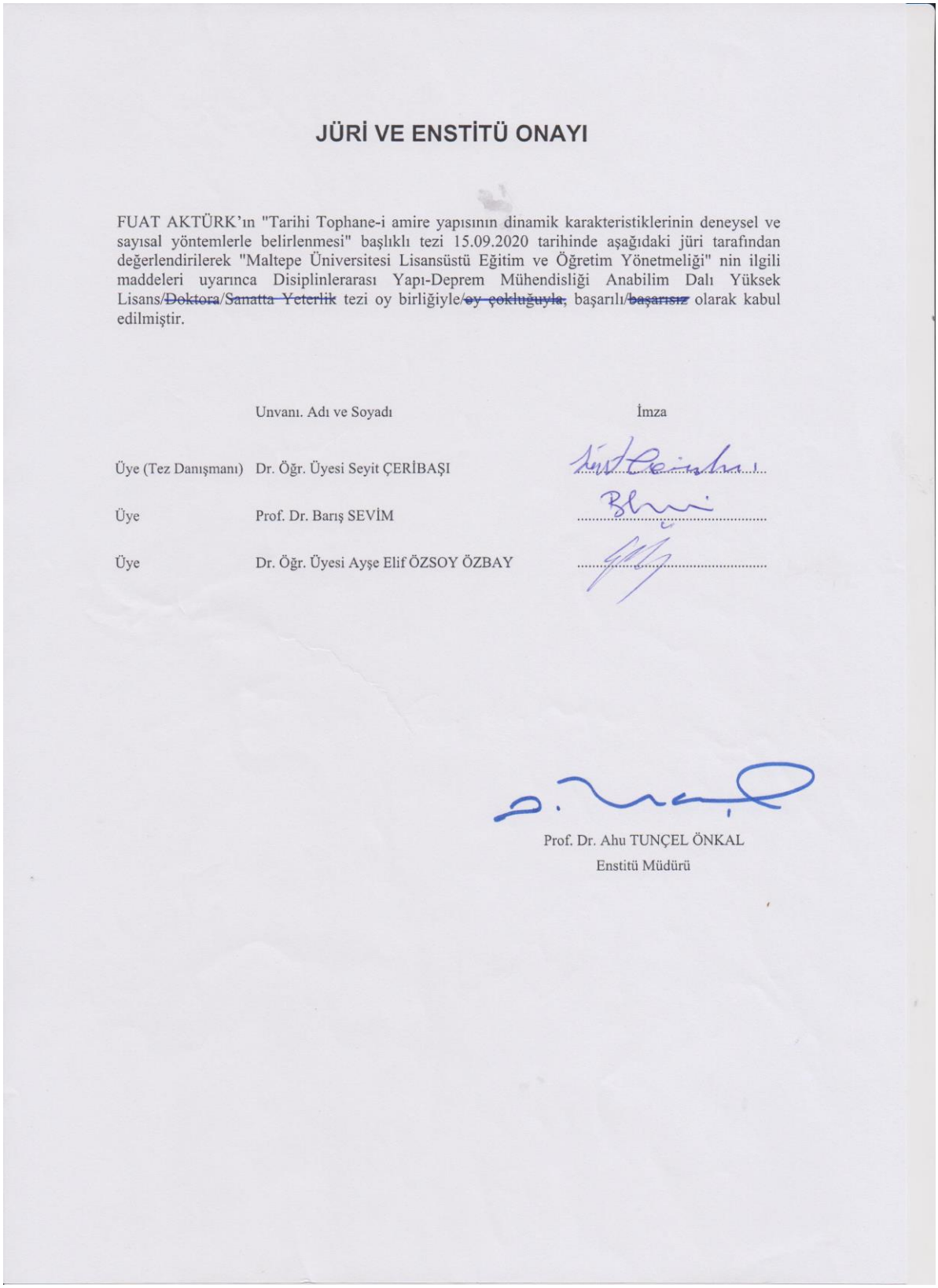
Fuat Aktürk
181412104
Orcid: 0000-0002-5880-7144

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yapı Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Deprem Mühendisliği
Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Seyit Çeribaşı
İkinci Tez Danışmanı: Doç.Dr. Fuat Aras (T.C. İstanbul Medeniyet Üniversitesi)

İstanbul
T.C. Maltepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Eylül, 2020

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI



JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

FUAT AKTÜRK'ın "Tarihi Tophane-i amire yapısının dinamik karakteristiklerinin deneysel ve sayısal yöntemlerle belirlenmesi" başlıklı tezi 15.09.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Maltepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği" nin ilgili maddeleri uyarınca Disiplinlerarası Yapı-Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans/~~Doktora~~/~~Sanatta Yeterlik~~ tezi oy birliğiyle/~~oy çokluğuyla~~, başarılı/~~başarısız~~ olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı. Adı ve Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	Dr. Öğr. Üyesi Seyit ÇERİBAŞI	.....
Üye	Prof. Dr. Barış SEVİM	.....
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Elif ÖZSOY ÖZBAY	.....

Prof. Dr. Ahu TUNÇEL ÖNKAL
Enstitü Müdürü

ETİK İLKE VE KURALLARA UYUM BEYANI

maltepe üniversitesi	LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ ETİK İLKE VE KURALLARA UYUM BEYANI	Doküman No	FR-178
		İlk Yayın Tarihi	01.03.2018
		Revizyon Tarihi	23.01.2020
		Revizyon No	01
		Sayfa	1

15.09.2020

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bulguların sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilmeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; çalışmanın Maltepe Üniversitesinde kullanılan "bilimsel intihal tespit programı" ile tarandığını ve öngörülen standartları karşıladığını beyan ederim.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Fuat AKTÜRK

Hazırlayan: Enstitü Sekreterliği	Onaylayan: Kalite Yönetim Koordinatörlüğü

TEŞEKKÜR

Tezin hazırlanması aşamasında bana her türlü desteği veren danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi Seyit Çeribaşı'ya, benimle birlikte tüm saha çalışmalarında bulunan, deneysel çalışmanın yapılmasını sağlayan, sayısal modelin oluşmasında rehberlik eden ve teknik desteğini hiçbir zaman esirgemeyen İkinci Tez Danışman hocam Doç.Dr. Fuat Aras'a, Tophâne-i Âmire'nin sayısal modelinin oluşturulmasında büyük katkısı bulunan, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, bana destek olan arkadaşım İnş. Müh. Emre İnam'a, Tophâne-i Âmirede deneysel ve sayısal çalışma yapmam için gerekli iznlerin alınmasına ve literatür taramasında bana yardımcı olan değerli mesai arkadaşım Yük. İnş. Müh. Celal Yılmaz'a, yüksek lisansa başlamama vesile olan ve mimari çalışmalarda bana yardımcı olarak desteğini esirgemeyen kardeşim mimar Gülperi Aktürk'e son olarakta aileme teşekkürlerimi sunarım.

Bu Tez konusu çalışmam olan Tophâne-i Âmirenin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesini biricik kızım Ecrin Aktürk'e ithaf ediyorum.

.

Fuat Aktürk

Eylül, 2020

ÖZ

TARİHİ TOPHÂNE-İ ÂMİRE YAPISININ DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

Fuat Aktürk
Yüksek Lisans Tezi
Yapı Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Deprem Mühendisliği Yüksek Lisans Programı
Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Seyit Çeribaşı
İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fuat Aras (T.C. İstanbul Medeniyet Üniversitesi)
Maltepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2020

Dünya kültür mirasının eşsiz eserlerinden birçoğu ülkemiz topraklarında bulunmaktadır. Ülkemizde Osmanlı İmparatorluğu ve Selçuklular Dönemi'nden birçok medrese, cami, darüşşifa, kale, türbe, hamam, köprü, su kanalları ve kervansaraylar bulunmakla birlikte, antik dönemlerden beri birçok tarihi yapı ve kalıntı da günümüze kadar ulaşmaktadır. Ancak; ülkemiz deprem kuşağında yer almakta ve özellikle Kuzey Anadolu Fay Hattının geçtiği birçok bölgede tarihi yapılarımız deprem riski ile karşı karşıya kalmaktadır. Kültürel mirasımız olan tarihi yapılar; doğal afetler, olumsuz çevre koşulları ve fiziksel-kimyasal bozulmaların yanında, insanoğlunun bu yapılara karşı aldığı tavır karşısında korunmaya ihtiyaç duymaktadır.

Tarihi yapılar da kullanılan malzemeler, yerel zeminin özelliklerine bağlı olarak, malzeme özellikleri her bölgede farklılık göstermektedir. Bundan dolayı yapılması muhtemel bir yapısal analizde seçilecek malzeme parametreleri yapının gerçek durumunu tam olarak temsil etmeyecek olup; dinamik tanımlama yöntemiyle malzeme parametrelerinin karakterizasyonu yapılmalıdır. Tarihi mirasımızın gelecek kuşaklara özellikleri bozulmadan aktarılabilmesi için söz konusu yapıların geometrik ve malzeme özelliklerinin ayrıntılı olarak bilinmesi elzemdir. Yapılacak uygun modelleme teknikleri ile tarihi yapıların yapısal analizlerinin gerçekleştirilmesi, analiz sonuçlarına bağlı olarak gerekli görülen yapıların onarım ve güçlendirmelerinin yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmanın amacı İstanbul'un fethi ile başlayarak tarihi mirasımızın önemli bir kısmını oluşturan, İstanbul/Beşiktaş'taki tarihi büyük top döküm binasının (Tophâne-i Âmire) dinamik karakteristiklerinin belirlenerek, sismik analizlerinin yapılmasıdır. Tophâne-i Âmire ile ilgili deneysel ve sayısal olarak daha önce literatürde herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu çalışma ile yapılacak bir dinamik tanımlama sayesinde söz konusu yapının performans analizi yapılacak ve elde edilen sonuçlar literatüre kazandıracaktır. Burada deneysel ve sayısal yöntemler kullanılacak olup; sayısal model, deneysel yöntemle elde edilen veriler ışığında güncellenerek analizleri yapılacaktır.

Anahtar Sözcükler: Tarihi yığma yapılar; Tophâne-i Âmire; Dinamik tanımlama; Operasyonel Modal Analiz; Sonlu Elemanlar Yöntemi, Model ayarlama.

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE HİSTORİCAL IMPERIAL ARSENAL BY EXPERIMENTAL AND NUMERICAL METHODS

Fuat AKTÜRK
Master Thesis
Department of Structure Earthquake Engineering
Structure Earthquake Engineering Programme
Thesis Advisor: Asst. Prof. Seyit Çeribaşı
Second Thesis Advisor: Assc. Prof. Fuat Aras (T.C. İstanbul Medeniyet U.)
Maltepe University Institute of Science, 2020

Our country has hosted many civilizations; has a rich cultural heritage. For this reason, many of the most unique historical artifacts of the world cultural heritage are located in the territory of our country. Although there are many madrasahs, mosques, hospital, castles, tombs, turkish bath , bridges, water channels, caravansaries from the Ottoman Empire and Seljuk Period in our country, many historical buildings and ruins have survived since ancient times. But; Our country is located in the earthquake zone and our historical buildings face earthquake risk especially in many regions where the North Anatolian Fault Line passes. Historical buildings that are our cultural heritage; it needs protection against natural disasters, adverse environmental conditions, physical-chemical deterioration and damage caused by human beings.

The materials used in historical buildings differ depending on the characteristics of the local floor, the material properties differ in each region. Therefore, the material parameters to be selected in a possible structural analysis will not fully represent the actual state of the structure; Characterization of material parameters should be done with dynamic identification method. In order for our historical heritage to be transferred to future generations without deteriorating its properties, the geometric and material properties of the structures in question must be known in detail. It is necessary to perform structural analysis with appropriate modeling techniques to be done in historical buildings and to interfere with the structures deemed necessary depending on the analysis results.

The aim of this study is to determine the dynamic characteristics and seismic analysis of the historical big cannon foundry (Tophâne-i Âmire) which is lokated in Istanbul / Beşiktaş and forms an important part of our historical heritage starting with the conquest of Istanbul. Tophâne-i Âmire have not been researched experimentally and numerically in the literature. The performance analysis of the building will be made with a dynamic definition to be made with this study and the results will bring to the literature.

Keywords: Historical masonry structures; İmperial Arsenal ; Dynamic identification; Operational Modal Analysis; Finite Elemens Method; Model tunning.

İÇİNDEKİLER

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI ii
ETİK İLKE VE KURALLARA UYUM BEYANI iii
TEŞEKKÜR iv
ÖZ v
ABSTRACT vi
İÇİNDEKİLER vii
ŞEKİLLER LİSTESİ ix
TABLOLAR LİSTESİ xv
SEMBOLLER xvi
KISALTMALAR xix
ÖZGEÇMİŞ xxi
BÖLÜM 1. GİRİŞ 1
1.1. Konu 1
1.2. Çalışmanın Amacı 3
BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ 5
2.1 İbadethane Tipi Yapıları İle İlgili Çalışmalar 7
2.2 Anıt, Saray Ve Köşk Tipi Yapıları İle İlgili Çalışmalar 15
2.3 Köprü Tipi Yapılar İle İlgili Çalışmalar 19
2.4 Kule Yapıları İle İlgili Çalışmalar 24
2.5 Diğer Yapılar İle İlgili Çalışmalar 33
BÖLÜM 3. YÖNTEM 37
3.1 Deneysel Yöntem 37
3.1.1 Zorlanmış Titreşim Testi Yöntemi (FVT) 37
3.1.2 Operasyonel Modal Analiz Yöntemi (OMA)(AVT) 40
3.1.2.1 Operasyonel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ölçüm Sistemi 43
3.1.2.2 Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (EFDD) Yöntemi 46
3.1.2.3 Stokastik Altalan Belirleme (SSI) Yöntemi 50
3.2 Sayısal Yöntem 52
3.2.1 Kabuller 52
3.2.2 Çok Serbestlik Dereceli (ÇSD) Sistemlerde Hareket Denklemleri 53
3.2.3 ÇSD Sistemlerde Serbest Titreşim 56
3.2.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi 61
3.3 Sayısal Model Güncellenmesi 65
BÖLÜM 4. TOPHÂNE-İ ÂMİRE ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMA 67
4.1 Bu Çalışma Kapsamında İncelenen Yapı 67
4.1.1 Tophane-İ Amirenin Tarihi 68
4.1.2 Tophâne-İ Âmirenin Mimarisi 76
4.1.3 Yığma Binalarda Malzeme Karakteristikleri 84
4.2. Deneysel Çalışma 90

4.2.1 Ortam Titreşim Testi 90
4.2.2 Deneysel Sonuçlar 91
4.3 Sayısal Yöntemle Dinamik Tanımlama 99
4.3.1 Tophâne-i Âmire'nin Sayısal Modeli 99
4.3.1 Tophâne-i Âmire'nin Sayısal Modelinin Ayarlanması 107
4.4 Tophâne-İ Âmire Yapısının Deprem Yükleri Altındaki Davranışı 116
BÖLÜM 5. SONUÇ 146
KAYNAKÇA 148

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1 Günümüz Ani Antik Kenti Haritası (Kars Valiliği) [6] 6
Şekil 2 Ani Antik Kenti Havan Bir Kısım Görüntü (Ebul Menuçehr Camii) [7] 6
Şekil 3 Model ayarlama aşaması [17] 12
Şekil 4 Todi Köprüsü [35] 21
Şekil 5 Todi Köprüsü Sanal 3D Model [35] 22
Şekil 6 Harmonik kuvvetin uyarılması için eksantrik kütle çalkalayıcı [25] 38
Şekil 7 Zorlanmış Titreşim Yönteminin a) şematik gösterimi b) Frekans davranış fonksiyonunun belirlenmesi (Schwarz ve Richardson, 1999). [59] 38
Şekil 8 Frekans tepki matrisi (Reto Cantieni) [60] 39
Şekil 9 Darbe çekici ile dinamik karakteristiklerin belirlenmesi (Schwarz ve Richardson, 1999) [59] 40
Şekil 10 a) Ortam Titreşim Test Şeması; R bir referans noktasıdır, k ise bir gezici noktasıdır. b) Referans noktası R ile gezici tepki noktası k sinyalleri arasındaki çapraz ilişkinin hesaplanması formülü (Schwarz ve Richardson, 1999) [59] 41
Şekil 11 Operasyonel Modal Analiz işlem Sırası 42
Şekil 12 01.08.2019 Tophâne-i Âmire ölçümünden, solda; ivmeölçer ve kutusu, sağda; ivmeölçer ve güç kaynağı 45
Şekil 13 ivmeölçerler ve veri toplama merkezi, R. Cantieni [60] 46
Şekil 14 Psd matriksinin tekil değerinin tepkisi R. Brincker ve diğ. [63] 49
Şekil 15 Rijit bir cisim serbestlik yönleri (V.Yerlici ve H. Luş) [66] 53
Şekil 16 (a)iki katlı yayma çerçevesi (b) kütlelere etkiyen kuwwetler (A.K. Chopra) [67] 53
Şekil 17 (a) iki serbestlik dereceli sistem (b)serbest cisim diyagramı (A.K. Chopra) [67] 54
Şekil 18 sönümsüz sistemin birinci titreşim modunda serbest titreşimi (a) iki katlı çerçeve, (b) a,b, c, d ve e anlardaki görünüm, (c) mod koordinatları, q1 (t); (d) yer değişiminin zaman değişimi (A.K. Chopra) [67] 57
Şekil 19 sönümsüz sistemin ikinci titreşim modunda serbest titreşimi (a) iki katlı çerçeve, (b) a,b, c, d ve e anlardaki görünüm, (c) mod koordinatları, q2 (t); (d) yer değişiminin zaman değişimi (A.K. Chopra) [67] 57

Şekil 20 Sonlu eleman (konsol kirişi) A.K. Chopra [67]..... 62
Şekil 21 Fıransız Seyyah , Mimar Ve Ressam Antoine Ignace Melling (1763-1831), İstanbul Gravürlerinden Tophâne-İ Âmire Ve Çevresinden Görünümler (Melling, A. I., (1819). Voyage Pittoresque Constantinople Et Des Reives Du Bosphore , Paris). [79] 71
Şekil 22 Tophane Meydanı Ve Top Dökümhânesini Gösteren Bir Gravür (Comte De Choiseul-Gouffier, Voyage Pittoresque De La Grèce, Paris 1822, Iı, Lv. 95) [81] 72
Şekil 23 J. F. Lewis (1805-1876) Tophane Büyük Top Döküm Binası Kapısı Giriş Saçağı Ve Rampa (Lewis (1837) J.F. Lewis Illustrarions Of Constantinopole Made During A Residence İn That Citiy İn The Years 1835, 1836 London) [82]..... 73
Şekil 24 Tophâne-i Âmire yıkılırken, H. Şahenk, 1950 73
Şekil 25 Galata Kulesi'nden Tophane-i Amire – Caner Cangül Fotoğrafları, 2008 [86] 75
Şekil 26 Tophanede Dökülen Muhteşem Toplardan İkisi (Türk Kültür Tarihi-Tophaneler) E. B. Şapolyo, 1968 [69]..... 76
Şekil 27 Tophâne-i Âmire Önünde Sergilenen Toplar, 2019 76
Şekil 28 Tophane Meydanı ve Çevresi planı (Pervititch, 1927) [88] 78
Şekil 29 Tophâne-i Âmire restorasyondan önce (E. GÖNEN, 1999) [89]..... 79
Şekil 30 Tophâne-i Âmire iç mekân (kubbe, pandantif, kemer, duvar, kolon vb. taşıyıcı sistem)..... 80
Şekil 31 Tophâne-i Âmire temel görünümü E. Gönen, 1999 [89] 81
Şekil 32 Tophâne-i Âmire Günümüz Güney Cephe (Deniz Tarafı)..... 82
Şekil 33 Tophâne-i Âmire Günümüz Kuzey Cephe (Yol Tarafı)..... 83
Şekil 34 Tophâne-i Âmire Günümüz Batı Cephe (Ön Giriş) 83
Şekil 35 Tophâne-i Âmire Günümüz Doğu Cephe (Arka Giriş)..... 84
Şekil 36 Tuğla duvar örneği (labaratuvarda oluşturulmuş) F.Aras ve g.altay [23] 86
Şekil 37 Mimar Sinan'ın üzerinde araştırmalar yaptığı ve pek çok eserinde kullandığı küfeki taşının ustası Muammer Erdoğan, nasır tutan elleriyle yarım asırdır taş kesiyor. (Küfeki taşın ocaktan kesilmesi) [95]..... 88
Şekil 38 Tophâne-i Âmire'de deneysel çalışma için ölçüm noktalarının atılması (a), (b) tüm noktalar, (c) birinci ölçüm, (d) ikinci ölçüm. (T2 referans noktasının) (T1 ve T9 yerdeki ölçümler). 93

Şekil 39 (a), (b) Dinamik ayarlama testi için nokta 4'e (T9) konulan ivmeölçer (Tophâne-i Âmire) 94
Şekil 40 Dinamik ayarlama testi için nokta 5'e (T2) konulan referans ivmeölçer (Tophâne-i Âmire) 94
Şekil 41 Tophâne-i Âmirenin deneysel çalışmasında, ölçüm noktalarından resimler (güney ve kuzey batı tarafı) (T3, T5) 95
Şekil 42 Tophâne-i Âmirenin deneysel çalışmasında, ölçüm noktalarından resimler (kuzey ve güney doğu tarafı) (T2, T4) 95
Şekil 43 Tophâne-i Âmirenin deneysel çalışmasında, ölçüm noktalarından resimler (binanın ortası güney tarafı) (T7, T8) 96
Şekil 44 Tophâne-i Âmirenin deneysel çalışmasında, ölçüm noktalarından resimler (binanın kuzey doğu ve binanın orta kuzey tarafı) (T2, T6) 96
Şekil 45 ARTeMIS yazılımıyla gerçekleştirilen baskın frekansların pik seçimi (Peak-picking), Geliştirilmiş Frekans Alanında Ayrışma yöntemi (EFDD) ve Tophâne-i Âmirenin modal özellikleri. 98
Şekil 46 Tophâne-i Âmirenin ARTeMIS yazılım programı ile elde edilen mod şekilleri 99
Şekil 47 Tophanei amire görünümünü (Kağıt üzerine oyma). Cosimo Comidas de Carbognano'dan sonra Marco Sebastiano Giampiccoli tarafından, Carbognano'dan, Descrizione topografica dello stato presente, Costantinopoli arriccchita di figure (Bassano, 1794). [100] 100
Şekil 48 Tophâne-i Âmire Vaziyet Planı (Mono Mimarlık, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Arşivi) 101
Şekil 49 Tophâne-i Âmire güney cephe görüntüsü (Mono Mimarlık, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Arşivi) 101
Şekil 50 Tophâne-i Âmire kuzey cephe görüntüsü (Mono Mimarlık, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Arşivi) 102
Şekil 51 (a) Tophâne-i Âmire doğu cephe görüntüsü (d-d kesiti) , (b) Tophâne-i Âmire batı cephe görüntüsü (b-b) kesiti) (Mono Mimarlık, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Arşivi) 102

Şekil 52 Tophâne-i Âmire Sayısal modeli; (a) malzeme özellikleri, (b) malzeme boyutları, (c) sayısal modelin güney batı görünşü (d) sayısal modelin kuzey doğu görünüşü..... 104
Şekil 53 Sayısal Modelde elde edilen önemli mod şekilleri ve dinamik parametreler. 106
Şekil 54 Ayarlama aşaması (Deneysel yöntemin 1. Modun sonuçları ile sayısal modelin güncelleme öncesi ve sonrası 1. Modun sonuçları) 108
Şekil 55 Güncellenmiş sayısal modelin (GSM) dinamik parametreleri 111
Şekil 56 Güncellenmiş sayısal modelin (GSM) elastisite modülleri 111
Şekil 57 Tophâne-i Âmire, OMA mode1 ile GSM mode 1..... 112
Şekil 58 Tophâne-i Âmire, OMA Mode2 ile GSM mode2 112
Şekil 59 Tophâne-i Âmire, OMA mod 3 ile GSM mod 4 113
Şekil 60 Tophâne-i Âmire, GSM mode 3 ve mode 5 114
Şekil 61 Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması Türkiye Haritası [103] 117
Şekil 62 Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması (a) Marmara Bölgesi (b) İstanbul Ölçeği [103] 117
Şekil 63 Tophâne-i Âmirenin sismik haritada bulunduğu nokta [102] 118
Şekil 64 Farklı sönüm oranları için azami deprem tepki spektrumu (Fuat Aras ve Gülay Altay) [24]..... 118
Şekil 65 S11 (yatay) GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri. (Deprem;sırasıyla (a) EX-LD yönü, (b) EY-TD yönü)..... 120
Şekil 66 S22 (dikey) GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri. (Deprem; sırasıyla (a) EX-LD yönü, (b) EY-TD yönü)..... 120
Şekil 67 S12 (kesme) GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri. (Deprem; sırasıyla (a) EX-LD yönü, (b) EY-TD yönü)..... 121
Şekil 68 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire kuzey cephe GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri. (Deprem; EY-TD yönü)..... 122
Şekil 69 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire iç kemer sitemi (kuzey cephe sonrası LD doğrultusu) GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri. (Deprem; EY-TD yönü) 122
Şekil 70 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire güney cephe GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri. (Deprem; EY-TD yönü)..... 123

Şekil 71 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire iç kemer sitemi (güney cephe öncesi LD doğrultusu) GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri. (Deprem; EY-TD yönü) 123
Şekil 72 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında kritik DSA kritik cephe gerilmeleri. (Deprem; EY-TD yönü) 124
Şekil 73 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında kritik DSA kritik iç kemer gerilmeleri. (Deprem; EY-TD yönü) 125
Şekil 74 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında maksimum DSA gerilmeleri (Güney cephe orta kemer), (Deprem; EY-TD yönü). 126
Şekil 75 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında maksimum DSA gerilmeleri (Güney cephe orta kemer), (Deprem; EY-TD yönü). 127
Şekil 76 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (kapı, pencere), (Deprem; EY-TD yönü). 128
Şekil 77 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (temel seviyesi), (Deprem; EY-TD yönü). 129
Şekil 78 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen minimum deprem altında DSA gerilmeleri YZ doğrultusu batı (eminönü) cephesi (Deprem; EY-TD yönü). 129
Şekil 79 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri YZ doğrultusu iç kemer (Deprem; EY-TD yönü). 130
Şekil 80 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA güney cephe gerilmeleri , (Deprem; EX-LD yönü). 131
Şekil 81 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA kuzey cephe gerilmeleri , (Deprem; EX-LD yönü).. 131

Şekil 82 S11 (yatay) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (kuzey cephe), (Deprem; EX-LD yönü).132
Şekil 83 S11 (yatay) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (güney cephe), (Deprem; EX-LD yönü).133
Şekil 84 S11 (yatay) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (Batı-Eminönü cephe), (Deprem; EY-TD yönü). 134
Şekil 85 S11 (yatay) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (Batı-Eminönü cephe sonrası iç kemer sistemi), (Deprem; EY-TD yönü). 135
Şekil 86 S11 (yatay) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (Doğu-Beşiktaş cephe), (Deprem; EY-TD yönü). 135
Şekil 87 S11 (yatay) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (Doğu-Beşiktaş cephe öncesi iç kemer sistemi), (Deprem; EY-TD yönü). 136
Şekil 88 S12 (kesme) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (güney cephe), (Deprem; EX-LD yönü).137
Şekil 89 S12 (kesme) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (güney cephe), (Deprem; EX-LD yönü).138
Şekil 90 S12 (kesme) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (batı-doğu), (Deprem; EY-TD yönü)..... 140
Şekil 91 Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (orta büyük kubbe). 142
Şekil 92 Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında güney cephe DSA gerilmeleri (düzlemdışı hareket). 142
Şekil 93 Tophâne-i Âmire taşıyıcı duvar ve kolon (kabuk ile çubuk eleman) görünümü 144

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1 Dört Farklı Kulenin Deneysel Ve Güncellenmiş Sayısal Modellerın Karşılaştırılması [51] 32
Tablo 2 Tuğlag'nın mekanik özellikleri 87
Tablo 3 Literatürdeki küfeki taşının mekanik özellikleri 90
Tablo 4 Tophâne-i Âmirenin deneysel çalışmada referans noktasındaki baskın frekanslar 97
Tablo 5 Sayısal Modelin Dinamik Özellikleri 106
Tablo 6 Güncellenmiş sayısal modelin dinamik parametreleri 110
Tablo 7 Tophâne-i Âmirenin deneysel (OMA) veriler ile ilk sayısal model (SM) ve güncellenmiş sayısal model (GSM) karşılaştırılması 115
Tablo 8 Tophâne-i Âmirenin güncellenmiş sayısal model (GSM) sonrası dinamik özellikleri 115

SEMBOLLER

ϕ_n :Doğal Mod

ω_n :Doğal frekans

X_i (t) :Dışardan zorlama bir kuvvet (Zorlanmış Titreşim Testi Yöntemi)

Y_k (t) : Yapının bu kuvvete göstermiş olduğu tepki (Zorlanmış Titreşim Testi Yöntemi)

$H_{ik}(i\omega)$:Transfer Matrisi

f :Frekans

T :Periyod

R :Referans Noktası

$G_{yy}(j\omega)$:Tepki Sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk Fonksiyonunu,

$H(j\omega)$:Frekans Davranış Fonksiyonunu

$G_{xx}(j\omega)$:Etki Sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk Fonksiyonunu (PSD),

* :Komplex Eşleniği,

T :Transpoze

n : Mod Sayısı

λ_k : Kutup Fonksiyonu

R_k : Artık Değer Fonksiyonu

ϕ_k : Mod Şekil Vektörü

γ_k : Kalıcı Katılım

α_k :$\lambda_k = -\alpha_k + j\omega_k$ Kutbun Gerçek Kısmı Olan Eksi Tarafı

U_i :$[u_{i1}, u_{i2}, ..., u_{im}]$ Matrisi

u_{ij} :Tekil Vektörlerini Tutan Üniter Bir Matris

S_i :Diagonal Bir Matris

s_{ij} :Skaler Tekil Değer

k :Denklemdeki katsayı

φ :Mod Şekil Tahmini

M : Yapının Kütle Matrisi

C : Yapının Sönümleme Matrisi

K: :Yapının Rjitlik Matrisi

F (t) :Uyarma Kuvveti

U (t) :Sürekli t Zamanındaki Yer Değiştirme Vektörü

$x(t)$:Durum Vektörü

A_c :Durum Matrisi

B_c : Katsayı Matrisi

C_a :İvme İçin Çıktı Lokasyon Matrisi

C_v :Hız İçin Çıktı Lokasyon Matrisi

C_d :Yer Değiştirme İçin Çıktı Lokasyon Matrisi

C_c :Çıktı Matrisi

D_c :Doğrudan İletim Matrisi

$x_k = x(k\Delta t)$:Örneklenen Yer Değiştirmeleri Ve Hızları İçeren Ayrık Zamanlı Durum Vektörü

u_k :Örneklenmiş Girdi

y_k :Örneklenmiş Çıktı

$A = \exp(A_c \Delta t)$:Ayrık Durum Matris

$B = [A - I]\, A_c^{-1}\, B_c$: Ayrık Giriş Matrisi

u_k :Deterministik Bir Girdi

w_k :İşlem Gürültüsü

v_k :Ölçüm Gürültüsü

$E\left[\begin{pmatrix} w_p \\ v_p \end{pmatrix}\left(w_q^T v_q^T\right)\right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix}\delta_{pq}$: Beklenen Değer Operatörü

Δpq :Kronecker Deltası

m :Kütle Matrisi

f_S :Doğrusal Davranan Sistemde Elastik Direnç Kuvvetleri

u :Yanal Ötele, Yer değiştirme Vektörü

k_j :Kat Rijitliği

V_j : Taşıyıcı Elemanlarda Oluşan Toplam Kesme Kuvveti

$\mathbf{f}_s$:Elastik Direnç Kuvveti

f_{D1} :Sönüm Kuvvei

$\dot{\Delta}_j$:Katın Şekil Değiştirmesi

$\mathring{u}_1$: Hız Vektörü

$\begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix}$:Kütle Matrisi

$\begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{pmatrix}$:Rijitlik Matrisi

$\begin{pmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{pmatrix}$:Sönüm Matrisi

ω_n :Açısal Frekans

T_n :Doğal Titreşim Peryodu

f_n :Doğal Devir Frekansı

ϕ_n :Şekil Değiştirme Biçim Vektörü

$\hat{\psi}_i(x)$:Deneme Fonksiyonu

$\mathbf{a}_e$:Dönüşüm Matrisi

L :Örnek Kiriş Eleman Uzunluğu

EI (x) :Eğilme Rijitliği

k_{ij} :Rijitlik Etki Çarpanı

E :Elastisite Modulu
E1 : Elastisite Modulu (Küfeki Taşı)
E2 : Elastisite Modulu (Küfeki Taşı- Tuğla)
E3 : Elastisite Modulu (Tuğla)
ν :Posion Oranı
P :Birim Hacim Ağırlığı
f_c :Basınç Dayanımı
c_k :Fourier serisi
EI(x) :Eğilme Rijitliği
$\bar{m}$:Çizgisel Kütle
ξ :Sönüm Oranı

KISALTMALAR

$CaCO_3$	:Kalsitin
CO_2	:Karbondioksit
$Ca(HCO_3)_2$	: Kalsiyumbikarbonat
ARTEMİS	:Deneysel Yöntem Analiz Programı
MNEXT-ERA	:Dinamik parametrelerin çıkartılması için algoritma
OSP	:Optimum Sensör Yerleşim Tekniği
(FDF-H_{ik})	:Frekans Tepkisi Fonksiyonu
$H_{ik}(i\omega)$	:Transfer Matrisi
FDF	:Frekans Tepkisi Matrisi
(FRF)	:Frekans Tepki Fonksiyonu Matrisi
FDD	: Frekans Alanında Ayrışma
EFDD	: Geliştirilmiş Frekans Alanında Ayrışma
SSI	: Stokastik Altuzay Tanımlaması
ERA	: Özsistem Gerçekleştirme Algoritması
Peak Picking-PP	: Piklerin Seçilmesi Yöntemi
KKO	:Kütle Katılım Oranı
PSD	: Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu
RSM	:Tepki Yüzeyi Modeli
RS-HDMR	: Rastgele Örnekleme Yüksek Boyutlu Model
Kriging	:Mekânsal Veriler İçin Kullanılan Enterpolasyon Tekniği
SVD	: Tekil Değer Ayrışması
SDOF	: Tek Serbestlik Derecesi
FEM	: Sonlu Elemanlar Modeli
EMA	: Deneysel Modal Analiz
İHA	:İnsansız Hava Aracı
AVT	: Ortam Titreşim Testi
FVT	:Zorlanmış Titreşim Testi
OMA	: Oparesyonel Modal Analiz
MAC	: Model Güvence Kriteri
Δf	:Frekanslar arasındaki farklar

SHM	: Yapı Sağlığı İzleme Sistemi
LD	:Boyuna Doğrultu
TD	:Enine Doğrultu
ÇSD	:Çok Serbestlik Dereceli
3D	:3 Boyutlu
SM	:Sayısal Model
GSM	:Güncellenmiş Sayısal Model
ANSYS	:Sayısal Modelleme Paket Programı
SAP 2000	:Sayısal Modelleme Paket Programı
MIDAS GEN	: Sayısal Modelleme Paket Programı
Strand7	: Sayısal Modelleme Paket Programı
ABAQUS	: Sayısal Modelleme Paket Programı
DIANA FEA	: Sayısal Modelleme Paket Programı
MIDAS GEN	: Sayısal Modelleme Paket Programı
ZC	: Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar
DD-2	:50 yılda aşılma olasılığı% 10 (475 yılda bir tekrarlanma) olan deprem yer hareketi düzeyi
DD-1	:50 yılda aşılma olasılığı% 2 (2475 yılda bir tekrarlanma) olan deprem yer hareketi düzeyi
AFAD	:Acil Afet Durum Müdürlüğü
S_s	:Kısa Periyot Harita Spektral İvme Katsayısı (Boyutsuz)
S_1	:1.0 Saniye Periyot İçin Harita Spektral İvme Ktsayısı (Boyutsuz)
PGA	:En büyük yer ivmesi (g)
PGV	:En Büyük Yer Hızı (cm/sn)
S_{DS}	:Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı (Boyutsuz)
S_{D1}	:1.0 Saniye Periyot İçin Tasarım Spektral İvme Katsayısı (Boyutsuz
T_A	:Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu (s)
T_B	:Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu (s)
DSA	:Davranış Spektrum Analizi
R	:Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayıs
EX	:X doğrultusundaki deprem
EY	:Y doğrultusundaki deprem

ÖZGEÇMİŞ

Fuat Aktürk

Yapı ve Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

Eğitim

Derece	*Yıl*	*Üniversite, Enstitü, Anabilim/Anasanat Dalı*
Y.Ls.	2020	Maltepe Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü Yapı ve Deprem Mühendisliği
Ls.	2008	(5 Yıllık Lisans Öğretim) Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği (İngilizce)
Lise	2003	Ardahan Lisesi (İngilizce hazırlık)

İş/İstihdam

Yıl	*Görev*
2017 -	İstanbul Medeniyet Üniversitesi (İnşaat Müh.)
2008-2017	Ardahan İl Özel İdaresi (İnşaat Müh.)

Mesleki Birlik/Dernek Üyelikleri

Yıl	*Kurum*
2008	Üye: İnşaat Mühendisleri Odası

Alınan Burs ve Ödüller

Yıl	*Ödül*
2012	Konya İl Jandarma Komutanlığı Üstün Hizmet Belgesi

Yayınlar ve Diğer Bilimsel/Sanatsal Faaliyetler

Kişisel Bilgiler

Doğum yeri ve yılı : Ardahan, 1984 Cinsiyet: E
Yabancı diller : İngilizce (iyi);
GSM / e-posta : fuat_akturk@hotmail.com

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Konu

Geçmişten günümüze kadar gelebilen ve gelecek nesillere bırakacağımız kültürel miraslar olan tarihi yapılar doğal afetler, olumsuz çevre koşulları ile fiziksel-kimyasal bozulmaların yanında insanoğlunun bu yapılara vermiş olduğu zararlara rağmen varlıklarını sürdürmektedir. İnsanlık tarihi boyunca yapılan tarihi yapıların birçoğu ne yazık ki günümüze kadar ulaşamamıştır. Tarihi yapıların korunması için dinamik özelliklerinin, dayanımlarının ve emniyetlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Günümüzde birçok yapı, depreme karsı yeterli dayanım gösteremezken, günümüze kadar gelebilen eski yapıların sağlam olması merak konusudur. Tarihi yapıların deprem güvenliklerini belirleyebilmek için, yapının depreme karsı dayanımının bilinmesi gerekmektedir. Dolayısıyla bu tür yapılar üzerinde gerekli bilimsel çalışmalar arttırılmalı, yapıların malzeme ve dayanım açısından güçlendirilmesi için gerekli parametreler saptanmalıdır. Bu parametreler doğrultusunda yapıların iyileştirilmesi için uygulamaya dönük ilkeleri saptamak çağımızın bir gereğidir.

Tarihi yapılar deprem gibi beklenmedik doğal afetlerle zarar görmekte veya yıkılmaktadır. Bununla beraber tarihi yapılara zarar veren etkenler sadece depremler ya da doğal afetler değildir; yapıda kullanılan yapı malzemesinin dayanımını yitirmesi, zemin oturmaları, yanlış kullanımdan kaynaklı aşırı ve düzensiz yükleme, zamana bağlı deformasyonlar, savaşlar, yangınlar ve zamanında yapılmayan ya da bilinçsizce yapılan bakım – onarım faaliyetleri tarihi yapıların yavaş yavaş yok olmalarının diğer nedenleri arasında yer almaktadır

Bu çalışmada, İstanbul ili Tophane bölgesinde bulunan Tophâne-i Âmirenin (Büyük Top Döküm Binası) dinamik karakteristikleri belirlenerek, mod şekilleri ve mod frekansları çıkarılmış, sonrasında deprem analizleri yapılmıştır. Bizans döneminde "Metopan" olarak adlandırılan, Osmanlılar döneminde ise Tophane adını alan semtte top döküm tesisleri inşasının Fatih Sultan Mehmed tarafından başlatıldığı bilinmektedir. ll. Bayezıd döneminde genişletilen top döküm tesisleri, Kanuni döneminde yıktırılmış ve

yeniden, ancak bu kez daha büyük olarak inşa edilmiştir. III. Selim döneminde başlatılan yenileme hareketleri orduda da yansımasını bulmuş ve bu dönemde Tophane semtinde top döküm tesislerine ilave olarak Nizam-ı Cedid askerlerine ait Topçu ve Top Arabacıları Kışlaları inşa edilmiştir. Bu yapılar topluluğundan günümüze sadece iki adet top döküm binası kalmıştır. Günümüzde mevcut iki top döküm binasından büyük olanı XVIII. Yüzyıl'ın ortalarına, küçük top döküm binası ise XV. Yüzyıl'a tarihlenebilir (O. Ceylan) [1].

Tophane bölgesinde yıllar içinde zamanın ihtiyaçlarına göre birçok tarihi yapı inşa edilmiş, bunlardan ancak birkaçı günümüze kadar gelebilmiştir. Günümüze kadar gelebilen Tophâne-i Âmire (Büyük Top Döküm Binası) tarihi kalıntıların üzerine inşa edilmekle birlikte malzeme özelliklerinin bilinmemesi ve taşıyıcı elemanların farklılıklar göstermesiyle yapıda çok sayıda belirsizlik bulunmaktadır. Her ne kadar, gerçek yapı üzerindeki karmaşık ölçüm teknikleri mühendislerin yapının gerçek davranışını izlemesini ve daha sonraki değerlendirmelerde kullanılacak sayısal modelleri ayarlamayı sağlasa da; Yapı sistemleri, malzeme özellikleri, modelleme teknikleri, analiz yöntemleri ve zemin etkileşimleri ile ilişkili birçok belirsizlikler tarihi yapıların değerlendirmesini zorlaştırmaktadır. Tarihi yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesinde birçok yöntem bulunmaktadır. Ancak tarihi yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesinde yapılacak işlem tarihi yapılara zarar vermemesi gerekmektedir. Tophâne-i Âmirenin tarihsel önemi ve bilinen zorluklar nedeniyle hem deneysel hem de sayısal analizler gerekli görülmüştür. Bu çalışmada, yapıya zarar vermemek ve yapının günlük kullanımına da engel olmamak için ortam titreşim testi tercih edilmiştir. Ayrıca, çevre titreşim testi son zamanlarda büyük ölçekli yapıların dinamik davranışını değerlendirmek için temel deneysel yöntem haline gelmiş ve genellikle tarihi yapıların test edilmesi için tercih edilmektedir. Elde edilen veriler önemli olmakla birlikte, binanın sonlu eleman modelininin güncellenmesi için kullanılması durumunda bu veriler daha anlamlı sonuçlar sağlayabilmektedir (Aras ve diğerleri) [2].

Bu çalışmada SAP 2000 [3] paket programı yardımıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak binanın sayısal modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan sayısal model verileri ortam titreşim testi verileri ile karşılaştırılarak güncellenmiştir. Amaç, deneysel çalışma ile elde edilen dinamik özellikler ayarlama yapılarak Sonlu Eleman Modelindeki elastisite

modülünü düzenlemektir. Aynı zamanda ileriki dönemlerde yapılacak olan ölçümlerle yapının süreç içinde dinamik karakteristiklerinin değişime uğrayıp uğramadığını kontrol etmek ve yapı sağlığı izleme açısından yapının dinamik özelliklerini literatüre kazandırmaktır.

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu projenin amacı, İstanbul ili Tophane bölgesinde bulunan Tophâne-i Âmirenin dinamik karakteristiklerini belirlemek, mod şekillerini ve mod frekanslarını çıkarmaktır. Bu tarihi yapı daha önce hiç çalışılmadığı için literatüre sunulmamıştır. Bu çalışma kapsamında Tophâne-i Âmirenin dinamik tanımlama yöntemiyle ölçümlerinin yapılması planlanmaktadır. Bu ölçümler tarihi yapının mühendislik malzemelerinin ayarlanması açısından önem arz etmektedir. Bu ayarlamanın önemi güvenilir bir sonlu eleman modeli oluşturduktan sonra, doğru analiz sonuçlarının elde edilmesidir. Aksi takdirde bu tarihi yapının oluşturulacak sonlu eleman modeli ile yapılacak sismik analizleri güvenilir sonuçlar vermeyeceği için gerçek bir sismik aktivitede öngörülemeyen hasarlar meydana gelecektir. Doğru malzeme ayarlanması ve güvenilir sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasıyla yapıların literatüre göre zayıflıkları belirlenerek doğru güçlendirme teknikleri ile çözüm önerileri sunulması da olası çıktılar arasındadır. Ancak bu projenin öncelikli amacı doğru malzeme parametreleri ve güvenilir sonlu elemanlar modeli ile tarihi yapının mevcut durumunun performans değerlendirilmesinin yapılmasıdır. Bu çalışmadaki hedefer aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

İlk aşamada; Ortam Titreşim Testleri yardımıyla ivmeölçerler yerleştirilip kayıt almak, alınan kayıtlar ARTEMİS programı kullanılarak OMA yardımıyla yapının deneysel dinamik karakteristiklerini ortaya çıkarmak. İkinci aşamada; sonlu eleman yöntemiyle SAP 2000 paket programında Tophâne-i Âmire'ye ait güvenilir bir 3D sayısal model oluşturularak, dinamik tanımlama yöntemi ile mod şekillerini ve frekanslarını çıkarmak. Üçüncü aşamada; elde edilen deneysel veriler yardımıyla 3D sayısal model malzeme özellikleri dikkate alınarak ayarlanıp, mevcut yapıyı en iyi şekilde temsil edecek 3D sayısal model oluşturmak. Son aşamada ise; yapının mevcut durumunu temsil edecek en uygun hale getirilen sayısal model, lineer olmayan analiz ile yapının mevcut durumunun sismik tayini yapmaktır.

Kahraman ve diğerleri, [4] Evliya Çelebi Seyahatnamesinde; Tophane bölgesi Fatih Sultan Mehmet'in İstanbulu fethinden önce ormanlık alan olduğu ve içinde bir adet manastır olduğu yazar. Bu manastırın yerinde şu an Cihangir Camisinin olduğundan bahseder. Evliya Çelebi Seyahatnamesinde anlaşılacağı üzere Tophâne-i Âmire Yapılarının olduğu alanda herhangi bir yapı olmadığı anlaşılmaktadır. Diğer taraftan; Osmanlı müelliflerinden Hâfız Hüseyin Ayvansarâyî (Ö. 1787) [5], Hadîkatü'l-cevâmi' adli eserinde, Tophane'nin "bir rivayete göre" Bizans döneminden kalma bir yapı olup, fetihten sonra tekrar mamur hale getirildiğini; başka bir rivayete göre ise, fetihten sonra inşa edilip Osmanlı padişahları tarafından peyderpey genişletildiğini ihtiyatlı bir üslup ile ifade eder. Kahraman ve diğerleri [4], Evliya çelebi İstanbul'un fethinden sonraki yıllarda, önce Fatih Sultan Mehmet ağaçlık içinde bir derli toplu tophane inşa ettiğini, sonra II. Bayezîd Han-ı Velî de genişletip odalar yaptığını seyahatnamesinde yazar.

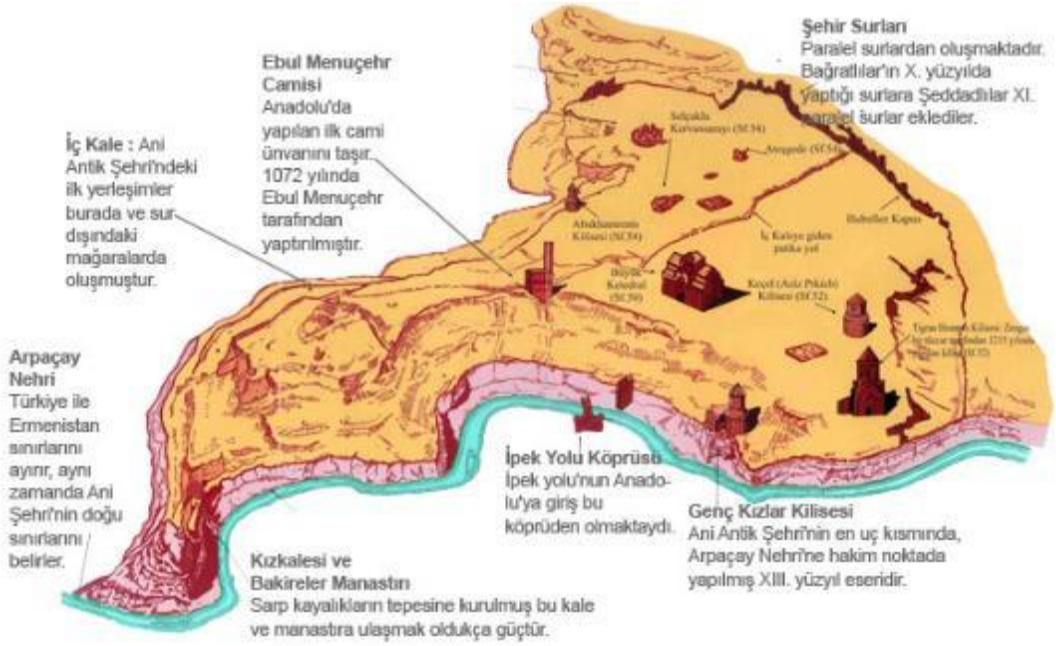
Günümüzde Cihangir Cami ile Tophâne-i Âmire Yapıları arasıında Kaptan-ı Derya Kılıç Ali Paşa Camii, Kılıç Ali Paşa Hamamı, Kabataş Mustafa Ağa Camii, Tophane Çeşmesi, Tophane Kasrı, Nusretiye Camii, Bizans Kalıntıları, Galataport Limanı, Süheyl Bey Camii, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi binaları gibi birçok yapı bulunmaktadır. Tophâne-i Âmire tarihi kaynakladan da anlaşılacağı üzere günümüze kadar birçok yapım ve onarımdan geçmiştir. Farklı dönemlerde çeşitli yapım ve onarım gören Tophâne-i Âmire yapılarında dinamik karakteristikleri; gerek kullanılan benzer malzeme, gerekse ilk inşa edildiği yerdeki mevcut durumu açısından İstanbul ilindeki tarihi yığma yapılarla kıyaslanması bir diğer ulaşılması planlanan hedeftir.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Deneysel ve sayısal çalışma ile yapıların dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi çok yaygın bir yöntem olup; bu yöntemler köprü, saray, anıt, ibadet yapıları, kule ve kale gibi birçok tarihi yapı ile rüzgâr tirbünleri, nükleer santraller, barajlar gibi birçok özel yapıda kullanılmaktadır. Dünyamız geçmişten günümüze kadar çok sayıda medeniyetlere ev sahipliği yapmıştır. Bu medeniyetler kendi ihtiyaç, kültür ve mimarilerine göre birçok yapı inşa etmiştir. Bu yapılar arasında ibadethaneler, saraylar, köprü tipi yapılar, kaleler ile kuleler, sanayi yapıları, anıtlar vb. gibi farklı amaçlı birçok tarihi yığma yapı bulunmaktadır.

Ülkemiz bulunduğu konum ve tarihi itibariyle dünya kültür mirasının en güzel örneklerini barındırmaktadır. Antik dünyanın yedi harikasından ikisi olan Halikarnas Mozolesi ile Artemis Tapınağı ülkemiz sınırları içinde bulunmaktaydı. Bunlardan Halikarnas Mozolesi Bodrumda, M.Ö. 350 yılında inşa edilmiş, ancak çevre ve insan faktörlerinden dolayı yıkılan anıtın sadece kalıntıları günümüze kadar ulaşabilmiştir. Yıkılan anıtın taşları ise bodrum kalesi yapımında kullanılmıştır. Mevcut durumda mozole alanı, açık hava müzesi olarak ziyaret edilmektedir. Bir diğer anıt olan Artemis Tapınağı ise Selçuk, İzmir'de M.Ö. 550 yılında tamamen mermerden inşa edilmiş, ancak günümüzde sadece birkaç mermer kalıntısı kalmıştır.

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığının resmi sitesinde bahsedildiği gibi [6], tarih öncesi dönemlerden itibaren çeşitli kültürlere ev sahipliği yapmış olan Ani Ören Yeri Kars ilimizde bulunmaktadır. İpek Yolunun Kafkaslardan Anadolu'ya ilk giriş noktasında bulunan Ani, ortaçağ döneminde bölgenin politik, kültürel ve ekonomik merkezi olmuştur. Büyük oranda ayakta kalmış olan etkileyici surları ile dini, sivil mimarlık örnekleri ve şehir planlamasıyla Ani bir Ortaçağ kenti özeti niteliğindedir. Ateşgede Tapınağı, çeşitli plandaki kiliseler ve Selçuklu Dönemine ait cami gibi farklı dinlere ait yapıları bir arada bulunduran Ani, Ortaçağ Dönemi mimarlık ve şehircilik tarihi içinde de özel bir yere sahiptir.



Şekil 1 Günümüz Ani Antik Kenti Haritası (Kars Valiliği) [6]



Şekil 2 Ani Antik Kenti Havan Bir Kısım Görüntü (Ebul Menuçehr Camii) [7]

Bahsedilen yapılardan Artemis Tapınağı ile Halikarnas Mozolesi günümüze ulaşamamıştır. Ani antik kenti (Şekil 1, Şekil 2) ise bünyesinde bulundurduğu birçok tarihi yapısını yitirmiş, ancak ağır hasarlı birçok tarihi yapısıyla da günümüze kadar ulaşabilmiştir. Tarihi mirasımız olan kültürel yapıların korunması durumunda gelecek nesillere bozulmadan aktarılabilmesi aşikârdır.

Bu bölümde tez konusuyla alakalı literatür taraması yapılarak tarihi yapılar ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar incelenmiş, tarihi yapıların (köprü, kule, anıt, saray, ibadethane vb.) dinamik özelliklerinin deneysel ve sayısal yöntemlerle nasıl elde edildiği özetlenmiştir. İtalya'daki tarihi yapıların çokluğu ve İtalya'nın deprem bölgesinde olması nedeniyle araştırmaların çoğu İtalya kaynaklı olmuştur. Literatür araştırmasında anlaşılacağı üzere deneysel ve sayısal çalışma ile yapıların dinamik karakterizasyonlarının elde edilmesi çok yaygın bir yöntem olup; köprü, saray, anıt, ibadet yapıları, kule ve kale gibi birçok tarihi yapıda olduğu gibi rüzgâr tribünleri, nükleer santraller, barajlar gibi birçok özel yapıda da kullanılmaktadır.

2.1 İbadethane Tipi Yapıları İle İlgili Çalışmalar

R. A. Votsis ve diğerleri [8], Kıbrıs'taki iki tarihi eserin, Gazimağusa'daki St. Nicholas Katedrali ve Güzelyurt'taki St. Mamas Kilisesi'nin dinamik özelliklerini araştırmışlardır. Ortam titreşim testi yaklaşım yöntemi kullanılarak, her iki yapı için düşük modların frekansları ve mod şekilleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sonlu eleman modellerinin güncellenmesinde kullanılmıştır. Sonlu eleman modelinde yapının her bölünmüş elemanlarında farklı bir elastisite modülü yerine tek bir elastisite modülü kullanılmış. Deneysel ve sayısal çalışmaların dinamik özellikleri arasında karşılaştırmalar yapılmış ve sonuçlar çıkarılmıştır. St.Nicholas Katedrali için oluşturulan sonlu eleman modelindeki taşın elastisite modülü başlangıçta 603MPa olarak belirlenmiş ve bu esneklik modülü ile temel frekans 0.834 Hz olarak bulunmuş. Deneysel çalışma ile elde edilen ilk frekansla eşleştirmek için tüm elemanların esneklik modülü 702MPa olarak değiştirilmiştir. İki yapı arasındaki taşların benzerliğinden dolayı; St. Mamas Kilisesi için oluşturulan sayısal modeldeki taşın elastisite modülü başlangıçta St.Nicholas Katedralinde olduğu gibi 603MPa olarak belirlenmiş ve bu esneklik modülü ile temel

frekans 2.13 Hz olarak bulunmuş. Deneysel çalışma ile elde edilen ilk frekansla eşleştirmek için tüm elemanların esneklik modülü 425MPa olarak değiştirilmiştir.

V. Compan ve diğerleri [9], Almanya'nın güneyindeki Bavyera'daki Bamberg yakınlarındaki Bad Staffelstein kasabası yakınlarında bulunan bir bazilikanın dinamik özelliklerini, sayısal ve deneysel yöntemler kullanılarak incelemişlerdir. Balthasar Neumann tarafından tasarlanan geç dönem Barok-Rokoko bazilikası 1743-1772 yılları arasında inşa edilmiştir. Katolik Kilisesi'nde, özellikle de Kara Ölüm zamanında Almanya'da bir araya getirilen bir grup aziz olan On Dört Kutsal Yardımcıya ithaf edilmiştir. Bu bazilika, tonozlarının aralarında çarpık birleşimler içeren karmaşık bir uzaysal geometriye sahip olması ve kullanılan inşaat tekniğiyle eşsiz bir yapıdır. Bu anlamda, Avrupa'da bu karmaşıklık düzeye sahip birkaç örnekten biridir. Yapılan çalışmada Bazilikasının ilk sekiz titreşim modu, bir ortam titreşim testi sırasında yapılan ölçümlere operasyonel modal analiz metodolojisinin uygulanmasıyla tahmin edilmiş. EFDD ve SSI sonuçları için MAC değerleri 0.76 ile 0.95 arasında değişen, sekiz titreşim modu ve ilişkili doğal frekansları ve titreşim modları tanımlanarak tablo halinde sunulmuştur. Yapının ortalama modal sönüm oranları SSI ve EFDD teknikleri için sırasıyla% 2.44 ve% 2.54 olduğu belirtilmiştir.

İ. Çalık ve diğerleri [10], Trabzon İli Araklı İlçesi Bereketli Mahallesinde bulunan ahşap malzemeden yapılmış Masele Camisinin ve minaresinin dinamik karakteristikleri ile ilgili çalışma yapmışlardır. Yapı 2014 yılında Trabzon Vakıflar Bölge Müdürlüğünce restorasyon geçirdiğinden, yapıda çevresel titreşim yöntemi kullanılarak restorasyon öncesi ve sonrası dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Restorasyon kapsamında yapıya ait taşıyıcı elemanlardan zayıf olanların yenilenmesi ve bağlantı noktalarının güçlendirilmesi sebebiyle yapının rijitliği artmış, böylelikle caminin ve minaresinin ilk üç moduna ait doğal frekansların sırasıyla %24 ile % %27 oranında artış olduğu belirtilmiştir. Diğer taraftan sönüm oranların dada farklılıklar olduğu ifade edilmiştir.

P. Pachón ve diğerleri [11], İspanya'nın Sevilla kentinde bulunan ve 15. Yüzyıl başlarında inşa edilen San Jerónimo de Buenavista Manastırının dinamik karakteristiklerini sayısal ve deneysel yöntemler kullanılarak incelemişlerdir. San Jerónimo Manastırı beş ana bina olarak inşa edilmiş (kilise, doğu manastır, ana manastır,

kule ve matbaa) olup, günümüzde ana manastırın sadece bir kısmı ile kilise kulesi ayakta kalmıştır. Yapı 1964 yılında kültürel miras ilan edilmiş ve bir çok defa restorasyon geçirdiği ifade edilmiştir. Mevcut yapının taşıyıcı elemanlarında birçok hasar olduğu dile getirilmiştir. Manastırın yapısal hasarlarının ağırlaşması nedeniyle, Seville Kent Konseyi Şehir Planlama Dairesi onayı alınarak mimarlar, mühendisler, arkeologlar ve tarihçilerden oluşan çok disiplinli bir çalışma ekibi 2015 yılında yapı sağlığı durumu hakkında bir çalışma yürütmüş. Bu çalışmada kolonlarda ve zeminde ortam titreşim testleri, arkeolojik testleri, tomografi ve sonik dalga testleri ile georadar testleri dahil olmak üzere karmaşık sayısal analizler ve orta derecede tahribatlı ve tahribatsız testler yapımışlardır. P. Pachón ve diğerleri bu projede elde edilen deneysel ve sayısal bilgilerden faydalandıklarının belirtmişlerdir. Bu çalışmada ilk olarak, yapının modal özelliklerinin ön tanımlaması için ortam titreşim testi yapılmış. Daha sonra, manastırın ayrıntılı üç boyutlu sonlu eleman modeli önceden tanımlanmış mod özelliklerine uyacak şekilde ayarlanmış. Son olarak, Optimum Sensör Yerleşim Tekniği (OSP) kullanılarak uzun vadeli bir yapı sağlığı izlemesi sistemi için en uygun sensör sayısı yerleşimi belirlemişlerdir.

C. Hansapinyo ve diğerleri [12], Tayland, Chiangmai, Phrathat Doi Suthep tapınağında iç mekânı olmayan, katı ters zil şeklinde geometriye sahip, tuğla duvarlardan inşa edilmiş Cedi'nin temel dinamik özelliklerini, sonlu eleman yöntemi ile ortam titreşim testleri kullanarak incelemişlerdir. Yapılan sonlu elemanlar analizinin x, y ve burulma yönlerindeki birinci modların doğal frekansları 3.817 Hz, 3.836 Hz ve 9.294 Hz, ortam titreşim ölçümlerinin frekansları 4.086 Hz, 4.025 Hz ve 10.819 Hz olarak bulunmuş. Sayısal ve deneysel yöntemlerle elde edilen frekanslar aradaki farklılıklar sırasıyla %6,59, %4,70 ve %14,09 olduğu ve benzer değerler verdiği belirtilmiştir. Her iki sonuç da temel frekansın sert bina karakteristiği (yaklaşık 4.0 Hz) aralığında olduğu, ancak üst kısımda yüksek hareket olduğu ifade edilmiş. Binanın yüksekliği yaklaşık 22.35 m olmasına rağmen, frekans değeri düşük katlı (2 veya 3 katlı) betonarme binalarınkine eşdeğer olduğundan, deprem altında binada yüksek sismik kuvvetin üretilebileceği tahminine varmışlardır.

K. Beyen [13], 7 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sırasında hasar gören Fatih camisinin yapısal davranışlarını incelemiştir. Fatih Camii, 1463-1470 yılları arasında

İstanbul'da inşa edilen ilk büyük Türk kompleksidir. 1766 yılında meydana gelen ciddi bir deprem sırasında büyük bir kısmı yıkılmış. 1772 yılında günümüzdeki haliyle yeniden açılmıştır. Bu çalışmada; yapısal modellerin ve yöntemlerin sonuçları, güvenilir dinamik karakteristikleri tanımlamak için çapraz doğrulanmış. Fatih camisi için ortam ölçümleri alınmış, sayısal modeller oluşturulmuş ve deprem kayıtları incelenmiştir. Fatih kaydının hesaplanan elastik tepki spektrumu, 0.55 s (geniş bant karakteristiği ile) periyodundan daha büyük genliklere ve tasarım spektrumunun genliklerinden (50 yılda% 10 aşılma olasılığı ile) daha büyük genliklere sahip olduğu belirtilmiş. Yapının ilk modu, KG ve DB yönleri için sırasıyla 2.4 ve 2.5 Hz olup; sismik yükün baskın geniş bant periyod aralığına girdiği sonucuna varılmış. Böyle bir eşleşme, deprem sırasında meydana gelebilecek rezonans olasılığını ortaya çıkardığı ifade edilmiştir. Depremin süresi ve rezonansa ek olarak birçok küçük depremin takip ettiği şoklar hasara katkıda bulunan kilit unsurlar olabilir. Özellikle Kuzeybatı ana kemerinin tepesinde yer alan istasyon 3, son 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi ile karşılaştırıldığında, gelecekte İstanbul'un yeni beklenen depreminde daha küçük bir büyüklükle bile yoğun hasara maruz kalabileceği sonucuna varmıştır.

M. Alberto Chiorino ve diğerleri [14], sayısal ve deneysel yöntemler kullanarak dünyadaki en büyük eliptik kubbesine sahip (37.15 m × 24.80 m eksenleri) Mondovì/İtalya yakınlarında bulunan Vicoforte Tapınağı'nın dinamik özelliklerini incelemişlerdir. Yapı 1596 yılında inşa edilmiş olup; yapıda zemin oturmalarından kaynaklı geniş çatlaklar oluşmuş. Yapı kubbenin çökme endişesi nedeniyle 1983 yılında güçlendirilmiş olduğu belirtilmektedir. Bu çalışmada çevresel titreşim testleri kullanılarak yapının gerçek frekans ve modları ortaya çıkarılmış. Ansys paket programında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal model oluşturulmuştur. Deneysel modelden elde edilen güncel mod ve frakans verileri kullanılarak, Poisson oranı(ν) ile Elastisite modülü(E) optimize edilmiş ve sayısal model güncellenmiştir. Sayısal model parametrelerinden 0.4 olarak alınan Poisson oranı(ν) 0.38, 1635 Mpa olarak alınan Elastisite modülü (E) ise 2330 Mpa olarak güncellenmiştir.

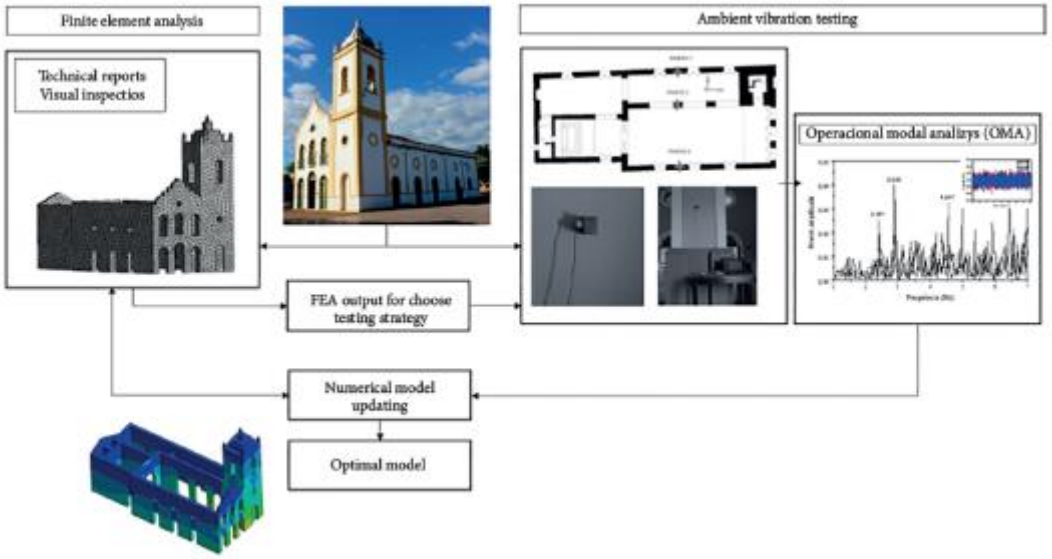
İ. Çalık ve diğerleri [15], Doğu Karadeniz Bölgesi'nde farklı geometrik boyutlara sahip yedi tarihi ahşap caminin deneysel dinamik özelliklerini, Ortam Titreşim Testi ve Geliştirilmiş Frekans Alan Ayrışması (EFDD) yöntemini kullanılarak belirlemişlerdir. Bu

camilerin deneysel dinamik davranışları başlangıçta elde edilen doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları kullanılarak karşılaştırılmıştır. Çalışma konusu camiler sırasıyla Araklı/Trabzon Bereketli Camii (6.39m × 8.98m), Dernekpazarı/Trabzon Günebakan Camii (9.05m x 9.22m), Sürmene/Trabzon Kuşluca Camii (8.50m x 10.98m), Çaykara/Trabzon Taşkıran Camii (9.60m x 11.3m), Çaykara/Trabzon Taşören Camii (8.70m x 13.63m), Kalkandere/Rize Hüseyin Hoca Camii (9.48m x 10.05m) dir. Bu bölgesel tarihi ahşap camilerin birinci, ikinci ve üçüncü doğal frekansları sırasıyla 2.251 Hz ile 6.361 Hz; 3.030 ve 6.859 Hz; 4.487 ve 8.648 Hz arasında değiştiği belirtilmiş. Aynı zamanda bu bölgesel tarihi ahşap camilerin ilk üç modun sönüm oranları % 4'ten az olduğu sonucuna varılmıştır.

E. Spoldi ve S. Russo [16], Nepalde bulunan ve 1979 yılında UNESCO'nun Dünya Kültürel Mirası listesine yazılmış Radha Krishna ile Bhimsen tapınaklarının dinamik davranışlarını ortam titreşim testi, mikro titreşim analizi ve sayısal analiz yoluyla incelemişlerdir. Bu yapılar 2015 yılında Katmandu ve vadisini vuran depremde zarar görmüştür. Her iki yapının Sayısal modelleri literatürde bulunan mekanik parametreler üzerinde ayarlanmış. Deneysel sonuçlar ve sayısal model (ANSYS paket programı) değerleri arasındaki fark Radha Krishna tapınağında% 100'den ve Bhimsen tapınağı % 70'den fazla olduğu ifade edilmiş. Bu sonuçlar göz önüne alındığında, sayısal modeller deneysel sonuçları üzerinde ayarlanmıştır. Elde edilen dinamik özellikler literatüre kazandırılmıştır.

E. Mesquita ve diğerleri [17], 1880 yılında Sobral, Brezilya'da inşa edilen tarihi bir kil-tuğla yapı olan Nossa Senhora das Dores Kilisesi'nin dinamik özelliklerini incelenmiş ve yapı sağlığı izlemesi için literatüre kazandırmışlardır. Yapı çevresel titreşim testi kullanılarak ilk üç doğal frekansı belirlenmiş, elde edilen verilerle 3D sonlu elemanlı sayısal model ayarlanmıştır. Yapılan işlem sırasıyla 1- Sonlu Elemanlar Analizi (FEM), 2- Ortam titreşim testi, 3- Operasyonel modal analiz, 4- Sayısal model güncelleme olarak gerçekleştirilmiştir. Yapının sonlu eleman analizi ANSYS programıyla yapılmış, sayısal model her biri 6 serbestlik derecesine sahip 93380 düğümden ve 53889 tetrahedral elemandan oluşmuştur. Sayısal ve deneysel model ile elde edilen doğal frekanslar arasındaki farkların en aza indirilmesi için elastik modül "güncelleme parametresi" olarak seçilmiş. Yapılan güncelleme ile elastik modülün

optimal değeri 1.70 GPa olarak belirlenmiş. Model ayarlamadan sonra deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki maksimum sapma genellikle % 5 olarak kabul edilmekte olup, bu çalışmada maksimum sapma % 2.63 olarak bulunmuştur. Ayrıca, sayısal modelde yapılan analiz sonucunda; yapı ana cephesinin etrafındaki alanda gerilmelerin (0.58 MPa), kabul edilen çekme dayanımından (0.16 MPa) yüksek olduğu, bu gerilmelerin yapıda mevcut durumundaki çatlak olan bölgelere denk geldiği belirtilmiştir.



Şekil 3 Model ayarlama aşaması [17]

İ. Kazaz ve diğerleri [18], Diyarbakırda bulunan ve 16. Yüzyılda inşa edilmiş olan Şeyh Mutahhar Camii Minaresini (Dört ayaklı minare) sonlu elemanlar yöntemi kullanarak oluşturulan sayısal modelle incelemişlerdir. Minare gövdesi sadece dört silindirik bazalt sütun üzerinde serbestçe durmasıyla özgün bir yapıdır. Sütun bölümünün tüm derinliğini geçen destek sütunlarından birinde bir çatlak mevcut olup, bu çatlakların ne zaman ve nasıl geliştiği bilinmemektedir. Yapının sayısal modeli ANSYS paket porogramı ile oluşturulmuş. Literatür araştırması yapılarak, bazalt olan dört ayaklı sütünların ve minarenin taşıyıcı elemanlarının Elastisite modülü 45 GPa olarak alınmıştır. Sayısal model analizinde, yapıda çekme gerilemeleri tasarım gerilmelerinin altında olduğu, yapıda mevcut olan çatlakların olumsuz hava koşullarının taşın mekanik özelliklerini bozmasından veya insan müdahalesi sonucu oluşabileceği belirtilmiştir. Şeyh Mutahhar Camii Minaresini (Dört ayaklı minare) insanoğlunun müdahalesi olmadıkça gelecekte de ayakta kalabileceği sonucuna varılmıştır.

Y.S. Erdoğan ve diğerleri [19], tarihi Sultan Ahmet Camii minaresinin sismik davranışlarını kuvvetli deprem hareketi altında incelemişlerdir. Minarenin malzeme parametrelerini belirlemek için ortam titreşim ölçümleri ve malzeme testleri yapılmış. Sayısal model oluşturulmuş, deneysel yöntemlerle ve malzeme testlerinden çıkarılan parametreler kullanılarak sayısal model ayarlanmıştır. Ayarlanmış sayısal model ile doğrusal olmayan sismik analiz yapılmıştır. İlk dört moda göre ayarlanmış frekanslarla deneysel frekanslar arasında sırasılya %0, %4.9, %1.9, %7,3lük bir fark ortaya çıktığı ortaya konulmuş. Sayısal model analizlerinde minberde çok yüksek gerilim değerleri gözlenmiş, Ancak; bu yüksek gerilme değerleri altında minarede toplu göçme beklenmediği belirtilmiştir.

K. Hamdaoui ve diğerleri [20], Ürdünde bulunan ve 1247 yılında inşa edilen Ajloun Cami'sinin minaresinde ivmeölçerler kullanarak ortam titreşim testi yöntemiyle deneysel çalışma yapmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak SAP 2000 paket programı yardımıyla sayısal model oluşturmuş. Sonrasında deneysel çalışma ile elde edilen verilerle sayısal modeli güncellemişlerdir. Minare gövdesi iki ayrı düz yüzlü kireçtaşı bloktan yapılmıştır. Caminin pencere etrafında enkaz taş numuneleri alınarak laboratuvarda test edilmiş ve malzemelerin mekanik özellikleri tespit edilmiş. Yapılan labarotuvar testinde malzemelerin elastisite modülülleri 2100 MPa ile 1700 MPa bulunmuştur. Ajloun cami minaresinin sayısal model ile elde edilen frekanslar ile deneysel metod ile elde edlen doğal frekanslar arasında, 3. ve 4. frekans hariç, benzerlik olduğu ve birbirine uyumlu olduğu belirtilmiştir. Sayısal yöntemin 3. ve 4. frekansları ile deneysel yöntemin 3. ve 4. frekansları arasındaki büyük farklılıklar önemli olmadığı, çünkü ilgili modların katkısı çok küçük olacağı ortaya konulmuştur (% 3'ten az veya daha az olmayacak).

L. F. Ramos ve diğerleri [21], Portekiz'in Guimaraes kentindeki Saint Torcato kilisesinde yapı sağlığı izleme sistemi için dinamik araştırmalar yapmışlardır. Portekizin önemli yapılarından olan kilise uzunluğu 57.5 m, genişliği 17.5 m ve ve ortalama yüksekliği 26.5 m olarak 1871 ile 2008 yılları arasında inşa edilmiştir. Yapım yılı çok uzun sürdüğünden yapıda farklı malzemeler kullanıldığı bildirilmiştir. Mevcut durumda yapıda çok sayıda çatlak ve deformasyon olduğu belirtilmiş. Yazarlar, mevcut durumu kontrol etmek ve gelecekteki restorasyon çalışmalarına ışık tutmak için deneysel ve

sayısal çalışma yaparak sayısal model ayarlama gerçekleştirmişlerdir. Kilisenin 2009'dan beri sürekli bir dinamik sistemle izlendiği ifade edilmiş. Bu izlemenin; kilisedeki hasarların ilerlemesini kontrol etmek, yapılacak olan güçlendirme-restorasyon çalışmalarının başarısını değerlendirmek ve uzun vadede yapı sağlığını izlemek için kullanılacağı belirtilmiştir. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalarda; tarihi yapının ilk dört modun deneysel doğal frekansları sırasıyla 2.14 Hz, 2.63 Hz, 2.85 Hz ve 2.93 Hz olarak elde edilmiş, sayısal modelin frekansları ise sırasıyla 2.14 Hz, 2.55 Hz 2.93 Hz ve 2.94 Hz olarak güncellenmiştir. Modal Güvence Ölçütleri sırasıyla MAC1: 0.93, MAC2: 0.86, MAC3: 0.83 ve MAC4: 0.77 gibi iyi bir eşleşme kabul edilen (MAC4 hariç) 0.80'den büyük MAC değerleri elde etmişlerdir. Güncellenmiş sayısal model ile deneysel model arasında çok iyi bir uyum olduğu sonucuna varmışlardır.

G. Milani ve diğerleri [22], Beytüllahim'deki Doğuş Kilisesi narteks'inin dinamik karakteristiklerini sayısal olarak incelemiş ve deprem analizini yapmışlardır. Yapım ve onarımları hakkında çok fazla bilgi bulunmayan Narteks, kilisenin önünde olup; Kilise cephesi kadar uzun ve yaklaşık altı metre genişliğindedir. Zaman içerisinde çok fazla değişim geçiren Narteks üçü ağır hasarlı olmak üzere beş çapraz tonoz elemanı ile örtülüdür. Kilisenin daha önce restorasyon gördüğü açıklanmış ve literatür araştırması yapılarak; toprak altı yerinde incelemeler ve ayrıntılı lazer tarayıcı araştırmaları sonuçları elde edilmiş, bu sonuçlarla tonozların yapısal özellikleri hakkında bilgi edinildiği ifade dilmektedir. Gözle görülür şekilde; Narteksin cephe duvarlarında çok sayıda çatlak ve kopmaların yansıra 40cm'lik düzlem dışı yer değiştirmenin meydana geldiği ile Narteksin tonozlar üzerindeki kemerlerde ise deformasyonların olduğu belirtilmiştir. Yazarlar; ABAQUS paket programıyla doğrusal olmayan dinamik analizleri içeren gelişmiş sayısal sonlu elemanlar (FE) modeli oluşturmuş ve dinamik analiz yapmışlardır. İlk olarak; orijinal ahşap çatının bir duvar örtü tonoz sistemi ile değiştirilmesinden hemen sonraki hali ile tüm kilisenin sayısal modeli oluşturulmuş. Sayısal modelin dinamik analizinde; hasarlarının tonoz sisteminde, yarım kubbelerde ve dik duvarların birbirine kenetlenmesindeki bölgede çok hızlı bir şekilde oluştuğu belirtilmiştir. Son olarak; narteks, kiliseden bağımsız olarak sadece uzunlamasına yönde uygulanan farklı sismik etkiler altında analiz edilmiş. Sayısal model sonuçların; Orta yoğunlukta bir deprem sırasında tonoz sisteminin önemli gerilmelere ve dolayısıyla ciddi hasara maruz kaldığı, batı cephesindeki tonoz sisteminin tabanında gerilme oluşumu nedeniyle devrilme

olasılığının olduğu belirtilmiş. Ayrıca analiz sonuçlarında da görüldüğü gibi, cephede görülen 40 cm'lik maksimum düzlem dışı yer değiştirmenin şiddetli bir deprem sırasında veya sıralı düşük şiddetteki depremlerden dolayı oluşacağı ifade edilmiştir. Sonuç olarak yapıdaki mevcut hasarların sayısal modelin dinamik analizin dede görüldüğü ve hasarların deprem etkisiyle oluşabileceği görüşünde bulunulmuştur.

2.2 Anıt, Saray Ve Köşk Tipi Yapıları İle İlgili Çalışmalar

F. Aras ve diğerleri [2], Prohitech programı kapsamında 1861-1865 yılları arasında inşa edilmiş olan bodrum + 2 katlı, 72m uzunluğunda ve 48m genişliğindeki Beylerbeyi Sarayının dinamik özelliklerinin incelemişlerdir. Yapıda hem deneysel metod hem de sayısal metod kullanılarak malzeme özellikleri ayarlanmıştır. Her ne kadar mühendislik olanakları gelişmişse de yapı sistemleri, malzeme özellikleri, modelleme teknikleri, analiz yöntemleri ve toprak etkileşimleri ile ilgili birçok belirsizlik nedeniyle, tarihi bir yapının değerlendirilmesi gerçekten zor bir iştir. Bu çalışmada tarihi binaya zarar vermemek açısından ve binanın günlük kullanımına da engel olmamak için ortam titreşim testi kullanılmış. Elde edilen deneysel model verileri kullanılarak yapının sayısal model verileri güncellenmiştir. Yapılan bu çalışma, deneysel model verileri kullanılarak sonlu eleman yöntemi ile oluşturulan sayısal modelin elastisite modülü 5 aşamada ayarlanarak ikisi arasındaki aynı dinamik özellikler yakalanmıştır. Her iki yönde kütle katılım oranının %90 olabilmesi için en az 60 mod'a gereksinim duyulduğu belirtilmiştir.

F. Aras ve G. Altay [23], tarihi Beylerbeyi Sarayı'nın mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Tarihi yapıdan numune almak veya tarihi yapı üzerinde herhangi bir işlem yapmak olanaksız olduğu için, yapıda kullanılan orijinal harcın kalıntısının mineralojik yapısı belirlenmiş. Akabinde de tarihi yapıda kullanılan harç ve duvar numunelerinin benzeri, laboratuvar ortamında hazırlanarak basınç ve çekme testleri yapılmış. Elde edilen mekanik özellikler, duvarın gerçek elastisite modülünü belirlemek için dinamik tanımlama ile düzeltilmiş. Dinamik tanımlama için ortam titreşim testi yapılmış ve sarayın sonlu eleman modeli oluşturularak iki yöntemin karşılaştırılmasından faydalanılmıştır. Böylelikle duvarın mukavemet parametreleri düzeltilmişti. Sonuç olarak üç farklı elastisite modülü bulunmuş (E1 = 2315 MPa, E2 = 3100 MPa ve E3 = 8000

MPa), yapının duvarları için çekme ve basınç dayanım değerleri, sırasıyla 0.82 MPa ve 10 MPa olarak elde etmişlerdir.

F. Aras ve G. Altay [24], daha önce literatüre kazandırılan tarihi Beylerbeyi Sarayının dinamik özelliklerini kullanılarak binanın yapısal davranışı ve deprem performansını incelemişlerdir. Binaya gelebilecek deprem etkilerinin azaltılması için taban izalatörleri araştırılmış ve önerilmiştir. Ortam titreşim testi (AVS), yapının ilk sekiz modu için sönüm oranlarının % 1 ile% 2,7 arasında olduğunu göstermiş. Bu bağlamda; sönüm oranı %2 olarak seçilmiştir. Beylerbeyi Sarayı'nın sönüm oranı, normal bir sistemle karşılaştırıldığında yatay yükleri artıracak kadar küçük bir değerdir. Sap2000 paket programıyla yapılan sismik analizde; duvarların düzlem dışı hareketinin bir sonucu olarak, yatay gerilmeleri 7MPa'ı aştığı ve duvarın gerilme mukavemetinin çok ötesinde olduğu, yatay gerilmeler için yapının üst kısmı riskli olduğu ifade edilmiş. Dikey gerilmelerin büyüklükleri 3.5 MP'ın üzerinde olup, yatay gerilmelerden daha az olduğu, ayrıca kesme gerilmelerinin ise duvar açıklıkların köşelerinde olduğu ve büyüklüğü ise maksimum 1.5 MPa olduğu belirtilmiştir. Laboratuarda yapılan duvar ve harç örnekleri üzerinde yapılan deneylerde saraydaki yığma duvarların basınç dayanımı 10 MPa ve çekme dayanımı 0.85 MPa olduğu literatüre kazandırılmış [23], bu durumda Beylerbeyi Sarayının dikey gerilmeler altında güvenli olduğu, yatay gerilmeler ve kesme gerilmeleri altında riskli olduğu belirtilmiştir. Son olarak olası bir depremde deprem risk altında olduğu belirtilen tarihi yapıya gelecek olan deprem yüklerinin azaltılması için taban izolatörleri incelenmiş ve önerilmiştir.

R. Talep ve diğerleri [25], Lisbon-Portekizde düzenlenen ‘’15th World Conference on earthquake Engineering’’ konferansında 1908 yılında Fransız konolizasyonu döneminde Cezayir'de inşa edilen 22m uzunluğunda ve 17.75m genişliğinde bodrum, zemin, iki normal kat ve kule katından oluşan bir konağı incelemişlerdir. Binanın yapısal sisteminde taşıyıcı duvarlar ortalama 50 cm kalınlığında olup, döşemeler ise 50 cm'de aralanmış çelik kirişlerle desteklenen içi boş kil tuğla elemanlar ile yapıldığı, bu çelik kirişler yatak duvarları tarafından basitçe desteklendiği belirtilmiştir. Ayrıca yapı 2003 Boumerdes depreminde hasar aldığı ve bazı çatlaklar meydana gelen geldiği ifade edilmiştir. Bina deprem sonrası ankrajlar, öngerilme çubukları, çapraz destekler ve akma tipi amortisörler gibi çeşitli çelik elemanlarla

güçlendirilmiştir. Bu çalışmada ortam titreşim testi ve zorlanmış titreşim testi kullanılarak binanın güçlendirmeden önce ve sonraki dinamik davranışının incelenmiştir. Güçlendirmeden önce ve sonra ortam titreşim testi ile elde edilen doğal frekanslar arasındaki karşılaştırmada, doğal frekanslar güçlendirmeden sonra yaklaşık % 5 oranında yükseldiği görülmüş. Rezonans frekans eğrilerinden görülebilen zorlanmış titreşim yöntemi ile tanımlanan rezonant frekansları % 3-5 oranında ortam frekanslarından daha küçük ve güçlendirmeden önceki orijinal duruma yakın olduğu sonucuna varmışlardır. Bu çalışma ile binada yapılan güçlendirme çalışmalarının binanın dinamik özelliklerini değiştirmediği sonucuna varılmıştır. Bunun nedeni olarak, yüksek rijitliğe sahip olan taşıyıcı duvarlara yerleştirilen çelik çubukların duvar rijitliğini değiştirmediğinden kaynaklandığı belirtilmiştir.

G. Lacanna ve diğerleri [26], İtalya, Floransa'da on ikinci yüzyıldan kalma tipik bir sekizgen plan düzenine sahip olan, 36 m çapında ve 46 m yüksekliğinde bir daire içinde bulunan San Giovanni Vaftizhanesinin dinamik davranışını rüzgâr, trafik, mikro-sismik ve diğer insan faaliyetlerinin neden olduğu ortam titreşimi kullanarak operasyonel mod analizi (OMA) ile araştırmışlardır. Bu çalışmada vaftizhanenin genel dinamik davranışı olan doğal frekanslar, sönüm oranları ve altı mod için mutlak yer değiştirmeler belirlenerek literatüre kazandırılmış. Birinci modun neden olduğu salınımın, tüm dönem boyunca altıncı modun salınımından 7 kat daha büyük olduğu sonucuna varılmış. Ayrıca araç trafiğinin yapı üzerinde zorlanmaya neden olduğu belirtilmiştir.

G. Comanducci ve diğerleri [27], anıtsal bir çeşme olan, İtalya'nın Perugia şehrindeki "Fontana Maggiore" nin dinamik davranışını Ortam Titreşim Testi (AVT) yöntemini kullanarak araştırmış ve sayısal modeli güncellemişlerdir. Fontana Maggiore İtalya'nın en sembolik yapılarından biri olup, çeşme sırasıyla 9.0m ve 6.5m çaplarında iki adet üst üste poligonal taş tank 'tan oluşmaktadır. Sembolik yapı onüçüncü yüzyılda inşa edilmiş ve 1948 ile 1991 yıllarında ciddi restorasyonlar görmüştür. Deneysel çalışmalar 8 ile 15 Temmuz 2016'da UJ festivali sırasında saat 19: 00'dan 23: 00'e kadar gerçekleştirilmiş. 15 Temmuz'da üst tankta su olmadan ölçümler yapılmış, böylece su kütlesinin çeşmenin dinamik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen veriler tablo halinde sunulmuş, sonuç olarak her iki ölçümde tüm doğal frekanslarda neredeyse tutarlı bir artış olduğu vurgulanmıştır.

F. Lorenzoni ve diğerleri [28], M.S. birinci yüzyılda inşa edilen İtalya'nın Verona kentindeki Roma Arenasının dinamik özellikleri incelemişlerdir. Arena'nın statik, dinamik (gösteriler, konserler vb.) ve sismik yüklere karşı yapısal tepkisini değerlendirmek amacıyla 2011 yılında yapı sağlığı izleme sistemi (SHM) kurulmuştur. Temel modal parametreleri çıkarmak ve referans sonlu elemanlar modellerini ayarlamak için ortam titreşim testleri yapılmış; küresel modlar tanımlanmış, sayısal modelin önemli dinamik amplifikasyonların beklendiği yerlere ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Tarihi yapı ile ilgili ayrıntılı çalışma makalede sunularak, elde edilen sonuçlar literatüre kazandırılmıştır. Bu çalışma ile deneysel ve sayısal model yardımıyla ayarlanan elastisite modülleri sırasıyla; taş duvarlar için E1: 15223 MPA, E2: 16174 MPA, E2: 14443 MPA, tonozlar için E: 2479 MPa, kemerler için E: 14096 MPA, harç için E: 477 MPa, dolgu için E: 483 Mpa ve taş zemin için E:11723 Mpa olarak bulunmuştur.

G. Bongiovanni ve diğerleri [29], İmparator Marcus Aurelius Antoninus Augustus'un zaferlerini kutlamak için MS 176 ve 192 yılları arasında Roma'da dikilen Marcus Aurelius Sütunu'nun dinamik davranışını deneysel metodla araştırmışlardır. Haziran 1985'te anıt üzerinde ilk ortam titreşim analizi yapılmış, Mart 2012'de sadece dokuz sismometre kullanılarak ikinci bir deneysel çalışma yapılmış, Şubat 2015'te ise 24 tek kanallı sensörden oluşan bir sismometre dizisi kullanılarak son deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Marcus Aurelius Sütununun ortam titreşim testinden elde edilen deneysel veriler, hem zaman hem de frekans alanında analiz edilmiş ve önceki deneysel çalışmalarda elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, 0.15 mm'lik tepe yer değiştirme değerleri kaydedilmiş, maksimum hareket değerleri, bu tür bir yapı için beklenebileceği gibi üstte değil, yaklaşık orta yükseklikte gerçekleştiği belirtilmiştir. Sütun hareketinin sırasıyla 1.26 Hz ve 1.33 Hz'e eşit iki frekans tarafından baskın olduğu, önceki deneysel çalışmalarda elde edilen ilk rezonans frekanslarına çok yakın olduğu sonucuna varılmıştır.

F. Lorenzoni ve diğerleri [30], 1771-1774 yılları arasındaki arkeolojik çalışmalar sırasında keşfedilen Roma öncesi döneme (M.Ö. 3. Yüzyıl) ait İtalya, Pompeii'deki Villa Diomede'nin dinamik karakteristiklerini araştırmışlardır. Girişi içeren ve en yüksek alıntıda bulunan yol seviyesi, Quadriportico yapısını barındıran alt bahçe seviyesi ve Cryptoportico adlı yeraltı seviyesi olmak üzere antik yapı üç seviyeden oluşmaktadır.

Yapıda Nocera tüf, Sarno kireçtaşı, sarı tüf, gri tüf ve lav taşı gibi çok çeşitli malzemelerle birlikte birçok belirsiz malzemeler de kullanıldığı açıklanmıştır. Villa Diomede M.S. 63'te meydana gelen şiddetli depremle Quadriportico'nun batı sütunlarının çöktüğü, M.S. 79'da ise Vezüv yanardağının patlamasıyla da büyük hasar gördüğü literatürde geçmektedir. Yazarlarca; Villa Diomede'nin iki katındaki diğer yapı elemanlarında doğrudan ve tomografik sonik titreşim hız testleri, yere nüfuz eden radar, endoskopiler ve operasyonel modal analizler uygulanmış. Ortam titreşim testleri sonuçları ile yapının dinamik özellikler ortaya çıkarılmıştır. Elde edilen deneysel verilerle zemin-yapı ilişkisi göz önünde bulundurularak yapının sayısal model ayarlama gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, Quadriportico'nun yapı-zemin etkileşimini ayrıntılı olarak incelemek için sayısal bir yerel model (P15 sütunu) oluşturulmuş, ortam titreşim testleri yapılarak deneysel verilerle yapı-zemin etkileşiminin yerel model üzerindeki etkisi incelenmiş ve P15 sütununun ilk beş temel modu 3-7 Hz frekans aralığında ortaya çıkarılmıştır. Daha sonra tüm Quadriportico'nun bir FE modeli DIANA FEA yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Tüm Quadriportico'nun ilk altı modun deneysel doğal frekansları sırasıyla 2.610 Hz, 2.662 Hz, 3.156 Hz, 3.249 Hz, 3.560 Hz ve 4.016 Hz olarak elde etmiş, sayısal modelin frekansları ise sırasıyla 2.642 Hz, 2.790 Hz, 3.433 Hz, 3.147 Hz, 4.510 Hz ve 3.768 Hz olarak güncellemişlerdir. Deneysel mod ve güncellenmiş sayısal mod frekanslar arasında (5. Mod hariç) %10'un altında kabul edilebilir bir fark olduğu, tüm modlarda; MAC dizinleri ise iyi bir eşleşme kabul edilen (1. Mod hariç) 0.75'den büyük MAC değerleri ortaya çıktığı ifade edilmiştir. Sonuç olarak eksik yapıların dinamik davranışlarını karakterize etmek, değerlendirmek ve yapıyı temsil eden güvenilir modeller oluşturmak için dinamik tanımlama testlerinin yürütülmesinin etkili bir araç olduğunu belirtmişlerdir.

2.3 Köprü Tipi Yapılar İle İlgili Çalışmalar

T. Türker ve A.Bayraktar [31], Samsun'da bulunan Ali Çetinkaya köprüsünün yapısal güvenlik değerlendirmesini, ortam titreşim testi ve sonlu eleman modeli ayarlama ile araştırmışlardır. 1937 yılında inşa edilen yapı, yedi ayrı kemerden oluşan kiriş tipi betonarme kemer köprüsü olup, toplam uzunluğu 250m'dir. Bu çalışmada sırasıyla ortam titreşim testi, ilk sonlu eleman modellemesi, sonlu eleman modeli ayarlama ve güncellenmiş sonlu eleman modelinin yapısal analizi yapılmıştır. Deneysel çalışmada,

ilk altı modun doğal frekanslarını 3.181 Hz - 7.595 Hz aralıkları arasında elde etmiş, sayısal modelde ise ilk altı modun doğal frekanslarını 3.771 Hz - 10.840 Hz aralığında hesaplamışlardır. İlk sonlu eleman modeli değişken özellikler olarak malzeme özellikleri ve sınır bölümleri dikkate alınarak ortam titreşim testi sonuçlarına göre ayarlanmış. Ayarlama işleminden sonra, farklar önemli ölçüde azalmış ve ikinci modda minimum fark% 1.07 olarak elde edildiği belirtilmiştir. Güncellenmiş sonlu eleman modelinin yapısal güvenlik değerlendirmesinde kullanılabileceği ifade edilmiştir.

A. C. Altunışık ve diğerleri [32], restorasyon sonrası tahribatsız ortam titreşim testleri ile sayısal model kullanarak tarihi ahşap Buzlupınar Köprüsünün yapısal modal parametrelerini incelemişlerdir. Rize'nin Çayeli İlçesi, Madenli Deresi üzerinde yer alan tarihi köprü tamamen ahşaptan yapılmış olup, yaya, hayvan ve yük taşımacılığında kullanılmaktadır. Deneysel çalışmada, ilk altı doğal frekans 2.22 Hz – 18.01 Hz aralıkları arasında elde edilmiş, sayısal modelde ise doğal frekanslar 2.39 Hz – 19.50 Hz aralığında hesaplanmıştır. Deneysel ve sayısal frekanslar arasında % 34.55'lik farkları en aza indirmek için, ahşap köprünün sayısal modeli manuel model güncelleme prosedürleri kullanılarak güncellenmiştir. Yapılan güncelleme ile dördüncü mod hariç doğal frekanslar arasında maksimum farklar % 1'in altına düşürülmüştür.

C. Gentile ve N. Gallino [33], tarihi bir asma yaya köprüsü olan Morca köprüsünün güçlendirme sonrası gerçek yapısal davranışını deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemişlerdir. Köprü Kuzey italya, Varallo Sesia kasabasında geçen Sesia nehri üzerine 1982 yılında inşa edilmiştir. 0-2 Hz frekans aralığında, ortam titreşim verilerinden mod parametrelerini çıkarmak için pik toplama ve geliştirilmiş frekans alanı ayrıştırma teknikleri kullanılmış ve iki teknikten tanımlanan mod parametreleri arasında çok iyi bir uyum bulunmuştur. Tarihi köprünün ilk beş modun deneysel doğal frekansları sırasıyla 0.443 Hz, 0.646 Hz, 0.738 Hz, 0.965 Hz ve 1.264 Hz elde edilmiş, sayısal modelin frekansları ise sırasıyla 0.436 Hz, 0.658 Hz, 0.737 Hz, 0.922 Hz ve 1.261 Hz olarak güncellenmiştir. İlk beş moda göre ayarlanmış frekanslarla deneysel frekanslar arasında sırasıyla %1.58, %1.86, %0.14, %4.46, % 0.24'lük tolere edilebilir farklar ortaya çıktığı belirtilmiştir. Güncellenmiş model, deneysel sonuçlar ile mükemmel bir uyum gösterdiğinden, modelin gerçek yaya köprüsünün doğru bir temsilini sağladığı ve hizmet yükleri altında yapı sağlığı izleme sistemi için kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

T. Aoki ve diğerleri [34], tarihi bir taş kemer köprüsü olan Rakanji Köprüsünün dinamik özelliklerini deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemişlerdir. Köprü 1917 yılında Japonyanın Honabakei, Oita vilayetinde bulunan Yamakuni nehri üzerine inşa edilmiş. Yaklaşık 26 m'lik üç açıklığa sahip olan köprünün toplam uzunluğu 89.30 m'dir. Malzeme testlerinden, taşın elastisite modülü ile basınç mukavemeti sırasıyla 17200 MPa ve 28.5 MPa, harcın elastisite modülü ile basınç mukavemeti ise sırasıyla 5500 MPa ve 3.9 MPa olarak bulunmuştur. Tarihi köprünün ilk dört modun deneysel doğal frekansları sırasıyla 7.90 Hz, 9,18 Hz, 11.02 Hz ve 11,89 Hz olarak elde edilmiş, ilk sayısal modelin frekansları sırasıyla 7.94 Hz, 9.15 Hz, 10.08 Hz, 10.51 Hz olarak bulunmuş ve deneysel veriler ile malzeme testleri verileri yardımıyla güncellenen sayısal modelin frekansları sırasıyla 7.85 Hz, 9.25 Hz, 10.91 Hz, 11.94 Hz olarak ayarlanmıştır. İlk dört moda göre ayarlanmış frekanslarla deneysel frekanslar arasında sırasıyla %0.58, %0.8, %0.96 ve %0.42'lik uygun farklar ortaya çıktığı belirtilmiştir.

C. Pepi ve diğerleri [35], Todi (Umbria, İtalya) bölgesindeki Roma döneminden kalma ağır hasarlı bir yığma kemer köprüsü üzerinde devam eden bir araştırmanın ön sonuçlarını sunmuşlardır (Şekil 4). Antik köprünün yapısal performansını değerlendirmek amacıyla geometrik araştırma, dinamik test ve sayısal modellemeyi birleştiren çok disiplinli bir yaklaşımda bulunmuşlardır. 3D sayısal bir model elde etmek ve çatlak düzenini haritalamak için İHA (İnsansız Hava Aracı) tarafından sağlanan yüksek çözünürlüklü görüntülere dayalı bir fotogrametrik araştırma yapılmış. (Şekil 5)



Şekil 4 Todi Köprüsü [35]

Deneysel yöntem için ortam titreşim testleri, zorlanmış titreşim testleri, lazer vibrometre, radar interferometre ve sismik ivmeölçerler kullanılmıştır. Deneysel veriler operasyonel modal analiz ile işlenmiş ve sonuçlar basitleştirilmiş bir modelin verdiği sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Tarihi köprünün ilk dört modun deneysel doğal frekansları sırasıyla 8.79 Hz, 13.81 Hz, 16.95 Hz ve 22.81 Hz olarak elde edilmiş, sayısal modelin frekansları sırasıyla 9.43 Hz, 14.19 Hz, 15.36 Hz, 15.96 Hz olarak bulunmuş ve sonuçların birbirine yakın olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 5 Todi Köprüsü Sanal 3D Model [35]

İHA teknolojisi ve fotogrametri tekniği ile elde edilen geometrik araştırma kullanılarak kemer köprüsünün daha doğru bir 3D modelinin geliştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir. Deneysel testler, dinamik özelliklerin yapısal güçlendirme ile değişimini araştırmak için devam eden restorasyon sürecinin sonunda tekrarlanacağı belirtilmiştir.

B. Conde ve diğerleri [36], İspanya'nın kuzeybatısındaki Galiçya'da bulunan tarihi yığma bir kemer köprü olan Vilanova Köprüsünün yapısal değerlendirmesi için multidisipliner bir çalışma yürütmüşlerdir. Lazer tarama, yer penetrasyonu radarı, sonik testler ve ortam titreşim testi gibi tamamen tahribatsız test tekniklerine dayanan kapsamlı bir saha araştırması yapılmış. Doğru ve ayrıntılı üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş. Daha sonra sayısal model, deneysel olarak elde edilen verilerle güncellenmiştir. Güncellenmiş sayısal model üzerinde yapısal analiz yapılmıştır. Tarihi köprünün ilk dört modun deneysel doğal frekansları sırasıyla 4.76 Hz, 6.05 Hz, 6.74 Hz ve 7.71 Hz olarak elde edilmiş, sayısal modelin frekansları ise sırasıyla 4.71 Hz, 6.10 Hz,

6.82 Hz ve 7.64 Hz olarak güncellenmiştir. İlk beş moda göre ayarlanmış sayısal frekanslarla deneysel frekanslar arasında sırasılya %1.04, %0.81, %1.2 ve %0.92'lik makul farklar ortaya çıktığı belirtilmiştir. Güncellenmiş sayısal model üzerinde yapılan yapısal analizle; özellikle dolgu malzemesi özelliklerinin, analiz edilen tüm yükleme senaryoları altında yapının mekanik performansında temel bir rol oynadığı belirtilmiştir. Vilanova Köprüsü'nün kabul edilebilir bir güvenlik seviyesi sunduğu, diğer taraftan daha düşük servis yükleri altında yapının daha uzun ömürlü olacağı kanaatine varmışlardır.

T. Lui ve diğerleri [37], otomatik model güncelleme prosedürünü kullanarak Canonica Asma Kemer Köprüsünün sonlu eleman modelini güncellemiş ve yapının dinamik özelliklerini incelemişlerdir. Köprü İtalya'nın Milan şehrine 40km uzaklıkta Vaprio ve Canonica ikiz kasabaları arasında 1950 yılında inşa edilmiştir. Orijinal çizim ve topografik araştırmaya dayanarak, köprünün sayısal modeli oluşturulmuş. Deneysel modal parametreleri elde etmek için ise ortam titreşim testleri ve frekans alan ayrışma tekniği kullanılmıştır. Saysal model köprüyü daha iyi temsil edebilmesi için deneysel verilerle güncellenmiştir. Canonica asma kemer köprüsünün ilk sekiz modun deneysel doğal frekansları 3.203 Hz ile 7.813 Hz aralığında olup, güncellenmiş sayısal modelin frekansları ise 3.203 Hz ile 7.9478 Hz aralığında olduğu belirtilmiştir. İlk sekiz moda göre ayarlanmış sayısal frekanslarla deneysel frekanslar arasında sırasıyla %0.00, %001, %1.43, %4.95, %0.04, %1.09, %0.09 ve %1.73'lük %5'ten az farklar ortaya çıktığı belirtilmiştir

B. Sevim ve diğerleri [38], Rize İli Fırtına deresi üzerinde bulanan iki tarihi taş kemer köprüsü olan Osmanlı ve Şenyuva köprülerinin dinamik davranışlarını deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemişlerdir. İki kemer köprünün sonlu eleman modelleri, ortam titreşim testi sonuçları kullanılarak güncellemiş. İlk sayısal modelin ile güncellenmiş sayısal modelin 1992 Erzincan depremi verileri altında sismik analizlerini yapmışlardır. Kullanılan malzemelerin elastisite modülü taşın E1: 3000 MPa, Ahşap taşıyıcıların E2:1500 MPa, yan duvarların E3: 2500 MPa olarak alınmıştır. Şenyuva köprüsünün ilk beş modun deneysel doğal frekansları sırasıyla 4.045 Hz, 7.750 Hz, 8.020 Hz, 10.000 Hz ve 12.160 Hz olarak elde edilmiş, sayısal modelin frekansları ise sırasıyla 4.070 Hz, 7.780 Hz, 8.020 Hz, 10.670 Hz ve 12.090 Hz olarak güncellenmiştir. Osmanlı köprüsünün ilk beş modun deneysel doğal frekansları sırasıyla 4.640 Hz, 8.094 Hz, 9.879

Hz, 12.340 Hz ve 15.840 Hz olarak elde edilmiş, sayısal modelin frekansları ise sırasıyla 4.640 Hz, 8.757 Hz, 9.875 Hz, 11.967 Hz ve 15.703 Hz olarak güncellenmiştir. Şenyuva ile Osmanlı Köprülerinin sayısal model güncellenmesinden sonra, hesaplanan ve ölçülen doğal frekanslardaki farklılıklar sırasıyla yaklaşık % 2'in ve %5'nin altında çıkmıştır. Osmanlı Kemer Köprüsü'nün başlangıç ve güncellenmiş modellerinin deprem analizlerinden sırasıyla 2.6 MPa ve 1.2 MPa'lık maksimum ana gerilmeler elde edilmiştir. Senyuva Kemer Köprüsü'nün başlangıç ve güncellenmiş modellerinin deprem analizlerinden sırasıyla 2,7 MPa ve 1,6 MPa maksimum ana gerilmeler elde edilmiştir. Bu maksimum temel gerilmeler, genellikle her iki köprü için taş kemer tabanı çevresindeki bölgelerde meydana geldiği ifade edilmiştir.

2.4 Kule Yapıları İle İlgili Çalışmalar

G. Fiorentino ve diğerleri [39], toplam yüksekliği 58.4m, dış çapı 19.6m olan İtalya'nın ünlü Pisa Kulesi'nin dinamik davranışını incelemişlerdir. Pisa kulesi ile ilgili en son çalışmalar üzerinden yirmi yıl geçmiş olup; 1999-2001 yıllarında yapıda zemin-temel çalışması yapılmış, ayrıca deprem mühendisliği alanındaki son gelişmeler ışığında yapının dinamik davranışları gözden geçirilmiştir. Yapının eğimini dikkate alan bir sonlu eleman modeli hazırlanmış ve mevcut deneysel sonuçlar dikkate alınarak güncellenmiştir. Son olarak, Kulenin sismik karakterizasyonunu geliştirmeye yönelik sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Kuleye yerleştirilen ivmeölçerlerle 2012 yılında meydana gelen deprem sırasında kulenin dinamik tepkisi zaman ve frekans alanında analiz edilmiştir. Tarihi yapının ilk dört modun deneysel doğal frekansları sırasıyla 0.958 Hz, 1.025 Hz, 2.98 Hz ve 6.29 Hz olarak elde edilmiş, sayısal modelin frekansları ise sırasıyla 0.950 Hz, 1.025 Hz, 2.964 Hz ve 6.294 Hz olarak güncellenmiştir.

C. Gentile ve A. Saisi [40], XVII yüzyıldan kalma ve yaklaşık 74 m yüksekliğindeki Monza Katedrali'nin tarihi taş çan kulesinin dinamik özelliklerini teorik ve deneysel olarak araştırmasını yapmışlardır. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalarda; tarihi yapının ilk beş modun deneysel doğal frekansları sırasıyla 0.586 Hz, 0.708 Hz, 2.456 Hz, 2.731 Hz ve 5.706 Hz olarak elde edilmiş, sayısal modelin frekansları ise sırasıyla 0.585 Hz, 0.709 Hz, 2.455 Hz, 2.726 Hz ve 5.698 Hz olarak güncellenmiştir. Modal Güvence Ölçütleri sırasıyla MAC1: 0.987, MAC2: 0.975, MAC3: 0.861, MAC4:

0.860 ve MAC5: 0872 gibi iyi bir eşleşme kabul edilen 0.80'den büyük MAC değerleri elde etmişlerdir. Özellikle, kulenin en hasarlı bölgelerinde elastisite modülünün nispeten düşük değerleri için teorik ve deneysel modal parametreler arasında iyi bir eşleşme olduğu ortaya çıkarılmış. Güncellenen sayısal model ile kulenin yapısal güvenliğini değerlendirmek için çeşitli yük koşulları altında güvenilir tahminler sağlamak için yeterli olduğu yazılmıştır.

D. Pellegrini ve diğerleri [41], Mogadouro Saat Kulesinin dinamik özelliklerini, yapısal hasarın varlığını dikkate alarak tahmin etmek için doğrusal pertürbasyon ve modal analizi birleştiren sayısal bir yaklaşım ile incelemişlerdir. 20.4 m yüksekliğinde olan tarihi yığma kule, Portekiz'in kuzeydoğusunda bir kale çevresinde bulunan ve muhtemelen 1559'dan sonra komşu kiliseye çan kulesi olarak hizmet vermek için inşa edilmiştir. Yapıda hasralar olduğu belirtilmiş, güçlendirme öncesi ve sonrası deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilerek doğal frekanslar karşılaştırılmış ve elde edilen dinamik özellikler literatüre kazandırılmıştır. Sonlu eleman model güncellemesi, güçlendirme öncesinde ve sonrasında gözlemlenen yapısal koşullara göre, kulenin farklı bölümlerindeki elastisite modülü ve gerilme mukavemeti için optimum değerleri ayarlamak için kullanılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki karşılaştırma, lineer pertürbasyon ve modal analiz kombinasyonunun, yığma kulenin ilk iki frekansını ve mod şekillerini hem hasarlı hem de güçlendirilmiş koşullarda makul bir doğrulukla tahmin etmeyi sağladığını göstermiştir.

D. Foti ve diğerleri [42], İtalya, Bari İl İdare Binası Kulesinin dinamik davranışını değerlendirmek için deneysel araştırmalar ile sayısal modelleme yapmışlardır. Sonuçların istatistiksel tekrarlana bilirliğini değerlendirerek, dinamik özelliklerin doğru tahmini için 11 ardışık ortam titreşim testi yapmışlardır. Ayrıca deneysel ölçümler dikkate alınarak oluşturulan 3D elemanlı sayısal modeli güncellemişlerdir. Yapı şehrin sembolik bir yapısı olup, XX. Yüzyılda 60 m yüksekliğinde inşa edilmiştir. Yapılan deneysel yöntemde; iç asansör boşluğunun ve merdiven boşluğunun varlığı nedeniyle, herhangi bir ivmeölçer kulenin karşı tarafına yerleştirilememiştir. Deneysel ve sayısal çalışmalarda, kulenin ilk beş modun deneysel doğal frekansları sırasıyla 2.301 Hz, 2.429 Hz, 4.187 Hz, 4.599 Hz ve 5.071 Hz olarak elde edilmiş, sayısal modelin frekansları ise sırasıyla 2.331 Hz, 2.339 Hz, 4.473 Hz, 5.503 Hz ve 5.504 Hz olarak güncellenmiştir. İvmeölçerlerin konumu

dikkate alındığında (ilk iki mod hariç) modlar arasında düşük bir korelasyon elde etmişlerdir.

S. Castellaro ve diğerleri [43], alışveriş çantası içerisinde taşınabilir bir sismometre (10x7x14 cm, <1 kg) ile Eiffel Kulesinde ve çevresindeki toprakta ortam titreşimleri kaydedilerek, kulenin dinamik özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca, literatür araştırması ve yerinde incelemeler yaparak, MIDAS GEN yazılım programı ile kule için gözlenen verilere uyacak 3 boyutlu sonlu eleman modeli oluşturmuşlardır. Dünyanın en ikonik ve popüler binalarından biri olan Eiffel Kulesi, Gustave Eiffel tarafından tasarlanmış olup; 1889 yılında Dünya Fuarı için tamamlanmıştır. İnşaatından 1930'a kadar, 324 m yüksekliğiyle, aynı zamanda dünyanın en yüksek binası olma özelliğini taşımıştır. Eiffel'in orijinal çizimleri ile yapılan sayısal modelin kütlesi 10.100 ton bulunmuş, ancak Le Moniteur'de yayınlanan makaleye göre kulenin mevcut kütlesinden 11.700 ton olarak bahsedilmektedir. Yapısal elemanlar 1989'dan bu yana değişmediğinden, kulenin birinci seviyesine 800 ton ölü yük, ikinci seviyesine 400 ton ölü yük ve en üst seviyesine ise 360 ton ölü yük eklenmiştir. Sayısal model, deneysel sonuçlarla eşleşmesi için birkaç kez güncellenmiştir. Eiffel kulesinin altı modun deneysel doğal frekansları sırasıyla 0.32 Hz, 1 Hz, 1.2 Hz, 1.4 Hz, 1.7 Hz ve 2.1 Hz olarak elde edilmiş, sayısal modelin frekansları ise sırasıyla 0.33 Hz, 1.07 Hz, 1.18 Hz, 1.25 Hz, 1.62 Hz ve 2.2 Hz olarak güncellenmiştir. Kulenin dinamik modeli, gelecekteki müdahaleleri daha iyi tasarlamak ve yapı sağlığı izleme sistemi için veri oluşturmuştur. Sayısal modele göre, kule mevcut sismik tehlike tahminlerinin öngördüğü değerlerden % 100 daha büyük pik zemin hızlanmalarına dayanabileceği belirtilmiştir.

R. Sancibrian ve diğerleri [44], XX. Yüzyılın başlarında İspanya'da küçük bir kasaba olan Corrales de Buelna'da inşa edilmiş, eski bir sanayi kompleksine ait bir endüstriyel yığma bacanın dinamik davranışlarını değerlendirmişlerdir. Baca ile ilgili herhangi orijinal bir bilgi bulunmamakla birlikte, yerinde yapılan incelemede; baca 38.30 m yüksekliğinde taban çapı 4.02m ve üst çapı 2.02m olan konik şekilli bir piramit olarak yapıldığı ifade edilmiştir. Dinamik çalışma öncesi tuğla ve harç analiz edilerek, malzemelerin mekanik parametreleri laboratuvarda elde edilmiştir. Malzemenin elastisite modülü 6519 MPa, possion oranı 0.1, basınç dayanımı ise 31.21 MPa olarak bulunmuştur. Akabinde dinamik davranışın incelenmesi için deneysel ve sayısal çalışma yapılmıştır.

Deneysel analizin sonuçları, bacanın teorik simülasyonu için kullanılan Sonlu Eleman (FE) modelini güncelleyen sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Kulenin ilk beş modun deneysel doğal frekansları sırasıyla 0.76 Hz, 8.41 Hz, 23.05 Hz, ….. Hz ve 39.14 Hz olarak elde edilmiş, sayısal modelin frekansları ise sırasıyla 0.95 Hz, 8.48 Hz, 26.92 Hz, 38.33 Hz ve 44.78 Hz olarak güncellenmiştir. Bacanın yapı sağlığı durumunun tatmin edici olduğu, yerçekimi ve rüzgâr yüklerinin kombinasyonunun yapının fiziksel bütünlüğü için bir risk oluşturmadığı belirtilmiştir. Baca üzerinde bazı çatlakların olduğunu ve bu çatlakların yüzeysel olduğu düşünülmüştür. Modal analiz sonuçları bu hipotezi desteklediği, çünkü bacanın sayısal modeli sürekli bir yapısal sistem olarak modellenmiş ve bu model deneysel sonuçlar ile doğrulandığı ifade edilmiştir.

F. Peña ve diğerleri [45], Hindistan, Delhi'deki Kutub Minarın deneysel ve sayısal yöntemlerle dinamik özelliklerini inceleyerek sismik değerlendirmesini yapmışlardır. Farklı karmaşıklık ve sadeleştirme düzeylerine sahip üç sayısal model oluşturulmuş. Sayısal modellerden birincisi sonlu elemanlar yöntemini kullanarak 3D katı elemanlar modeli, ikincisi sonlu elemanlar yöntemini kullanarak 3D kompozit kirişler modeli ve üçüncüsü rijit eleman yöntemi kullanılarak 2D rijit modeli oluşturulmuştur. Modeller doğrusal olmayan statik (itme) ve doğrusal olmayan dinamik analizler için kullanılmıştır. Hindistan'ın en yüksek anıtı ve dünyanın en uzun yığma taş kulelerinden biri olan Kutub Minar 1200-1368 yılları arasında Quwwat Ul-İslam Camii 'nin minaresi olarak inşa edilmiştir. Tarihi yapı İslam'ın putperestliğe karşı zaferini yüceltmek için inşa edilmiştir. Minare 72.45 m yükseklikte olup; taban çapı 14.07 m ve üst çapı 3.13 m olan yukarıya doğru incelen dairesel tabanlı konik bir yapıdır. Delhi, Hint sismik bölgesinde bulunduğundan dolayı, Delhide 5 ile 8 arasında birçok büyüklükte ve çok sayıda deprem meydana gelmiştir. Bundan dolayı Kutub Minar çok fazla koruma çalışmaları ve restorasyon geçirtmiştir. Kutub Minar'ın modal parametreleri Minho Üniversitesi tarafından ortam titreşim testleri yapılarak elde edilmiştir. Deneysel ilk on modun doğal frekansları 0.789 Hz ile 6.282 Hz arasında bulunmuştur. Sayısal modellerin ilk on modun frekansları deneysel veriler kullanılarak güncellenmiş; birinci sayısal model (Katı) frekansları 0.71 Hz ile 5.35 Hz arasında, ikinci sayısal model (Kiriş) frekansları 0.734 Hz ile 6.098 Hz arasında ve üçüncü sayısal model (Rijit) frekansları 0.778 Hz ile 7.061 Hz arasında ayarlanmıştır. Yapılan statik analizde minarenin tabanı en kritik bölge olduğu, dinamik analizde ise minarenin üstü en kritik bölge olduğu belirtilmiştir. Doğrusal

olmayan dinamik analizlerin sonuçları, depremin tarihsel hasarı son seviyelerde yoğunlaştığı için minarenin gerçek sismik davranışını daha iyi temsil edeceğinden, Kutub Minaresinin en savunmasız kısmının en üstteki iki kat olduğu sonucuna varmışlardır.

E. G. Macías ve diğerleri [46], tarihi binaların gerçek zamanlı yapısal değerlendirmesi için yenilikçi vekil tabanlı model güncelleme yaklaşımı sunmuşlardır. İtalya, Perugia, şehrinde bulunan ortaçağ yığma yapısı olan Sciri kulesini örnek yapı olarak seçimlerdir. Kule on üçüncü yüzyılın sonlarında 41 m yüksekliğinde savunma amaçlı inşa edilmiştir. Ortam titreşim testleriyle yapılan deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılarak, sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan sayısal model güncellenmiş. Deneysel ilk altı modun doğal frekansları 1.692 Hz ile 9.795 Hz arasında bulunmuş. Sayısal modelin ilk altı modun frekansları deneysel veriler kullanılarak 1.753 Hz ile 9.822 Hz arasında güncellenmiştir. Yapıda kullanılan taşın elastisite modülü 5770 MPa, kesme modülü ise 2310 MPa olarak ayarlanmıştır. Yapı sağlığı izleme sistemi için güncellenmiş sayısal modelden elde edilen dinamik parametrelerle RSM (Tepki Yüzeyi Modeli), Kriging (mekânsal veriler için kullanılan enterpolasyon tekniği) ve RS-HDMR (Rastgele Örnekleme Yüksek Boyutlu Model) modelleri olmak üzere üç farklı vekil model simülasyonları oluşturulmuştur. OMA (Operasyonel Modal Analiz) tarafından tanımlanan modsal özellikleri kullanarak, önerilen yaklaşım yapının hasara duyarlı belirli parametrelerinin sürekli olarak güncellenmesine olanak tanımıştır. Bunu yapmak için, üç farklı vekil model göz önünde bulundurulur ve bunların etkinliği bir yapı sağlığı izleme yönünden karşılaştırılmıştır. Bildirilen sonuçlar, kulenin sıcaklığa bağlı dinamik özelliklerinin izlenmesi için önerilen metodolojinin uygun olduğu ifade edilmektedir. 13 Şubat'tan 10 Mart 2019'a kadar sürekli bir ortam titreşim testi gerçekleştirilmiş ve yapının dinamik özellikleri operasyonel modal analiz tarafından belirlenmiştir. Daha sonra, deneysel verilerden elde edilen dinamik parametreler ile vekil modellerin tahmin ettikleri dinamik parametreler arasındaki uyumsuzluğun en aza indirilmesi için sürekli bir ayarlama yapılmıştır. Bu çalışmada üç vekil model arasından Kriging modelinin tarihi yapıların sürekli vekil tabanlı model güncellemesi için en uygun vekil model olduğu ardından RSM ve RS-HDMR modellerinin geldiği sonucuna varmışlardır.

C. Gentile ve diğerleri [47], Romanın son dönemlerine tarihlenen, yaklaşık 37 m yüksekliğindeki Chiesa Collegiata Kilisesi'ne ait tarihi çan kulesinin dinamik

özelliklerini araştırmışlardır. Kule 5.8 m x 5.8 m kare kenar planlı olup, yığma taş duvar ile inşa edilmiştir. Bu çalışmada; Haziran 2007 ve Haziran 2008'de ortam titreşim testleriyle deneysel veriler elde edilmiş, kulenin üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemine dayalı 3 farklı sayısal modeli oluşturulmuş ve deneysel veriler kullanılarak manuel ayarlama ile ayarlama yapılmıştır. Birinci sayısal modelde (FEM1) taş duvar, lineer elastik ve izotropik bir malzeme olarak kabul edilerek elastisite modülü 3000 MPa alınmış ve kulenin kilise ile bağlantısı dikkate alınmamıştır. İkinci sayısal modelde (FEM2) taş duvar, ortotropik elastik bir malzeme kabul edilerek elastisite modülü 3000 MPa alınmış ve kulenin kilise ile bağlantısı dikkate alınmamıştır. Üçüncü sayısal modelde ise (FEM3) taş duvar, ortotropik elastik bir malzeme kabul edilerek elastisite modülü 3000 MPa alınmış ve kulenin kilise ile bağlantısı bir dizi doğrusal yay ile modellenmiştir. Her üç sayısal model sırasıyla oluşturulduktan sonra deneysel verilerle ayarlanmış ve FEM3 modelin deneysel verilere en yakın model olduğu sonucuna varılmıştır. Manuel güncellemenin sonunda, DR prosedürü (Douglas) uygulanarak sayısal (FEM3-DR) ve deneysel doğal frekanslar arasındaki fark en aza indirilmişti. Yapılan çalışmalar sonucunda; alt bölgedeki elastisite modülü 2970 MPa ve üst bölgedeki elastisite modülü 1600 MPa olarak güncellenmiştir. Ayrıca; kulenin ilk beş modun deneysel doğal frekansları sırasıyla 1.216 Hz, 1.283 Hz, 3.598 Hz, 4.009 Hz ve 4.156 Hz olarak elde edilmiş, sayısal modelin (FEM3-DR) frekansları ise sırasıyla 1.220 Hz, 1.282 Hz, 3.592 Hz, 4.057 Hz ve 4.145 Hz olarak güncellenmiştir. Modal Güvence Ölçütleri sırasıyla MAC1: 0.967, MAC2: 0.985, MAC3: 0.810, MAC4: 0.845 ve MAC5: 0.711 gibi iyi bir eşleşme kabul edilen (5. Mod hariç) 0.80'den büyük MAC değerleri elde etmişlerdir.

R. M. Azzara ve diğerleri [48], Ortaçağda inşa edilen 48.4 m yüksekliğindeki Saat Kulesi'nin (Torre delle Ore) dinamik özelliklerini deneysel yöntemlerle araştırmışlardır. Kule İtalya, Loccada bulunmakta olup; taban kalınlığı 1.77m ile üst kalınlığı 0.85 m olan değişken kalınlığa sahip 5.1 m × 7.1 m dikdörtgen ebatlarında alt tabanı taş duvar ile üst tabanı tuğla duvar bloklardan oluşmaktadır. 25 Kasım 2016'da sismometrik istasyon aracılığıyla birkaç saatliğine ortam titreşim testi yapılmış, ilk dört modun deneysel doğal frekansları sırasıyla 1.05 Hz, 1.30 Hz, 4.20 Hz ve 4.30 Hz olarak elde edilmiştir. Kasım 2017'de, INGV firmasının 4 adet sismik istasyonu ile AGI Srl firmasının 2 adet üç eksenli ivmeölçerleri kulenin yüksekliği boyunca yerleştirilmiş ve sürekli bir uzun vadeli ortam titreşim izleme çalışması başlatmışlardır. Elektrik kesintileri ve kulenin içinde bulunan

çalışanlardan dolayı bazı zamanlar ivmeölçer kayıtların alınamadığı ifade edilmiştir. Birinci ve ikinci frekanslar tüm kayıtlarda iki farklı cihaz tarafından tespit edilmiş ve iki frekanstaki değişim % 3 seviyesinde olduğu bildirilmiştir. Kulenin dinamik özelliklerini etkileyen başlıca faktörler: sıcaklık, rüzgâr hızı, zil çanları, kalabalık hareketleri, tarihi merkezin etrafındaki trafik ve mikro titreme olarak sıralanmıştır. Kule üzerinde cihazlar takılıyken Çinden Peruya kadar birçok yerde deprem meydana gelmiş ve hepsini kaydedebilmiştir. Kule üzerindeki aletler, yüzlerce kilometreye kadar merkez üssü mesafeden ve düşük frekans aralığındaki depremleri açıkça tespit edebildiği belirtilmiştir. Son olarak; Saat Kulesi'nde ölçülen frekans değerleri, benzer geometrilere sahip diğer kulelerinkilerle uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır

D. Sabia ve diğerleri [49], 1099-1338 yıllarında inşa edilen yaklaşık 88.82 m yüksekliğindeki Ghirlandina Çan Kulesinin dinamik özelliklerini araştırmışlardır. Kule İtalya, Modenada bulunmakta olup; içi boş bir kesite sahip 11 m x 11 m kare tabanlı bir yapıdır. Yapı zemin ilişkisi incelenmiş; kayma dalgası hızını (VS) ölçmek ve küçük gerilme seviyelerinde toprak davranışını araştırmak için, çapraz delik testleri yapılarak toprak profili çıkarılmıştır. Daha yüksek titreşim modlarını düzgün bir şekilde elde etmek için on adet üç eksenli ivmeölçerler kuleye yerleştirilmiştir. 24.296 katı elemandan oluşan kulenin sayısal bir modeli (FEM) oluşturulmuş, dinamik analizi yapılmış ve ivmeölçerlerin yerleri belirlenmek için kullanılmıştır. Ortam titreşim testleriyle yapılan deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılarak, yapı-zemin ilişkisi dikkate alınan sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan sayısal model güncellenmiştir. Deneysel ilk dokuz modun doğal frekansları 0.740 Hz ile 9.790 Hz arasında bulunmuş. Sayısal modelin ilk altı modun frekansları deneysel veriler kullanılarak 0.740 Hz ile 9.790 Hz arasında güncellenmiştir. Güncellemeden sonra, MAC değerleri (yedinci ve sekizinci mod hariç) 0.879 üstü bulunmuş, deneysel ve analitik frekanslar arasındaki farklar, ilgili modlar için % 2.1'in altına düştüğü belirtilmiştir. 25 Ocak 2013'te sismik olayı sırasında kulede ivmeölçerlerle elde edilen dinamik parametrelerle, güncellenmiş sayısal model analizinden elde edilen dinamik parametrelerin uyuştuğu ve güncellenmiş sayısal modelin kuleyi temsil ettiği sonucuna varmışlardır.

S. V. Calcina ve diğerleri [50], farklı dinamik özellikleri bulunan 42 m yüksekliğinde ikiz çan kulelerinin ortam titreşim testleri aracılığı ve sonlu elemanlar

modellemesi yöntemiyle ana titreşim parametrelerini incelemişlerdir. 1785-1818 yılları arasında İtalya, Cagliari şehrinde inşa edilen Sant'Anna kilisesi, iki simetrik kuleli orijinal projeye dâhil olan doğu kulesinden yoksun olarak tamamlanmış. İkinci kule (doğu kule) 1938'de mevcut (batı kulesi) kuleye çok benzer geometrik özelliklere sahip olarak inşa edilmiştir. Doğu kulesi Karmaşık ve farklı yapım süreci nedeniyle; eski kule, kilisenin ana yapısal elemanı olarak yığma bir yapı olarak ve ikinci kule ise betonarme bir yapı olarak inşa edilmiştir. İki kule için üç eksenli tek termometre istasyonları, ivmeölçerler ve İnterferometrik yüzey araştırıcılar kullanılarak üç farklı deneysel ölçüm yapılmıştır. Kilisenin ilk beş modun deneysel doğal frekansları sırasıyla 2.30 Hz, 2.60 Hz, 2.90 Hz, 3.40 Hz ve 3.60 Hz olarak elde edilmiştir. Kilisenin tüm taşıyıcı elemanları (iki kule dâhil) tek sayısal modelde oluşturularak, kendi içinde beş alt bölüme ayrılmıştır. Sayısal modelin birinci kısmı, yapının ana gövdesinden (kilisenin tek ön nefesi ve yan şapeller), ikinci kısmı; transept ve kilise korosu yerinden, son üç kısmı ise; iki çan kulesi ile merkezi sekizgen kubbe 'den oluşmaktadır. Bu şekilde, binanın çeşitli bölümlerinin inşasında kullanılan farklı malzemeleri simüle etmek için her bir alt alana farklı fiziksel özellikler atamak mümkün olduğu ifade edilmiştir. Kilisenin ilk beş modun sayısal model frekansları sırasıyla 2.32 Hz, 2.58 Hz, ….. Hz, 3.25 Hz ve 3.65 Hz olarak güncellenmiş. Analitik sonuçların deneysel öz frekanslara yakın olduğu sonucuna varmışlardır. 2.9 Hz'deki deneysel mod, savaştan sonra restorasyon amaçlı kullanılan malzemelerin yapısal özelliklerinin bilinmemesinden kaynaklı teorik modelde gösterilemediği belirtilmişlerdir. Sayısal model analizinde, Kulelerin malzeme özellikleri birbirinden farklı olduğundan, doğu kulesinin maksimum yer değiştirimleri 2.50 Hz'da, batı kulesinin maksimum yer değiştirmeleri ise 2.61 Hz'da olduğu sonucuna varmışlardır.

G. Standoli ve diğerleri [51], İtalya, Ferrara'da bulunan dört farklı yığma taş çan kulesinin dinamik özelliklerini deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. San Giorgio katedralinin çan kulesi; 1412-1844 yılları arasında inşa edilmiş, 50.78 m yükseklikte ve 11.70 m kare kenar plana sahiptir. San Benedetto kilisesinin çan kulesi; 1621-1624 yılları arasında inşa edilmiş, 39.78 m eğimli yükseklikte ve ilk kat 7.33 m ile son kat ise 5.7 m kare kenar plana sahiptir. Matildea çan kulesi (Maria Vergine Kilisesi'nin); XII ile XV yüzyılları arasında inşa edilmiş, 29.96 m yükseklikte ve 7.2 m kare kenar plana sahiptir. Pomposa Manastırının çan kulesi; 1063 yılanda inşa edilmiş, 49.90 m yükseklikte ve 7.7 m kare kenar plana sahiptir. Kuleler depremler, savaşlar ve çeşitli nedenlerden dolayı

hasar görmüş ve onarılmıştır. Deneysel çalışma ile kaydedilen dinamik karakteristiklerin çıkarılması için EFDD ve SSI tanımlama teknikleri kullanılmış, her ikisinin de frekanslar ve modal şekiller açısından benzer sonuçlar verdiği belirtilmiştir. San Benedetto çan kulesinin eğimi, yapının frekans ve mod şekillerini diğer benzer kulelere göre önemli ölçüde etkilediğini ortaya çıkarmışlardır. Deneysel ve güncellenmiş sayısal modeller arasındaki frekans farkları %'5 altında iyi bir değer olduğu belirtilmiş. Aksine modlar arasındaki MAC sonuçları, hem ilk üç frekans için iyi değerler verdiği hem de yüksek modlar için önemli farklar olduğu ifade edilmiştir. Sonuçlar Tablo 1'de gösterilmektedir. Tarihi yapıların sayısal modeli; sadece görsel araştırmalara ve tarihsel analizlere dayanarak oluşturulamayacağı, deneysel yöntemlerle (tahribatsız test teknikleri) elde edilen veriler kullanılarak güncellenen sayısal modelin yapıyı daha iyi temsil edeceği ifade edilmiştir.

San Giorgio Çan Kulesi

Mode	f_{EXP} (Hz)	f_{NM}(Hz)	Δf (%)	Cross MAC (%)
1	1.030	1.023	0.68	89.70
2	1.060	1.061	0.09	86.30
3	3.213	3.056	4.89	100.00
4	4.656	4.576	1.72	68.30
5	4.703	4.812	2.32	66.70

San Benedetto Çan Kulesi

Mode	f_{EXP} (Hz)	f_{NM}(Hz)	Δf (%)	Cross MAC (%)
1	0.759	0.737	2.90	99.20
2	1.38	1.372	0.58	63.80
3	2.781	2.866	3.06	4.80
4	2.858	2.868	0.35	9.60
5	2.982	2.944	0.40	14.90

Matildea Tower Çan Kulesi

Mode	f_{EXP} (Hz)	f_{NM}(Hz)	Δf (%)	Cross MAC (%)
1	1.478	1.478	0.00	84.70
2	1.513	1.511	0.13	97.20
3	4.206	3.917	6.87	38.40
4	5.011	4.767	4.87	0.50
5	5.14	5.169	0.56	35.20

Pomposa Abbey Çan Kulesi

Mode	f_{EXP} (Hz)	f_{NM}(Hz)	Δf (%)	Cross MAC (%)
1	0.939	0.934	0.53	73.50
2	1.024	1.018	0.59	96.30
3	2.754	2.818	2.32	72.80
4	3.493	3.433	1.72	5.40
5	3.516	3.487	0.82	1.50

Tablo 1 Dört Farklı Kulenin Deneysel Ve Güncellenmiş Sayısal Modellerın Karşılaştırılması [51]

G. Osmancıklı ve diğerleri [52], 2010 yılında TC Kültür Bakanlığı tarafından restore edilen Ayasofya Kilisesi'nin çan kulesinin restore öncesi ve sonrası dinamik karakteristiklerini araştırmışlardır. Türkiye, Trabzon şehrinde bulunan ve XIII. Yüzyıla tarihlenen yığma çan kulesi yaklaşık 23.5 m yüksekliğinde inşa edilmiştir. Restorasyon öncesinde kulede ortam titreşim testleri yapılmış, restorasyon sonrasında da

ivmeölçerlerle ortam titreşim testleri tekrarlanarak kulenin yapısal davranışları arasındaki farklılıklar karşılaştırılmıştır. Restorasyon öncesi ve sonrası kulenin birinci ve ikinci bükme modları, birbirine yakın olduğu, ilk beş modda doğal frekansların azaldığı belirtilerek en fazla farkın üçüncü frekansta olduğu sonucuna varmışlardır. Kulenin restorasyon öncesi ve sonrası durumları arasındaki göreli farklılıklar% 0,16 ile% 5,74 arasında değiştiği açıklanmıştır. Kulenin ilk beş modun deneysel doğal frekanslarını restorasyon öncesi sırasıyla 2.557 Hz, 2.659 Hz, 6.216 Hz, 7.756 Hz ve 8.097 Hz olarak, restorasyon sonrası ise sırasıyla 2.553 Hz, 2.628 Hz, 5.862 Hz, 7.681 Hz ve 7.934 Hz olarak elde etmişlerdir.

2.5 Diğer Yapılar İle İlgili Çalışmalar

A. C. Altunışık ve diğerleri [53], Trabzon, Zağanos Tabyasının doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları gibi yapısal davranışları deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemişlerdir. Yaklaşık 17 m yükseklik, 15 m genişlik ve 10 m derinliğe sahip yapı kahverengi konglomera taşından yapılmıştır. OMA yöntemiyle, tabyanın dinamik özellikleri deneysel olarak incelenmiş, sonlu elemanlar yöntemiyle ANSYS paket programında tabyanın sayısal modeli oluşturulmuştur. Tabyanın FEM modelinde yığma kemerler ve tonoz, yığma duvarlar, demirli betonarme zeminler ve çelik kolonlar olmak üzere dört malzeme tanımlandığı ifade edilmiştir. Tarihi yapının ilk üç modun deneysel doğal frekansları sırasıyla 4.455 Hz, 4.750 Hz ve 6.967 Hz olarak elde edilmiş, sayısal modelin frekansları ise sırasıyla 5.945 Hz, 6.585 Hz ve 9.464 Hz olarak bulunmuştur. Deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki maksimum fark% 26 olarak elde edilmesine rağmen, sayısal ve deneysel mod şekilleri aynı olduğu ifade edilmiştir. Sayısal model güncellenmesi başka bir çalışmaya bırakılarak, güncellenmemiş sayısal modele analiz yapılmış. Yapılan analizde basınç ve çekme gerilmeleri sırasıyla 0.90 MPa ve 0.135 MPa gibi çok düşük değerler olduğu, maksimum yer değiştirmenin ise kalenin üst kısmında 7.8 mm olduğu belirtilmiştir. Time History analiz neticesinde ortamın titreşim ölçümlerinin, kalenin yapısal tepkisini tanımlamak için yeterli olduğu bildirilmiştir.

S. Tiberti ve diğerleri [54], İtalya Emilia Romagna'da bulunan ve 2012 depreminden etkilenen Finale Emilia kalesi üzerindeki dağınık hasarların ve kısmi çökmelerin meydana gelmesinin nedenlerini daha iyi anlamak amacıyla kapsamlı bir

sayısal model araştırması yapmışlardır. Strand7 ve ABAQUS paket programlarıyla İki sayısal model oluşturulmuş ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapı üzerinde üç farklı hipotez geliştirilmiş, birincisi deprem sırasında karşılaşılan gerçek durumu temsil ettiği, ikincisi kalenin tamamen restore edilmediği, sonuncusu ise tüm kalenin restore edildiği varsayılmıştır. Restore edilmemiş duvarlar için kabul edilen mekanik özellikler, komşu bölgelerde bulunan kıyı duvarları ve kiliseler üzerinde yapılan bazı deneysel veriler kullanılarak elde edilmiş. Ayrıca daha önce yapılan deneysel verilerden yararlanmışlardır. Yapılan sayısal analizlerde; Strand7 ve ABAQUS sayısal modellerin ilk üç modun frekansları sırasıyla 0.394 HZ, 0.384 Hz ve 0.381 Hz ile 0.398 Hz, 0.387 Hz ve 0.383 Hz olduğu, iki paket programı arasında MAC değerleri ise 0.983, 0.976 ile 0.909 gibi uygun değerler olduğu belirtilmiştir. Hem itme hem de doğrusal olmayan dinamik analizlerden sayısal modelde gözlemlenen hasarlarla gerçek durumda meydana gelen hasarların örtüştüğü, restore edilmiş kısmın neredeyse hasarsız bir şekilde, yine gerçek davranışla mükemmel bir uyum içinde olduğu belirtilmiştir. Deprem öncesi orijinal durum hipotezinde yapılan sayısal analizde ise deprem sırasındaki yıkılan kısımlar, gerçek durumda bulunan davranışa oldukça benzer bir şekilde tekrar yıkılacağı sonucuna varmışlardır. Son zamanlarda yapılan restorasyon müdahalesinin kale üzerinde daha fazla hasarı önleyebildiği, kalenin restorasyonlu bölümünü koruyarak oldukça faydalı olduğu belirtilmiştir. Restorasyon çalışmalarının tüm kaleye uygulanması, her iki yönde yapının dayanıklılığını büyük ölçüde artıracağı ve üç kulenin üst kısımlarındaki hasarları ve Batı'daki yerel çöküşü büyük ölçüde önleyeceği tezi savunulmuştur.

A. Nour ve diğerleri [55], Japonya'daki 2011 Fukushima Daiichi nükleer kazasının ardından, Kanada'da mevcut bir nükleer tesisin dinamik özelliklerini araştırarak, sismik güvenlik değerlendirmesini yapmışlardır. Nükleer tesis Kanada yenileme projesi kapsamında bir CANDU 6 reaktörü olarak 1983 yılında hizmete girmiştir. Reaktör binasının ve muhafaza duvarının sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan 3D sayısal modelleri, nominal dinamik malzeme özellikleri kullanmak yerine ortam titreşim ölçüm sonuçlarıyla ayarlanmış ve Time History yöntemiyle analiz edilmiştir. CANDU 6 reaktör binası, CW ve IS olmak üzere iki ayrı bölümden oluşmaktadır. CW; 1.5 m kalınlığında ve 47 m çapında dairesel sal temelinden oluşan ön gerilmeli beton bir yapıdadır. Ayrıca 1.05 m kalınlığa ve 20.7 m iç yarıçapa sahip silindirik bir duvarın yanı sıra 0.61 m merkezi kalınlığa ve 41.5 m yarıçapa sahip küresel

bir kubbeye sahiptir. IS ise bu kubbenin hemen altında 2540 m3 lük su deposu olan, ikinci bir betonarme küresel kubbeye sahiptir. Nükleer santralin iç kısımdaki yapıların ilk üç modun deneysel doğal frekansları sırasıyla 4.19 Hz, 5.47 Hz ve 6.54 Hz olarak elde edilmiş, sayısal modelin frekansları ise sırasıyla 4.21 Hz, 5.47 Hz ve 6.54 Hz olarak ayarlanmıştır. Nükleer santralin muhafaza duvarların ilk üç modun deneysel doğal frekansları ise sırasıyla 4.20 Hz, 7.50 Hz ve 9.70 Hz olarak elde edilmiş, sayısal modelin frekansları ise sırasıyla 4.26 Hz, 7.53 Hz ve 9.88 Hz olarak ayarlanmıştır. Yapılan sismik analizde; çelik takviyeler eklenerek ve duvar kalınlığının artırılarak güçlendirilmiş muhafaza duvarlarının ile CW ve IS yapılarının sismik eylemler açısından çok sağlam olduğu belirtilmiş. Nükleer tesisin güvenlik hedeflerine uyduğu sonucuna varmışlardır.

H. Kim ve diğerleri [56], Kore'de XII ile XVI yüzyıllarda inşa edilmiş 8 adet geleneksel tarihi ahşap yapının dinamik karakteristiklerini deneysel yöntemlerle incelemişlerdir. Yazarlar tarafından, Kore'de ulusal hazineler olarak belirlenen sekiz tarihi ahşap binanın yerinde ortam titreşim testi uygulanmış, dinamik özellikleri araştırılmış ve sonuçlar literatüre kazandırılmıştır. Kore'nin Gyeonnam Eyaletinde bulunan dikdörtgen planlı ahşap yapılardan üçü Geungnakjeon, Josadang ve Murayngsujeon- Goryeo hanedanlığı döneminde, diğer beş bina ise Joseon hanedanlığı döneminde inşa edilmiştir. Bunlardan Geungnakjeon Kore'nin en eski ahşap binası olma özelliğini taşımaktadır. Sekiz tarihi ahşap yapıda, üç vektörlü ölçüm yöntemi kullanılarak ortam titreşim testleri yapılmış, yapılara ait elde edilen dinamik karakteristikler tablo halinde çalışmalarında sunmuşlardır. Tarihi ahşap binaların ilk mod doğal frekansları 1.3051 Hz ila 3.1674 Hz arasında ve sönüm oranlarının % 1.06 ila% 2.25 arasında değişmekte olduğu vurgulamışlardır. Üç binanın (Geungnakjeon Bongjeongs, Josadang Buseoksa, Sebyunggwan) ilk burulma modunun enine yönde, ikinci burulma modunun uzunlamasına yönde olduğu, üç binanın (Daewungjeon Bongjeonsa, Murayngsujeon Buseoksa, Daewungjeon Tongdosa) ilk öteleme modunu uzunlamasına yönde ve ikinci öteleme modunu enine yönde olduğu, diğer iki binanın (Geojoam Yeongsanjeon Eunhaesa, Janggyoungpanjoen, Haeinsa) ilk modun enine yönde bir brulma modu ve ikinci modun bir dönme modu olduğu sonucuna varmışlardır. Neticede, ahşap binalarda ortam titreşim testinin uygulanabileceği, ancak bu tür binaların bir dereceye kadar katı davrandığını belirtmişlerdir.

I. Prowel ve diğerleri [57], ABD, Kaliforniya, Mojave yakınlarındaki Oak Creek Enerji Sistemlerinde bulunan bir rüzgâr türbininin modsal parametrelerini araştırmışlardır. Türbin 900 kW nominal güç, 55 m göbek yüksekliği ve 53.6 m pervane çapına sahiptir. İvmeölçerler, kule boyunca seçilen tüm lokasyonlara eşzamanlı olarak, tüm yüksekliği kapsayacak şekilde monte edilmiş ve ivmeölçerlerin tirbün hem çalışır vaziyetteyken hem de sabit durumdayken kayıt aldığı belirtilmiştir. Yazarlarca; elde edilen titreşim verileri kullanılarak, sabit durumdaki türbinin ilk altı modu ile çalışır durumdaki türbininin ilk dört titreşim modu (doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekilleri) MNEXT-ERA algoritmasını kullanılarak tanımlanmış ve literatüre kazandırılmıştır. Sayısal model için ilk etapta kule çeliğinin elastisite modülü 200 GPa ile bıçakların elastisite modülü 13 GPa alınmış, deneysel verilere göre de sayısal model güncellendiği ifade edilmiştir. Deneysel olarak elde edilmiş ve sayısal olarak tahmin edilen modsal parametreler arasındaki düzenleme ile güncellenmiş 3D FEM modelinin modern rüzgâr türbini dinamiklerini temsil ettiğini ve sismik tepki değerlendirmelerine temel oluşturacağını değerlendirmişlerdir.

B. Sevim ve diğerleri [58], 201 m yükseklik ve 270 m kret uzunluğuna sahip, Artvin ilinde bulunan ve Türkiye'nin en yüksek kemer barajı olan Berke Barajının dinamik karakteristiklerini incelemişlerdir. Yazarlarca; birinci aşamada ANSYS paket programında teorik model oluşturulmuş, ikinci aşamada Mayıs-2009'da dört günlük ortam titreşim testleri yapılmış, üçüncü aşamada deneysel veriler kullanılarak sayısal model güncellenmiş ve son aşamada güncellenmiş sayısal modelin Time History analizi yapılmıştır. Deneysel çalışmada, ilk sekiz modun doğal frekanslarını 2.75 Hz – 9.66 Hz aralıkları arasında, ayarlanmış sayısal modelde ise ilk sekiz modun doğal frekanslarını 2.55 Hz – 9.77 Hz aralığında elde etmişlerdir. Ayrıca 0.90'den büyük uygun MAC değerleri elde etmişlerdir. Güncellenmemiş sayısal model frekansları ile deneysel sonuçların doğal frekansları arasında yaklaşık % 15 fark olduğu, güncellemeyle bu farkın yaklaşık %2-3'e kadar indiği belirtilmiştir. Yapılan analizlerde, ilk sayısal model ile ayarlanan sayısal model arasında; maksimum yer değiştirmeler tepe noktasında sırasıyla 14.6 ve 10.3 cm olduğu, maksimum ana gerilmeler benzer bölgelerde sırasıyla 15.4 ve 12.5 MPa olduğu, minimum temel gerilmeler ise yine benzer bölgelerde 15.1 ve 11.9 MPa olduğu sonucuna varmışlardır. Güncellenmemiş sayısal modelde, baraj gövdesi üzerindeki gerilmelerin daha fazla olduğuna dikkat çekmişlerdir.

BÖLÜM 3. YÖNTEM

3.1 Deneysel Yöntem

Bir yapının dinamik özellikleri olan doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönümleme oranlarının ortaya çıkarılması için yerinde deneysel yöntemler yapılması son derece önemlidir. Bunun için Deneysel Modal Analiz Yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem deneysel ölçüm yöntemlerine bağlı kalınarak ve yapılardaki titreşimleri dikkate alarak yapının, dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılan tahribatsız bir test yöntemidir. Deneysel Modal Analiz Yöntemi; yapının dinamik özelliklerini deneysel olarak tanımlamak için Zorlanmış Titreşim Testi (FVT) ve Ortam Titreşimi Testi (AVT) olmak üzere iki ayrı yönteme ayrılır. Bu iki yöntem yapı üzerine gelecek titreşim kaynaklarına göre sınıflandırılmıştır. Zorlanmış Titreşim Testi (FVT); yapıya dışardan verilen bir kuvvet (darbe çekici, sarsıcılar vb.) ile yapıda titreşim sağlanmakta, sonrasında yapının bu kuvvete karşı vermiş olduğu tepki ölçülmektedir. Ortam Titreşimi Testi (AVT) ise; yapının çevresel (rüzgâr, taşıt yükü, deprem, patlatma, insan vb.) nedenlerle kendiliğinden oluşan titreşime karşı göstermiş olduğu tepki ölçülmektedir

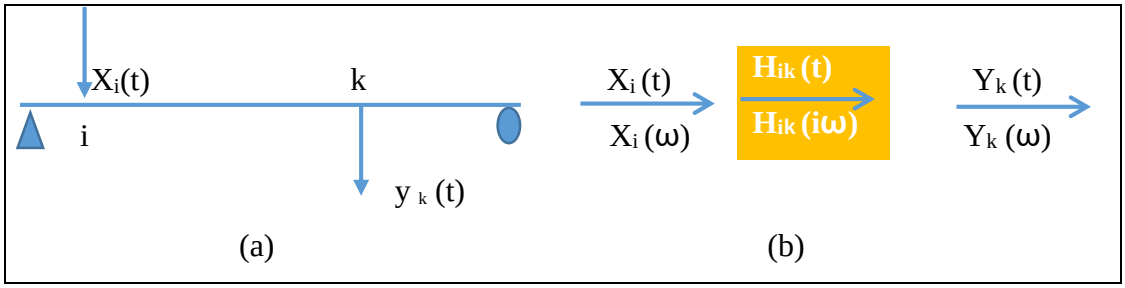
3.1.1 Zorlanmış Titreşim Testi Yöntemi (FVT)

Zorlanmış titreşim testi (FVT) yöntemi rezonans konseptine dayanmaktadır. Binanın en üst kotuna dinamik bir harmonik kuvvet uygulanarak, kuvvetin frekansı binanın doğal frekanslarından birine eşitse, binanın rezonans frekanslarını uyarmak mümkündür. Kuvvetin frekansı, 0.5-16.0 Hz aralığında küçük adımlarla kademeli olarak değiştirilebilir. Rezonans durumu, ölçüm noktasındaki ivme tepkisi maksimum olduğunda ulaşır ve sonrasında kuvvetin frekansı artmaya devam etse bile azalmaya devam eder. Bu şekilde, her dik yön ve burulma için frekans tepki eğrileri elde edilir. Şekil 6'de gösterilen zorlanmış titreşim ekipmanı; 1-15 Hz frekans aralığında harmonik sinüzoidal kuvvetle uyarma için eksantrik bir kütle çalkalayıcı ve sinyal kayıt ekipmanı içerir (R. Talep ve diğ.) [25].



Şekil 6 Harmonik kuvvetin uyarılması için eksantrik kütle çalkalayıcı [25]

Zorlanmış Titreşim Yöntemi; yapı Şekil 2a'da gösterildiği gibi X_i (t) olan dışardan zorlama bir kuvvetle i noktasından uyarılır, sonrasında yapının bu kuvvete göstermiş olduğu tepki olan Y_k (t) ile yapay kuvvet sinyali X_i (t) birlikte ölçülür. Bu zaman sinyallerinin frekans alanına dönüştürülmesi ve tüm Frekans Tepkisi Fonksiyonlarının hesaplanması etki-tepki fonksiyonu zaman sinyalleri arasındaki ilişki (FDF-H_{ik}), Transfer Matrisi $H_{ik}(i\omega)$ olarak da adlandırılan (Şekil 7) Frekans Tepkisi Matrisini (FDF) verir. (Schwarz ve Richardson) [59].



Şekil 7 Zorlanmış Titreşim Yönteminin a) şematik gösterimi b) Frekans davranış fonksiyonunun belirlenmesi (Schwarz ve Richardson, 1999). [59]

$$H_{ik}(i\omega) = \frac{y_i(\omega)}{x_i(\omega)} \qquad (3.1)$$

Denklem (3.1); Zorlanmış Titreşim Yönteminde, etki-tepki sinyalleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. $H_{ik}(i\omega)$; frekans davranış fonksiyonu, X_i (ω); frekans ortamındaki tepki fonksiyonunu, Y_k (ω) ise; frekans ortamındaki etki fonksiyonunu ifade etmektdir (Schwarz ve Richardson) [59].

İnşaat mühendisliği araştırmalarında kullanılan uyarıcıların çok fazla taşınma imkânı bulunmamaktadır. Bundan dolayı, uyarma noktası sabit tutularak, tepki noktaları ise yapının üzerinde ya da tam tersi yönde hareket ettirilerek Zorlanmış Titreşim Testi yapılmaktadır. Makine mühendisliğinde ise; test edilecek yapıların nispeten daha küçük ve uyarılmalarının daha kolay olmasından dolayı çekiç gibi uyarıcıların kullanımı daha yaygındır. Doğrusal sistemler için, Frekans Tepkisi Matrisi diyagonaldir. Bu, Şekil 8'teki matrisin bir satırını veya bir sütununu belirlemeye yeterli olduğu anlamına gelir. Frekans Tepkisi Matrisi, incelenen yapının dinamik doğal özelliklerini (doğal frekanslar ve ilişkili mod şekilleri ve sönümleme katsayıları) belirlemek için gerekli tüm bilgileri içerir. Zorunlu Titreşim Testinin sonuçlarından bu modsal parametreleri çıkarmak için piyasada çok sayıda özel yazılım programları bulunmaktadır (Reto Cantieni) [60].

$$H(i\omega) = \begin{bmatrix} H_{11} & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & H_{ik} & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & H_{nn} \end{bmatrix}$$

Şekil 8 Frekans tepki matrisi (Reto Cantieni) [60]

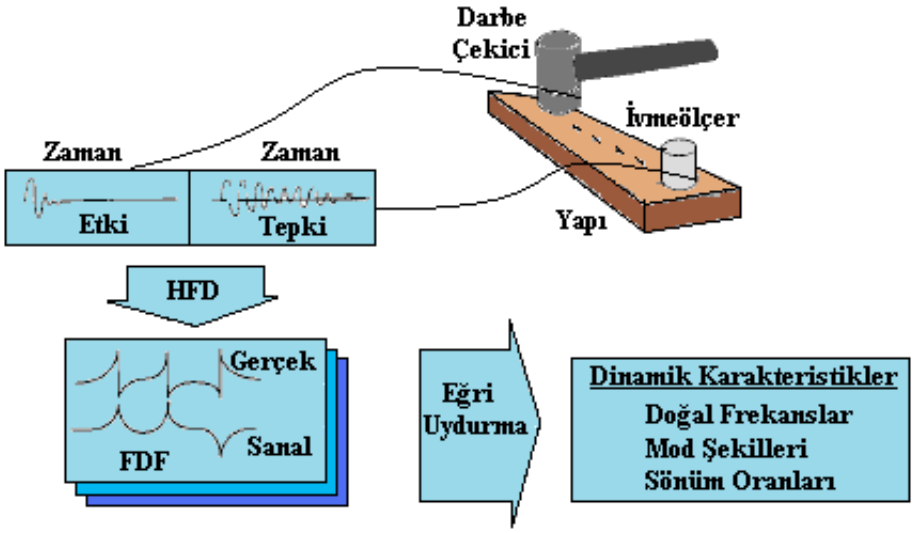
- **Uyarıcılar (Fvt)**

Uyarıcılar olarak geniş bantlı titreşim jeneratörleri ile dar bantlı titreşim jeneratörleri bulunmaktadır. Geniş bantlı titreşim jeneratörleri, bu frekans bandındaki yapının tüm doğal titreşimlerini aynı anda uyarmaktadır. Darbeli çekiçler ile rastgele veya kontrollü güç üreten servo-hidrolik veya elektro-dinamik çalkalayıcılar örnek olarak gösterilebilir. Dar bantlı titreşim jeneratörleri ise bir seferde belirli bir frekansı uyarır.

Burada hidrolik veya elektrikli çalkalayıcılar kullanılmakla birlikte, tersine dönen kütleler kullanan mekanik cihazlar örnek olarak gösterilmektedir (Reto Cantieni) [60].

- **Tepki Cihazları (Fvt)**

Tepki ölçümü için seçilen sensör tipi, hassasiyet ve frekans aralığı ile ilgili gerekliliklere uyulmalıdır. Ayrıca, bir yapıya uygulanması ve taşınması çok daha kolay olduğu için, ivmeölçerler çoğu durumda en iyi seçimdir. Yer değiştirmenin birçok noktada ölçülmesi inşaat mühendisliği yapıları için çok zahmetli bir iştir. Hız transdüserleri, f> 4.5 Hz temel doğal frekans sergileyen yapılar için çok uygundur. Çoğu inşaat mühendisliği yapısı daha düşük frekanslar sergiler. Bu nedenle, oldukça hassas ivmeölçerler esas olarak bu yapıları (10 V / g) araştırmak için seçilir. Piezoelektrik sensörler temel doğal frekansı f> 1 Hz olan yapılar için uygundur. Daha düşük frekanslar sergileyen yapılar için kuvvet dengesi tipindeki sensörler tercih edilmelidir (Reto Cantieni) [60].



Şekil 9 Darbe çekici ile dinamik karakteristiklerin belirlenmesi (Schwarz ve Richardson, 1999) [59]

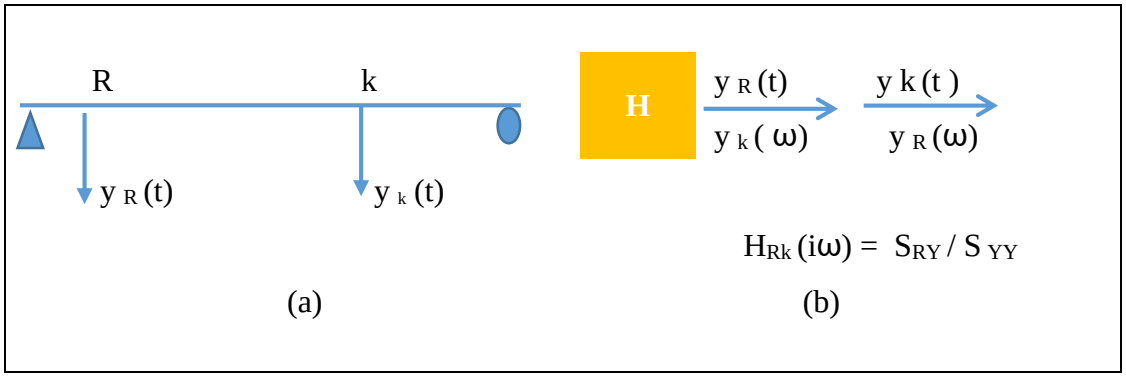
3.1.2 Operasyonel Modal Analiz Yöntemi (OMA)(AVT)

Deneysel Modal Analiz Yöntemi için en uygun olanı Ortam Titreşim Testi (AVT) yöntemini uygulamaktır. AVT çoğu yerde Operasyonel Modal Anliz (OMA) olarakta geçmektedir. AVT; özellikle tarihi yapılar için çok yararlı olan tahribatsız deneysel bir yöntemdir, çünkü yapının çevresel (ortam) mikro titreşimleri ölçüldüğünden hiçbir

uyarma ekipmanına ihtiyaç duyulmamaktadır. Prosedür, yapay bir uyarıcı kullanılmadan mikro titreşimlerin (insan, rüzgâr, trafik, deprem vb.) gerçek zamanlı olarak kaydedilmesinden ve kayıtların uygun yazılımla işlenebilmesinden oluşmaktadır. Yapının tüm doğal frekanslarının uyarılabilmesi için, ortam titreşiminin mümkün olduğu kadar geniş bantlı olması gerekmektedir, aksi durumda yapının tüm doğal frekanslarının uyarılmama riski bulunmaktadır.

Ortam titreşim testi insan rüzgâr, trafik, deprem vb. gibi ortam uyarımlarına dayanır. Çok hassas sismometreler, rastgele bir sinyal türü olan ve çeşitli yapısal titreşim modlarını harekete geçirecek kadar geniş frekans aralığındaki uyarma frekanslarından oluşan mikrotremorları yakalayabilir (R. Talep ve diğ.) [25].

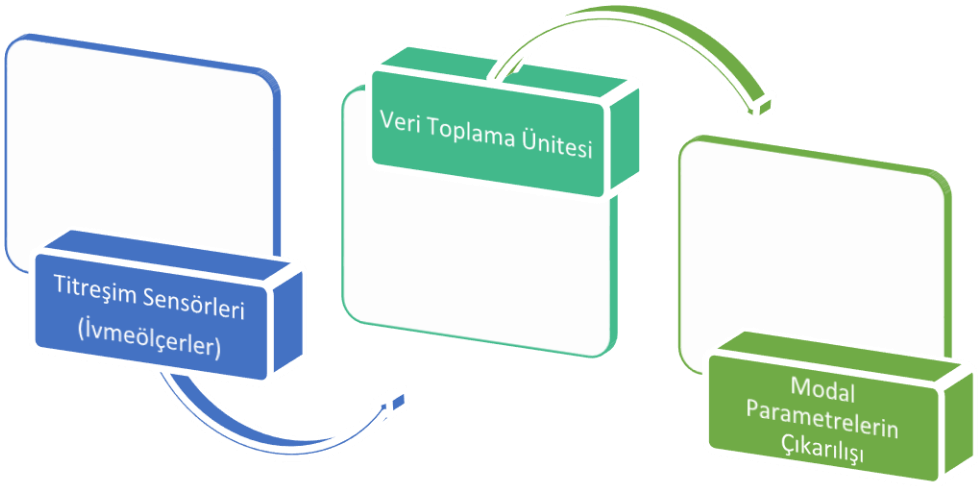
Ortam Titreşim Yöntemi; yapı Şekil 10 (a)'da gösterildiği gibi ortam veya çevre titreşimlerinden (insan, rüzgâr, trafik, deprem vb.) gelen bilgiler referans noktası olarak seçilen R'deki $y_R(t)$ sinyalleri ile gezici bir nokta olan k'daki $y_k(t)$ sinyalleri birlikte ölçülür. Bu zaman sinyallerinin frekans alanına dönüştürülmesi ve tüm Frekans Tepkisi Fonksiyonlarının hesaplanması etki-tepki fonksiyonu zaman sinyalleri arasındaki ilişki (FDF-H_{Rk}), Transfer Matrisi $H_{Rk}(i\omega)$ olarak da adlandırılan (Şekil 10 b) Frekans Tepkisi Matrisini (FDF) verir (Reto Cantieni) [60].



Şekil 10 a) Ortam Titreşim Test Şeması; R bir referans noktasıdır, k ise bir gezici noktasıdır. b) Referans noktası R ile gezici tepki noktası k sinyalleri arasındaki çapraz ilişkinin hesaplanması formülü (Schwarz ve Richardson, 1999) [59]

AVT araştırmalarından modal parametreleri ayıklayan ilk yazılım paketi, geçen yüzyılın doksanlı yıllarında bir inşaat mühendisi tarafından geliştirilmiştir. Bugün, piyasada, Şekil 10(b)'de şematik olarak gösterilen frekans alanı prosedürlerini kullanan çeşitli paket programları bulunmaktadır. Bu paket programları, FDD (Frekans Alanı

Ayrışımı) ve EFDD (Gelişmiş FDD) gibi daha karmaşık yöntemler sunmakta ve sönümleme değerlerini de vermektedir. Bu yöntemler son zamanlarda ARTEMİS paket programı tarafından korunmaktadır (www.svibs.com). Her ne kadar, en son sinyal işleme araçları, Şekil 10'te gösterildiği gibi frekans alanında bir analize dayanmasa da, Stokastik Altuzay Tanımlaması (SSI); zaman alanında tamamen çalışan bir yöntemdir. SSI, temel olarak, ölçülen zaman sinyallerini optimum bir şekilde sentezleyen çok sıralı bir model olarak görünür. Bu yöntem özellikle AVT araştırmaları için geliştirilmiştir (Reto Cantieni) [60].



Şekil 11 Operasyonel Modal Analiz işlem Sırası

Burada işlem sırasına göre ilk olarak dinamik ayarlama testi yapılır. Öncelikle tüm ivmeölçerler (sismometreler) aynı pozisyonda ve yönde yerleştirilir, böylece sinyaller aynı anda kaydedilerek Fourier Spektrumları elde edilir. Sonrasında, aynı yönde olmak kaydıyla ivmeölçerlerin pozisyonları ve konumları değiştirilerek eşzamanlı kayıt yapılır. Böylelikle yapının titreşim mod şekilleri elde edilmiş olur. Burada önemli olan, ivmeölçerlerden birinin referans noktası olarak seçilmesidir. Ayrıca; stokastik olmayan uyarılmaların dikkate alınabilmesi için de kayıt süresinin mümkün olduğunca uzun tutulması gerekmektedir (F.Aras ve diğ.) [2].

Kayıt işlemlerinden sonra elde edilen verilerin işlenmesi ve analizi yapılması gerekmektedir, bunun için çeşitli yazılım programları bulunmakla birlikte en yaygın olanı ARTeMIS yazılım programıdır.

Bu yazılım programları, yapıda ivmeölçerlerle elde edilen deneysel verilerin işlenmesi ve analizinin sağlanması için frekans ortamında piklerin seçilmesi (Peak Picking-PP), Frekans alan ayrışması (Frequency Domain Decomposition-FDD), özsistem gerçekleştirme algoritması (eigensystem realization algorithm-ERA), Stokastik altuzay tanımlaması (Stochastic Subspace Identification-SSI) gibi teknikleri kullanmaktadır. Burada ilk iki metod klasik zaman alanı yöntemini kullanmakta, son iki metod ise frekans alan yöntemini kullanmaktadır. Operasyonel modal analizin temel aldığı; zaman alan yöntemi, durum uzayı dinamik modeline, frekans alan yöntemi ise fourier dönüşümü fikrine dayanmaktadır (A.C. Altunışık ve diğ.) [32].

3.1.2.1 Operasyonel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ölçüm Sistemi

Operasyonel modal analiz; titreştiriciler, ölçüm sistemi ve analiz yazılımı olmak üzere üç alt başlıkta özetlenmektedir. Doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları gibi deneysel modal parametreleri çıkarmak için tarihi yapı üzerinde ortam titreşim testleri yapılmıştır. Ortam titreşim testleri için ölçüm ekipmanı olarak tek eksenli ve üç eksenli ivmeölçerler kullanılmış. Veri toplama sisteminden elde edilen sinyaller daha sonra PULSE Labshop yazılımına aktarılmıştır. Parametre tahmini için Operasyonel Modal Analiz yazılımı kullanılmış. Modal karakteristikler sırasıyla frekans ve zaman domenileri için EFDD ve SSI yöntemleriyle ayrı ayrı çıkartılmıştır (A.C. Altunışık ve diğ.) [32].

- **Titreştiriciler**

Tarihi yapıların zarar görmemesi için dışarıdan herhangi bir müdahalede bulunulmaması gerekmektedir. Tarihi yapıların dinamik karakteristiklerinin ortaya çıkarılması için Operasyonel Model Analiz en uygun yöntemdir. Yapıya herhangi bir müdahalede bulunmaksızın deprem, yaya hareketleri, rüzgâr, taşıt etkileri gibi doğal veya çevresel birçok etki ile titreşmektedir. Diğer taraftan, doğal titreşim haricinde darbe çekiçleri, sarsıcılar gibi yapay titreştiricilerde normal binalar için kullanılmaktadır.

- **Ölçüm sistemi**

İvmeölçerler; OMA yönteminde, yapıya verilen yapay titreştiricilerden gelen titreşimlerin veya çevresel etkenlerden gelen titreşimlerin ölçümü için piyasada bulunan kablolu veya kablosuz ivmeölçerler kullanılmaktadır. İvmeölçerler; mikrotremorların kırılması, yüzey dalgaların ölçülmesi, toprağın rezonas frekansını vurgulamak, sismik kırılma, sismik yansıma, mikrotremor korelasyonu gibi jeofizik alanlarında, sismoloji alanında, modal analiz ve yapı sağlığı izleme gibi mühendislik alanlarında, petrol ve gaz arama alanlarında olmak üzere birçok yerde kullanılmaktadır. İvmeölçerler, yapının modal analizi oluşturmak ve dinamik davranışlarını belirlemek için yapılar üzerine konulur. Çok hassas olan ivmeölçerler sayesinde yapının dinamik davranışı bir uyarım kaynağı olan arka plan gürültüsü kullanılarak rahatlıkla belirlenebilmektedir. Çok rijit yapılarda veya dinamik karakteristiklerinin önemli genliklerle analiz edilmesi arzulanan yapılarda ise vibrasyonlar, darbeli aletler veya açık alanda kontrollü patlamalar gibi dışarıdan kaynaklı kuvvetlerle yapılar uyarılmak suretiyle ivmeölçerlerin kayıt alması sağlanabilir. Yapının modal analizinin iyi oluşturulabilmesi için yeterli sayıda ve sürede ivmeölçerlerin yapının uygun yerlerine yerleştirilmesi ve ivmeölçerlere, kayıt esnasında herhangi bir fiziki müdahalede bulunulmaması gerekmektedir. Elektrik kesintisi, dışarıdan insan müdahalesi vb. etmenler ivmeölçerlerin kayıt prosedürünü etkileyecek olmasından dolayı dikkat edilmesi gereken hususlardır.

Altı adet piezoelektrik tek eksenli ivme transdüserine bağlı 24 bit dijital toplama kartları ile donatılmış kompakt bir birim, toplama sistemini oluşturur. İvmeölçerler, düzlem dışı doğrultu boyunca kanadın ikinci ve üçüncü kemer seviyelerine karşılık gelen yapıya sabitlenmiştir. Testler, önceden belirlenmiş bir program üzerinden tek bir kurulum kullanarak belirli bir örnekleme hızında veri elde etmekten oluşmaktadır. Yapının sayısal modeli oluşturulmuş ve sayısal modele bakılarak yapıda önemli dinamik amplifikasyonların beklendiği yerlere ivmeölçerler yerleştirilmiştir (F. Lazooni ve diğ.) [30].

İvmeölçerler, meydana gelen titreşimleri etki-tepki prensibiyle elektriksel voltaj üreterek çalışmaktadır. Bu elektrik yükünün kristal üzerindeki değişimi yer çekimi ivmesinin değişimi ile doğru orantılıdır. İvmeölçerlerdeki sismik kütlenin ivme altında maruz kaldığı atalet kuvveti piezoelektrik kristale etkimekte ve ivme ile doğru orantılı bir

elektrik sinyali çıkışı vermektedir. İvmeölçerlerde bulunan sinyal koşullayıcı devre, sinyal çıkışını taşınabilir voltaj sinyaline çevirmektedir. Bu şekilde üretilen sinyal veri toplama birimine aktarılmaktadır (T.Türker) [61].

İnşaat mühendisliğinde birçok yapı daha düşük frekanslarda olduğundan dolayı oldukça hassas ve geniş bantlı frekans aralığına sahip ivmeölçerlerin tercih edilmesi gerekmektedir. Piezoelektrik sensörler temel doğal frekansı f> 1 Hz olan yapılar için uygun olup; daha düşük frekanslar sergileyen yapılar için kuvvet dengesi tipindeki sensörler tercih edilmelidir. Tez konusu olan Tophâne-i Âmirede, deneysel çalışma yapılırken SARA, Acebox ivmeölçerleri kullanılmıştır. Bu ivmeölçer, aynı anda 3 eksende ölçüm yapabilmektedir. İvmeölçerin teknik özellikleri ise; ivme aralığı +/-2g, gürültü seviyesi $< 20ng/\sqrt{Hz}$, çalışma sıcaklığı -20/+70 C, frekans aralığı 1-600 Hz ve boyutları 205*107*107 mm olarak sıralanmaktadır.



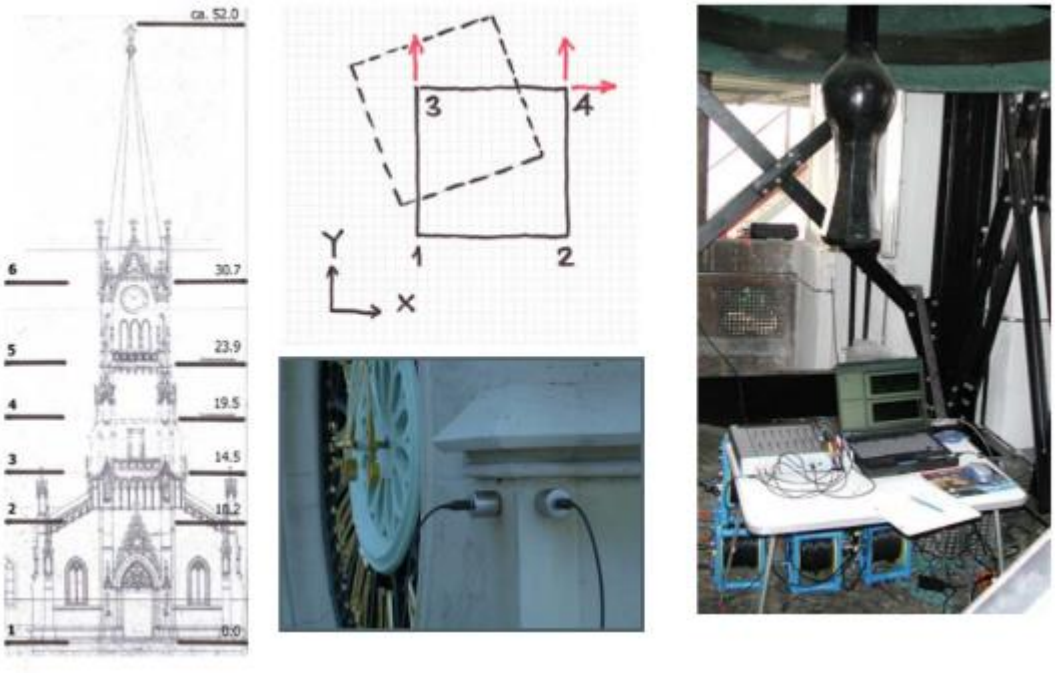
Şekil 12 01.08.2019 Tophâne-i Âmire ölçümünden, solda; ivmeölçer ve kutusu, sağda; ivmeölçer ve güç kaynağı

Veri toplama birimi; ivmeölçerlerden elde edilen verileri kendi algoritmasıyla derlemektedir. İvmeölçerler yapı üzerine yerleştirildikten sonra titreşimler sayesinde oluşturulan elektrik sinyalleri veri toplama birimince kaydedilmektedir. Kaydedilen

sinyaller ise daha sonra bilgisayar ortamına aktırılmaktadır. Aktarılan sinyaller ilk etapda ham olup, işlenmesi gerekmektedir. Bunun nedeni ise çevre ve insan sesinin oluşturduğu gürültü sinyallere karışmasıdır. Yapının dinamik karakteristiklerinin doğru bir şekilde ortaya çıkarılabilmesi için bu istenmeyen seslerin uygun bir şekilde bilgisayar ortamında çeşitli yazılımlarla ayıklanması veya filtrelenmesi gerekmektedir. Bunun için veri toplama biriminde sinyal koşullama yapılmaktadır. Sinyal koşullama; gürültü sinyallerini bastırmak, gereksiz sinyalleri ayıklamak, düşük seviyedeki sinyallerin kalitesini artırmak ile ivmeölçerleri yapının ve çevrenin koşuluna göre seçmek ve ayarlamak olarak sıralanabilir (T.Türker) [61].

Tez konusu olan Tophâne-i Âmirede, deneysel çalışma yapılırken kullanılan SARA, Acebox ivmeölçerlerinin her birisinin kendi veri depolama birimi bulunmaktadır.

Tüm ölçüm noktalarında kaydedilen sinyallerin sonradan işlenmesi ve analizi için ARTeMIS yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım Tepe Toplama tekniği ve Frekans Alanı ayrışmasına dayanır ve elde edilen verilerin iyi grafik sunumunu sağlamaktadır.



Şekil 13 ivmeölçerler ve veri toplama merkezi, R. Cantieni [60]

3.1.2.2 Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (EFDD) Yöntemi

Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (EFDD) Yöntemi, Frekans alan ayrışması (FDD) yönteminin geliştirilmiş halidir. Bu yöntemle, sinyallerin ölçülmesiyle elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonlarında pikler seçilerek yapıya ait modlar belirlenmektedir (Jacobsen ve diğ.) [62]. EFDD yöntemi, yakın mesafeli modları tespit edebilmektedir. Bu gibi durumlarda, belirli bir frekansın çevresinde tekil bir değerden fazlası maksimuma ulaşacaktır ve sıfır olmayan tekil bir değere karşılık gelen her tekil vektör bir mod şeklini verecektir (C. Gentile ve N. Gallino) [33]. (FDD) yöntemi; klasik yaklaşımla ilgili tüm dezavantajları ortadan kaldırır, ancak kullanıcı dostluğunun önemli özelliklerini korur, hatta spektral yoğunluk fonksiyonu ile doğrudan ilgilenerek fiziksel anlayışı geliştirir. Ayrıca teknik, yanıt sinyallerindeki harmonik bileşenlerin açık bir göstergesini de verir (R. Brincker ve diğ.) [63].

EFDD'de bilinmeyen etki ve ölçülen tepki arasındaki bağlantıyı aşağıdaki denklem (3.2)'de tanımlamıştır (Bendat ve Piersol) [64].

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega)^{*} G_{xx}(j\omega) H(j\omega)^{T} \tag{3.2}$$

Gyy(jω); tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu,

H(jω) ; frekans davranış fonksiyonunu,

Gxx(jω); etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu (PSD),

* ; komplex eşleniği,

T ; transpoze olarak tanımlanmaktadır.

Burada Gxx (jω), girdinin (r × r) güç spektral yoğunluk (PSD) matrisi, r girdi sayısı, Gyy (jω) tepki (m × m) PSD matrisi, m tepki sayısı, H (jω), (m × r) frekans tepki fonksiyonu (FRF) matrisidir (R. Brincker ve diğ.) [63].

Bazı matematiksel işlemlerden sonra tepki sinyaline ait Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu tek kutuplu artık değer fonksiyonu olarak denklem (1.3)'deki gibi tanımlanmaktadır (Bendat ve Piersol) [64].

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^{n} \frac{R_k}{j_\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j_\omega - \lambda_k^*} \tag{3.3}$$

n ; mod sayısı,

λ_k ; kutup fonksiyonu,

Rk ; artık değer fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır.

$$R_k = \phi_k \gamma_k^T \tag{3.4}$$

Burada $\phi_k \; ve \; \gamma_k$sırasıyla mod şekil vektörü ve kalıcı katılım vektörüdür. R. Brincker ve diğ [63].

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^{n} \sum_{s=1}^{n} \left[\frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R^*}{j\omega - \lambda_k^*}\right] + xC \left[\frac{R_s}{j\omega - \lambda s} + \frac{R_s^*}{j\omega - \lambda s}\right]^H \tag{3.5}$$

$$G_{xx}(j\omega) = C \tag{3.6}$$

Buradaki H üst simgesi, karmaşık bir konjugatı belirtir ve devreder. İki kısmi fraksiyon faktörünün türetilmesi ve Heaviside partial fraction teoremi kullanılması, bazı matematiksel manipülasyonlardan sonra, çıktı PSD'si denklem (3.7)'deki gibi bir kutup / kalıntı formuna indirgenebilir (R. Brincker ve diğ) [63].

$$G_{yy}(jw) = \sum_{k=1}^{n} \frac{A_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{A_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{B_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \tag{3.7}$$

Burada, Ak tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonuna (PSD) ait ''k'' artık değer matrisi olarak belirtilmektedir (Bendat ve Piersol) [64].

Artık matris bir (m × m) Hermitian matrisidir ve denklem (3.8) de verilmektedir (R. Brincker ve diğ.) [63].

$$A_k = R_k C \left[\sum_{s=1}^{n} \frac{\dot{R}_S^T}{-\lambda_k - \lambda_s^*} + \frac{\dot{R}_s^T}{-\lambda_k - \lambda_s^*}\right], \dot{R} = R^* \tag{3.8}$$

''k''nıncı modundan tortuya katkı denklem (3.9) daki gibidir. Burada α_k; $\lambda_k = -\alpha_k + j\omega_k$ kutbun gerçek kısmı olan eksi tarafıdır. Göründüğü gibi, sönüm hafif olduğunda ve dolayısıyla hafif sönüm durumunda bu terim hakim olur; tortu, mod şekli vektörü ile orantılı hale gelir (R. Brincker ve diğ.) [63].

$$A_k = \frac{R_k C \dot{R}_k^T}{2\alpha_k} \tag{3.9}$$

FDD tanımlamasında ilk adım PSD matrisini tahmin etmektir. Ayrık frekanslarda ω = ωi bilinen PSD Ĝyy (jω) çıktısının tahmini daha sonra matrisin Tekil Değer Ayrışması (SVD) alınarak ayrıştırılır (R. Brincker ve diğ.) [63].

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k\epsilon Sub(\omega)} \frac{d_k \phi_k \phi_k^T}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\bar{d}_k \bar{\phi}_k \bar{\phi}_k^T}{j\omega - \bar{\lambda}_k} \tag{3.10}$$

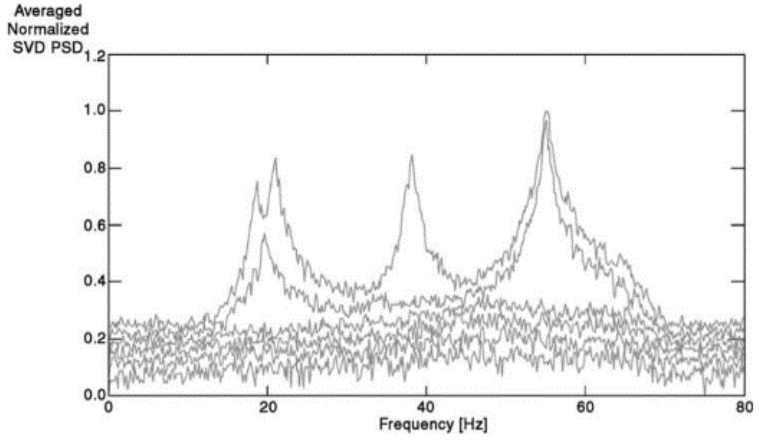
$$\hat{G}_{yy}(j\omega_i) = U_i S_+ i U_i^H \tag{3.11}$$

Yukarda elde edilerek denklem (3.10); U_i = [u_{i1}, u_{i2}, ..., u_{im}] matrisi, u_{ij} tekil vektörlerini tutan üniter bir matristir. S_i diagonal bir matris olup; skaler tekil değer olan s_{ij}'yi tutmaktadır. Spektrumdaki ''k''nıncı moduna karşılık gelen bir zirvenin yakınında bu mod veya belki de olası bir kapalı mod baskın olacaktır. Eğer sadece ''k'' modu baskınsa, denklem (3.10)'daki gibi sadece bir terim olacaktır. Bu PSD fonksiyonu, φ^'nin mod şekil tahmini ile pik çevresindeki frekans çizgileri için tekil vektörlerle karşılaştırarak tanımlanır. Φ ile yüksek modal güvence kriteri (MAC) değerine sahip tekil bir vektör bulunduğu sürece, karşılık gelen tekil değer yoğunluk fonksiyonunun tek serbestlik derecesine (SDOF) aittir (R. Brincker ve diğ.) [63].

$$\tilde{G}_{yy}(\omega_i) = s_i u_{i,1} u_{i,1}^H \qquad \omega \to \omega_r \tag{3.12}$$

$$\bar{\Phi}_r = u_{i,1} \tag{3.13}$$

Spektrumdaki r'ninci moduna karşılık gelen bir pik noktasına yakın olan PSD matrisi, 1. aşama matrisine yaklaşır. r'ninci rezonansındaki ilk tekil vektör, r'ninci modu şeklinin bir tahminidir, denklem (3.12-3.13) (T.Lui diğ.) [37].



Şekil 14 Psd matriksinin tekil değerinin tepkisi R. Brincker ve diğ. [63]

Tophâne-i Âmirede ivmeölçerlerle elde edilen veriler toplama merkezinde işlenip, bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Burada ARTeMis yazılım programı kullanılarak Peak Picking-PP ve EFDD yöntemi ile yapının dinamik karakteristikleri deneysel olarak ortaya çıkarılmıştır.

3.1.2.3 Stokastik Altalan Belirleme (SSI) Yöntemi

Operasyonel modal analiz için uygun olan Stokastik altuzay tanımlama (SSI) yöntemi, doğrudan zaman verileriyle çalışan ve yalnızca çıktıya sahip bir zaman alanı yöntemidir. Titreşimli bir yapının dinamik karakteristiği, doğrusal ikinci mertebeden diferansiyel denklem (3.12) ile ile tanımlanabilir

$$M\ddot{U}_{(t)} + C_2\dot{U}_{(t)} + KU_{(t)} = F_{(t)} = B_{2u(t)} \tag{3.12}$$

M, C_2, K sırasıyla yapının kütle, sönümleme ve sertlik matrisleridir. F (t) uyarma kuvveti, U (t) ise sürekli t zamanındaki yer değiştirme vektörüdür. Kuvvet vektörü F (t), B_2(t) girdilerin yerinde tanımlandığında ve u(t) girdileri zamanın bir fonksiyonu olarak tanımlandığında faktörleştirilebilir. Durum vektörü x (t) aşağıdaki tanımlarla, durum matrisi A_c ve sistem kontrolü, katsayı matrisi B_c'yi etkiler (D.-J. Yu ve W.-X. Ren)[65].

$$x_{(t)} = \begin{pmatrix} U & (t) \\ \dot{U} & (t) \end{pmatrix}, A_c = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -M_k^{-1} & -M^{-1}c_2 \end{pmatrix}, B_c = \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}B_2 \end{pmatrix} \tag{3.13}$$

Pratik bir operasyonel titreşim izlemede, yapının tüm serbestlik dereceleri ölçülmez. Ölçümler (denklem 3.14) genel olarak ivmeler, hızlar veya yer değiştirmeler olarak gözlemlenebilmektedir (D.-J. Yu ve W.-X. Ren) [65].

$$y(t) = C_a\ddot{U}(t) + C_v\dot{U}(t) + C_dU(t) \tag{3.14}$$

y (t) çıktılar; C_a, C_v, C_d sırasıyla ivme, hız ve yer değiştirme için çıktı lokasyon matrisleridir. Çıktı matrisi C_c ve doğrudan iletim matrisi D_c denklem (1.15)'teki gibidir (D.-J. Yu ve W.-X. Ren) [65]

$$C_c = (C_d - C_aM^{-1}KC_v - C_aM^{-1}C_2) \tag{3.15}$$

$$D_c = C_a M^{-1} B_2 \tag{3.16}$$

$$y_{(t)} = C_c x(t) + D_c u(t) \tag{3.17}$$

Denklem (3.17), titreşimli bir sistemin sürekli-zaman durum-uzay modeli oluşturmaktadır (D.-J. Yu ve W.-X. Ren) [65]

$$x_{k+1} = A_{xk} + B_{uk} \tag{3.18}$$

$$y_k = C_{xk} + D_{uk} \tag{3.19}$$

$x_k = x(k\Delta t)$; örneklenen yer değiştirmeleri ve hızları içeren ayrık zamanlı durum vektörü,

u_k, y_k ;örneklenmiş girdi ve çıktısı,

$A = \exp(A_c \Delta t)$; ayrık durum matrisi,

$B = [A - I]\, A_c^{-1}\, B_c$; ayrık giriş matrisi,

C, ayrık çıktı matrisi,

D, doğrudan iletim matrisidir.

Şimdiye kadar yapı, sadece deterministik bir girdi olan u_k tarafından yönlendirildiği varsayılmaktadır. Uygulama esnasında ayıklanması gereken çevresel gürültü, modelleme hataları gibi nedenlerden dolayı deterministik model gerçek operasyonel ölçüm verilerini tam olarak tanımlayamaz. Bundan dolayı, stokastik bileşenler modele dâhil edilmelidir ve denklem (3.20-3.21)'deki gibi ayrık zamanlı kombine deterministik-stokastik durum-uzay modeli elde edilmelidir (D.-J. Yu ve W.-X. Ren) [65].

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \tag{3.20}$$

$$y_k = Cx_k + Du_k + v_k \tag{3.21}$$

w_k ; işlem gürültüsü

v_k ; ölçüm gürültüsüdür.

Her ikisi de(w_k ve v_k) sıfır ortalama, beyaz ve kovaryans matrisleri ile varsayılan olarak ölçülemeyen vektör sinyalleridir (D.-J. Yu ve W.-X. Ren) [65].

$$E\left[\begin{pmatrix} w_p \\ v_p \end{pmatrix}\left(w_q^T v_q^T\right)\right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix}\delta_{pq} \tag{3.22}$$

E ; beklenen değer operatörü,

δpq ;Kronecker deltasıdır.

Girdi bilgisi eksikliğinden dolayı, u_k deterministik girdilerini gürültü terimleri olan w_k , v_k'yi denklem (3.20-3.21)'de ayırmak imkansızdır. Eğer deterministik girdi terimi u_k w_k, v_k gürültü terimleriyle modellenirse, bir titreşim yapısının ayrık zamanlı tamamen stokastik durum-uzay modeli elde edilebilir, denklem (3.23) (D.-J. Yu ve W.-X. Ren) [65].

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + w_k \\ y_k = Cx_k + v_k \end{cases} \tag{3.23}$$

SSI muhtemelen operasyonel titreşim ölçümleri için bugüne kadar bilinen en gelişmiş yöntemdir. SSI, yalnızca çıktı ölçümlerine dayanarak ve QR-çarpanlara ayırma, tekil değer ayrışması (SVD) ve en küçük kareler gibi sağlam sayısal teknikler kullanarak durum-uzay matrislerini tanımlar. QR çarpanlarına ayırma işlemi önemli bir veri azaltımı sağlarken, SVD gürültüyü reddetmek için kullanılır. Bir yapının matematiksel açıklaması (durum uzay modeli) bulunduğunda, modal parametreleri (doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekilleri) belirlemek çok basit olacaktır. SSI'da diğer algoritmalardan temel fark, altuzay algoritmasının, kovaryans matrisinin açık oluşumundan kaçınılması için kovaryans yerine veriye dayalı olmasıdır. Stokastik altuzay tanımlamasının, korelasyonlara veya spektrumlara dönüştürmeye gerek kalmadan, doğrudan zaman verileriyle çalışan bir zaman alanı metodu olduğu açıktır (D.-J. Yu ve W.-X. Ren) [65].

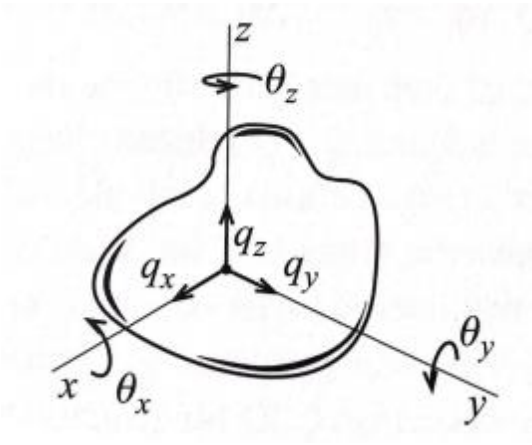
3.2 Sayısal Yöntem

3.2.1 Kabuller

Sap 2000 [3] paket programında oluşturulan sayısal 3d modelde, makro modelleme yapıldığından harç; duvar dokusunda dikkate alınmamıştır. Tophâne-i Âmirede, harç sadece boşlukları doldurmak ve yapının yığma duvarlarında pürüzsüz bir yüzey elde etmek için kullanılmıştır.

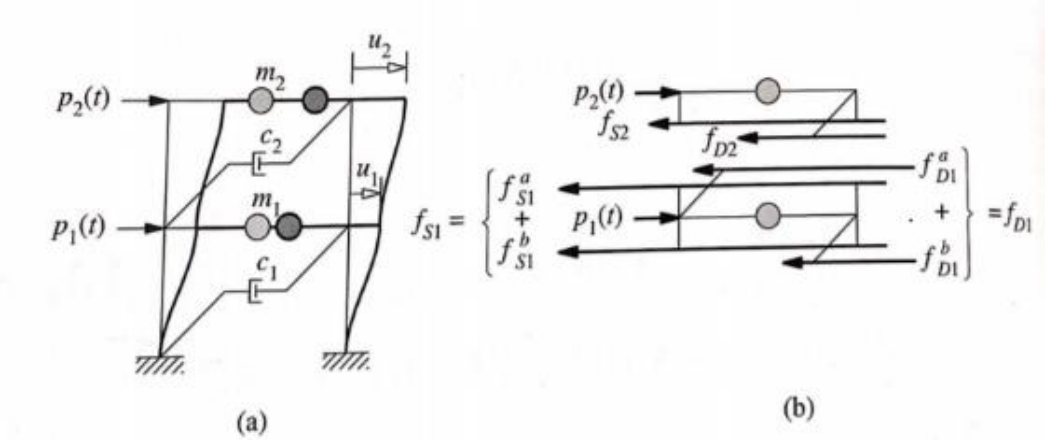
3.2.2 Çok Serbestlik Dereceli (ÇSD) Sistemlerde Hareket Denklemleri

Gerçekte tam bağımsız rijit bir cisim Şekil 7'de de görüldüğü gibi üçü öteleme, üçü de dönme olmak üzere altı farklı şekilde bağımsız hareket etmektedir. Ancak bu serbestlik yönlerinden bazıları veya hepsi, belirli koşullardan dolayı derece kısıtlanabilir. Hareketi kısıtlayan etmenler fiziksel bazı kısıtlamalar nedeniyle gerçek engeller olduğu gibi yapı modellerinin basitleştirilmesi için kullanılan varsayımlarda olabilir (V.Yerlici ve H. Luş)[66].



Şekil 15 Rijit bir cisim serbestlik yönleri (V.Yerlici ve H. Luş) [66]

Olabilecek en basit ÇSD, oldukça idealleştirilmiş bir model olan iki katlı kayma çerçevesi (Şekil 8.a) ile buna etkiyen P1(t) ve P2(t) kuvvetlerini ele alalım. Bu modelde kiriş ve döşemelerin eğilme etkisinde hiç esnemediği kabul edilir; buna ek olarak, kiriş ve kolonların eksenel şekildeğişimleri ile eksenel kuvvetin kolon rijitliğine etkisi yok sayılır. Bu kayma çerçevesi modeli pek gerçekçi olmasa da, ÇSD sistemlerin hareket denklemlerinin nasıl kurgulanacağını göstermekte oldukça yararlıdır (A.K. Chopra) [67].

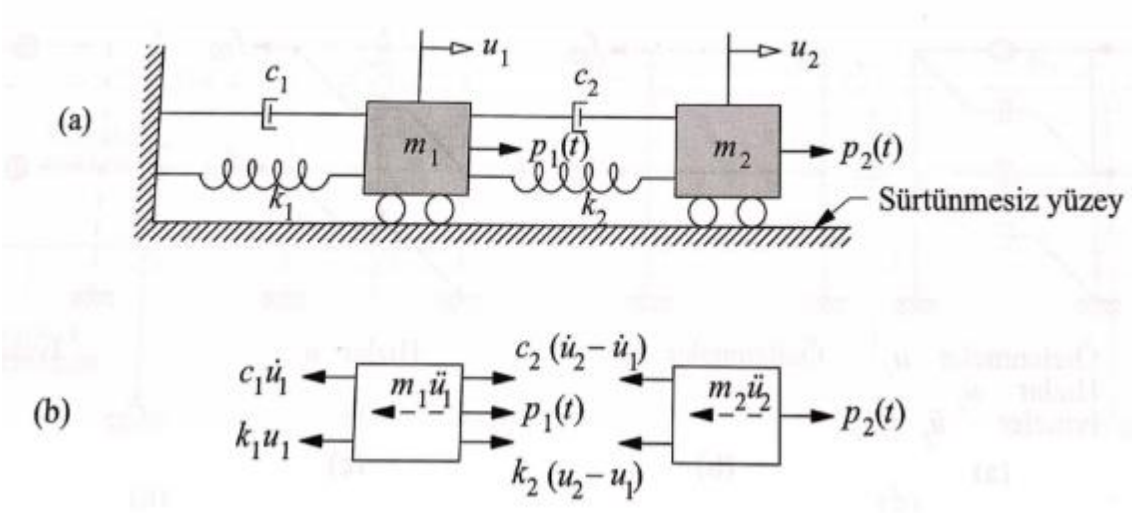


Şekil 16 (a)iki katlı yayma çerçevesi (b) kütlelere etkiyen kuwwetler (A.K. Chopra) [67]

Gerçekte bina üzerinde yayılı olsada, kütlenin kat döşemelerinde toplandığı varsayılmaktadır. Çok katlı binalarda kütlenin büyük bölümü döşeme seviyelerinde yoğunlaştığından bu varsayım geçerli kabul edilmektedir. m_j ile belirtilen döşeme kütleleri üzerine etkiyen kuvvetler Şekil 16.b'de gösterilmiştir (A.K. Chopra) [67].

Birden fazla serbestliğe sahip sistemler, serbest itreşim sırasında bütün kütleleri sahip oldukları serbestlik yönlerinde hareket ettirebilirler. Kütlelerin kendi serbestliklerinde yer değişimleri sonucu parçası oldukları sistem, Mod olarak adlandırılan birbirinden bağımsız değişik şekiller alabilirler. Oluşan Mod'ların sayısı sistemin serbestlik yönü sayısı kadar olur. Kuvvet etkisi altında ÇSD sistemlerin hareketleri, kuvvetlerin kütleleri serbestlik yönlerinde harekete zorlayarak sistemi sokabileceği şekillerden oluşur. Zorlanmış titreşimlerin sınırları, kuvvetlerin etkime frekansı ve büyüklüklerine göre değişir. Kuvvetlerin etkime frekansı sistemin hangi mod şeklinin frekansına yaklaşırsa, o mod şeklinde titreşimlerin genlikleri büyür (V.Yerlici ve H. Luş) [66].

İki serbestlikli sistemin daha yaygın gösterimi Şekil 17.a'da olduğu gibi, birbirine doğrusal yay ve sönümleyicilerle bağlı iki kütle ile bunların üzerine dışardan etkiyen $p_1(t)$ ve $p_2(t)$ kuvvetlerinden oluşur. Herhangi bir anda kütlelere etkiyen tüm kuvvetler serbest cisim diyagramında Şekil 17.b deki gibi gösterilmiştir (A.K. Chopra) [67].



Şekil 17 (a) iki serbestlik dereceli sistem (b)serbest cisim diyagramı (A.K. Chopra) [67]

$$\sum F = 0 \tag{3.24}$$

$$m_j \ddot{u}_j + f_{Dj} + f_{Sj} = p_j(t) \tag{3.25}$$

Denklem (3.25)'den j=1 ve 2 için iki bağlantı kurulur ve bunlar matris yazılımıyla aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} f_{D1} \\ f_{D2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} f_{S1} \\ f_{S2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \end{pmatrix} \tag{3.26}$$

Denklem (3.26) kısaca denklem (3.27) olarak tanımlanır.

$$\boldsymbol{m\ddot{u}} + \boldsymbol{f}_D + \boldsymbol{f}_S = \boldsymbol{p}(t) \tag{3.27}$$

$$u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}, \quad m = \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \qquad f_D = \begin{pmatrix} f_{D1} \\ f_{D2} \end{pmatrix} \quad f_S = \begin{pmatrix} f_{S1} \\ f_{S2} \end{pmatrix} \quad p = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix}$$

Burada **m**; iki katlı çerçevenin kütle matrisidir. Doğrusal davranan sistemde elastik direnç kuvvetleri f_S ile kat döşemelerinin yanal ötelenmelerin **u** arasındaki ilişki tanımlanırken, kat rijitliği olarak k_j kullanılır. Bu kat rijitliği kat kolonlarında oluşan toplam kesme kuvveti V_j ile katta oluşan şekildeğişimi arasındaki ilişkiyi tanımlar. İki katlı kayma çerçevesinde, elastik direnç kuvveti $\mathbf{f}_s$ ile yer değiştirme vektörü olan **u** birbirini rijitlik matrisi **k** üzerinden bağlıdır (A.K. Chopra) [67].

$$\boldsymbol{f_S} = \boldsymbol{ku} \tag{3.28}$$

$$V_j = k_j \Delta_j \tag{3.29}$$

Sönüm kuvvetleri f_{D1} ve f_{D2} kat kat döşemelerinin $\dot{u}_1$ ve $\dot{u}_2$ ile gösterilen hızlarına bağlıdır. Katın sönüm katsayısı $\boldsymbol{c}_j$, sönüme bağlı kesme kuvveti V_j ile katın şekildeğiştirme hızı $\dot{\Delta}_j$ arasındaki ilişkiyi tanımlar (A.K. Chopra) [67].

$$\boldsymbol{f_D} = \boldsymbol{c\dot{u}} \tag{3.30}$$

$$V_j = c_j \dot{\Delta}_j \tag{3.31}$$

İncelenen iki katlı kayma çerçevesinde sönümün açtığı direnç kuvveti $\mathbf{f}_D$ ile hız vektörü $\dot{\mathbf{u}}$ birbirlerine sönüm matrisi **c** üzerinden bağlıdır (A.K. Chopra) [67].

Denklem (3.25) yapılan işlemler sonucunda Denklem (3.32) matrisiyle tanımlanarak nihayetinde Denklem (2.33) halini alır. A.K. Chopra [67]

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \end{pmatrix} \qquad (3.31)$$

Burada; $\begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix}$; kütle matrisi, $\begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{pmatrix}$; rijitlik matrisi, $\begin{pmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{pmatrix}$; sönüm matrisi olarak adlandırılmaktadır.

$$\boldsymbol{m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p}(t) \qquad (3.33)$$

3.2.3 ÇSD Sistemlerde Serbest Titreşim

Serbest titreşim, yapının herhangi bir dinamik zorlama (kuvvet veya mesnet oynaması) olmadan yaptığı titreşim hareketidir. Böyle bir hareket, yapıya başlangıçta yer değişimi ve/veya hız kazandırıp onu denge konumundan uzaklaştırma ile (A.K. Chopra) [67]

- **Sönümsüz Sistemler**

ÇSD serbest titreşimi ***p(t)=0*** olarak tanımlanır. Burada aşağıdaki denklemle yönetilir (A.K. Chopra) [67]

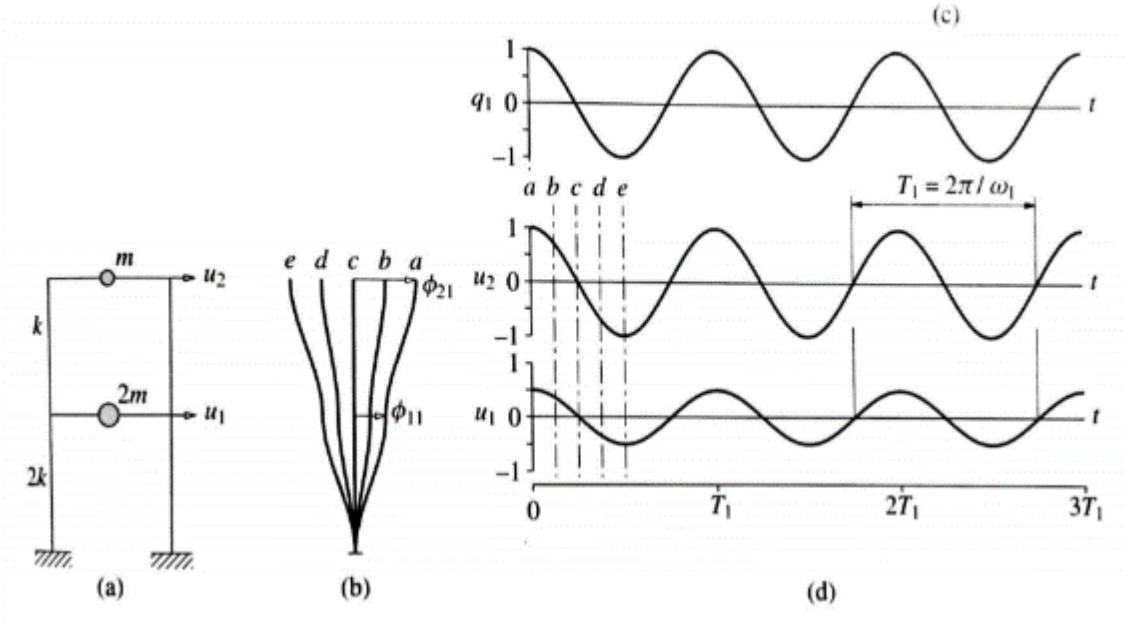
$$\boldsymbol{m\ddot{u} + ku = 0} \qquad (3.34)$$

u=u(0), **u̇ = u̇** (0) ile tanımlanan başlangıç koşullarını sağlayan **u**(t) çözümünü bulmaktır. ÇSD sisteminde T_n ile gösterilen doğal titreşim periyotları, bu modlarda harmonik titreşimin bir tam döngüsü için gereken zaman olarak tanımlanır. Bir doğal titreşim periyoduna karşılık gelen doğal açısal frekans ω_n ve doğal devir frekansı f_n aşağıdaki gibidir (A.K. Chopra) [67].

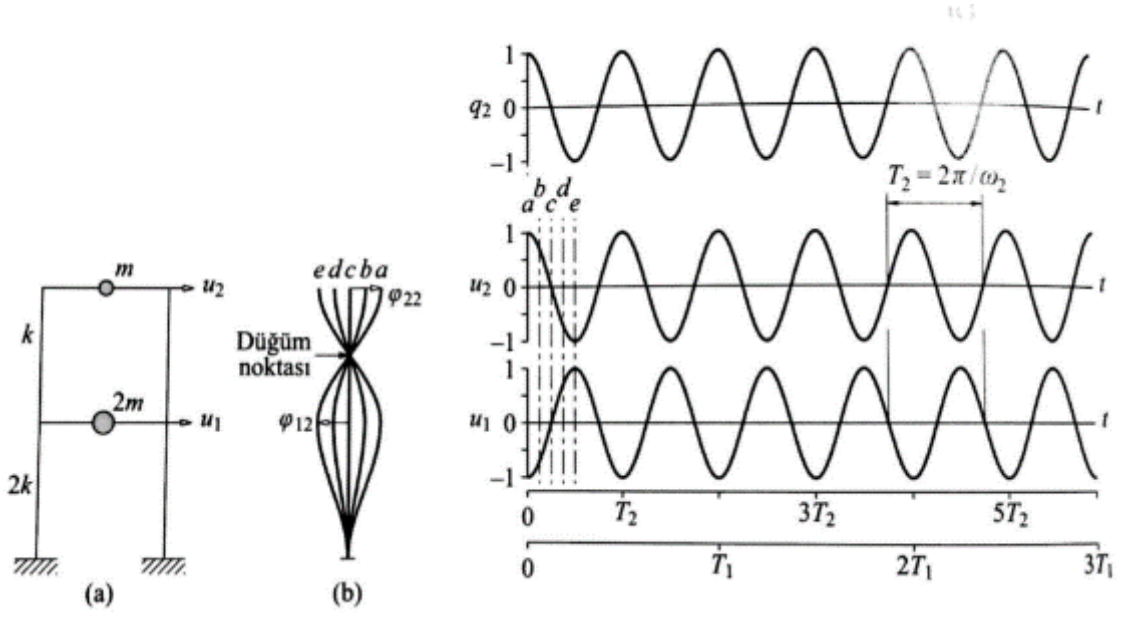
$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \qquad f = \frac{1}{T_n} \qquad (3.35)$$

Şekil 18 ve Şekil 19'deki gibi gösterilen bu iki serbestlikli sistem için, öyle iki özel yer değişimi biçimi vardır ki, yapı yer değişimi biçimlerinden zorlanıp serbest bırakıldığında harmonik titreşim yapar ve ilk biçimini korur. Her iki katta aynı fazda

salınım yapar. Bu özel yer değiştirme biçimlerinin her birine ÇSD sistemin doğal titreşim modu denir (A.K. Chopra) [67].



Şekil 18 sönümsüz sistemin birinci titreşim modunda serbest titreşimi (a) iki katlı çerçeve, (b) a,b, c, d ve e anlardaki görünüm, (c) mod koordinatları, q_1 (t); (d) yer değişiminin zaman değişimi (A.K. Chopra) [67]



Şekil 19 sönümsüz sistemin ikinci titreşim modunda serbest titreşimi (a) iki katlı çerçeve, (b) a,b, c, d ve e anlardaki görünüm, (c) mod koordinatları, q_2 (t); (d) yer değişiminin zaman değişimi (A.K. Chopra) [67]

- **Doğal Titreşim Frekansları ve Modları**

Burda doğal frekans ve modların hesabında karşılaşılan özdeğer problemi üzerinde durulmuştur. Şekil 18 ve Şekil 19'de iki serbestlikli sistem için gösterilenlere benzer biçimde bir titreşim modu ve hareketi tanımlanmıştır (A.K. Chopra) [67].

$$\boldsymbol{u}(t) = q_n(t)\phi_n \tag{3.36}$$

Burada şekil değiştirme biçimi ϕ_n zaman içinde sabit kalır. Denklem (3.27)'te A_n ve Bn katsayıları, sistemi harekete geçiren başlangıç koşullarını belirlemektedir. Ancak ω_n ve ϕ_n henüz bilinmemektedir (A.K. Chopra) [67] .

$$\boldsymbol{u}(t) = \phi_n(A_n cos\omega_n t + B_n sin\omega_n t \tag{3.37}$$

Denklem (3.34)'de $\boldsymbol{u}(t)$ için yerine konulduğunda, denklem (3.38) bağlantısı bulunur. Bu bağlantının sağlanabilmesi ve $\boldsymbol{u}(t)$=0 olabilmesi için $q_n(t)$=0 olmalıdır. Burdan anlaşılacağı üzere sistem hareketsiz olur. Doğal frekans ($\omega_{n\ )\ ve}$ modların (ϕ_n) denklem (3.39)'yı sağlaması lazım (A.K. Chopra) [67].

$$[-\omega_n^2 \boldsymbol{m}\phi_n + \boldsymbol{k}\Phi_n\ ]\ q_n(t) = \boldsymbol{0} \tag{3.38}$$

$$\mathbf{k}\phi_n = \omega_n^2 \boldsymbol{m}\phi_n \tag{3.39}$$

Denklem (3.39)'da cebirsel denkleme matris özdeğer problemi denilmektedir. Rijitlik ve kütle matrisleri bilindiğinden $[\boldsymbol{k}\ ve\ \boldsymbol{m}]$, burada sitenen ω_n^2 değerinin ile ϕ_n vektörünün hesaplanmasıdır (A.K. Chopra) [67].

$$[k - \omega_n^2 \boldsymbol{m}]\phi_n\ = 0 \tag{3.40}$$

Denklem (3.40)'de aşikâr çözüm ϕ_n=0'dır ancak bu sonuç hareketsizliği ifade edeceğinden dolayı, hareketli çözüm ancak denklem (3.41)'de elde edilebilmektedir. Denklem (3.41) karakteristik denklem ya da frekans denklemi olarak tanımlanmaktadır (A.K. Chopra) [67].

$$det[k - \omega_n^2 \boldsymbol{m}]\ = 0 \tag{3.41}$$

Denklem (3.41)'in kökleri olan *N* tane ω_n^2'den titreşim frekansları ω_n'ler (n=1,2,…… *N*) belirlenir. Bir doğal frekans ω_n bilindiğinde, Denklem (3.40) kullanılarak ona karşılık gelen *N* Serbestlik dereceli sistemin *N* doğal titreşim frekansına

karşılık gelen ϕ_n vektörü bir çarpana bağlı olarak belirlenebilir. *N* sebestli dereceli sistemin *N* doğal titreşim frekansına karşılık gelen tane bağımsız ϕ_n vektörü vardır, bunlara doğal titreşim modu ya da doğal titreşim mod şekli denir (A.K. Chopra) [67].

- **Sönümlü Sistemler**

Sönümlü sistemlerde **p**(t)=**0** için Denklem (3.20) kullanılmaktadır (A.K. Chopra) [67].

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{u}(0) \quad \dot{\boldsymbol{u}} = \dot{\boldsymbol{u}}(0) \tag{3.42}$$

$$\boldsymbol{m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0} \tag{3.43}$$

$\boldsymbol{u}$ (t) çözümü, Denklem (3.20)'i ve t=0 koşullarını sağlamalıdır. $\boldsymbol{u} = \boldsymbol{u}(0) \quad \dot{\boldsymbol{u}} = \dot{\boldsymbol{u}}(0)$

Eğer doğrusal sistemin sönüm matrisi; Denklem (3.44) bağıntısını sağlıyorsa tüm titreşim modları gerçek ve sönümsüz sistemdeki gibi olur. Bu modlar, gerçek özdeğer problemini tanımlayan denklem (3.39)'da bulunur (A.K. Chopra) [67].

$$\boldsymbol{cm^{-1}k = km^{-1}c} \tag{3.44}$$

Yer değişimi vektörünün mod açılımında, Birbirinden bağımsız herhangi *N* tane vektör, *N* boyutlu herhangi bir vektörü temsil etmek için bir taban olarak kullanılabilir. Bu durumda her yer değişimi vektörünün mod açılımı aşağıdaki gibidir (A.K. Chopra) [67].

$$\boldsymbol{u} = \sum_{r=1}^{n} \Phi_r q_r = \boldsymbol{\Phi_q} \tag{3.45}$$

Yer değişim vektörü $\boldsymbol{u}$'yu Denklem (3.45) ve Denklem (3.43)'de yerine konulduğunda Denklem (3.46) elde edilir (A.K. Chopra) [67].

$$\boldsymbol{m\Phi\ddot{q} + c\Phi\dot{q} + k\Phi q = 0} \tag{3.46}$$

Bu eşitlik her iki taraftan Φ^T ile çarpılınca aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\boldsymbol{M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = O} \tag{3.47}$$

Burada köşegen matrisler **M** ve **K** ile **C** matrisi aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$\boldsymbol{K = \Phi^T k \Phi} \tag{3.48}$$

$$\boldsymbol{M = \Phi^T m \Phi} \tag{3.49}$$

$$\boldsymbol{C = \Phi^T c \Phi} \tag{3.50}$$

Klasik sönümlü sistemlerde **C** matrisi köşegen(diagonal) matris olur, ancak sönüm matrisi denklem (3.44) 'i sağlamayan sistemlerde, doğal titreşim modları karmaşık değerli olur ve Denklem (3.50)'deki C matrisi köşegen matrisi olmaz (A.K. Chopra) [67].

- **Titreşim Özelliklerinin Hesabı**
  - **Özdeğer Probleminin Çözüm Yöntemleri**

Bir yapının doğal frekans ve modlarını bulmak için Denklem (3.51)'de tanımlanan matris özdeğer probleminin çözülmesi gerekmektedir (A.K. Chopra) [67].

$$\mathbf{k}\Phi = \lambda \mathbf{m}\Phi \tag{3.51}$$

$\lambda_n = \omega_n^2$ özdeğerleri, karakteristik denklem (3.41)'nin kökleridir.

$$p(\lambda) = det[\boldsymbol{k} - \lambda \boldsymbol{m}] = 0 \tag{3.52}$$

Buradaki $p(\lambda)$, serbestlik derecesi N olan bir sistem için, N'inci derece bir çokterimlidir. Ancak, çokterimlilikte N tane hesabın çok zahmetli olmasından ve $p(\lambda)$ çokterimlisinin kökleri sayısal yuvarlamada hatalara sebep olacağından ÇSD sistemleri için kullanışlı olmaz (A.K. Chopra) [67].

Modların dikliği; Farklı doğal frekanslara karşılık gelen doğal modların ($\omega_n \neq \omega_r$) olduğunda aşağıdaki diklik koşullarını sağlayabilmektedir (A.K. Chopra) [67] .

$$\phi_n^T \boldsymbol{k} \phi_r = 0 \qquad \phi_n^T \boldsymbol{m} \phi_r = 0 \tag{3.53}$$

Özdeğer probleminin güvenilir ve etkin biçimde çözümünü sağlayacak yöntemler, bilgisayarların kullanılmasına başlanmasından sonra çok sayıda araştırma konusu olmuştur. Çözüm algoritmasının dayandığı temele bağlı olarak üç başlık altında sınıflandırılmıştır. Bunlardan ilki ''vektör yaklaşım yöntemi'' olup, Denklem (3.51) ile çalışır. İkincisi olan ''dönüşüm yöntemleri'', Denklem (3.53) ile tanımlanan mod diklik

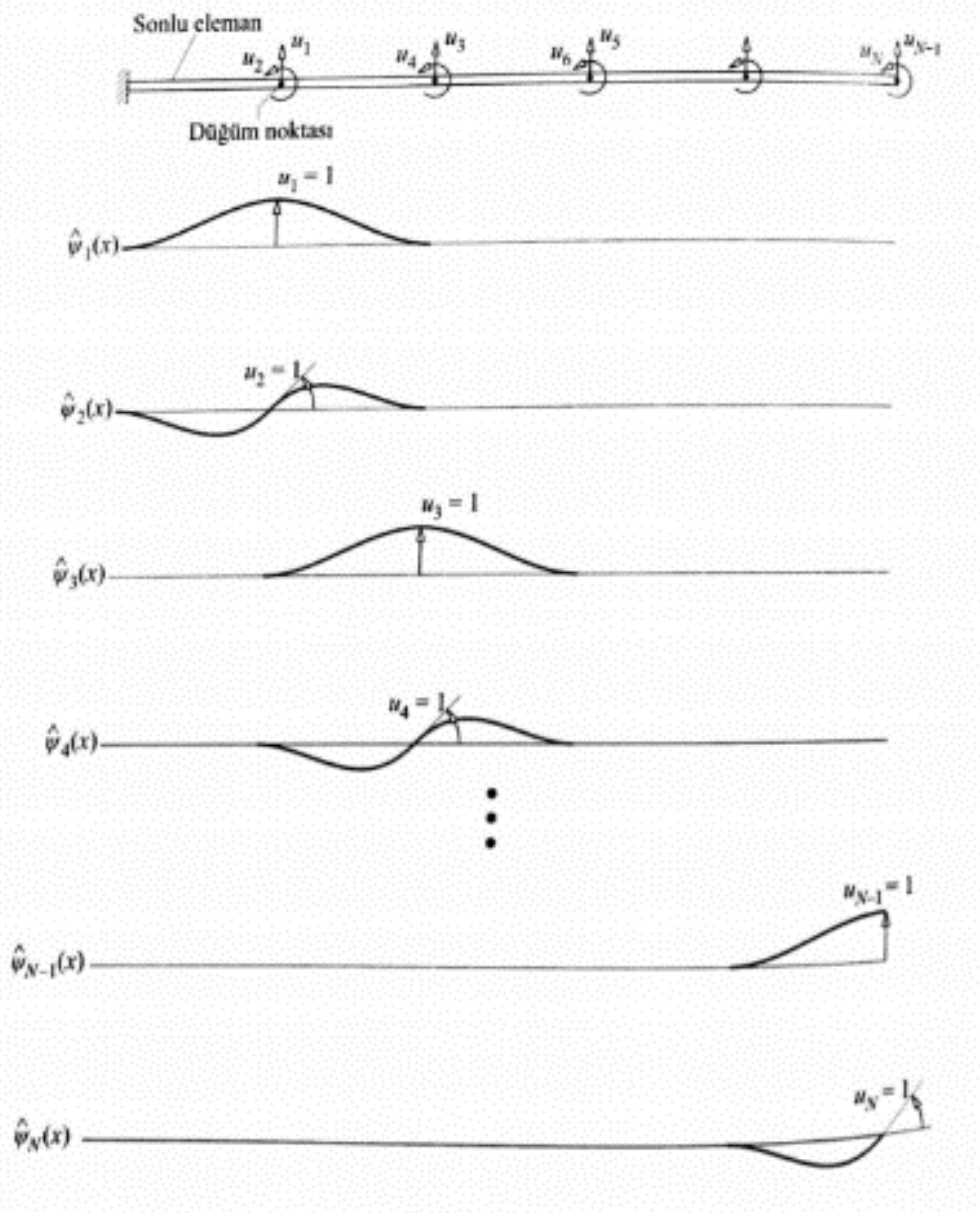
koşullarını kullanır. Sonuncusu ise ‘’çok terimli yaklaşım yöntemleri’’ $p(\lambda) = 0$ olması koşulu ile çalışır. Bu üç yöntemden hangisinin seçileceği, kütle ve rijitlik matrislerinin özelliklerine (boyutu belirleyen N değeri, **k** matrisinin bant genişliği, **m** matrisinin köşegen ya da bant matris oluşu) ve istenen öz çiftlerin sayısına bağlıdır. Yapı mühendisliğinde çoğu kez dar bantlı **k** matrisi ile köşegen ya da dar bantlı **m** matrisi olan sistemlerle karşılaşılır, dış yükler de bu sistemleri en düşük (N'ye göre) birkaç doğal mod'da zorlar. Vektör yaklaştırma yöntemleri genelde etkili ve doğru sonuçlar vermede güvenilir olmakla birlikte hesaplamalarda etkindir (A.K. Chopra) [67].

3.2.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Yayılı kütleli, sonsuz serbestlik dereceli sistemlerin klasik çözümlemesi, uygulamadaki yapılar için kullanışlı değildir. Bundan dolayı Rayleıgh-Rıtz Yöntemi ile Sonlu Elemanlar Yöntemleri kullanılmaktadır. Rayleıgh-Rıtz Yöntemi; birçok nedenden dolayı karmaşık yapıların çözümlenmesinde genel uygulama ve hesapların bilgisayarda otomatikleştirilmiş biçimde gerçekleştirilmesi açısından pek uygun değildir (A.K. Chopra) [67].

Sonlu Elemanlar Yöntemi için Şekil 20'teki konsol kirişi ele alınmıştır. Burada konsol kirişi sonlu elemanlar denen birtakım parçalara bölünmüş. Bu birbirinden farklı veya aynı olan elemanlar birbirlerine düğüm noktalarında bağlanır. Burada her düğüm noktasının iki serbestliği vardır, boya ilk doğrultuda ötelenme ve dönme. Sonlu elemanlar yönteminde genelleştirilmiş koordinatlar olarak düğüm noktalarının serbestlikleri kullanılır ve hareket denklemleri fiziksel anlamı olan bu yer değiştirmeleri üzerinden kurgulanır. Kirişteki sehim ve düğüm noktalarındaki yer değiştirmeleri birbirlerini Şekil 20'te gösterilen deneme fonksiyonları üzerinden $\hat{\psi}_i(x)$ bağlanır. Her serbestlik için bir deneme fonksiyonu seçilir. Bağımsız olan bu fonksiyonlar hem kendileri hem de birinci türevleri süreklidir ve geometrik sınır koşullarıyla tutarlıdır (A.K. Chopra) [67].

$$u(x) = \sum_i u_i \hat{\psi}_i(x) \tag{3.54}$$



Şekil 20 Sonlu eleman (konsol kirişi) A.K. Chopra [67]

Burada; u_i, düğüm noktalarında tanımlı i sayılı serbestlikte oluşan yer değişimi, $\hat{\psi}_i(x)$ ise onunla bağlantılı deneme fonksiyonudur.

- **Sonlu Elemanlar Yöntemi Hesap Adımları**

Yapı birbirine yalnız düğüm noktalarında bağlanan sonlu elemanların birleşimi olarak idealleştirilir ve düğüm noktasında $\boldsymbol{u}$ serbestlikleri tanımlanır. Her bir sonlu eleman için elemanların serbestliklerine göre rijitlik matrisi $\mathbf{k}_e$, kütle matrisi $\mathbf{m}_e$ ve yük vektörü $\mathbf{p}_e(t)$ kurulur (A.K. Chopra) [67].

$$(\mathbf{f}_s)_e = \boldsymbol{k_e}\mathbf{u}_e \quad (\mathbf{f}_I)_e = \boldsymbol{m_e}\ddot{\boldsymbol{u}}_e \tag{3.55}$$

Elemanlar yerel $\mathbf{u_e}$ serbestlikleri ve $\mathbf{p}_e$ yükleri ile genel kurulumda kullanılan **u** serbestlikleri ve **p** yüklerini ilişkilendiren dönüşüm matrisi $\mathbf{a}_e$ oluşturulur (A.K. Chopra) [67].

$$\boldsymbol{u_e} = \boldsymbol{a_e u} \qquad \boldsymbol{p}(t) = \boldsymbol{\alpha_e^T p_e}(t) \tag{3.56}$$

Buradaki, $\boldsymbol{a_e}$, sıfır ve birlerden oluşan, Boole tipi bir matristir. İşlevi ise $\mathbf{k}_e$, $\mathbf{m}_e$ ve $\mathbf{p}_e$ içerisindeki bileşenleri, genel kurulumun kütle matrisi, rijitlik matrisi ve yük vektörlerindeki yerlerine yerleştirmektir. Sonlu elemanlar birleşiminden elde edilecek genel kurulumun rijitlik matrisi, kütle matrisi ve yük vektörü bulunurken, elemanlarla ilgili matrisleri birleştirilir (A.K. Chopra) [67].

$$\boldsymbol{k} = A_{e=1}^{N_e}\boldsymbol{k_e} \qquad \boldsymbol{m} = A_{e=1}^{N_e}\boldsymbol{m_e} \qquad \boldsymbol{p}(t) = A_{e=1}^{N_e}\boldsymbol{p_e}(t) \tag{3.57}$$

A, doğrudan kurulum yönetimini göstermektedir. Her elemanın rijitlik matrisi, kütle matrisi ve yük vektörü içindeki bileşenler , $\boldsymbol{a_e}$ matrisinin tanımladığı biçimde, genel kurulumun rijitlik matrisi, kütle matrisi ve yük vektörü içine yerleştirilerek toplanır. Sonlu eleman kurulumunun hareket denklemi kurgulanır (A.K. Chopra) [67].

$$\boldsymbol{m\ddot{u} + c\dot{u} + ku} = \boldsymbol{p}(t) \tag{3.58}$$

- **Sonlu Elemanlarda Eleman Serbestlikleri ve Ara değerleme Fonksiyonları**

Uzunluğu *L*, birim boydaki kütlesi *m*(x) ve eğilme rijitliği *EI*(x) olan düz bir kiriş ele alınacak olursa, kirişteki yer değişimi dağılımı her bir düğüm noktasının iki serbestliği olan bu dört serbestliğe bağlıdır (A.K. Chopra) [67].

$$u(x,t) = \sum_{i=1}^{4} u_i(t)\psi_i(x) \tag{3.59}$$

Buradaki $\psi_i(x)$ fonksiyonu, u_i serbestliğinde birim yer değişimi varken ve diğer tüm serbestlikler hiç yer değişimi yapmayacak şekilde kısıtlanmışken kirişin biçimi tanımlar. Kesme şekildeğişimi yok sayıldığında, yalnız uçlardan yüklenen kirişin denge denklemi aşağıdaki gibi olur (A.K. Chopra) [67].

$$EI\frac{d^4u}{dx^4} = 0 \tag{3.60}$$

Düzgün bir kiriş için Denklem (3.60)'ün genel çözümü üçüncü dereceden bir çokterimlidir (A.K. Chopra) [67].

$$u(x) = a_1 + a_2\left(\frac{x}{L}\right) + a_3\left(\frac{x}{L}\right)^2 + a_4\left(\frac{x}{L}\right)^3 \tag{3.61}$$

- **Sonlu Elemanlarda Rijitlik Matrisi**

ÇSD sistemlerin hareket denklemlerini doğru ifade edebilmek için sistem özelliklerini tanımlayan matrislerin ve yük kolonunun oluşturulması gerekmektedir. Hareket denklemindeki matrislerin kolonları, ilgili serbestlik yönündeki hareketler sonucu oluşacak kuvvetleri belirler. Böylece serbestlik yönlerindeki yer değişimi, hız ve ivmeler ayrı ayrı incelendiğinde, matrislerdeki katsayıların harekete katkıları incelenmiş olur (V. Yerlici ve H. Luş) [66].

Kiriş eleman uzunluğu *L*, eğilme rijitliği *EI* (x) olan, rijitlik etki çarpanı k_{ij}, diğerleri sabit tutulurken sadece *j* sayılı serbestlikte birim yer değişimi olması için *i* sayılı serbestliğe etkiyecek kuvvet kadardır (A.K. Chopra) [67].

$$k_{ij} = \int_0^L EI(x)\Psi_i''(x)dx \tag{3.62}$$

Eğilme rijitliği *EI*(x) değişken olan sistemlerde de geçerli olduğundan Denklem (3.62) genel bir sonuçtur (A.K. Chopra) [67].

EI(x)= *EI* olan düzgün bir kiriş elemanın rijitlik matrisi, Denklem (3.62)'deki integrali *i*,*j*=1,2,3 ve 4 için kapalı biçim çözerek, aşağıdaki gibi bulunur. Aşağıdaki rijitlik matrisi düzgün bir kiriş için tam doğrudur (A.K. Chopra) [67].

$$\bar{k}_e = \frac{EI}{L^3}\begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

- **Sonlu Elemanlarda Kütle Matrisi**

Denklem (3.63)'de ara değerlendirme fonksiyonu olarak eleman rijitlik matrisi türetilirken kullanılan ara değerlendirme fonksiyonları kullanıldığında bulunacak sonuca tutarlı kütle matrisi denir. m(x) fonksiyonuna bağlı olarak denklem (3.40)'nin integrallerine kapalı biçim veya sanal çözüm bulunmaktadır (A.K. Chopra) [67].

$$m_{ij} = \int_0^L m(x)\Psi_i(x)\Psi_j(x)dx \tag{3.63}$$

Kütlesi düzgün yayılı Kütlesi düzgün yayılı $[m(x) = m]$ bir eleman için integrallere kapalıbiçim çözüm bulunarak aşağıdaki kütle matrisi elde edilmiştir (A.K. Chopra) [67].

$$\bar{m}_e = \frac{mL}{420}\begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

3.3 Sayısal Model Güncellenmesi

Yapılan literatür araştırmasında; model güncelleme prosedürü kullanılmadan yapılan sayısal modellerin yapıyı gerçekte temsil etmediği anlaşılmaktadır. Yapıyı temsil edemeyen sayısal model üzerinde yapılacak olan deprem ve statik analizlerden elde edilen sonuçlar yanılgılara ve hatalara sebebiyet vereceği ortadadır. Bunun nedenleri ise, yapıda kullanılan malzemelerin kendine has karakteristiklerinin oluşu, malzemelerin yıllar içinde değişime uğradığı, malzemenin çevresel etmenler sebebiyle fiziksel ve kimyasal değişimlere uğrayacağı, malzemenin kendi içerisinde homojen olmayışı gibi birçok etmen bulunmaktadır. Deneysel ve sayısal çalışmalar yapıldıktan sonra, 3D Sayısal modelin yapıyı daha iyi temsil edebilmesi için sayısal modelin mutlaka ayarlanması gerekmektedir.

Yapılan araştırmalarda model ayarlama için pek çok yöntem olmakla birlikte, otomatik model güncelleme yapan bilgisayar programları da piyasada bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında sayısal modelin güncellenmesi için elastisite modülü model güncelleme kriteri olarak seçilmiştir. Yapının farklı duvar tipleri ve farklı malzeme karakteristikleri için elastisite modülü el ile iterasyon yapılarak adım adım ayarlanmıştır. Ayrıca otomatik güncelle yapan programlar model güncelle kriteri olarak elastisite modülü'nün yanında poisson oranı ve birim hacim ağırlığı gibi kriterleri de kullanmaktadır. Deneysel

araştırmadan elde edilen doğal frekansların ve mod şekillerinin eşleştirilmesi için sayısal model güncellenmektedir.

Fuat Aras ve diğ. [2], Beylerbeyi sarayında model güncelleme prosedürü olarak denklem 3.64 ile denklem 3.65'i kullanmış ve 5 adımda sayısal modeli güncellemişlerdir. Burada da aynı şekilde model güncelleme prosedürü uygulanacaktır. Denklem (3.65) den çıkan katsayı elastisite modülü ile çarpılarak elde edilen yeni değer el ile tekrar sayısal modele girilip model analiz edilecektir. Bu prosedür sırasıyla yapılarak en uygun adımda sonlandırılacaktır. Burada *T;* binanın doğal periyodu, c; düzeltme katsayısıdır.

$$T = 2x\pi\sqrt{\frac{m}{K}} \tag{3.64}$$

$$c = \left(\frac{T_1}{T_2}\right) \tag{3.65}$$

Model ayarlama yapıldıktan sonra sayısal ve deneysel iki mod şekli arasında, Modal Güvence Kriteri (MAC) kullanılarak karşılaştırılma yapılması gerekmetdir. Ayrıca Deneysel doğal frekanslar ile sayısal model frekansları birbiriyle karşılaştırılacaktır.

$$\mathrm{MAC}\left(\phi_{A,k}\phi_{B,j}\right) = \frac{\left(\phi_{A,k}^{T}\phi_{B,j}\right)^{2}}{\left(\phi_{A,k}^{T}\phi_{A,k}\right)\left(\phi_{B,J}^{T}\phi_{B,J}\right)} \tag{3.66}$$

MAC muhtemelen iki mod şekil vektörü setini ilişkilendirmek için en yaygın kullanılan prosedürdür. Burada $\phi_{A,k}$, A veri kümelerinin k'nıncı modudur, $\phi_{B,j}$ ise B veri kümesinin j'ninci modudur. MAC, istatistiklerdeki korelasyon katsayısına benzer bir katsayıdır ve 0 ila 1 arasında değişir; 1 değeri, iki mod şekil vektörünün mükemmel korelasyonunu gösterirken, 0'a yakın bir değer, ilişkisiz (dik) vektörleri gösterir. Genel olarak, 0.80'den büyük bir MAC değeri iyi bir eşleme olarak kabul edilirken, 0.40'tan küçük bir MAC değeri kötü bir eşleme olarak kabul edilir. MAC,; sayısal ve deneysel sonuçları ilişkilendirmek için kullanılmaktadır (M.I. Friswell ve J.E. Mottershead) [68].

BÖLÜM 4. TOPHÂNE-İ ÂMİRE ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMA

Bu tez çalışmasında seçmiş olduğumuz Tophâne-i Âmire tarihi, mimarisi ve işlevselliği bakımından son derece özgün bir yığma yapıdır. Tarihi yığma yapılar farklı harç malzemeleri kullanılarak kesme taş, tuğla gibi doğal malzemelerden inşa edilmektedir. Bunun yanında daha çok döşemlerde kullanılmak üzere ahşap malzeme tercih edilmiştir. Tarihi yapılar geometrik yapısı, malzeme özellikleri, zemin etkileşimleri ve taşıyıcı eleman kesitleri ile birbirinden farklılık göstermesinden dolayı özgün yapılardır. Tarihi yapılarla ilgili birçok akademik çalışma bulunmaktadır.

Tarihi yapıların dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için doğru malzeme parametreleri ve güvenilir sonlu elemanlar modeli oluşturularak ve ortam titreşim testi yardımı ile mod tanımlama yöntemi kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır. Ayrıca bu iki yöntem birlikte kullanılarak malzeme özellikleri ayarlanmış, mevcut durumu performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Yapılan dinamik tanımlama sayesinde tarihi yapıların performans analizi yapılmış, olası bir sismik aktivite esnasında yapıların göstereceği davranışlar incelenmiştir.

4.1 Bu Çalışma Kapsamında İncelenen Yapı

Tophâne-i Âmire gerek tarihi, gerek mimarisi, gerekse kullanımı amacı açısından çok eşsiz ve son derece önemli bir kültürel mirasımızdır. A.G. URAL [8], Tophane semtinde yer alan Tophâne-i Âmire Kültür ve Sanat Merkezini heterotopik mekân olarak incelemiştir. Yapı Fatih Sultan Mehmet Handan bu yana birçok döneme tanıklık etmiş olması, Osmanlı döneminde top döküm merkezi olmasından dolayı zamanın en iyi silah sanayisi olması sebebiyle tercih edilmiştir. Ayrıca bir diğer tercih sebebi ise daha önceki işlevi ile şimdiki işlevinin üst üste çakıştırılamayacak anlamlar taşıması olarak belirtilmiştir. Tophâne-i Âmire binası fetihten I.Dünya Savaşına kadar top döküm binası olarak kullanılmış, daha sonra askeri müze olarak düşünülmüş ancak restorasyonun getirdiği zorluklar karşısında 1992'de Mimar Sinan Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesine devredilmiştir. Tophâne-i Âmire mimari yapısı büyük ölçüde korunmasına rağmen fonksiyonel anlamda çok farklı bir değişikliğe gidilerek, kültür ve sanat merkezi olarak işlevlendirilmiştir. Tophâne-i Âmire Kültür ve Sanat Merkezi'nin tarihi yapısı,

mimari özellikleri ve eski işlevine dair izleri hala korumasının yanında yeni işlevi ve eski işlevi arasındaki zıtlık bu yapının örneklem olarak seçilmesine sebep olmuştur. Bu nedenle A.G. URAL [8] tarafından heterotopik mekân olarak tanımlanabileceği sonucuna varılmıştır. Tophâne-i Âmire binası yapılışından günümüze kadar birçok yıkım, yapım ve onarım görmüş, aynı zamanda deprem, yangın gibi birçok doğal afet yaşamıştır. Tarihi yapının malzeme özellikleri ve dinamik karakteristiklerinin zamanla değişmiş olabileceğinden dolayı, farklı sayısal modeller ve deneysel yöntemler kullanılarak binaya ait söz konusu bilgilerin belirlenerek literatüre kazandırılması gerekmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile SAP 2000 paket programı kullanılarak yapının 3 boyutlu modelleme analizi yapılacaktır. Yapının bu modelleme ile elde edilen mod frekansları, deneysel yöntemlerle elde edilen verilerle karşılaştırılarak malzeme özellikleri ayarlanacaktır. Yapılan çalışma ile Tophâne-i Âmirenin dinamik karakteristikleri araştırılarak literatüre kazandırılması hedeflenmektedir. Bu çalışmalar ışığında İstanbul İlinin Kuzey Anadolu Fay Hattı kuşağında olması sebebiyle ortaya çıkarılacak bir dinamik tanımlama sayesinde söz konusu yapının performans analizi yapılarak olası bir sismik aktivite esnasında, yapının göstereceği davranışı daha doğru ve güvenilir bir şekilde ortaya çıkararak, literatüre kazandıracaktır.

4.1.1 Tophane-İ Amirenin Tarihi

Türkler ağır sanayide ileri gitmiş ve bilhassa top dökümcülüğünde asırların üstün tekniğine sahiptiler. Karşılarına çıkan orduları, topları ve savaş taktikleriyle yenmişlerdir. Osmanlı ordularında 13. Yüzyıldan beri topçu bataryaları mevcut olup, gezici topları da vardı. Fatih Sultan Mehmet Han tahta geçince İstanbul'un fethi için hemen gizli bir top kâr hanesi kurmalarını emretmiştir. Bu kâr hane dört yüksek surla çevrili, üzeri ahşap yapılı ve tavanında yüksek bacalar uzanan bir tophâneydi. 15. Yüzyılda Türkler sanayide çok ileri bir seviyede olup; teknik üstünlüğe sahiptiler. Tophâne semtinde ilk tophâneyi Fatih Sultan Mehmet Han yaptırmış ve akabinde birçok padişah da tophânede yeni yapılar yaptırmış ve onarmıştır (E.B. Şapolya) [69].

Kahraman ve diğerleri, [4] Evliya Çelebi Seyahatnamesinde; Tophâne-i Âmire yapılarının olduğu alanda herhangi bir yapı olmadığı, Fatih Sultan Mehmet Hanın İstanbul'u fethinden sonra, bölgede ağaçlık içinde derli toplu bir tophane inşa ettiğini,

sonrasında ise II. Bayezîd Han-ı Velînin de yapıyı genişletip odalar yaptığını yazar. Diğer taraftan; Osmanlı müelliflerinden Hâfız Hüseyin Ayvansarâyî (Ö. 1787) [5], Hadîkatü'l-cevâmi' adli eserinde, Tophane'nin "bir rivayete göre" Bizans döneminden kalma bir yapı olup, fetihten sonra tekrar mamur hale getirildiğini; başka bir rivayete göre ise, Evliya Çelebinin bahsettiği gibi tophanenin fetihten sonra inşa edilip Osmanlı padişahları tarafından peyderpey genişletildiğini ihtiyatlı bir üslupla ifade eder. A. Y. Kubilay, Dünden Bugüne İstanbul Ansiklopedisinde [70], Tophanenin 1453-1470 yılları arasında kurulduğunu, ilk top dökümhanesinin İstanbul'un fethinden hemen sonra inşa edildiğini ve II. Bayezîd Han-ı Velînin döneminde (1481-1512) tophaneye bir kışla eklendiğini yazar. Seyahatnamede [4], Evliya çelebi; Koca Süleyman Hanın (Kanuni Sultan Süleyman) memleketin her tarafından topçu sınıfından topçular ayarladığını ve Fatih Sultan Mehmet Han ile Bayezid Hanın yaptığı eski tophaneyi yıktığını, yerine büyük bir tophane binası yaptırdığını söyler. Bunula birlikte; bu büyük tophanenin din düşmanı olan kâfirlerin ellerindeki büyük kaleleri fethetmek ve kurtarmak için önemli savaş aletlerinden olan topların her türlüsünün yapılacağını yazar. E.B. Şapolya [69], Kanunî'nin yaptırdığı tophânenin en muhteşem tophâne olanıdır diye bahseder.

Tophâne-i Âmirenin Tophane bölgesinde kurulmasının sebebi; yapının zamanının bir sanayi kuruluşu olduğu hasebiyle devamlı hammadde, yakıt, su gibi ihtiyaçlarının karşılanması gerektiğinden deniz bağlantılı bir yer olması, topların limana rahat taşınması için yamaç bir yerde olması ile Tophane bölgesinin Topkapı Sarayı, Haliç gibi önemli yerlere yakın olması açıklanabilir.

M. Cezar [71], yazdığı kitapta 1723-1724 yılları arasında tophanede çıkan yangınlardaki bölümde; Küçük Çelebizade Asım Efendi'nin yangınlarda hasar gören Tophane-i amirinin kâgir olarak tamirinden ve yeni bir küçük ocak ilavesinden bahsettiğini, yangınlara müdahale etmek ve tophane ile çevresinin su ihtiyacını karşılanabilmek için ise Tophane'de büyük bir su sarıcının inşa edildiğini yazar.

Kanuni Sultan Süleyman döneminde (1520-1560) yapılan ve 1742 senesinde bir onarımı gören Tophane – i Amire (Ayverdi) [72], (A. Refik) [73], 1743 tarihinde tamamen yıkılmış ve bugünkü haliyle yeniden inşa edilmiştir (Hammer) [74]

S. Aydüz [75], Tarihçi İzziden alıntıladığı kadarıyla [76]; Hem mimar hem de ressam olan dönemin topçu başsısı Mustafa Ağa, meşhur bazı ressamlarla bir araya gelerek dönemin ihtiyaçlarına göre bir Tophane planı yapmıştır. Modern bir tarzda çok başarılı bir şekilde yeniden inşa edilen bu Tophane-i Âmire Dökümhanesi, üzerinde dönemin padişahi, sadrazamı ve Mustafa Ağa'nın isimlerinin havi kitabesiyle halen ayakta durduğunu belirtir. Bununla birlikte; Tophane inşaatını 1745 yılı hadiseleri arasında zikrettiğinden dolayı, Tophâne-i Âmire inşaatının bu yıl tamamlandığı zannedilmiştir. S. Aydüz [75], U. Derman'dan alıntıladığı gibi [77], Mustafa Ağa ayrıca, güneye bakan ana kapı üzerine mermer bir kitabe yerleştirmiştir. Kitabenin sağında, Mustafa Ağa'nın kendi elinden çıkma I. Mahmud'un bir tuğrası bulunmaktadır. Tuğranın solunda, Kâtip Fahreddin Yahya Efendi'nin taşa hâkkettiği celi sülüs kitabede şair Şem'i'ye ait bir tarih manzumesi bulunmaktadır.

''Çeküp kilk- i himmetle Mustafa Ağa-yı ser- topî
pesend eyler debîr-i nüh-felek tuğra-yı mergûbî'' (1156/1743)

Yine Şem'i tarafından yazılmış kapı üzerinde duran kitabedeki beş kıtalık ta'lik manzumenin ilk kıtası aşağıda yazılmıştır.

Himem- perdaz-ı erbab- ı gaza Sultan Mahmud'un
Mehâbet saldı sıyt -ı şevketi Turan u İran'e
Rusûmât -ı imârât hıtta -i milkinde dâirdir
Zamân- ı devletinde kalmadı bir cây -ı virâne
Müsaiddir hemîşe tâli ü baht -ı hümâyûnu

Ketebehû az'afu'l - küttab Fahreddin Yahya sene 1743

P.Ğ. İnciciyan [78], Sultan Mahmut (I.)'un Tophane, Galata, Kasımpaşa ve Beşiktaşın su ihtiyacını karşılamak için 1753 yılında büyük bir su bendi yaptırdığından, öncesinde de büyük bir su-kemeri inşa ettiğinden bahseder. M. Cezar [71], 1765'te Tophanede çıkan yangının on beş saat sürdüğünü ve mütenasip zararlara neden olduğunu, A.Y. Kubilay [70], Aynı yıl harap olan yapıların III. Mustafa tarafından tekrar elden geçirdiğini yazar. P.Ğ. İnciciyan [78], Sultan Abdul Hamid Han'ın, Sultan Mahmut (I.) tarafından yaptırılan ve tophanenin su ihtiyacını sağlayan su bendinin tamiratını 1784

yılında yaptığından bahseder. M. Cezar [71], 1804'te Tophanede çıkan yangınla Tophane Kışlaları ile birlikte dört yüz evin yandığını ve yangının söndürülmesi esnasında iki yüz evin yıkıldığını yazar.

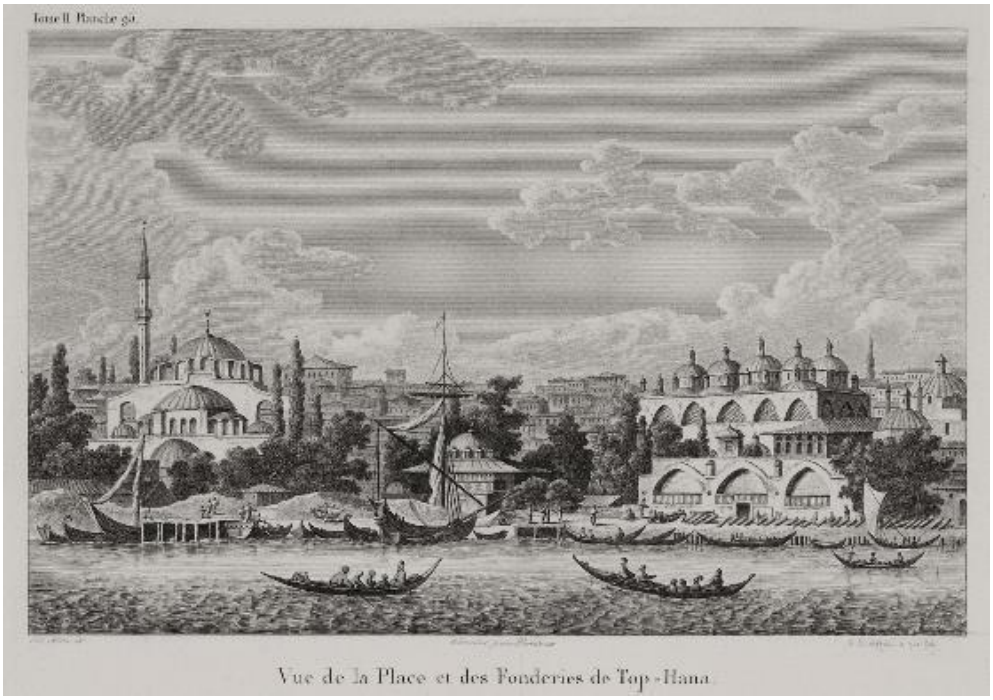
III. Selim döneminde (1789-1807) Tophâne-i Âmire yeniden ele alınmış, dönemine göre modernizasyonu yapılarak imar edilmiştir (H.H. Ayvansarayi) [5]. Tophâne-i Âmire ile ilgili görsellerin (Resim, gravür vb.) çoğu III. Selim ve sonrası dönemi yansıtmaktadır (Şekil 21,Şekil 22) (A.Y. Kubilay) [70].



Şekil 21 Fıransız Seyyah , Mimar Ve Ressam Antoine Ignace Melling (1763-1831), İstanbul Gravürlerinden Tophâne-İ Âmire Ve Çevresinden Görünümler (Melling, A. I., (1819). Voyage Pittoresque Constantinople Et Des Reives Du Bosphore , Paris). [79]

1823 yılında meydana gelen meşhur Firuzağa yangını 17 saat sürmüş. Yangın; Cihangirden başlayarak, Fındıklıya oradan da Gümüşsuyu'na kadar ilerlemiş diğer taraftan Beyoğlu'na kadar uzanmış, başka bir koldan ise Cihangir Camii tarafını yakıp Tophâne-i Âmire'ye kadar gelmiştir. Tahrip gücü yüksek olan yangınla Cihangir Camii, Topçu ve Arabacı kışlaları ile top dökümhanesinin bir kısmı yanıp mahvolmuştur. Topçu ve arabacı kışlalarının tekrar inşalarına, dökümhanenin de tamirine derhal başlanmıştır (M. Cezar) [71]. II. Mahmud bir yıl içinde imar faaliyetlerini tamamlamıştır. J. F. Lewis'in 1838 yılındaki albümünde yer alan bir taş baskısında Tophâne-i Âmire yapıları ile Nusretiye Camii görülmektedir (Şekil 23). 1965 yılında yayımlanan Vakıflar

dergisinde [80]; Ağustos 1823- Nisan 1827 tarihleri ile Nisan 1840- Mart 1845 tarihleri arasında yapılan inşa ve tamir masrafları kayıtlarında Tophâne-i Âmireninde adı geçmektedir (A.Y. Kubilay) [70].



Şekil 22 Tophane Meydanı Ve Top Dökümhânesini Gösteren Bir Gravür (Comte De Choiseul-Gouffier, Voyage Pittoresque De La Grèce, Paris 1822, Iı, Lv. 95) [81]



Şekil 23 J. F. Lewis (1805-1876) Tophane Büyük Top Döküm Binası Kapısı Giriş Saçağı Ve Rampa (Lewis (1837) J.F. Lewis Illustrarions Of Constantinopole Made During A Residence İn That Citiy İn The Years 1835, 1836 London) [82]

III. Selim tarafından yaptırılmış topçu başı binaları, 1863-1864 yıllarında yanmış. Abdulaziz tarafından yanan binaların arsa genişletilerek yerine müşirilik binası yaptırılmış. Tophane- Salıpazarı yolu yapımı esnasında bir kısmı ve 1956'da da tamamı yıktırılmış, yerine beton bir teras ile altına da dükkânlar yaptırılmıştır (Şekil 24) (A.Y. Kubilay) [70].



Şekil 24 Tophâne-i Âmire yıkılırken, H. Şahenk, 1950

A.Y. Kubilay [70], Tophâne-i Âmireye Abdulmecid 1847 de bir marangozhane, Abdulaziz ise 1866 da başka yapılar eklediğini yazmıştır. Aynı zamanda 1867 tarihli Devlet Salnamesinde Tophâne-i Âmire yapıları; Top dökümhanesi, vapur makinehanesi, marangozhane, demirhane, çarkhane, saraç atölyesi, nakkaş atölyesi, alethane, terzihane, avadanlıkhane, mastarhane, kılıçhane, tüfenkhane, sandık ve model atölyeleri olduğunu belirtmiştir.

Tophâne-i Âmire yıllar geçtikçe yıkılan, onarılan ve yapılan yeni yapılarla birlikte II. Abdülhamid zamanında son halini almıştır. Tophâne-i Âmirenin işlevinden ve

konumundan dolayı Tophane bölgesi XVII. asırda kalabalık bir yerleşim yeri olmuştur (Ş. Tunç) [83].

Tanzimat Dönemi'nden sonra Tophane-i Âmire'ye devredilen baruthanenin işletimi, Cumhuriyet döneminde ise, Askeri Fabrikalar İdaresi'ne devredilmiştir (M. Kütükoğlu) [84]. I. Dünya Savaşından sonra önemini kaybeden Tophâne-i Âmire uzun süre kaderine terkedilmiş ve amacının dışında kullanıldıktan sonra 1955 yılında Askeri Müze olarak kullanılması düşünülmüş ancak yüksek bakım onarım maliyetleri nedeniyle Askeri Müzenin deposu olarak kullanılmıştır. 1972 yılında bakım onarım çalışmalarına başlanmış ancak büyük maliyet gerektiren restorasyon harcamaları düşünülerek 1992'de Mimar Sinan Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesine devredilmiştir (A.Y. Kubilay) [70].

Tophâne-i Âmire 1958-1959 yılları arası birinci dönem ile 1973-1984 arasında ikinci dönem olmak üzere yapısal olmayan onarımlar görmüştür (O. Ceylan) [1]. Tophâne-i Âmire; Gayrimenkul Eski Eserler ve Anıtlar Yüksek Kurulu'nun 14.10.1978 gün ve 10538 sayılı karar ile korunması gerekli kültür varlığı olarak tescil edilmiştir. Ayrıca Tophâne-i Âmire; İstanbul 1 Numaralı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kurulu'nun 07.07.1993 gün ve 4720 sayılı karar ile belirlenen Kentsel Sit Alam içinde kalmıştır. Mimar Sinan Üniversitesi Restorasyon Bölümü tarafından eski binaların restorasyonu konusunda uzmanlaşmış mimar Philippe Robert'e Tophâne-i Âmire'ye yeni işlev kazandırmak için restorasyon projesi hazırlatılmış. Tophâne-i Âmire; üniversiteler arası işbirliği, sanatsal ve endüstriyel yaratıcılığı geliştirmeye hazır bir sanat merkezi kimliğine büründürmüşlerdir. Mimar Sinan Üniversitesi'nce Tophâne-i Âmire kültür ve sanat merkezi alanına dönüştürülmüştür (E. Gönen) [85]. Mimar Sinan Güzel Sanatlar üniversitesinin 2016-2020 stratejik planında Tophâne-i Âmire Binası ve Çevre Düzenlemesi ile ilgili; yeni mekânlar oluşturulması için muhtelif ahşap ve havalandırma işlerin yapıldığı, çeşitli imalat, inşaat, sıhhi tesisat ve elektrik işlerin tamamlandığı, geri kalan işlemler için Anıtlar Kurulu'ndan izin beklendiği yazılmıştır.

Anlaşılacağı üzere; temelleri 15. Yüzyılda atılmış olan Tophâne-i Âmire 20. Yüzyılın ortalarına kadar aktif olarak kullanılmış, Osmanlı İmparatorluğunun ilk ve en önemli sanayi tesisi olmuştur. Tophâne-i Âmire yapılışından günümüze kadar sürekli yenilenmiş, birçok padişahın ve devlet adamının ilgisine mazhar olmuş, evliya çelebinin seyahatnamelerinde geçmiş, birçok tarihçinin dikkatini çekmiş ve üzerinde çok sayıda

araştırmalar, kitaplar, akademik çalışmalar yapılmıştır. Tophâne-i Âmire günümüzde eşsiz mimarisi ve tarihi ile ayakta durmakta olup; tarihe tanıklık etmektedir. Tophâne-i Âmire yapılarından günümüzde büyük top döküm binası, küçük top döküm binası, su sarnıçları ile idari mekânlar bulunmakta olup; tez konusu olarak Şekil 25'de görülen büyük top döküm binası incelenecektir.



Şekil 25 Galata Kulesi'nden Tophane-i Amire – Caner Cangül Fotoğrafları, 2008 [86]

Seyahatnamede [4], Evliya çelebi; Tophanede top dökümü yapılacağı gün, ocak ateşe verilir 20 saat bekletilir sadrazam, şeyhülislam, kazasker ve duası makbul şeyhler geldikten sonra dökümhanenin kapıları kapatılır, sonrasında sadrazam, hazinedar ve diğer vezirler erimiş bronzun içine atılmak üzere birkaç kese altını dökümcü başına verir, nihayetinde ustalar keçe elbiseleriyle Allah Allah diyerek kapağı açar ve erimiş bronz, top kalıplarına dökülür diye bahseder (Şekil 26Şekil 27) .



Şekil 26 Tophanede Dökülen Muhteşem Toplardan İkisi (Türk Kültür Tarihi-Tophaneler) E. B. Şapolyo, 1968 [69]



Şekil 27 Tophâne-i Âmire Önünde Sergilenen Toplar, 2019

4.1.2 Tophâne-İ Âmirenin Mimarisi

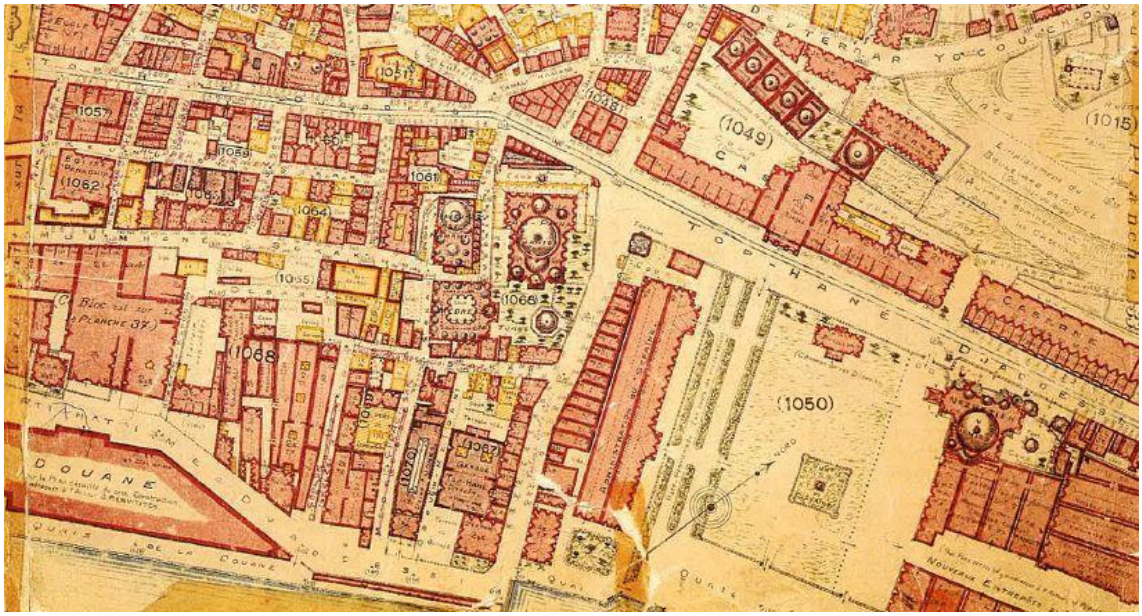
S. Aydüz [75], Tarihçi İzziden alıntıladığı kadarıyla [76]; Topçu başı ve ayni zamanda inşaat fenninde mahir olan Mustafa Ağa, Tophâne'nin en iyi şeklide elden geçmesi için çok gayret sarf etmiş ve yeni binalar eklemiştir. Bunun için Tophâne'nin

önündeki meydanı (denize doğru 50 zirâ) kazıklar çakıp doldurtarak genişletmiştir. Aynı şekilde; Kanuni Sultan Süleyman döneminde yapılan binaların tamamen yıkılmasıyla yapılan yeni kâgir binanın duvardan iki sıra ince tuğla, bir sıra taş örgüden oluşmaktadır. Binanın içinde iki büyük ergitme fırını bulunmakta olup, biri doğu ve biri de batıya açılan iki büyük kapısı vardır. Binanın mimarlığını yapan Mustafa Ağa, ayni zamanda topçu başı olduğundan çeşitli yerlere yerleştirdiği top figür ve süslemeleriyle göstermiştir.

Karamürsel taşı, volkanik yapısı nedeniyle ateşe dayanıklı olduğundan, "ateş taşı" olarak adlandırılmakta olup; top döküm fırınlarının da vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Bu nedenle Karamürsel Taşı, Karamürsel Taş Ocaklarından Tophâne-i Âmire'ye deniz yoluyla getirtilerek, Tophâne-i Âmirenin iki adet ergitme fırınlarında kullanılmıştır (N. Kahraman ile R. Arıkan) [87].

P.Ğ. İnciciyan [78], Çevirmen H.D. Andreasyan önsözünde, Şark ve Garb dünyalarının bağdaştıkları nokta olan İstanbul'un tarihini yazmak, eski ve yeni dünya medeniyetlerinin bir portresini çizmektir demiştir. Kitapta ise; 18. Yüzyılda, tamimiyle Türklerden meskûn olan Tophanede Topçu kışlası, Topçu-sarayı ile top ve havan topu imal eden beş kubbeli kâgir top dökümhanesinden (tez konusu büyük top döküm binası) bahseder.

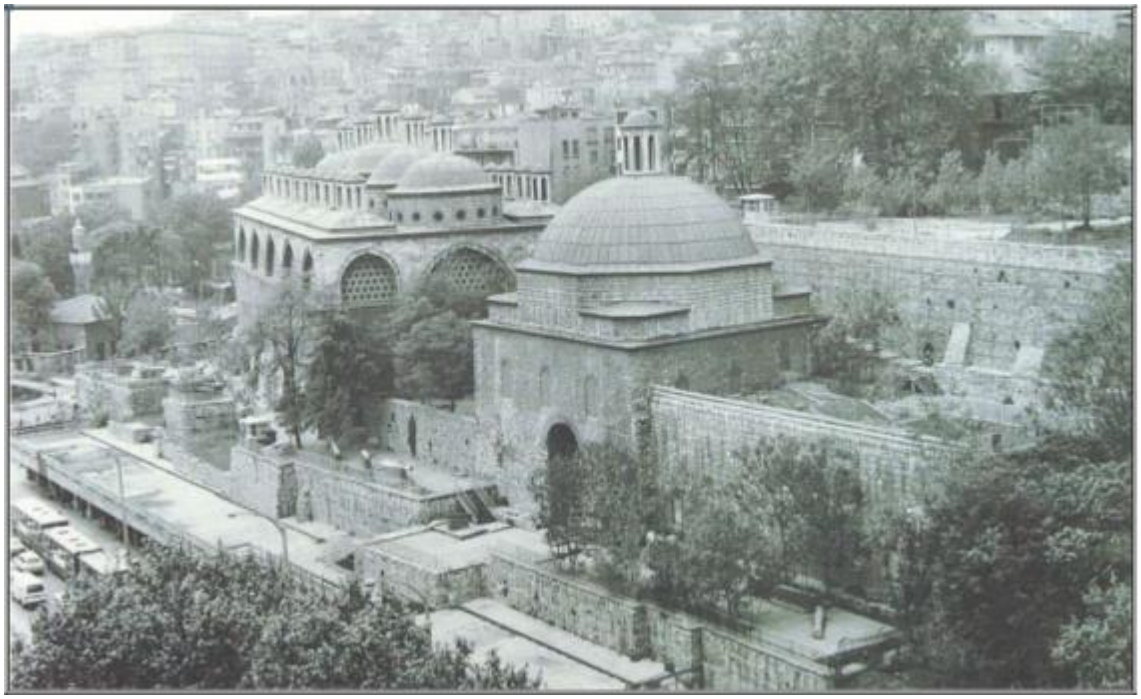
Tophâne yapıları Türklerin eşsiz mimari yapıtlarıdır. Türkler; Edirne, İstanbul, Antalya ve Gelibolu'da tophâneler inşa etmiş olup; bunların arasında en eski ve özgün olanı Tophâne-i Amiredir. Tophâne-i Amire tophane meydanının sırtına, denize doğru kurulmuş (Şekil 28) ve mimarisi ile benzersiz bir eserdir (E.B. Şapolya) [69].



Şekil 28 Tophane Meydanı ve Çevresi planı (Pervititch, 1927) [88]

Türk mimarlar dehâlarını konuşturarak, Tophâne-i Âmire'yi üzerinde birçok kubbelerle süslü, zarif bacaları ve kubbesinde ışık fenerleri olan kâgir yapıda bir şaheser olarak yaratmışlardır. Binanın yüzündeki mermer kapısı, üzerindeki büyük kemer ve küçük küçük yuvarlak pencereler yapıya ayrı bir eşsizlik katmıştır (E.B. Şapolya) [69]

Bugün toplam 1200 m²'lik alanı kaplayan Tophâne alanında (A.Y. Kubilay) [70], doğudaki küçük top döküm binası; kare planlıdır ve tek kubbe ile örtülüdür. Yapı dıştan 18.25 m x 17.20 m ölçülerindedir. Tez konusu olan büyük top döküm binası ise, dikdörtgen planlıdır ve beş kubbe ile örtülüdür. Bu yapı 51.45 m x 24.56 m ölçülerinde olup; duvar kalınlığı ortalama 1.60 m'dir. Ayrıca büyük top döküm binasının orta aksının iki yanında iki izabe ocağı bulunmaktadır (Şekil 29) (E.Gönen) [85]



Şekil 29 Tophâne-i Âmire restorasyondan önce (E. GÖNEN, 1999) [89]

Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesinden tez çalışması hakkında 30.05.2019 tarih ve 2070 sayılı yazı ile gerekli izinler alınmıştır. Bu kapsamda mülkiyeti Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesine ait olan Tophâne-i Âmire binalarından Büyük Top Döküm binası tez konusu olarak seçilerek, üniversite arşivlerinden faydalanılmış ve mono mimarlık firmasının üniversite için hazırlamış olduğu çizimlerden yararlanılmıştır. Ayrıca; yerinde ölçümler alınarak ayrıntılı literatür taraması da yapılmıştır.

Büyük top döküm binası 24 m x51 m ebadında olup duvarların temele yakın kısmının küfeki taşı, zemin kotu ile kemer kotları arası küfeki ve tuğla hatılıdır. Ortadaki beş kubbe sekiz sütuna oturur. Ön ve arka cephelerde beşer tonoz kubbeli iki bölüm daha bulunmaktadır. Kubbeler üzerinde mermerden yüksek beş adet fener veya hava deliği, tonoz kubbelerde de onar adet mermer delikler bulunmaktadır (T. Öz) [90]

Büyük top döküm binası; defterdar yokuşu tarafında simetrik olarak yaklaşık 4.8m x 8.5m ölçülerinde beşer adet ile meclisi mebussan caddesi tarafında ise yaklaşık 5.2m x 8.5m ölçülerinde beşer adet tonoz olmak üzere toplamda on adet tonoz ve ortada yaklaşık 8m- 8.5m arası çapa sahip beş adet kubbe ile örtülüdür. Bu kubbe ile tonozların birleşim bölgelerinde, iç mekânda her iki tarafta simetrik olan dörder adet olmak üzere toplamda 8 adet taşıyıcı kolon bulunmaktadır. Bu taşıyıcı kolonlar üst örtü sistemini taşımakta olup;

yaklaşık 2 m x 2.11 m ebatlarında kesme taştan oluşmaktadır. Ayrıca çevre duvarların içinde, kemer birleşim bölgelerinde ise ortalama 1.8 m x 1.6 m ebatlarında kesme taştan yapılma 12 adet taşıyıcı kolon bulunmaktadır. Top döküm imalathanesi olarak kullanılan yapı ’da eritme ocakları mevcut olup, buradan çıkan zehirli ve sıcak gazların dışarı atılabilmesi için kubbelerde birer, tonozlarda ise ikişer adet olmak üzere toplamda 25 adet taş fenerler bulunmaktadır. Havalandırma için ek olarak kubbe kasnaklarında da yaklaşık 0.8 m çapılarında on altışar adet yuvarlak boşluklar oluşturulmuştur. Kubbe ile kemer arası bağlantı (Şekil 30) pandantifler aracılığı ile sağlanmıştır (O. Ceylan) [1]



Şekil 30 Tophâne-i Âmire iç mekân (kubbe, pandantif, kemer, duvar, kolon vb. taşıyıcı sistem)

Temel ile ilgili yüzey araştırması yapılmış ancak net bir bilgi elde edilemediği ifade edilmiştir. Yapılan literatür araştırmasında E. Gönen [89]'e ait olan Şekil 31'de kolonların tekil temel ile zemine bağlı olduğu görülmektedir.



Şekil 31 Tophâne-i Âmire temel görünümü E. Gönen, 1999 [89]

Dış duvarlar; zemin kat döşeme seviyesine kadar kesme taş olup, zemin kat döşeme kotundan sonra iki sıra tuğla ve bir sıra taştan oluşmaktadır. Bu örgü sistemi kemer kotuna kadar devam etmektedir. Altıgen boşluklardan oluşan kemer dizgeleri ise uzun kenarda beşer, kısa kenarda üçer adet olup, kesme taştan oluşmaktadır. Dış duvarlar; kalınlıkları yaklaşık olarak 1.5 m -1.7 m arasında değişmekte olup, kâgir olarak inşa edilmiş ve taşıyıcı görevi görmektedir (O. Ceylan) [1].



Şekil 32 Tophâne-i Âmire Günümüz Güney Cephe (Deniz Tarafı)



Şekil 33 Tophâne-i Âmire Günümüz Kuzey Cephe (Yol Tarafı)



Şekil 34 Tophâne-i Âmire Günümüz Batı Cephe (Ön Giriş)



Şekil 35 Tophâne-i Âmire Günümüz Doğu Cephe (Arka Giriş)

4.1.3 Yığma Binalarda Malzeme Karakteristikleri

Yığma yapı tekniğine göre inşa edilmiş tarihi yapılar; kubbe, tonoz, kemer, sütun ile ayak, pandantif, tromp ve masif duvarlar vb. gibi taşıyıcı sistem elemanlarından oluşmaktadır. Bu taşıyıcı elemanlar genellikle doğal taş (Granit, mermer, kireç taşı, kumtaşı, kuvars, serpantin vb.) , ahşap ve tuğla malzemelerden oluşmaktadır. Kâgir yığma yapı olarak inşa edilen Tophâne-i Âmire'nin malzeme yapısı, literatür araştırmasına ve yerinde yapılan gözlemlere dayanarak, İstanbul'daki tarihi yapılarda sık tercih edilen küfeki (limestone) taşı ile tuğla kullanıldığı anlaşılmaktadır. Temel ve zemin seviyesinde kullanılan doğal taşların basınca karşı daha dayanıklı olmasından dolayı yapının ağırlığını daha iyi taşımaktadır, üst örtü elemanlarında kullanılan tuğlaların ise birim hacim ağırlığının düşük olması ve hafifliği sebebiyle kubbe, tonoz, pandantif vb gibi yapı elemanlarının depreme karşı daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Bu kapsamda Tophâne-i Âmirede zemin, temel ve kolonlardaki küfeki taşı tercihi ile kubbe ve pandantiflerdeki tuğla seçimleri yerinde bir karar olmuştur.

Tophâne-i Âmirenin yapı sağlığı ve yapıya zarar verilmemesi açısından, yapıda tahribatlı testler yapılamamaktadır. Bu nedenle yapıda numune alınıp laboratuvarda testler yapılarak malzeme özellikleri incelenememiştir. Tophâne-i Âmirede kullanılan

malzeme özellikleri belirlenemediği ve literatürde bu konuda herhangi bir çalışma yapılmadığından dolayı, malzemelerin başlangıç değerleri için; küfeki taşının elastisite modülü (E) = 8000 MPa, kayma modülü (G); 3333 MPa, birim ağırlık (c) = 21 kN / m3, poisson oranı (v) =0,2 ile tuğlanın elastisite modülü (E) = 2,500 MPa, kayma modülü (G); 1041 MPa, birim ağırlık (c) = 18 kN / m3, poisson oranı (v) =0,2 olarak alınmıştır

- **Tuğla Malzeme Karakteristikleri**

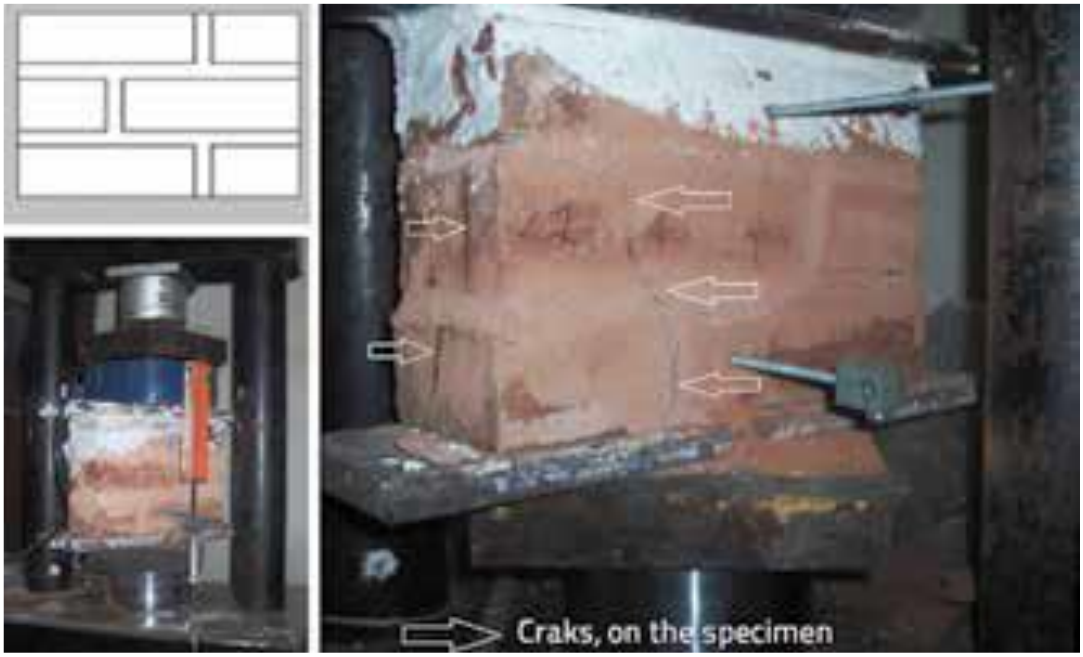
Çok eski bir geçmişe sahip ve tarihi yapılarda önemli bir yığma elemanı olan tuğla; Roma döneminden çok önceleri de kullanılmıştır. Dere yataklarında jeolojik zaman içerisinde biriken ince kum kalıntıları, pişirilmiş kilden üretilen tuğlanın hammaddesini oluşturmuştur. Görünümleri ve işlevlerine göre sınıflandırılan pişmiş kilden oluşan tuğla; saf kaolin ve kil karışımının fırınlarda yüksek ateş altında pişirilmesiyle elde edilmiştir. Tuğla; fırınlarda yüksek ateşte pişirilemeyen bölgelerde ve zamanlarda, doğrudan güneş ışığı altında da kurutularak üretilebilmektedir. Tuğlanın ortalama fiziksel özellikleri; Basınç Dayanımı; 10-30 MPa, Çekme Dayanımı; 2.7-5 MPa, Kayma Dayanımı; 10-20 MPa, Elastisite Modülü; 1500-3000 MPa olduğu belirtilmektedir (A. İ. Ünay) [91].

Tuğla yapımında kullanılan horasan harcı yapay puzolanik malzeme olan pişmiş kilden elde edilmektedir. Horasan harcına; Roma ve Bizanslılar ‘’Roman’’ harcı adını vermiş, Selçuklu ve Osmanlılar ise renginden ve dokusu itibariyle horasan bölgesindeki toprağa benzerliğinden ‘’Horasan’’ harcı demişlerdir. H. Böke ve diğ. [92], Tarihi yapılarda kullanılan puzolanik yapıdaki tuğlanın 700-900 ^{0}C derecede pişirilmesi ve yapısında yeterli kadar puzolanik kil bulundurması gerekmektedir (N. Çamlıbel) [93].

Tarihi yapıların zarar görmemesi için yapıların onarımında mutlaka puzolanik özelliğe sahip tuğla ve harç kullanılmalıdır. Puzolanik yapıdaki tuğla, eskiden beri tarihi yapılarda kullanılmakta ve basınca karşı dayanıklı bir malzeme olduğu bilinmektedir. Tarihi yapılar incelendiğinde, tuğla ve doğal taşlar, yapıların taşıyıcı elemanlarında basınç gerilmelerini sönümleyecek şekilde biçimlendirildiği görülmektedir.

Tarihi yapıların taşıyıcı elemanlarının malzeme özellikleri (fiziksel ve kimyasal) laboratuvar deneyleriyle belirlenmesi yapıya zarar vereceğinden oldukça güçtür. F.Aras ve G. Altay [23], Beylerbeyi sarayında araştırmalar yapmış, yapıda görülen yığma tuğla duvar ile ilgili toz numuneler almış ve numunelerin ana bileşenlerinin kireç, ince kum,

tuğla tozu ve mermer tozu olduğu tespitinde bulunmuşlardır. Yapıda kullanılan malzemeye benzer oranda tuğla duvar numunelerini, laboratuvarda üretimini yaparak test etmişlerdir. Test için yapıdaki orijinal tuğlalar kullanılamadığından, tuğla duvar örnekleri; literatürde belirtilen oranda horasan harcı formülleri ile normal kil ve yanmış tuğla parçaları kullanılarak hazırlamışlardır. Birinci örnekte; 1 sönmüş kireç, 1.22 tuğla tozu ve 2.11 su ağırlık oranında kombinasyon yapılarak hazırlamış. İkinci örnekte ise; 4 sönmüş kireç, 4 tuğla tozu, 2 ince kum, 1.5 su ve 0.05 fibre ağırlık oranında kombinasyon yapılarak hazırlamışlardır (Şekil 36). Sonuç olarak, Tablo 2'deki değerleri elde etmişlerdir.



Şekil 36 Tuğla duvar örneği (labaratuvarda oluşturulmuş) F.Aras ve g.altay [23]

Tuğla için literatürde ve yönetmeliklerde bulunan bilgiler araştırılmış ve 3D sayısal model analizi için ortalama değerler alınmıştır. Tablo 2′de literatürdeki tuğlanın malzeme özellikleri verilmiştir. Tablo dada anlaşılacağı üzere malzeme özelliklerinin verilen örnekler arasında ciddi farklılıklar bulunmaktadır. Bu durumun temel nedeni ise yapay bir malzeme olan tuğlanın her bir örneğinin dinamik ve fiziksel özelliklerinin birbirinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

TUĞLA (DOLU)	2018 TBDY	F.Aras ve G.Altay [23] (2015)	E. Mesquita ve diğ. [17] (2017)	R. Sanciprian ve diğ. [44] (2017)	G.Standoli ve diğ. [51] (2020)
Birim Hacim Ağırlığı (kN/m3)	-	22,4	18	18	ρ_1:18 ρ_2:20
Posion oranı	v ≤ %35	-	0,2	0.1	v_1: 03 v_2: 04
Elastisite Modulu (MPa)	2000	E1:2315 E2:3100 E3:8000	E1:1500 E2:1700	6519	E1:1500 E2:2175
Basınç Dayanımı (MPa)	5	10	3.2	31.21	
Çekme Dayanımı (MPa)	0.25	0.82	0.16	-	

Tablo 2 Tuğlag'nın mekanik özellikleri

- **Küfeki Taşının (Limestone) Malzeme Karakteristikleri**

Küfeki Taşı, kayıtlara göre 2000-2500 yıl gibi uzun bir zaman aralığındaki tarihi yapılarda dayanıklı bir şekilde kalan tek taş türüdür. Yerindeki (toprak altında) koşullarda yumuşak ve işlenmesi çok kolay olan Küfeki Taşı, daha sonraki aşamalarda havadaki karbondioksit gazını alarak sertleşmektedir. Yüzyıllardan beri İstanbul ve Trakya' nın yapı taşı gereksinimini karşılayan; "lümaşelli kalker", "maktralı kalker" ya da "Bakırköy taşı" adlarıyla da bilinir. Deniz kabuklarının ve yoğun olarak da istiridye kabuklarının yer aldığı bir kalker çeşididir. Küfeki taşı; özellikle Bizans ve Osmanlı dönemindeki yapılarda sıklıkla tercih edilen, taş ustalığında işlemesi kolay olan ve tarihi eser restorasyonunda en çok kullanılan taş çeşididir (Şekil 37) (M. Kumral ve diğ.) [94].

Yerindeki koşullarda yumuşak olan Küfeki Taşı; ocaktan çıkarıldıktan sonra havadaki karbondioksit gazını almasıyla sertleşir. Aynı zamanda; taşın fiziksel ve kimyasal özellikleri de değişmeye başlar. Bu süreç yıllar geçtikçe daha da artar ve sertleşen taşın ömrü 2 bin 500 yıla kadar dayanır. Çekme, basınç ve kesme mukavemetleri artan Küfeki taşının içindeki gözenekler azalmakta olup; taşın su ile gaz emisyonlarına karşı ve çevre etmenlere karşı dayanımı artmaktadır. Küfeki taşının yapısında su bulunmakta ve bu suyun bir bölümü buharlaşırken bir bölümü de kimyasal tepkime sonucunda oluşan katman içinde kapanım yapar. Küfeki taşının günlenme (ocaktan çıkarılması-işlenmesi) öncesi fiziksel özellikleri şu şekildedir. Birim Hacim Ağırlığı; 18.33 kN/m3, Yoğunluğu; 16.47 kN/m3, Posion oranı; 0.12, Elastisite Modulu 770.11 MPa, Basınç Dayanımı; 5.58 MPa. (M. Kumral ve diğ.) [94].



Şekil 37 Mimar Sinan'ın üzerinde araştırmalar yaptığı ve pek çok eserinde kullandığı küfeki taşının ustası Muammer Erdoğan, nasır tutan elleriyle yarım asırdır taş kesiyor. (Küfeki taşın ocaktan kesilmesi) [95]

Küfeki taşının mekanik ve fiziksel özellikleri, taş ocağından çıkarıldıktan sonra karbonasyon süreci nedeniyle değişmeye devam etmektedir. Sonuç olarak, küfeki taşı (limestone) taş ocağı işleminden kısa bir süre sonra kolayca işlenebilir ve yapının inşası tamamlandıktan sonra bile mukavemet geliştirmeye devam etmektedir. Geçmişte Küfeki taşı, İstanbul çevresindeki taş ocaklarının varlığı, hafif olması, liman bağlantılı kolay nakliye imkânının olması ile kolay işlenmesi gibi avantajlar nedeniyle tercih edilmiştir.

Bu avantajlara ek olarak, Küfeki taşının ocaktan çıkarıldıktan ve şantiyeye taşındıktan sonra karbonasyon süreci nedeniyle mekanik ve fiziksel özellikleri gelişmeye devam etmekte ve taşıyıcı özelliği artmaktadır. Eserleri ile yapı sanatına ve bilimine çok önemli katıklarda bulunan Mimar Sinan birçok eserinde Küfeki taşını kullanmıştır. Küfeki taşının mekanik dayanımlarının zaman ile artması taşın kimyasal yapısını oluşturan Kalsitin ($CaCO_3$) havada (suda) bulunan "CO_2" gazı ile tepkimeye girerek porların içinde Kalsiyum bikarbonat $Ca(HCO_3)_2$ oluşumu (karbonatlaşması) ile açıklanabilir. Kufeki taşının kimyasal ($CaCO_3$) ve fiziksel (boşluklu yapı) özellikleri bakımından artan kür suresiyle, tüm mekanik dayanımları aynen betondaki gibi artmaktadır. Bu özellik karbonatlaşması olayının doğal sonucudur (N. Arıoğlu ve E. Arıoğlu) [96] [97].

Küfeki taşının mukavemet artışı ve porozite azalması; taşın ocaktan çıkartılmadan önce toprak altında olduğu ve hava ile temasının olmadığından yerinde yumuşak olduğu, taşın ocaktan çıkartıldıktan sonra ise hava ile temas ettiği, böylece havadaki CO_2 nin kimyasal bileşimi $CaCO_3$ olan taşla tepkimeye girerek taşın gözeneklerini karbonatlaşma ürünleri ile doldurması ve sonuçta taşın "kompasite oranı" nın artmasıyla açıklanmaktadır (M. Kumral ve diğ.) [94].

Küfeki taşı için literatürde ve yönetmeliklerde bulunan bilgiler araştırılmış ve 3D sayısal model analiz için ortalama değerler alınmıştır. Tablo 3′de literatürdeki küfeki taşının malzeme özellikleri verilmiştir. Tablodada anlaşılacağı üzere malzeme özelliklerinin verilen örnekler arasında ciddi farklılıklar bulunmaktadır. Bu durumun nedeni ise her nekadar aynı malzeme olsa da, küfeki taşının farklı cinste fiziksel ve kimyasal özelliklerinin olmasından kaynaklanmaktadır.

Küfeki (LİMESTONE)	**Y.S. Erdoğan ve Diğ. [19] (2019)**	**A.M.Türk ve C.Coşgun [98] (2019)**	**E.Arıoğlu ve N.Arıoğlu [96] (1999)**	**C. Demir ve A. İlki [99] (2014)**	**M.Kumral ve diğ. [94] (2019)**
Birim Hacim Ağırlığı (kN/m3)	21.96	Kuru; 23.9 Doymuş:24.5	21.9	20.5	G.Önce: 18.33

					G.Sonra: 21.18
Posion oranı	3.04	0.24	0.12	0.3	G.Önce: 0.12
Elastisite Modulu (MPa)	12000	5840	23535	5700	G.Önce: 770.11
Basınç Dayanımı (MPa)	16,38	16.7	32.55	18	G.Önce: 5.58 G.Sonra: 31.8
Çekme Dayanımı (MPa)	-	0.9	3.53	3.2	
Eğilme Dayanımı (MPa)	9	-			G.Önce: 2.46

Tablo 3 Literatürdeki küfeki taşının mekanik özellikleri

4.2. Deneysel Çalışma

4.2.1 Ortam Titreşim Testi

Ortam titreşim testi yöntemi tarihi binalar için uygulanacak en uygun deneysel yöntemlerden biridir. Bu yöntem yapıya zarar vermediği, yapıda yapılan günlük aktivitelere engel olmadığı, diğer taraftan çok pratik ve hızlı bir yöntem olduğu için Mimar Sinan Üniversitesince izin alınarak çok kısa bir sürede binaya uygulanmıştır.

Ortam titreşim testi, yapılar üzerinde herhangi müdahale olmaksızın veya yapıya zarar vermeksizin uygulandığından tarihi yapıların dinamik özelliklerinin araştırılması için en ideal yöntemlerden biridir. Zamanla malzemelerin mekanik özelliklerinin değişmesi, yapının sismik aktivitelerden etkilenmesi- hasar alması, yapılar her ne kadar restorasyon geçirse de hiçbir zaman orijinal halini alamayacağı, yapılara çevrenin ve insan oğlunun gözle göremeyeceği hasarlar vermesi gibi nedenlerle tarihi yapıların yapı

sağlığı izlemesinin yapılması, mevcut dinamik özelliklerinin tespiti ve takibi gerekmekte olup; bunun için ortam titreşim testleri tercih edilmektedir.

Operasyonel modal analiz olarak ta bilinen, ortam titreşim testi yöntemi, titreşimlerin gerçek zamanlı olarak kaydedilmesi ve elde edilen bu kayıtların işlenmesinden meydana gelmektedir. Öncelikle yapıda kullanılacak tüm ivmeölçerler aynı yönde ve pozisyonda yerleştirilerek dinamik ayarlama yapılmaktadır. Böylelikle sinyaller aynı anda kaydedilir ve fourier spektrumları elde edilmektedir. Mod şekillerinin tanımlanması için spektrum genlikleri arasında oluşan farklar dikkate alınmaktadır. Bu işlemlerden sonra titreşimle mod şekillerinin elde edilmesi için, ivmeölçerler yapının farklı seviyelerine ve farklı noktalarına aynı yönde yerleştirilerek aynı anda kayıt alınmaya başlanır. Burada bir adet nokta referans seviyesi olarak seçilmektedir. Yapının dinamik karakteristiklerinin hatasız ve tam çıkarılabilmesi için yapıda kullanılacak ivmeölçerler yeterli sayıda ve kayıt işlemleri de yeterli sürede olması gerekmektedir. Genellikle deneysel çalışma yapılmadan önce sayısal model incelenerek ivmeölçerlerin sayısı ve konumlandırılacak yerleri tespit edilmektedir (F. Aras ve diğ.) [2].

Tez konusu olan Tophâne-i Âmirede, deneysel çalışma yapılırken SARA, Acebox ivmeölçerleri kullanılmıştır. Bu ivmeölçer, aynı anda 3 eksende ölçüm yapabilmektedir. İvmeölçerin teknik özellikleri ise; doğrusal hızlanma aralığı +/-2g, gürültü seviyesi $< 20ng/\sqrt{Hz}$, çalışma sıcaklığı -20/+70 C, frekans aralığı 1-600 Hz ve boyutları 205*107*107 mm olarak sıralanmaktadır. Her ivmeölçerin kendi veri depolama birimi bulunmakta ve bu ivmeölçerler ayrı çalışmaktadır. Dinamik tanımlama için gereken senkronizasyon bir GPS (global konumlandırma sistemi) anteni tarafından sağlanmaktadır. Brincker kriterlerine göre yeterince uzun olan 20 dakika boyunca saniyede 200 veri ile ortam ivmeleri kaydedilmiştir. Burada özel bir yazılım programı olan ARTeMİS kullanılarak, tepkinin Time History ve Fourier genlik spektrumları çizilmiştir.

4.2.2 Deneysel Sonuçlar

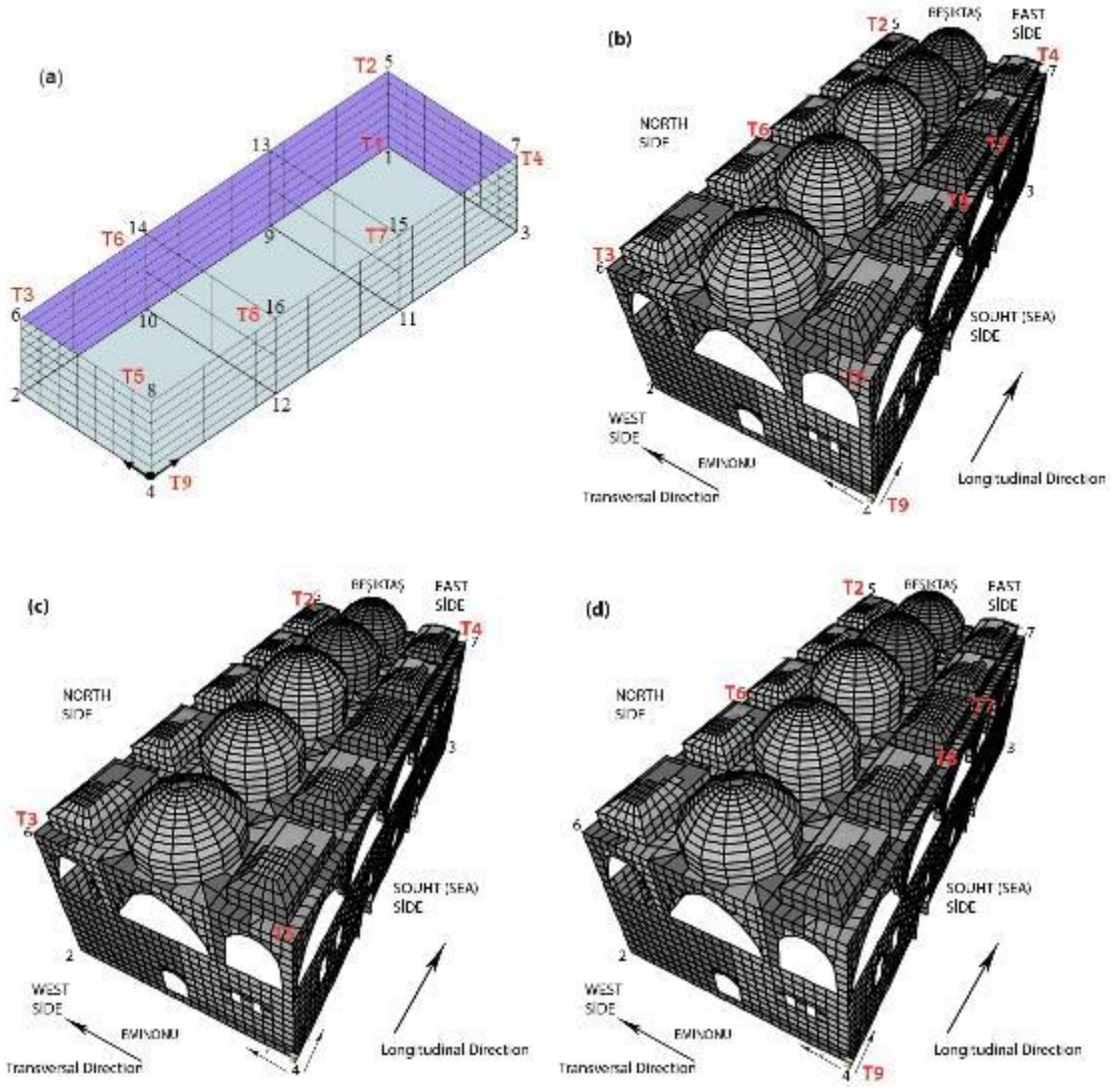
Tophâne-i Âmire'nin (büyük top döküm binası) dinamik özelliklerinin belirlenmesi için yapının seçilen 16 noktası içinde biri referans noktası olmak üzere

toplamda 9 noktada ortam titreşim ölçümleri yapılmıştır. Bu noktalardan 7 tanesi binanın çatısında, 2 tanesinde binanın zemininde bulunmaktadır. (Şekil 38 a, Şekil 38 b)

Referans noktası olarak binanın çatısının kuzey-doğu köşesi T2 (nokta 5) seçilmiştir. Ortam titreşim testi için beş adet ivmeölçer kullanılmış ve bu ölçümler iki set halinde gerçekleştirilmiştir. 31.07.2019 tarihinde yapılan AVT ölçümlerinden; birinci ölçüm saat 12:20 – 13:10 arası, ikinci ölçümde hemen akabinde saat 13:15 – 13:45 arası gerçekleştirilmiştir. Birinci ölçümde; bu beş adet ivmeölçerlerden dört tanesi binanın çatısına çıkartılarak, çatının dört köşesi olan T2 (nokta 5), T3 (nokta 6), T4 (nokta 7) ve T5 (nokta 8)'e ve diğer bir tanesi ise referans noktası olan T2 (nokta 5)'nin hemen alt seviyesi olan, binanın dış cephesinin kuzey-doğu köşesi zemin seviyesine T1 (nokta 1)'e yerleştirildi (Şekil 38c). İkinci ölçümde; binanın çatısında bulunan dört adet ivmeölçerden, referans noktası olarak seçilen ve binanın çatısının kuzey-doğu köşesi olan T2 (nokta 5)'deki ivmeölçer yerinde sabit tutulmuş, diğer üç ivmeölçer ise yerlerinden kaydırılarak binanın çatısının orta noktalarına konumlandırılmıştır. Binanın çatı noktası köşeleri olan T3 (nokta 6), T4 (nokta 7) ve T5 (nokta 8)'te bulunan bu üç ivmeölçer, binanın çatısının orta noktalarına doğru kaydırılarak T6 (nokta 14), T7 (nokta 15) ve T8 (nokta 16) noktalarına yerleştirilmiştir. Bu noktalardan T3 (nokta 6)'te bulunan ivmeölçer T6 (nokta 14)'ya, T4 (nokta 7)'te bulunan ivmeölçer T7 (nokta 15)'ye, T5 (nokta8)'te bulunan ivmeölçer ise T8 (nokta 16)'e kaydırılmıştır. Ayrıca ikinci ölçümde; referans noktası olan T2 (nokta 5)'deki ivmeölçerin hemen alt seviyesinde, binanın dış cephesinin kuzey-doğu köşesi zemininde bulunan T1 (nokta1)'deki ivmeölçer T4 (nokta 9)'e kaydırılırmıştır. T4 (nokta 9) binanın dış cephesinin güney-batı köşesi zemininde bulunmaktadır (Şekil 38 d).

AVT ölçümleri 31.07.2019 tarihinde yapılmış olup; ölçüm yapıldığı gün hava sıcaklığına dikkat edilmiş ve hava sıcaklığı 30^0 olarak ölçülmüştür. Bu ölçüm yapıda kullanılan ve çalışma sıcaklığı -20/+70 ^{0}C olan ivmeölçerler için çok uygun bir sıcaklık olmuştur. Ölçüm noktaları tarafından oluşturulan geometri, yapı üzerindeki ilgili yerleri ve modların açıklanması için kullanılan terminoloji ve bu çalışmadaki işlemler Şekil 38'da gösterilmektedir. Dinamik ayarlama testi binanın çatısında, Şekil 40'de de görülen Şekil 38'daki nokta 5'de (T2) gerçekleştirilmiştir. Bu testten sonra, enine doğrultuda (TD) ve boyuna doğrultuda (LD) titreşimleri ölçmek için referans noktası 5'te (T2) bir adet

ivmeölçer yerleştirilirken, çatıda bulunan yedi noktaya ve zeminde bulunan 2 noktaya ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Şekil 39 ve Şekil 40 , ivmeölçerlerin sırasıyla T9 ve T2 üzerindeki konumunu göstermektedir. Şekil 41, Şekil 42, Şekil 43 ve Şekil 44 ise Tophâne-i Âmirenin deneysel çalışmasında, ölçüm noktalarındaki resimleri göstermektedir.



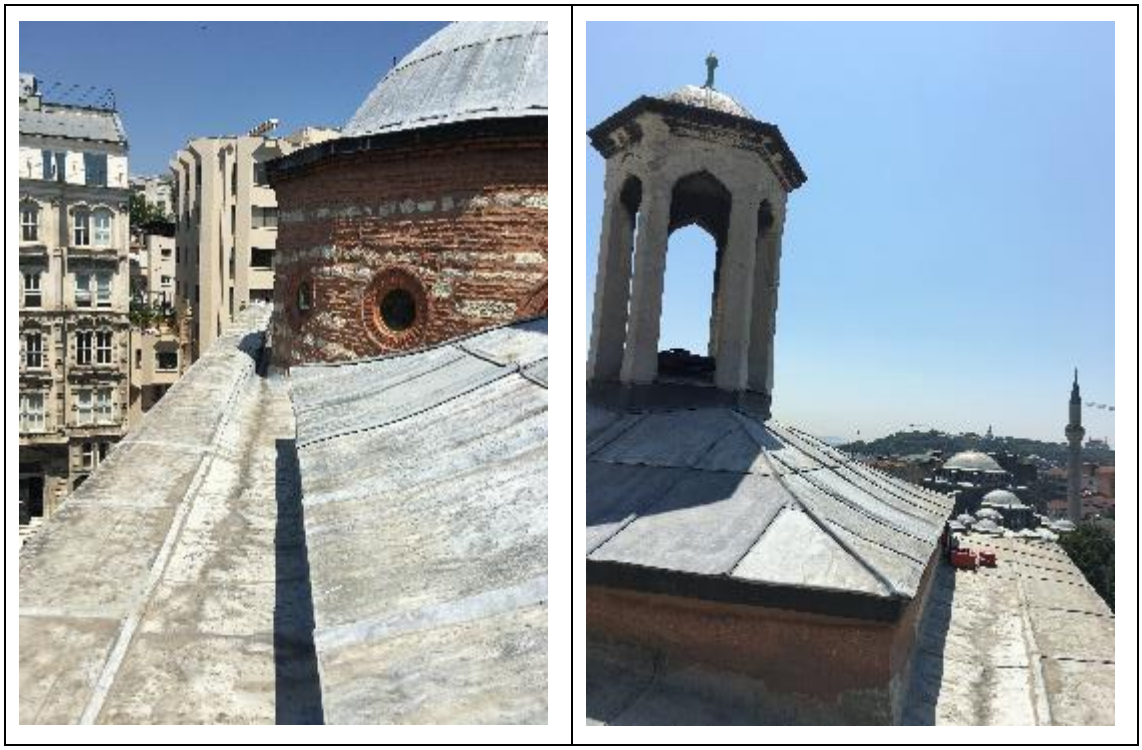
Şekil 38 Tophâne-i Âmire'de deneysel çalışma için ölçüm noktalarının atılması (a), (b) tüm noktalar, (c) birinci ölçüm, (d) ikinci ölçüm. (T2 referans noktasının) (T1 ve T9 yerdeki ölçümler).



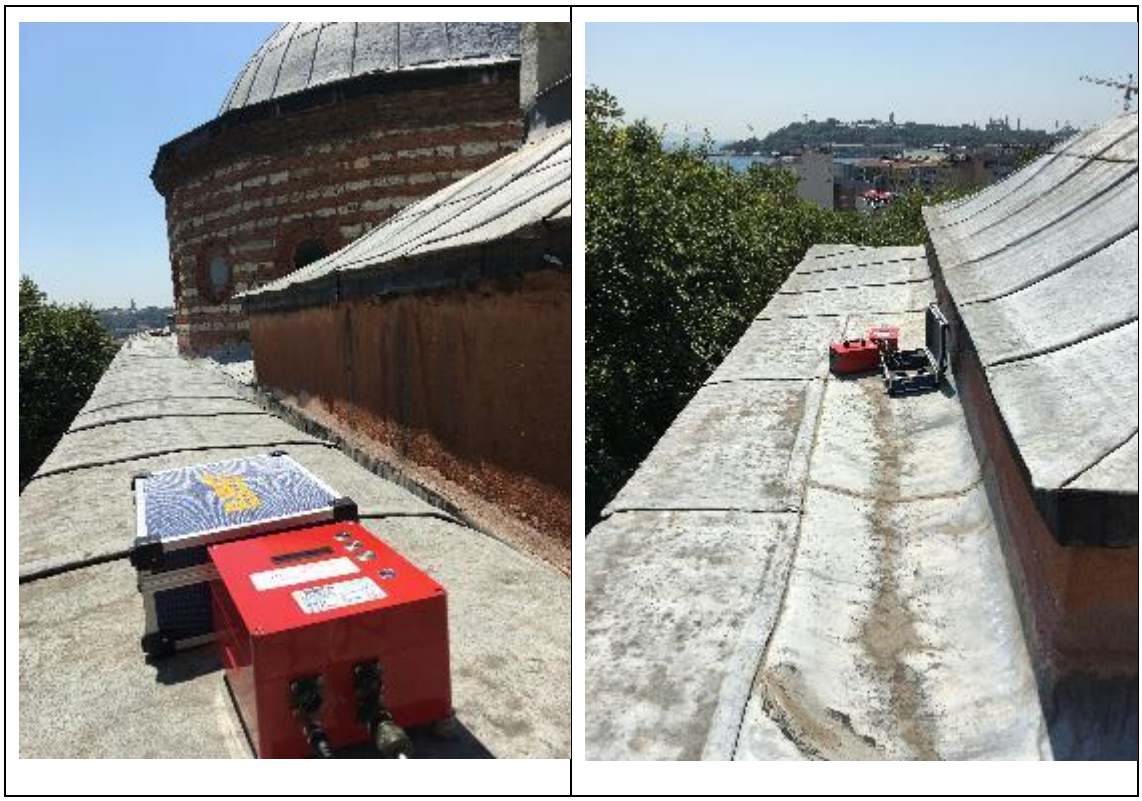
Şekil 39 (a), (b) Dinamik ayarlama testi için nokta 4'e (T9) konulan ivmeölçer (Tophâne-i Âmire)



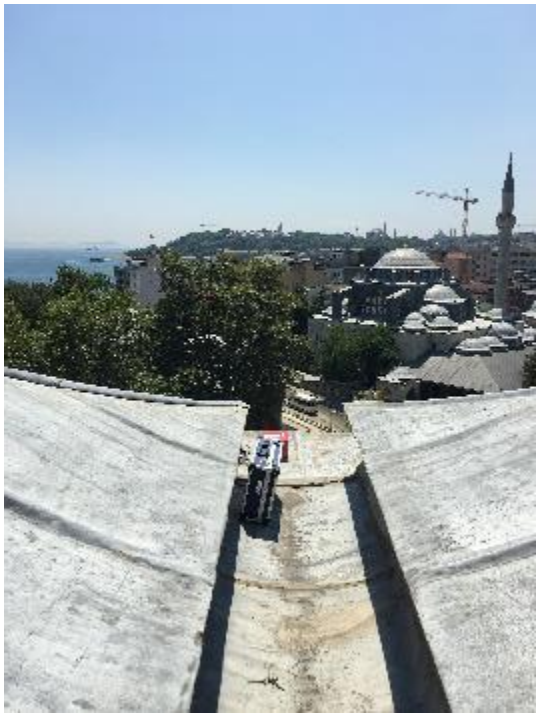
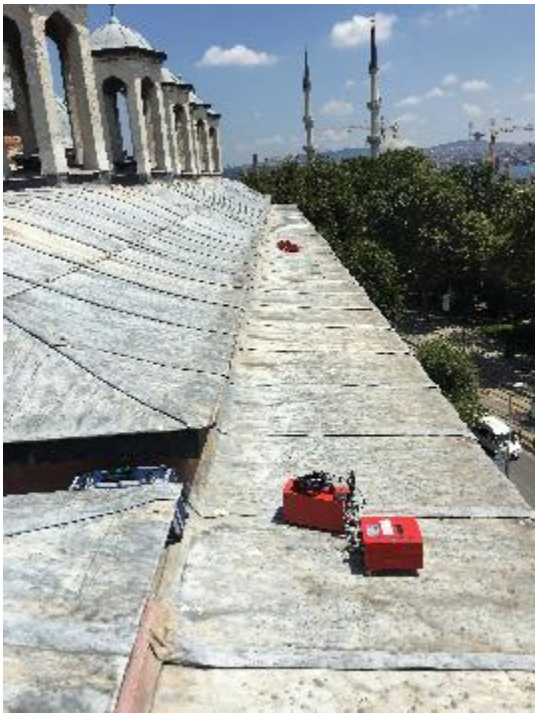
Şekil 40 Dinamik ayarlama testi için nokta 5'e (T2) konulan referans ivmeölçer (Tophâne-i Âmire)



Şekil 41 Tophâne-i Âmirenin deneysel çalışmasında, ölçüm noktalarından resimler (güney ve kuzey batı tarafı) (T3, T5)



Şekil 42 Tophâne-i Âmirenin deneysel çalışmasında, ölçüm noktalarından resimler (kuzey ve güney doğu tarafı) (T2, T4)

Şekil 43 Tophâne-i Âmirenin deneysel çalışmasında, ölçüm noktalarından resimler (binanın ortası güney tarafı) (T7, T8)



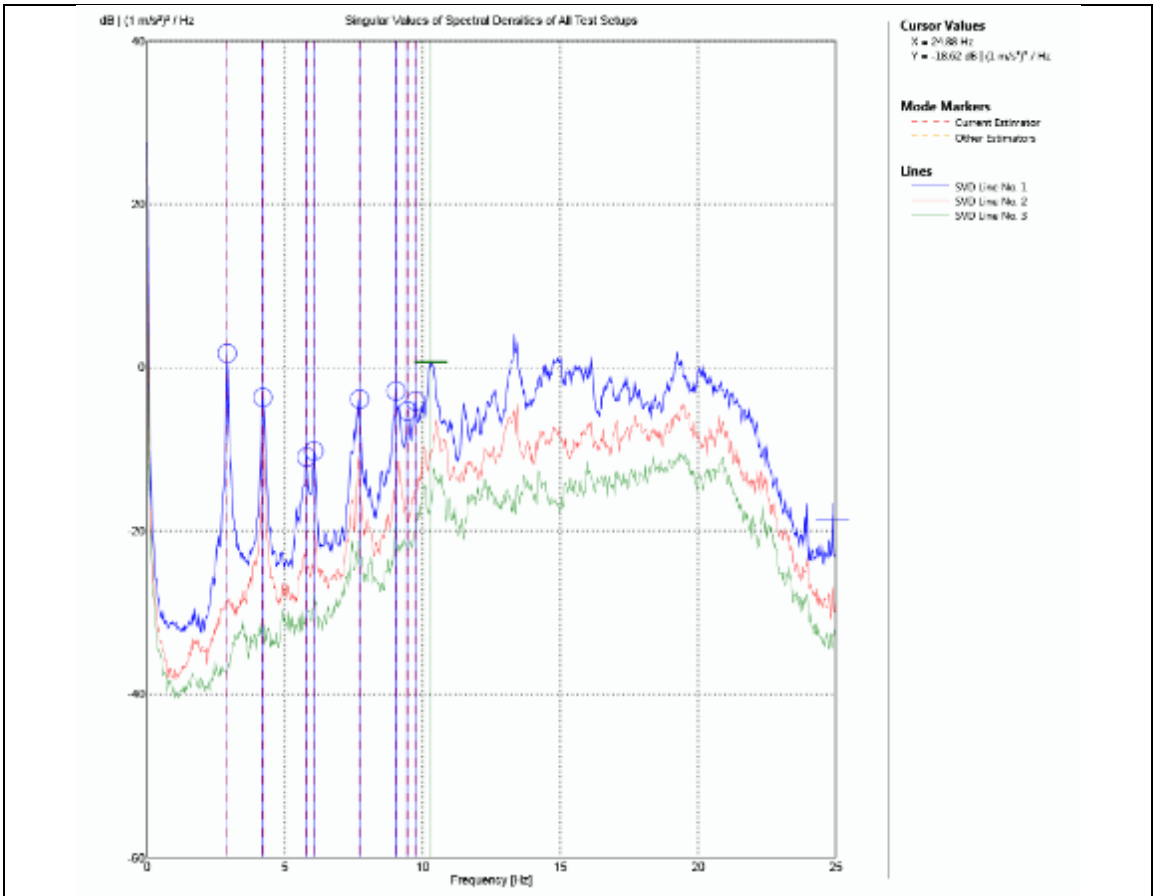
Şekil 44 Tophâne-i Âmirenin deneysel çalışmasında, ölçüm noktalarından resimler (binanın kuzey doğu ve binanın orta kuzey tarafı) (T2, T6)

Veri toplama ünitesi tarafından toplanan sinyaller, Time History ve Fourier genlik spektrumlarını elde etmek için işlenmiştir. T1 referans noktasında enine ve boyuna titreşimler için elde edilen Fourier genlik spektrumları Şekil 45'te gösterilmektedir. Tablo 4'te ise baskın frekanslar verilmiştir.

Yön	*Dominant frekanslar(Hz)*					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Enine	2.905		6.055	7.715	8.984	10.352
Boyuna		4.199				

Tablo 4 Tophâne-i Âmirenin deneysel çalışmada referans noktasındaki baskın frekanslar

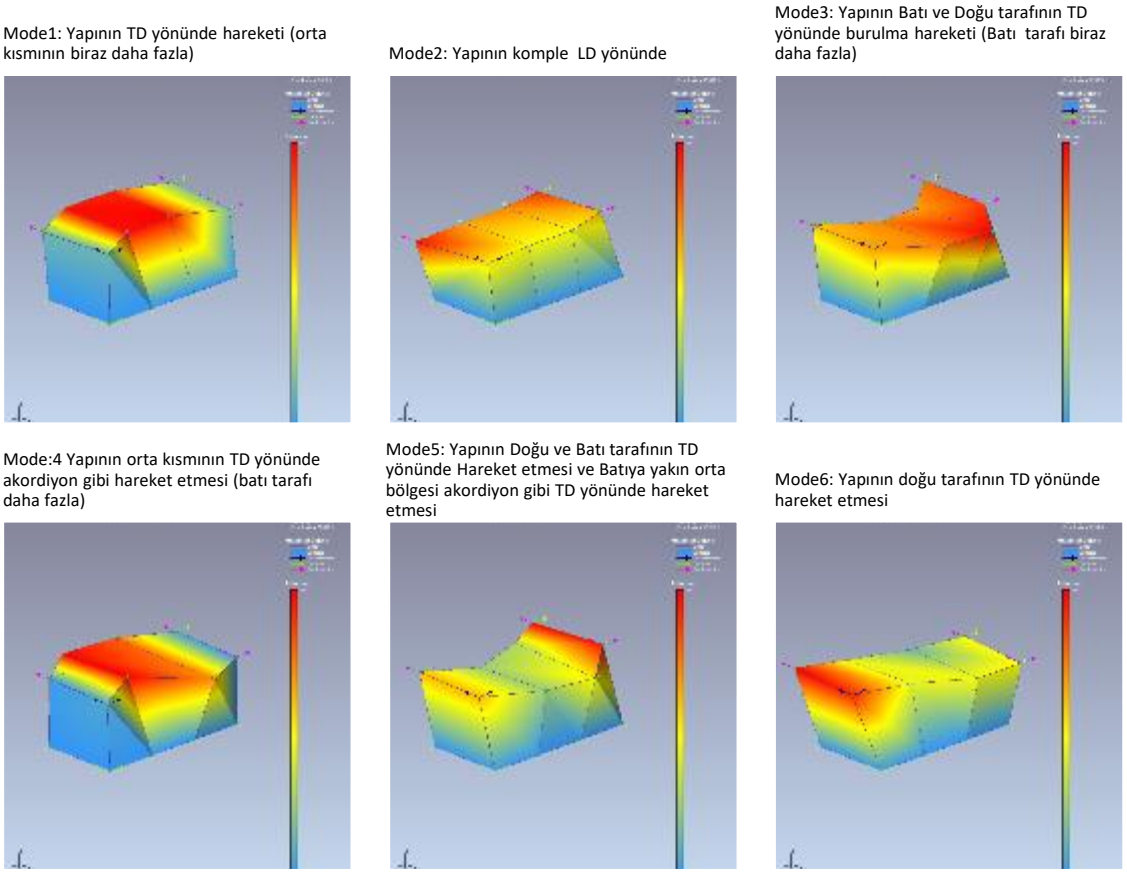
Tüm ölçüm noktalarında kaydedilen titreşimlerin sonradan işlenip analizinin yapılması için ARTeMIS yazılımı tercih edilmiştir. Bu yazılım Stokastik Altuzay Tanımlaması (SSI) yerine, Tepe Toplama tekniği (Peak Picking PP) , Frekans Alanı ayrışması(FDD) ile Geliştirilmiş Frekans Alanında Ayrışma yöntemin (EFDD) dayanmakta olup, elde edilen verilerin iyi grafik sunumunu sağlamaktadır. Şekil 45'te rezonans frekanslarının ve sönümleme katsayılarının değerleri ile analizle elde edilen sonuçlarını gösterirken, Şekil 46'te ise mod şekillerini göstermektedir.



Mode	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6
Frekans (HZ)	2.905	4.199	6.055	7.715	8.984	10.352
Sönüm Oranı (ξ) (%)	0.755	0.452	2.86	0	0.471	0.742

Şekil 45 ARTeMIS yazılımıyla gerçekleştirilen baskın frekansların pik seçimi (Peak-picking), Geliştirilmiş Frekans Alanında Ayrışma yöntemi (EFDD) ve Tophâne-i Âmirenin modal özellikleri.

Deneysel verilerle elde edilen sonuçlarda sönüm oranları %0-2.86 arasında bulunmuştur. Burada ölçüm yapıldığı tarih ve saate hava sıcaklığı 30 ^{0}C olduğu, hava durumunun sıcak, güneşli ve rüzgârız olduğundan sönüm oranları çok düşük çıkmaktadır. Rüzgâr, deprem vb. gibi uyarıcıların artmasıyla sönüm oranları da artmaktadır.



Şekil 46 Tophâne-i Âmirenin ARTeMIS yazılım programı ile elde edilen mod şekilleri

Yapılan deneysel analiz sonucunda, her iki dikey yön için ilk doğal frekanslar iyi bir şekilde ayrılmıştır. Enine titreşim 2.905 Hz ve boyna titreşim 4.199 Hz. Olarak elde edilmiştir. Elde edilen mod şekilleri, yapının karmaşık titreşime sahip olduğunu göstermektedir. Her ne kadar yapı simetrik olsa da; yapıdaki kot farklılıkları, yapının farklı duvar kalınlıkları, yapıda kullanılan malzemelerin homojen olmayan karakteristik özellikleri gibi nedenler yapının karmaşık titreşime sahip olmasını açıklamaktadır.

4.3 Sayısal Yöntemle Dinamik Tanımlama

4.3.1 Tophâne-i Âmire'nin Sayısal Modeli

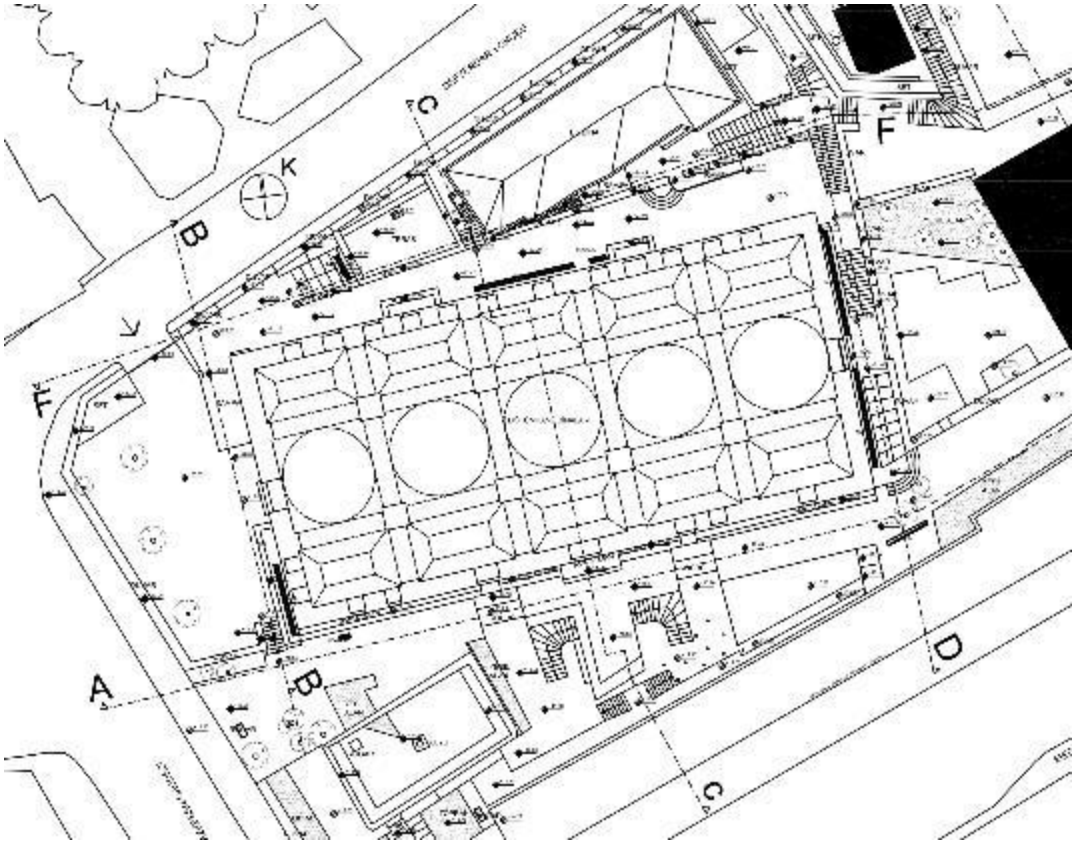
Tophâne-i Âmirenin, yapısal taşıyıcı sistemini ve belirlenmiş malzeme özelliklerini yansıtan üç boyutlu bir sonlu eleman modeli Sap 2000 [3] paket programında hazırlanmıştır. Yığma duvarlar, tonozlar, pandantifler ve kubbeler kabuk elemanları ile kolon elemanları ise çerçeve elemanlar olarak modellenmiştir. Tophâne-i Âmire'nin

simetrik geometrisi ve büyük boyutu, yapı malzemesinin homojen anizotropik bir malzeme olarak kabul edilmesi ve yapı geometrisinin devamlı elemanlarla tanımlanmasından dolayı sayısal modelde makro modelleme kullanılmıştır. Deneysel çalışma ile elde edilen verilerin değerlendirilmesiyle yapının tabanında sabit bir desteğin olduğu varsayılmıştır.

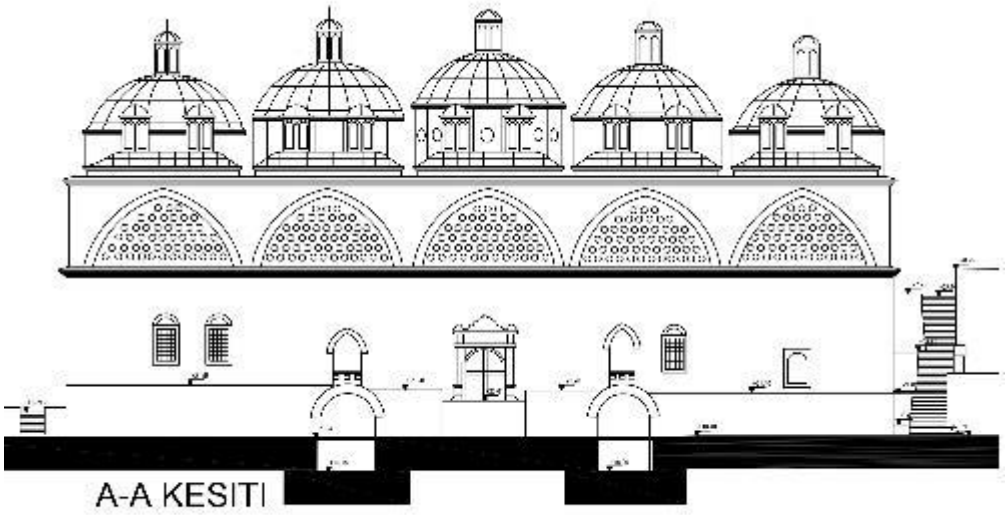
Deneysel çalışmadan elde edilen mod şekilleri ile literatür araştırmaları göz önünde bulundurularak yapının sayısal modellemesi yapılmıştır. Binanın önceden yapılan röleve çalışması (Şekil 48, Şekil 49, Şekil 50, Şekil 51) ile yerinde yapılan incelemede binanın tretuvar çevresinde kot farklılıklarının olduğu görülmektedir. Ancak Şekil 23, Şekil 31 ve Şekil 47'te anlaşılacağı üzere Tophanei Amirenin taban oturumu eğimli olmamakla birlik düz olduğu ve sonradan dolgu yapıldığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla sayısal model buna göre oluşturulmuştur.



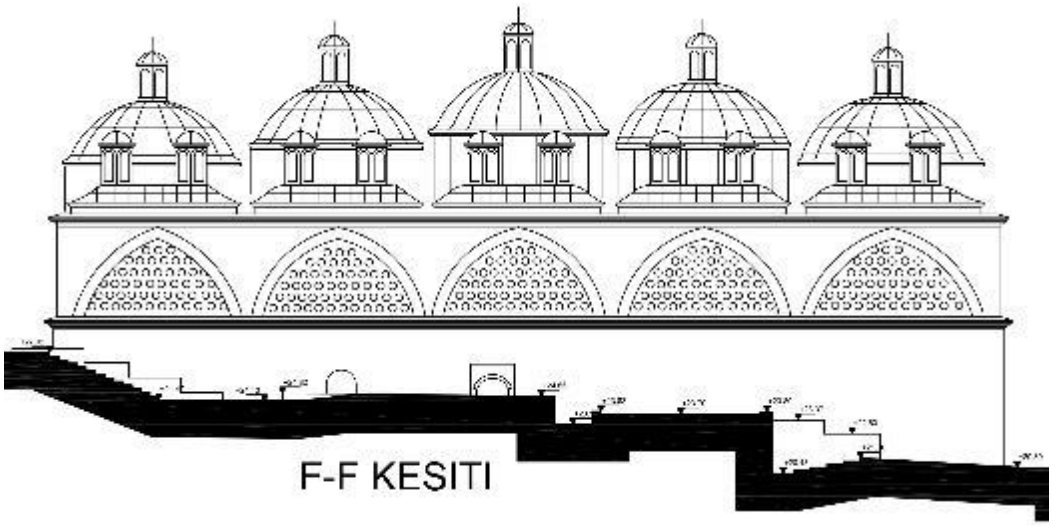
Şekil 47 Tophanei amire görünümünü (Kağıt üzerine oyma). Cosimo Comidas de Carbognano'dan sonra Marco Sebastiano Giampiccoli tarafından, Carbognano'dan, Descrizione topografica dello stato presente, Costantinopoli arriccchita di figure (Bassano, 1794). [100]



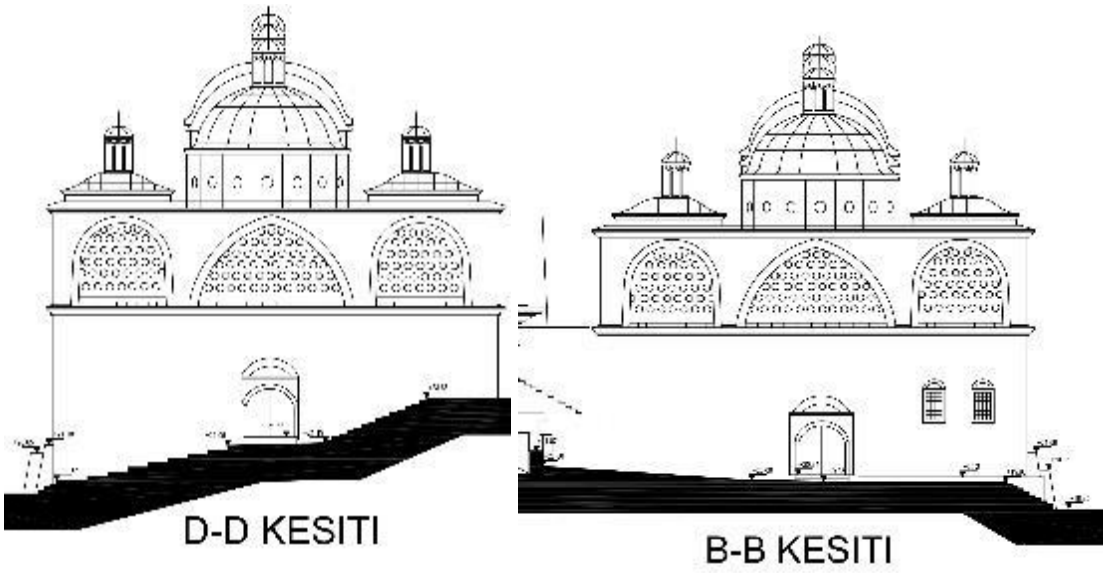
Şekil 48 Tophâne-i Âmire Vaziyet Planı (Mono Mimarlık, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Arşivi)



Şekil 49 Tophâne-i Âmire güney cephe görüntüsü (Mono Mimarlık, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Arşivi)



Şekil 50 Tophâne-i Âmire kuzey cephe görüntüsü (Mono Mimarlık, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Arşivi)

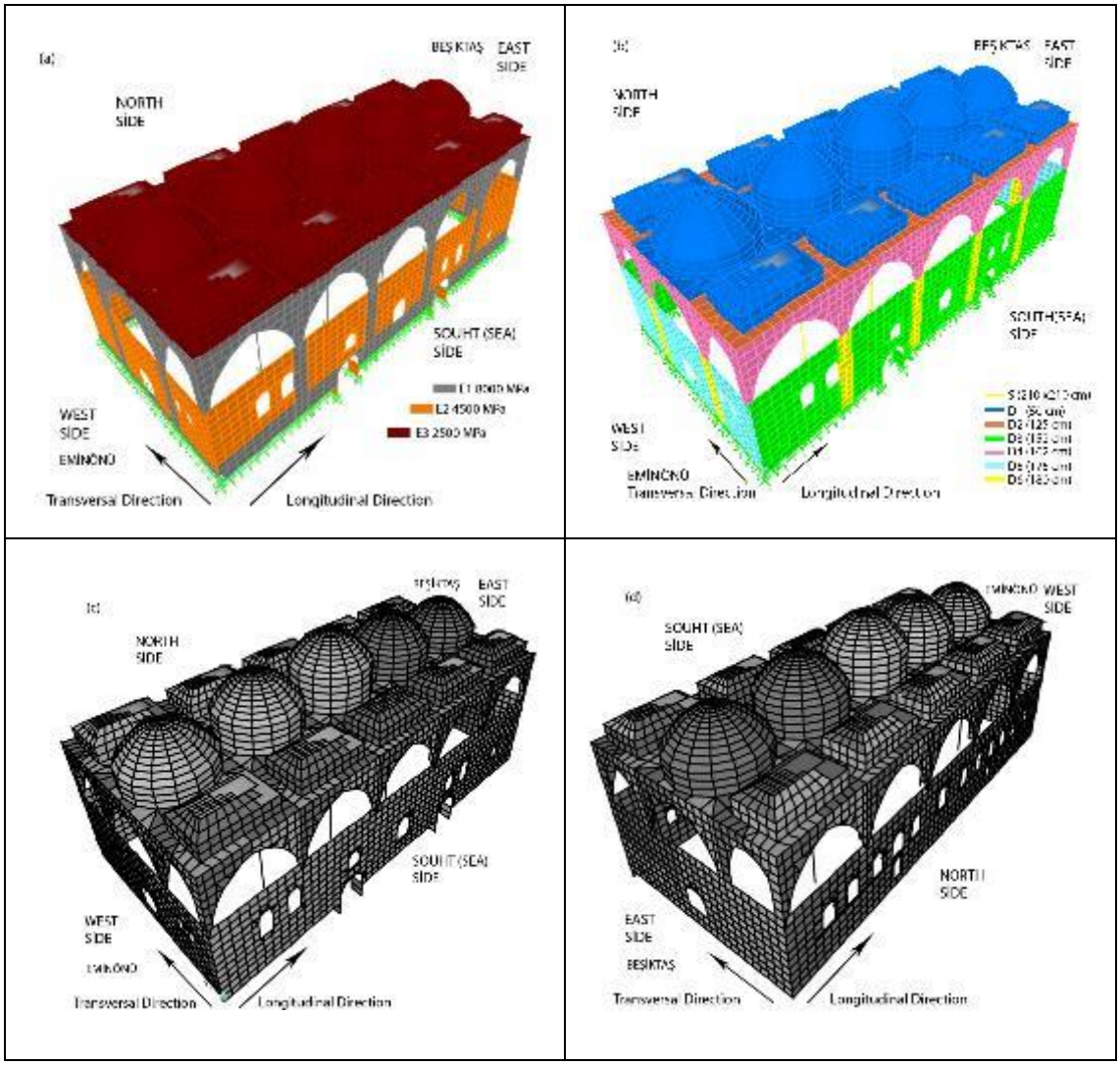


Şekil 51 (a) Tophâne-i Âmire doğu cephe görüntüsü (d-d kesiti) , (b) Tophâne-i Âmire batı cephe görüntüsü (b-b) kesiti) (Mono Mimarlık, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Arşivi)

Tophâne-i Âmirenin 3D sayısal modeli literatür araştırması ve yerinde yapılan incelemeler ile ölçümler neticesinde SAP 2000 [3] paket programında sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturuldu. Burada; ilk etapta oluşturulan sayısal model ile deneysel çalışmalar arasındaki mod şekilleri ve frekansların birbirleriyle uyumlu olduğu

görülmüştür. Sayısal model oluşturulduktan sonra, çerçeve elemanların kabuk elemanlara oturduğu yerde, çerçeve elemanlarının boşta kalan uçlarının aşağıya olan deplasmanları engellenmesi için 4 adet sonsuz rijit ve ağırlıksız, kütlesiz eleman tanıtılmıştır. Binanın taşıyıcı duvarları, tonozları, kubbeleri ve pandantifleri ile taşıyıcı duvar içinde kalan kolonları kabuk eleman olarak farklı kalınlıklarda tanımlanmış, binanın taşıyıcı kolonları ise çerçeve elemanlar olarak modellenmiştir (Şekil 52b). Taşıyıcı duvarlar; güney cephede zemin seviyesinden pencere alt seviyesine kadar küfeki taşı olarak modellenmiş, diğer cephelerde ise temel seviyesinde birer sıra küfeki taşı olarak modellenmiştir. Binanın taşıyıcı duvarları temelde küfeki taşı tanımlandıktan sonra, temel seviyesinden kemer alt seviyesine kadar karma (tuğla+ küfeki taşı) olarak modellenmiştir. Kemer seviyesinden çatı seviyesine kadar olan taşıyıcı duvarlar küfeki taşı olarak tanımlanmıştır. Binanın örtü katmanları ise tuğla malzeme olarak tanımlanmıştır. Son olarak binanın taşıyıcı kolonları küfeki taşı olarak tanımlanmıştır. Küfeki taşı ile tuğladan oluşan karma duvar, bir sıra tuğla ile bir sıra küfeki taşı olacak şekilde örülmüştür (Şekil 52a).

İlk oluşturulan 3D sayısal modelde; küfeki taşının (elastisite modülü, E1 = 8000 MPa, birim ağırlık, c = 21 kN / m^3, poisson oranı, v =0,2) , küfeki taşı ile tuğlanın oluşturduğu karma yapının (elastisite modülü, E2= 4500 MPa, birim ağırlık, c = 19,5 kN / m^3, poisson oranı, v =0,2) ve tuğlanın (elastisite modülü, E3 = 2500 MPa, birim ağırlık, c = 18 kN / m^3, poisson oranı, v =0,2) olarak alınmıştır. Sayısal model toplam 7105 düğüm, 40 çerçeve ve 6920 kabuk elemanı ile oluşturulmuştur. Sayısal modelin yapısı Şekil 52'de gösterilmektedir. Sayısal model oluşturulduktan sonra çatı kaplama ağırlığı 10kg/m^2, kar yükü 75 kg/m^2 ve hareketli yük 150 kg/m^2 olarak tanımlanmıştır. Yapının toplam ağırlığı ise 119.872,50 KN olarak bulunmuştur. Yapı içerisinde kemerlerin oturduğu kolon başlarında gergi olarak tertip edilmiş metal elemanlar, bağlantı detaylarının ve malzeme özelliklerinin belirlenememesi nedeniyle modele eklenmemiştir.



Şekil 52 Tophâne-i Âmire Sayısal modeli; (a) malzeme özellikleri, (b) malzeme boyutları, (c) sayısal modelin güney batı görünşü (d) sayısal modelin kuzey doğu görünüşü

Tophâne-i Âmirenin dinamik analizi için Eigen-vektör analizi yapılmış ve ilk etapta 12 mod hesaba katılmış ve toplam kütle katılım oranı uzun doğrultuda (X-LD) % 72.70, kısa doğrultuda (Y-TD) ise %76.44 çıkmıştır. Doksan mod için toplam kütle katılım oranı uzun doğrultuda (X-LD) % 87.02, kısa doğrultuda (Y-TD) ise %85.72 bulunmuştur. Birçok modun düşük kütle katılımına sahip olmasından dolayı, % 90 kütle katılım oranını yakalamak için iki yüz mod hesaba katılmış ve toplam kütle katılım oranı her iki doğrultuda (TD, LD) %90'a yakın bulunmuştur. Tablo 5 sayısal model analizin dinamik verilerini özetlemektedir. Oluşturulan sayısal modelin ilk on iki modun frekansları ise sırasıyla 2.638 Hz, 3.978 Hz, 4.259 Hz, 6.319 Hz, 6.618 Hz, 8.356 Hz, 8.497 Hz, 8.945 Hz, 9.651 Hz, 9.970, 9.997 ve 10.347 Hz olarak elde edilmiştir. Burada

birinci, ikinci ve dördüncü modların kütle katılım oranları %5'in üzerindedir. Birinci modun kütle katılım oranı Y-TD yönünde % 68.30 ve ikinci modun kütle katılım oranı X-LD yönünde %72.50 gibi yüksek değerlerdedir.

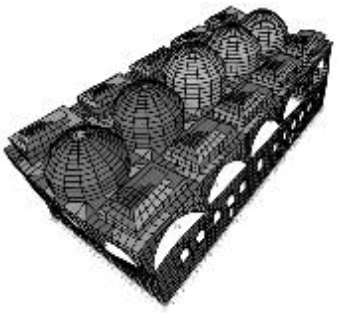
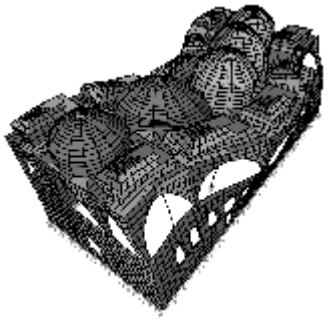
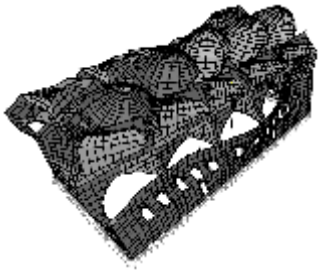
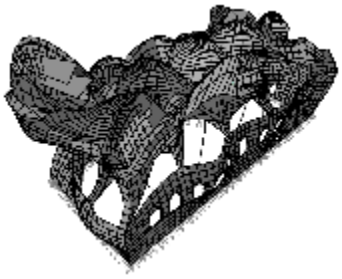
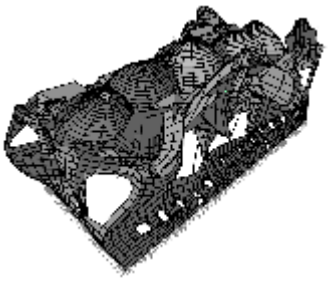
Tablo 5 ile Şekil 53'de gösterilen yapının dinamik özellikleri ve mod şekilleri, yapısal davranışın önemli özelliklerini ortaya çıkarmıştır. Yapıda toplanan düşük kütle katılımları nedeniyle, toplanmış kütle davranışı gözlenmemiştir. Yapının birinci, ikinci, dördüncü, sekizinci, on birinci, on üçüncü, on beşinci, yirmi dokuzuncu, seksen sekizinci, doksanıncı ve doksan sekizinci modlarında kütle katılım oranları %1'in üzerinde gerçekleşmiştir. Bunlardan birinci, ikinci, dördüncü seksen sekizinci modlar en önemlileri olarak göze çarpmaktadır.

Mod	Periyod (s)	Kütle Katılım Oranı Uzun Doğrultuda (X-LD)	Kütle Katılım Oranı Kısa Doğrultuda (Y-TD)	Toplam Kütle Katılım Oranı Uzun Doğrultuda (X-LD)	Toplam Kütle Katılım Oranı Kısa Doğrultuda (Y-TD)
1	0.379	0.000	0.683	0.000	0.683
2	0.251	0.725	0.000	0.725	0.683
3	0.235	0.000	0.000	0.725	0.683
4	0.158	0.000	0.055	0.725	0.738
5	0.151	0.000	0.000	0.726	0.738
6	0.120	0.000	0.000	0.726	0.739
7	0.118	0.000	0.000	0.726	0.739
8	0.112	0.000	0.011	0.726	0.750
9	0.104	0.001	0.000	0.726	0.750
10	0.100	0.001	0.000	0.727	0.750
11	0.100	0.000	0.014	0.727	0.764
12	0.097	0.000	0.000	0.727	0.764
13	0.097	0.000	0.013	0.727	0.777
14	0.094	0.004	0.000	0.731	0.777
15	0.093	0.000	0.014	0.731	0.791
-	-	-	-	-	-
29	0.077	0.022	0.000	0.762	0.802
-	-	-	-	-	-
88	0.043	0.031	0.000	0.849	0.857
89	0.043	0.001	0.000	0.849	0.857
90	0.043	0.021	0.000	0.870	0.857
91	0.042	0.009	0.000	0.879	0.857
92	0.042	0.001	0.000	0.880	0.857
93	0.042	0.000	0.006	0.880	0.864
94	0.041	0.000	0.000	0.880	0.864
95	0.041	0.000	0.001	0.880	0.865

96	0.041	0.000	0.000	0.880	0.865
97	0.041	0.001	0.000	0.882	0.865
98	0.041	0.000	0.011	0.882	0.876
-	-	-	-	-	-
199	0.028	0.000	0.000	0.901	0.916
200	0.028	0.000	0.000	0.901	0.916

Tablo 5 Sayısal Modelin Dinamik Özellikleri

Elde edilen önemli modlardan; sekizinci, on birinci, on üçüncü ve on beşinci modlar Y-TD yönünde hareket etmekte olup kütle katılım oranları %1'in üzerinde gerçekleşmektedir. Diğer önemli modlar Şekil 53'de gösterilmektedir.

<table>
<tr>
<td>
Mod 1(KKO=0.683, TD yönünde hareket, T=0.379 Sn)</td>
<td>
Mod 2(KKO=0.725, LD yönünde hareket, T=0.251 Sn)</td>
<td>
Mod 4 (KKO=0.055, TD yönünde burulma hareketi, T=0.158 Sn)</td>
</tr>
<tr>
<td>
Mod 29 (KKO=0.019, LD yönünde hareket ve burulma, T=0.077 Sn)</td>
<td>
Mod 88 (KKO=0.043, TD, LD ve yerçekimi yönünde hareket, T=0.045 Sn)</td>
<td>
Mod 90 (KKO=0.021, LD LD yönünde hareket ve burulma, T=0.043 Sn)</td>
</tr>
</table>

Şekil 53 Sayısal Modelde elde edilen önemli mod şekilleri ve dinamik parametreler

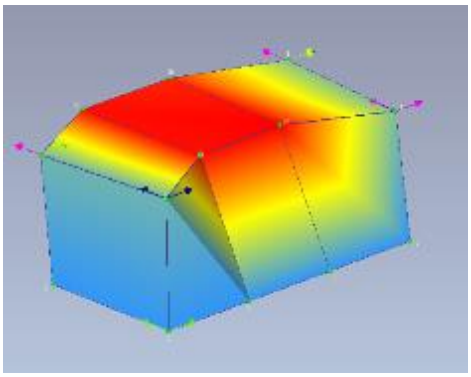
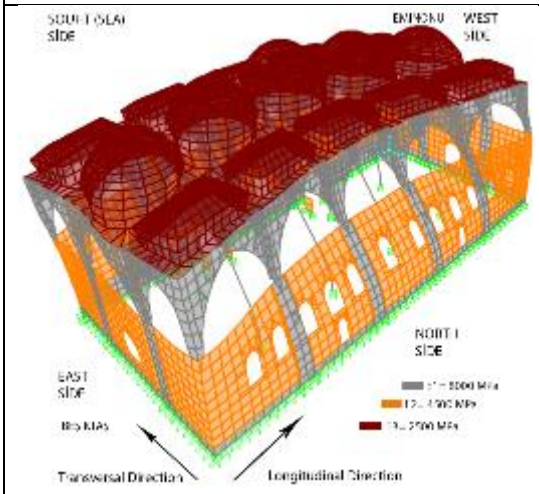
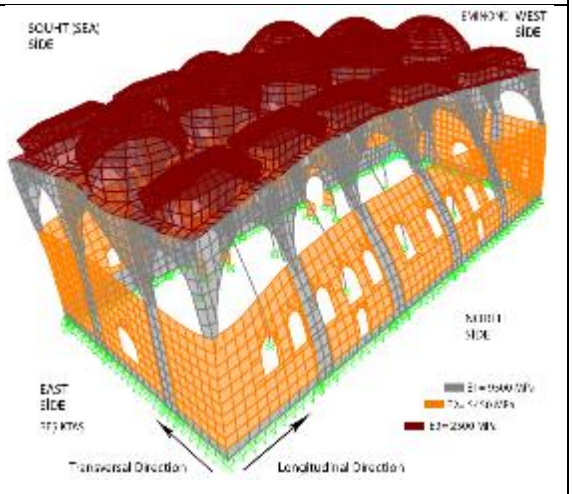
4.3.1 Tophâne-i Âmire'nin Sayısal Modelinin Ayarlanması

Yapıların modal parametrelerin ortaya çıkarılması için birçok tanımlama yöntemi bulunmaktadır. Literatürde betonarme ve çelik yapılar ile ilgili birçok uygulama bulunmaktadır. Ancak, yığma yapılar hakkında çalışmalar yapılmış olsa da bu yapılar ile ilgili çok fazla bilgi bulunmamaktadır. Bu tez konusu çalışmada; yapıda deneysel verilerle elde edilen dinamik özellikler ile yapının 3D sayısal modeli ile elde edilen dinamik özellikler arasındaki farklar incelenerek, bu farkların en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Fuat Aras ve diğ. [2], çalışmalarında Beylerbeyi Sarayı'nın sayısal modelini, karşılaştırma-değiştir-kontrol tabanlı yinelemeli çözümlerle güncellemişlerdir.

Tophâne-i Âmirenin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi için kullanılan bu yöntemle, deneysel veriler ile sayısal sonuçlardan elde edilen veriler arasında yapının mod şekilleri ve frekansları karşılaştırılarak, buna göre güncelleme kriteri olan elastisite modülü ayarlanmıştır. İstanbul'da bulunan yapılarda sıklıkla kullanılan küfeki taşı ile tuğlanın elastisite modülü, literatür taraması yapılarak elde edilmiştir. Tophâne-i Âmirede kullanılan metal gergi çubukları hesaba katılmadığından, 3D sayısal model sınırlı sayıda farklılıklar gösterebilmektedir. İlk oluşturulan sayısal model'in modları ile OMA ile elde edilen modlar arasında iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir. Güncelleme prosedürü, elastisite modülünün adım adım ayarlanmasıyla deneysel ve sayısal mod şekilleri karşılaştırılarak, aralarındaki bağlantı gösterilmiş ve açıklanması yapılmıştır. Nihai güncelleme adımından sonra güncellenmiş sayısal modelden elde edilen dinamik parametreler literatüre kazandırılacaktır.

Deneysel çalışma ile elde edilen birinci mod ile sayısal modelden çıkarılan birinci mod Şekil 54'de görüldüğü gibi benzer tipte hareket etmektedir. Ayrıca deneysel çalışma ile elde edilen birinci modun doğal frekansı ile sayısal modelden çıkarılan birinci modun doğal frekansı birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Hem mod şekillerinin hem de frekansların birbirine benzer ve yakın olması, sayısal modelin ne kadar iyi oluşturulduğunu ve yapıyı ne kadar iyi temsil ettiğini göstermektedir. Her ne kadar deneysel ve sayısal sonuçlar birbirine çok yakın olsa da aradaki küçük fark model ayarlama ile daha da azalacaktır.

Denklem (3.64) ile Denklem (3.65) kullanılarak bir ‘’C’’ katsayısı elde edilecektir. Deneysel çalışma ile elde edilen birinci modun periyodu T^1=0.344, sayısal modelin birinci modun periyodu ise T^2=0.379’dir. Birinci mod Y-TD yönünde hareket ettiğinden dolayı E1 ve E2 katsayıları güncellenecektir. Buradan $C = \left(\frac{T^2}{T^1}\right)^2 = \left(\frac{0.379}{0.344}\right)^2 = 1.21$ olarak bulunmuştur. Bu *C* katsayısı ile elastisite modülleri çarpıldığında; E1=8000 MPa*1.21 = 9680 MPa, E2=4500 MPa*1.21 = 5445 MPa olarak elde edilmştir. Buradan E1=9500 MPa, E2=5450 MPa olarak ele alınmıştır. Ayrıca OMA ile SM’in birinci ve ikinci modlarında kubbe örtüsü bir bütün olarak hareket ettiğinden E3=2500 MPa olarak kalmıştır. Deneysel yöntem ile 1. modun doğal frekansı 2.93 Hz, 2. modun doğal frekansı ise 4.199 Hz olarak elde edilmişti (Tablo 4).

<table>
<tr>
<td>
OMA Mod 1: T=0.344</td>
<td>Ayarlama katsayısı $C = \left(\frac{T^2}{T^1}\right)^2 = \left(\frac{0.379}{0.344}\right)^2 = 1.21$
Güncellenen Elastisite Moduülleri
E1=9500 MPa
E2=5450 MPa
E3=2500 MPa</td>
</tr>
<tr>
<td>
SM Mod1: T=0.379</td>
<td>
Ayarlama sonrası GSM Mod1: T=0.352</td>
</tr>
</table>

Şekil 54 Ayarlama aşaması (Deneysel yöntemin 1. Modun sonuçları ile sayısal modelin güncelleme öncesi ve sonrası 1. Modun sonuçları)

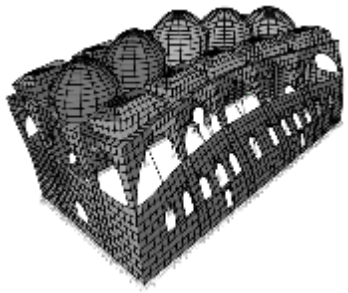
Yapılan bu düzenleme ile sayısal modelin 1. modun frekansı 2.839 Hz olarak, 2. modun frekansı 4.297 Hz olarak bulunmuştur. Deneysel ve sayısal modelin ilk iki modun frekansları ve mod şekilleri birbirine çok yakın ve benzer çıktığı, bu sonuçlar ile deneysel ve sayısal veriler arasında çok iyi bir uyum olduğu görülmüştür. İlk on iki modun frekansları ise sırasıyla 2.839 Hz, 4.297 Hz, 4.538 Hz, 6.693 Hz, 7.068 Hz, 8.838 Hz, 9.072 Hz, 9.679 Hz, 10.286 Hz, 10.701, 10.809 ve 10.938 Hz olarak elde edilmiştir. Burada birinci, ikinci, dördüncü, sekizinci, on bir ve on ikinci modların kütle katılım oranları %1'in üzerindedir. Birinci modun kütle katılım oranı TD yönünde % 67.7 ve ikinci modun kütle katılım oranı LD yönünde %71.9 gibi yüksek değerlerdedir. Ayrıca dördüncü modun kütle katılım oranı ise TD yönünde %5.70 olarak elde edilmiştir. Bu ilk iki modun frekans ve mod şekilleri deneysel ve sayısal model arasında uyumlu çıktığından dolayı ayarlama işlemi burada sonlandırılmıştır. Frekanslar ve mod şekilleri göz önünde bulundurulduğunda; sayısal modelin birinci, ikinci ve dördüncü modu deneysel verilerin sırasıyla ilk üç moduna karşılık gelmektedir. Binanın kemer kısımlarına ivmeölçerler yerleştirilemediğinden bazı modlarda farklılıklar görülebilmektedir. Güncellenmiş sayısal model ile elde edilen dinamik özellikler incelendiğinde birinci, ikinci, dördüncü, sekizinci, on birinci, on ikinci, on beşinci, yirmi sekizinci, doksan ikinci ve doksan yedinci modların kütle katılım oranları %1'in üzerinde çıkmıştır.

Mod	Periyod (s)	Kütle Katılım Oranı Uzun Doğrultuda (X-LD)	Kütle Katılım Oranı Uzun Doğrultuda (Y-TD)	Toplam Kütle Katılım Oranı Uzun Doğrultuda (X-LD)	Toplam Kütle Katılım Oranı Uzun Doğrultuda (Y-TD)
1	0.352	0.000	0.677	0.000	0.677
2	0.233	0.719	0.000	0.719	0.677
3	0.220	0.000	0.000	0.719	0.677
4	0.149	0.000	0.057	0.719	0.734
5	0.141	0.000	0.000	0.720	0.734
6	0.113	0.000	0.000	0.720	0.734
7	0.110	0.000	0.000	0.720	0.734
8	0.103	0.000	0.011	0.720	0.745
9	0.097	0.001	0.000	0.721	0.745
10	0.093	0.000	0.000	0.721	0.745
11	0.093	0.000	0.011	0.721	0.756
12	0.091	0.000	0.012	0.721	0.768

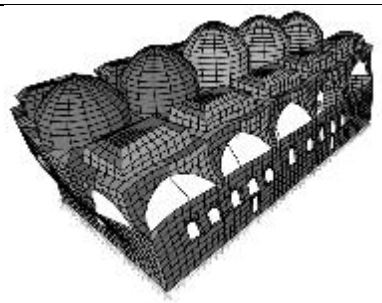
13	0.090	0.000	0.002	0.721	0.770
14	0.087	0.003	0.000	0.724	0.770
15	0.087	0.000	0.021	0.724	0.791
-	-	-	-	-	-
28	0.073	0.026	0.000	0.761	0.798
	--	-	-	-	-
92	0.040	0.038	0.000	0.840	0.850
93	0.040	0.002	0.000	0.842	0.850
94	0.039	0.000	0.003	0.842	0.853
95	0.039	0.000	0.000	0.843	0.853
96	0.039	0.000	0.000	0.843	0.853
97	0.039	0.027	0.000	0.870	0.853
-	-	-	-	-	-
199	0.027	0.001	0.000	0.898	0.915
200	0.027	0.001	0.000	0.899	0.915

Tablo 6 Güncellenmiş sayısal modelin dinamik parametreleri

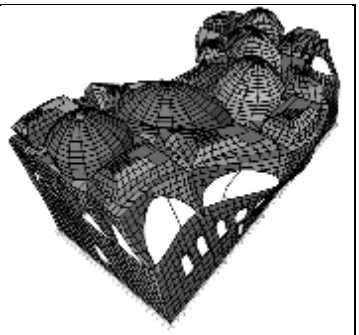
Tophâne-i Âmirenin 3D sayısal modeli oluşturulurken üç farklı malzeme tanımlanmıştır. Bunlardan küfeki taşının elastisite modülü E1, karma duvarcılığın (tuğla + küfeki) elastisite modülü E2 ve tuğlanın elastisite modülü E3 olarak tanımlanmıştı. Model güncelleme ile E1 = 9500 MPa, E2 = 5450 MPa ve E3 = 2500 MPa olarak elde edilmiş ve güncellenmiş sayısal modelin dinamik parametreleri Tablo 6'da özetlenmiş ve ayrıca Şekil 55 ile Şekil 56'te sunulmuştur.



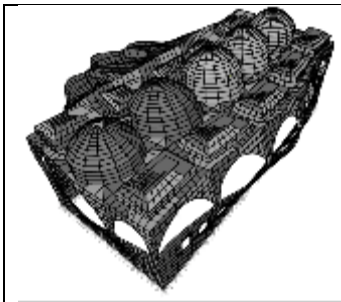
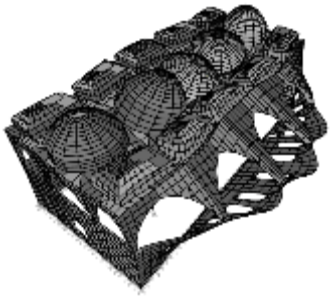
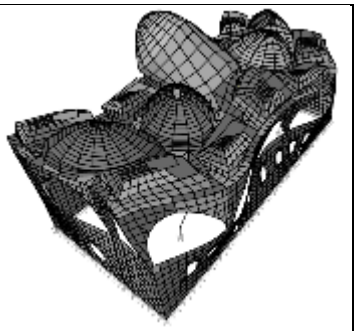
Mod 1: Yapının orta kısmının TD yönünde hareketi



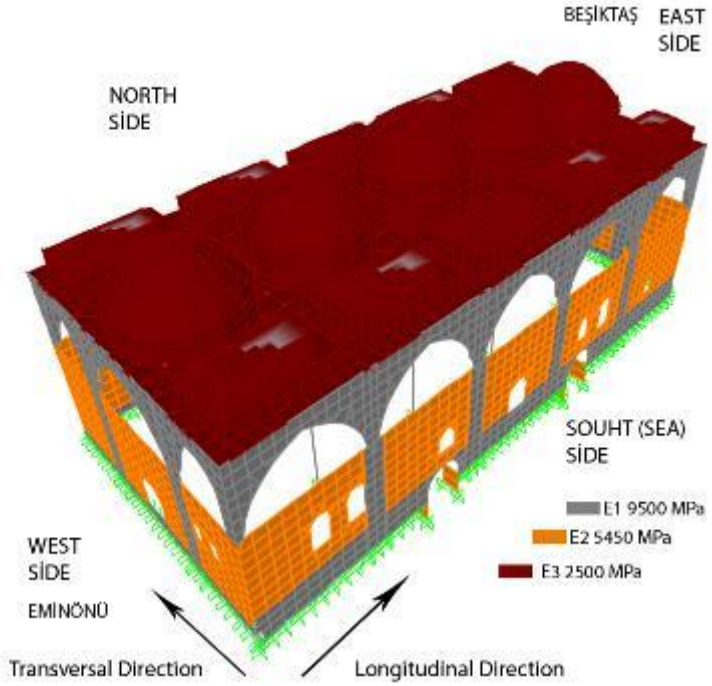
Mod 2: Yapının LD yönünde hareket etmesi



Mod 4 Yapının TD yönünde burulma hareketi (Bat tarafı biraz daha fazla)

 Mod 8 Yapının orta kısmının (kemer-duvar) TD yönünde akordeon gibi genişleyip daralması (batı tarafı daha fazla)	 Mod 11 Yapının orta bölgesinin (kemer-duvar) genişleyip daralarak TD yönünde hareket etmesi, kubbelerin yerçekimi yönünde hareket etmesi	 Mod 12:Yapının TD yönünde burulma hareketi, kubbe örtüsünün ise yerçekimi yönünde hareket etmesi

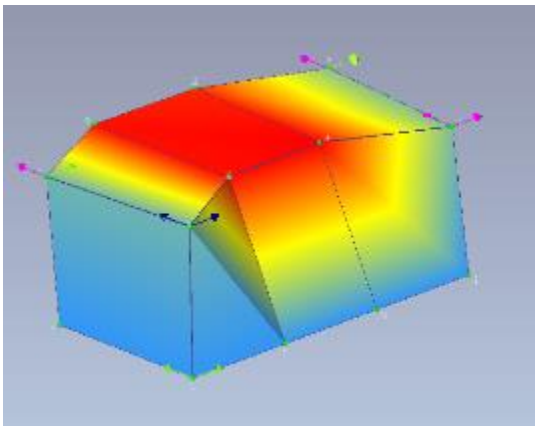
Şekil 55 Güncellenmiş sayısal modelin (GSM) dinamik parametreleri



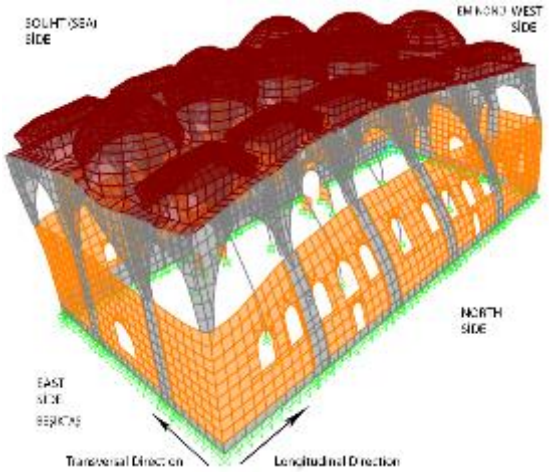
Şekil 56 Güncellenmiş sayısal modelin (GSM) elastisite modülleri

Güncellenmiş sayısal modelin mod şekilleri ve ilgili OMA mod şekilleri (Şekil 55-Şekil 46) arasındaki güncelleme prosedürü ile ilgili; Deneysel çalışmanın bir modu, güncellenmiş sayısal modelin bir veya birden fazla ardışık modu tarafından oluşturulabilmesi ve deneysel çalışmada yapının tüm noktalarına ivmeölçerlerin konulamaması gibi zorluklar bulunmaktadır. Bu nedenle bazı modlar birbirine tam uyum sağlayamamakla beraber, deneysel çalışmada bazı modlar elde edilememektedir.

Bu çalışmada deneysel ve sayısal yöntem ile elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Güncellenmiş sayısal modelin birinci modunun deneysel yöntemin birinci moduyla benzer, frekans ile periyotların birbiriyle çok yakın olduğu olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 57).



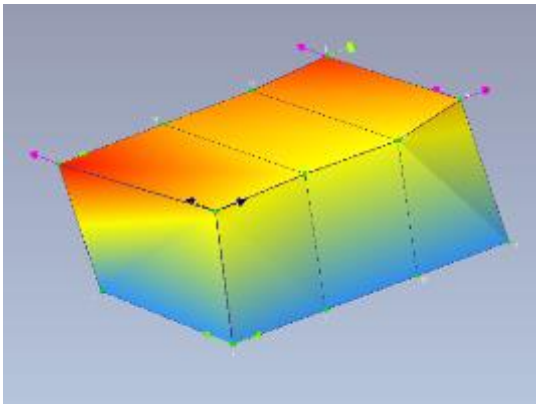
Mode1: Yapının TD yönünde Hareketi (orta kısmının biraz daha fazla) (*T*=0.344)



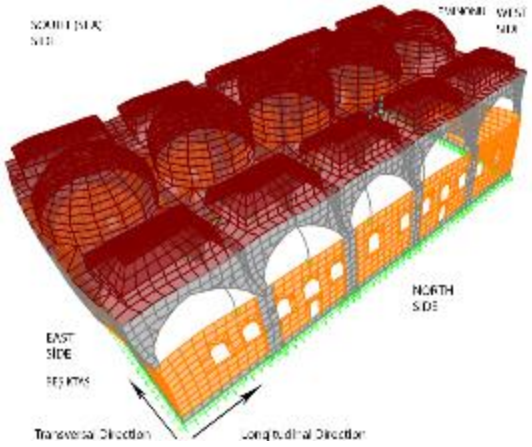
Mode 1: Yapının TD yönünde Hareketi (orta kısmının biraz daha fazla) (*T*=0.352)

Şekil 57 Tophâne-i Âmire, OMA mode1 ile GSM mode 1

Güncellenmiş sayısal modelin ikinci modunun deneysel yöntemin ikinci moduyla benzer ve frekans ile periyotların birbiriyle çok yakın olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 58).



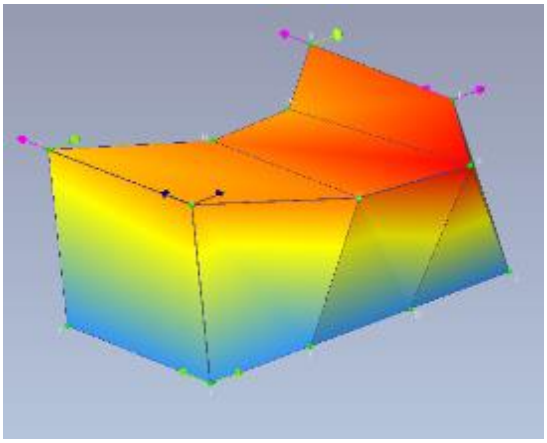
Mode2: Yapının LD yönünde hareketi (*T*=0.238)



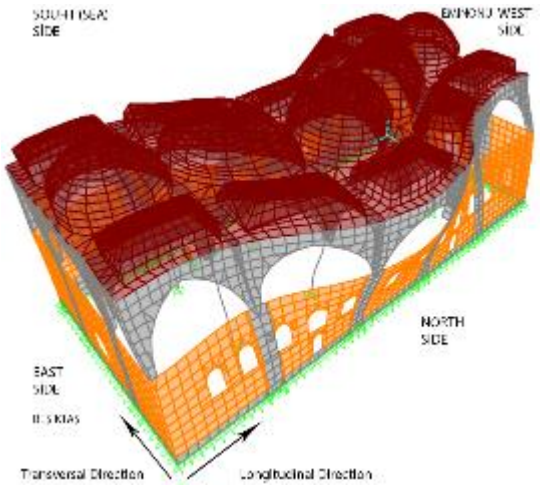
Mode2: Yapının LD yönünde hareketi (*T*=0.233)

Şekil 58 Tophâne-i Âmire, OMA Mode2 ile GSM mode2

Güncellenmiş sayısal modelin dördüncü modu ile deneysel yöntemin üçüncü modu benzer ve frekans ile periyotların birbiriyle yakın olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 59).



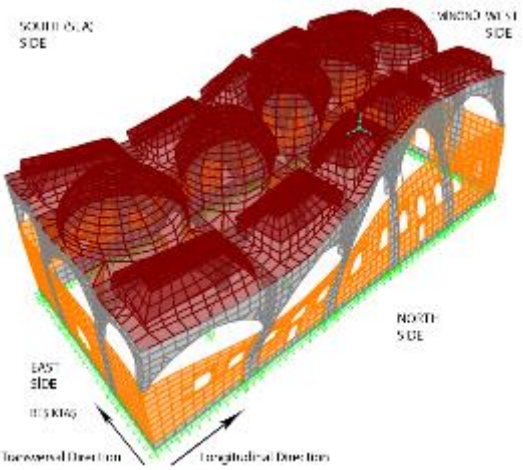
Mod3: Yapının doğu ve batı tarafının TD yönünde burulma hareketi (T=0.165)



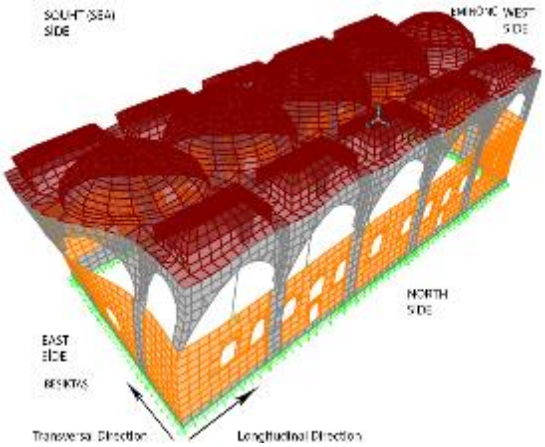
Mod4: Yapının doğu ve batı tarafının TD yönünde burulma hareketi (T=0.149)

Şekil 59 Tophâne-i Âmire, OMA mod 3 ile GSM mod 4

Güncellenmiş sayısal modelin üçüncü ve beşinci modları yerel bir mod olup OMA sonuçlarıyla gözlemlenememiştir (Şekil 60). Sayısal yöntemle elde edilen birinci, ikinci ve dördüncü modların kütle katılım oranları %5'in üzerinde olduğu ve bu modların deneysel yöntemle elde edilen birinci, ikinci ve üçüncü modlarla uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Yapının tüm noktalarına yeterli sayıda ivmeölçerler konulamadığından, deneysel yöntemle elde edilen dördüncü, beşinci ve altıncı modlar ile sayısal yöntemle elde edilen diğer yüz doksan yedinci modlar arasında karşılaştırma yapılmamıştır.



Mode:3 Yapının doğu ve batı trafının TD yönünde dalgalı hareket etmesi. (T=0.220)



Mode:5 Yapının kuzey ve güney taraflarının dalgalı LD yönünde hareket etmesi. (T=0.141)

Şekil 60 Tophâne-i Âmire, GSM mode 3 ve mode 5

Yapılan sayısal model güncelleme OMA sonuçlarına yakın olup; sayısal modelin yapıyı daha iyi temsil edebilmesi için daha birçok farklı yöntem bulunmakla birlikte yapının dinamik özelliklerini belirleyen birçok parametre bulunmaktadır. OMA mod şekilleri 16 nokta ile karakterize edilmiş, diğer taraftan yapının sayısal modeli ise 6836 düğüm noktasıyla modellenmiştir. Sınırlı sayıda yapılan ortam titreşim test ölçümleri sayısal modelin ayrıntılı ayarlanmasını engellemektedir. Bu durumda sayısal modelin ayrıntılı güncellenmesi tercih edilmemektedir. Nihayetinde yapılan bu model güncelleme prosedürü yeterli görülmektedir. Tablo 7'de güncellenmiş sayısal modelin mod frekansları ile deneysel yöntem ile elde edilen doğal frekanslar arasındaki farklar gösterilmektedir.

Mod	(OMA) Frekanslar (Hz)	Mod	SM			GSM		
			Frekans (Hz)	Δf (%)	Mac (%)	Frekans (Hz)	Δf (%)	Mac (%)
1	2.905	1	2.639	9.15	97.49	2.839	2.27	98.02
2	4.199	2	3,986	5.07	92.77	4.297	-2.33	92.64
3	6.055	4	6.327	-4.49	94.64	6.693	-10.53	95.21

Tablo 7 Tophâne-i Âmirenin deneysel (OMA) veriler ile ilk sayısal model (SM) ve güncellenmiş sayısal model (GSM) karşılaştırılması

Burada güncellenmiş sayısal modele ait dördüncü modun frekansı ile deneysel yöntemin üçüncü modun doğal frekansları arasındaki fark %10.53 olup, diğer iki modun frakanslar arasındaki fark % 5'un altındadır. %67.70, % 71.90 ve %5.70 ile en yüksek kütle katılım oranlarına sahip sayısal modelin birinci, ikinci ve dördüncü modu ile deneysel yöntemin ilk üç modu arasında çok iyi bir uyum olduğu görülmüştür (Tablo 7 ve Tablo 8).

Deneysel Yöntem			Sayısal Yöntem				
Mod	Periyot (s)	Mod Tanımı	Mod	Periyot (s)	KKO (%)	Δf (%)	Mac (%)
1	0.344	Yapının TD yönünde hareketi (orta kısmının biraz daha fazla)	1	0.352	67.70	2.27	98.02
2	0.238	Yapının LD yönünde hareketi	2	0.233	71.90	-2.33	92.64
3	0.165	Yapının doğu ve batı tarafının TD yönünde burulma hareketi	4	0.149	5.70	-10.53	95.21

Tablo 8 Tophâne-i Âmirenin güncellenmiş sayısal model (GSM) sonrası dinamik özellikleri

MAC istatistiklerdeki korelasyon katsayısına benzer bir katsayı olup; 0 ile 1 arasında değişmektedir. 1 değeri, iki mod şekli vektörünün mükemmel korelasyonunu belirtirken, 0'a yakın bir değer ise, ilişkisiz vektörleri göstermektedir. Genel olarak MAC değerleri 0.80-0.85'den büyük olduğunda, modeller arasında iyi bir eşleme olduğu kabul edilmektedir. Ancak; MAC değeri 0.40'tan düşük olduğu durumlarda modeller arasında kötü bir eşleme olduğu kabul edilmektedir (C. Gentile ve N. Galliano) [33].

Tablo 7'de görüldüğü gibi Tophâne-i Âmirenin hem ilk sayısal modelin (SM) hem de güncellenmiş sayısal modelin (GSM) birinci, ikinci ve dördüncü modunda MAC değerleri 0.9'dan büyük değerler çıkmıştır. OMA'nın birinci modu ile GSM'nin birinci modu arasındaki MAC değeri 0.98, OMA'nın ikinci modu ile GSM'nin ikinci modu arasındaki MAC değeri 0.92 ve OMA'nın üçüncü modu ile GSM'nin dördüncü modu arasındaki MAC değeri 0.95 gibi çok iyi değerler bulunmuştur. OMA verileri ile GSM

arasındaki MAC değerleri ve frekanslar arasındaki farklılıklarla GSM çok iyi oluşturulduğu ve mevcut yapıyı temsil edebileceği değerlendirilmektedir.

4.4 Tophâne-İ Âmire Yapısının Deprem Yükleri Altındaki Davranışı

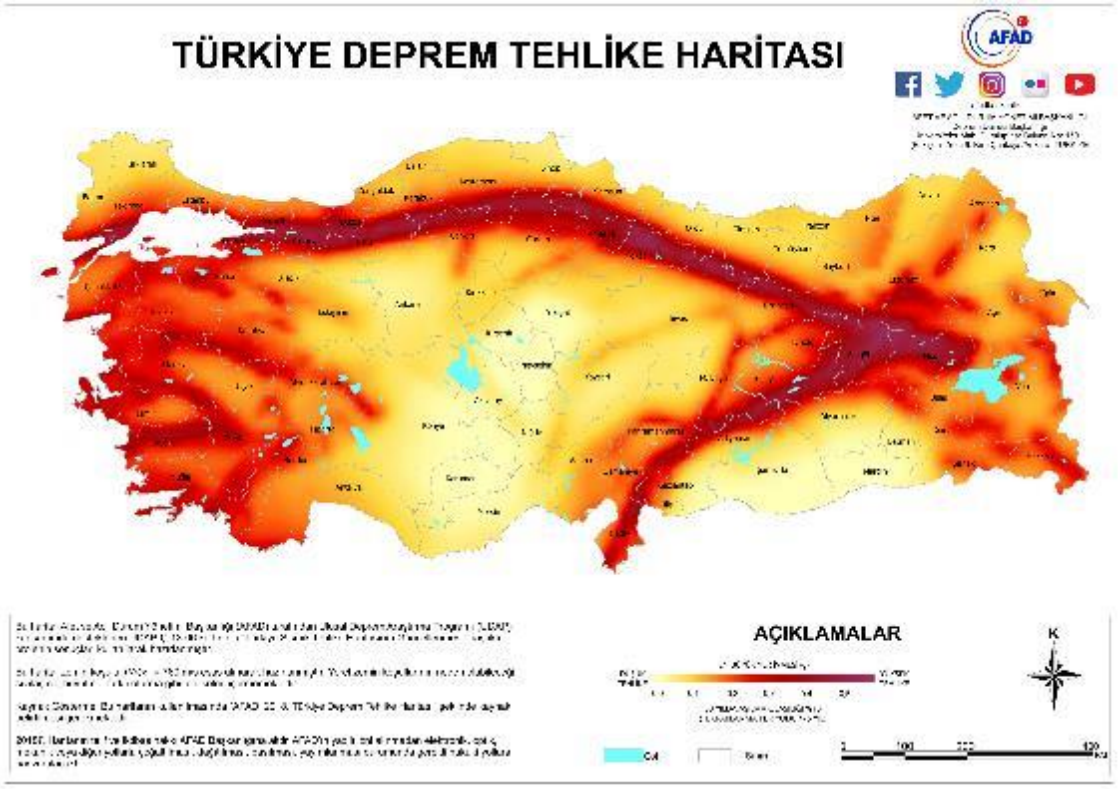
2018 Deprem Yönetmeliğine göre binaya gelecek deprem yükleri hesaplanarak, sap 2000 [3] programı ile spektrum analizi yapılmıştır. Yerel zemin sınıfı daha önce Tophane bölgesinde yapılan zemin etütleri incelenerek ZC (Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar) olarak alınmıştır. Yerinde zemin etüt yapma olanakları olmadığından, daha önce ZT ZEMİN TEKNİK ZEMİN ETÜDÜ MÜHENDİSLİK VE İNŞ. TİC. LTD. ŞTİ.'nin Tophâne-i Âmire'ye çok yakın bir bölgedeki Galata port için yaptırmış olduğu zemin etüt raporları göz önünde bulundurularak zemin sınıfı seçilmiştir [101].

Tez konusu Topâne-i Âmire; tarihi öneme sahip bir yapı olmasından dolayı deprem yer hareketi düzeyi DD-2 (50 yılda aşılma olasılığı% 10 (475 yılda bir tekrarlanma)) yerine DD-1 (50 yılda aşılma olasılığı% 2 (2475 yılda bir tekrarlanma)) olarak alınmıştır. Bina konum olarak, enlem; 41.027533°, boylamı ise; 28.980995° derecededir. 2018 deprem yönetmeliğine göre AFAD sitesinden Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması kullanılarak Tophâne-i Âmireye özel deprem parametreleri elde edilmiştir [102]. Buradan S_s; 1.574, S_1; 0.440, PGA; 0.631, PGV;39.444 olarak elde edilmiştir. Yerel zemin sınıfı ZC ve S_s=1.574 için F_s;1.2, yerel zemin sınıfı ZC ve S_1=0,440 için F_1;1.5 değerleri verilmiştir. Tasarım spektral ivme katsayıları denklem (4.1) ile denklem (4.2)'de aşağıdaki gibidir.

$$S_{DS}=S_S F_S = 1.574 * 1.2 = 1.889 \quad (4.1)$$

$$S_{D1}=S_1 F_1 = 0.440 * 1.5 = 0.660 \quad (4.2)$$

Bu değerler kullanılarak elde edilen yatay elastik tasarım spektrumunda TA=0.070 (s), T_B=0.349 (s) T_L=6 (s) olarak verilmiştir.



Şekil 61 Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması Türkiye Haritası [103]



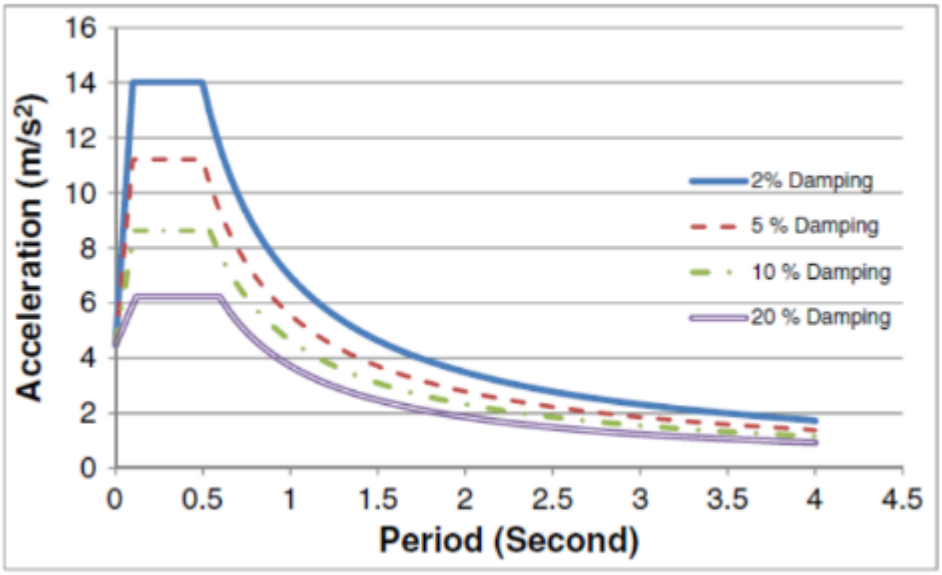
Şekil 62 Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması (a) Marmara Bölgesi (b) İstanbul Ölçeği [103]



Şekil 63 Tophâne-i Âmirenin sismik haritada bulunduğu nokta [102]

Burada AFAD resmi sitesi kullanılarak Tophanâne-i Âmirenin haritada gerçek noktası belirlenmiş ve seçilen zemin sınıfı, deprem yer hareketi düzeyi, yapının konumu (enlem ile boylam) ile sismik veriler elde edilmiştir (Şekil 61, Şekil 62, Şekil 63).

Yapıların deprem güvenliği için sönüm oranı son derece önemlidir. Sönüm oranının az olması, yapılara etki eden deprem yüklerinin fazla olduğu anlamında gelmektedir. Aşağıda elde edilen bu veriler kullanılarak farklı sönüm oranlarındaki spektrum eğrileri elde edilmektedir (Şekil 64) (F. Aras ve G.Altay) [24].



Şekil 64 Farklı sönüm oranları için azami deprem tepki spektrumu (Fuat Aras ve Gülay Altay) [24]

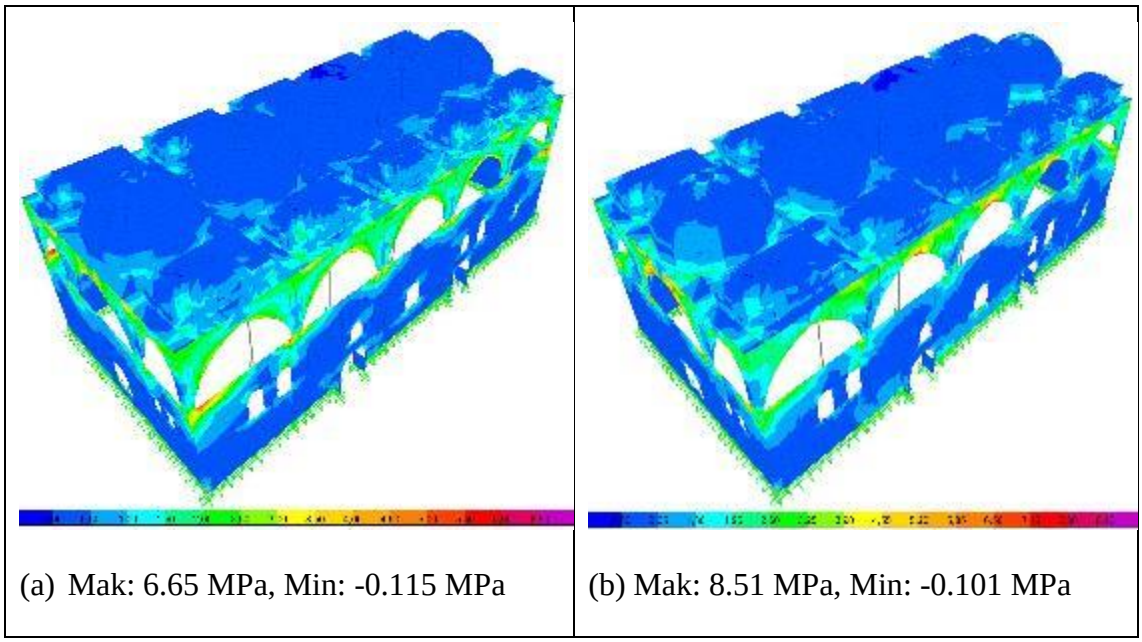
2018 deprem yönetmeliğinde genel modelleme kuralları doğrultusunda sönüm oranı% 5 olarak kabul edilmektedir, farklı durumlarda ise sönüm oranı % 2.5 olarak alınmaktadır. Tophâne-i Âmirede sönüm oranı deneysel verilerde de görüldüğü gibi, normal bir sistemle karşılaştırıldığında yatay yükleri artıracak kadar küçük bir değerdedir. Deneysel çalışma ile elde edilen verilerle, Tophane-i Amirenin ilk altı mod için sönüm oranları % 0.00 ile % 2.86 arasında olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlarda, yapının kütle katılım oranları en yüksek modlar olan birinci ve ikinci modlarında sönüm oranları sırasıyla 0.755 ile 0.452 olarak elde edilmiştir. Ancak deneysel çalışmanın yapıldığı koşullarda sismik aktivitelerin meydana gelmemesi, havanın güneşli ve stabil olması sebebiyle rüzgarın olmaması gibi durumlardan dolayı sönüm oranları çok düşük veya 0.00 çıkmıştır. Sönüm oranlarının düşük olması yapıyı uyaran etmenlerin (rüzgâr, deprem vb.) az olması ile açıklanabilmektedir. Bundan dolayı sismik analiz yapılırken sönüm oranı (ξ) % 5 alınmıştır. Ayrıca yapının tarihi önemi dolayısıyla taşıyıcı sistem davranış katsayısı olan R; 2 olarak alınmıştır.

Tophâne-i Âmirenin sismik analizi, güncellenmiş sayısal model üzerinden yapının her iki yönünde Davranış Spektrum Analizi ile değerlendirilmiştir. Kütle katılım oranlarının %90 üzerinde olması için 200 adet mod kullanılmış, böylelikle toplam kütle katılım oranları LD yönünde %89.90, TD yönünde ise %91.70 olarak gerçekleşmiştir (Tablo 7).

Yapılan analizle en fazla gerilmelerin kemer duvar birleşim bölgelerinde meydana geldiği ve buradaki malzemenin ise küfeki taşı olduğu görülmektedir. Şekil 65; % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında yatay gerilmeleri (S11), Şekil 66; % 5 sönümleme için düşünülen maksimum deprem altında dikey gerilmeleri (S22), Şekil 67; İse; % 5 sönümleme için düşünülen maksimum deprem altında kesme gerilmelerini (S12) göstermektedir.

Yüksek gerilme bölgeleri renklendirme ile açıkça gösterilmektedir. Maksimum gerilemeler dikey gerilmelerde (S22) meydana gelmekte, ancak buradaki gerilmeler küfeki taşının bulunduğu temel seviyesi ile kemer seviyelerinde bulunmaktadır. Ayrıca S11,S12 ve S22 ‘de maksimum gerilmeler kemer ile taşıyıcı duvarların birleştiği bölgede ve kemerlerin üst kısmında, minimum gerilmeler ise kubbede meydana gelmektedir.

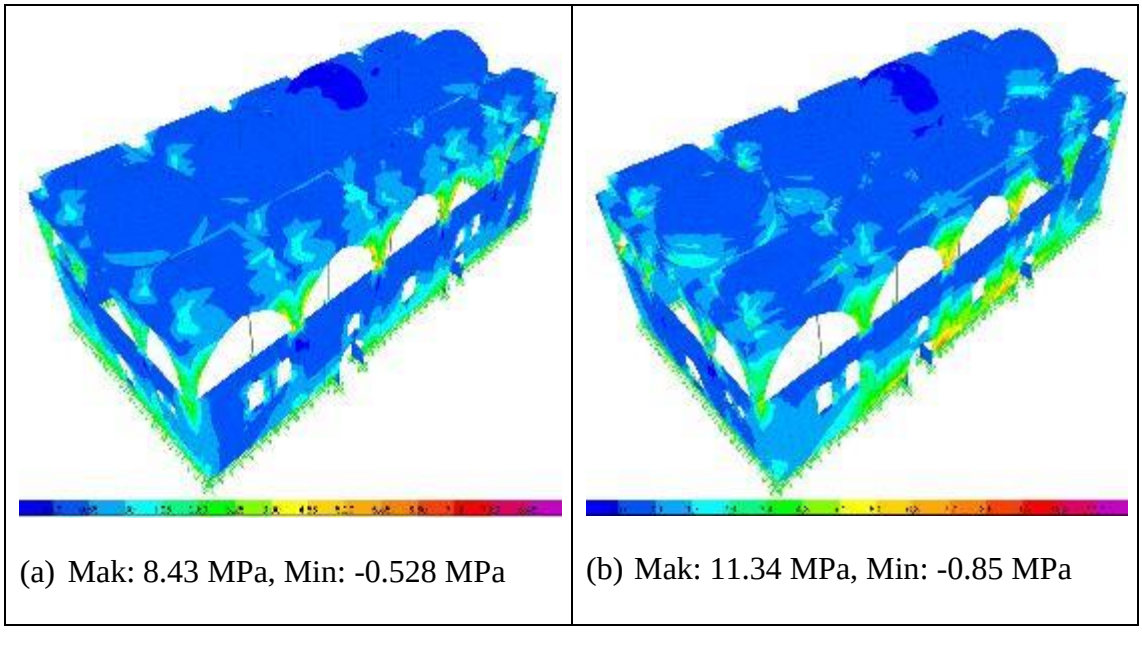
Buradaki malzeme yapısında küfeki taşından oluşmaktadır. Ayrıca tuğla malzemenin kullanıldığı yapının üst örtü sisteminde gerilmelerin az olduğu gözlemlenmiştir.



(a) Mak: 6.65 MPa, Min: -0.115 MPa

(b) Mak: 8.51 MPa, Min: -0.101 MPa

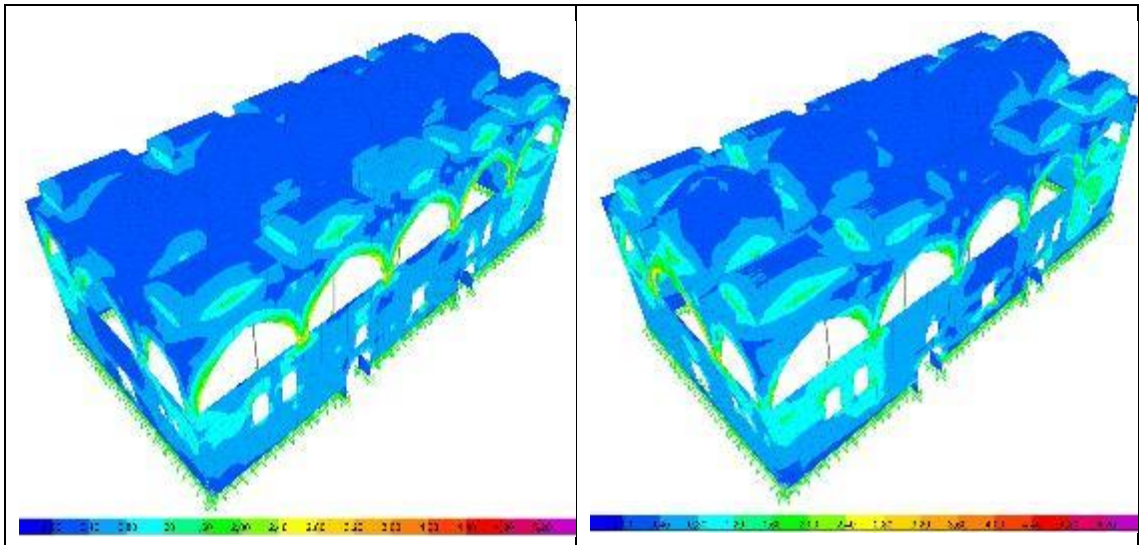
Şekil 65 S11 (yatay) GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri. (Deprem;sırasıyla (a) EX-LD yönü, (b) EY-TD yönü)



(a) Mak: 8.43 MPa, Min: -0.528 MPa

(b) Mak: 11.34 MPa, Min: -0.85 MPa

Şekil 66 S22 (dikey) GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri. (Deprem; sırasıyla (a) EX-LD yönü, (b) EY-TD yönü)

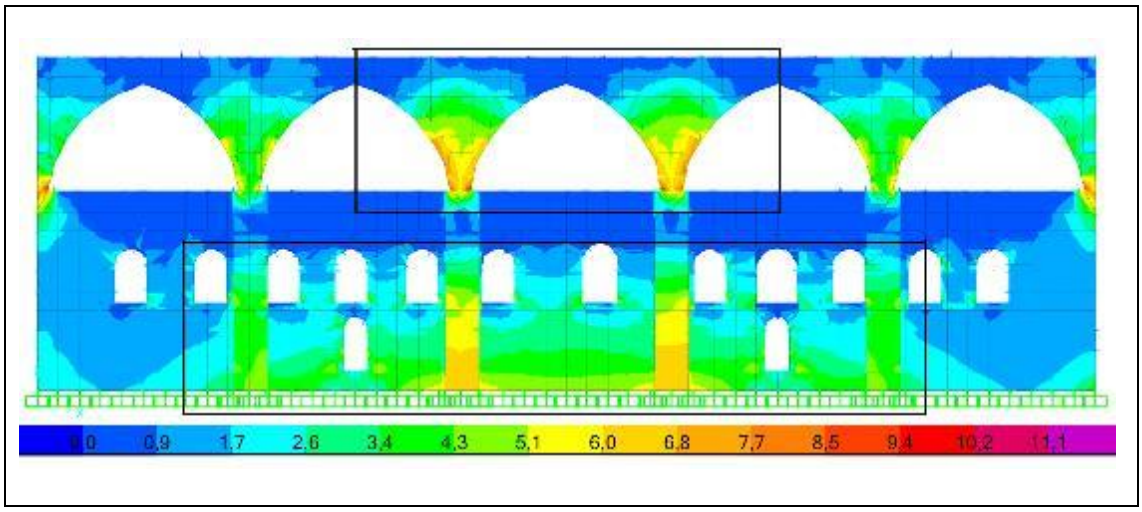


(a) Mak: 5.14 MPa, Min: -0.078 MPa

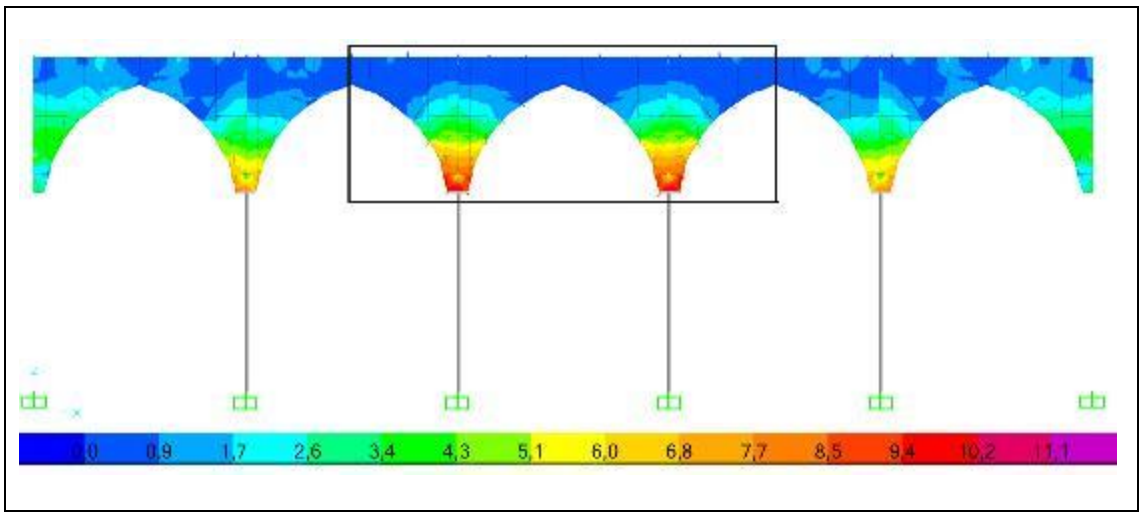
(b) Mak: 5.53 MPa, Min: -0.075 MPa

Şekil 67 S12 (kesme) GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri. (Deprem; sırasıyla (a) EX-LD yönü, (b) EY-TD yönü)

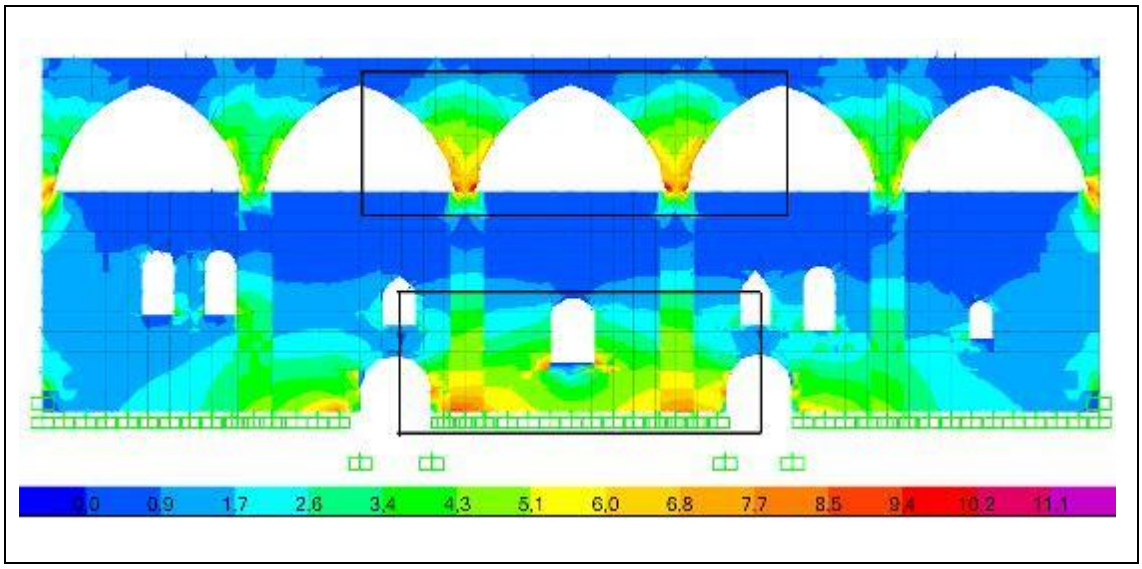
S22 (dikey) gerilmelerinde; EY-TD doğrultusundaki depremin gerilmeleri daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek gerilmeler, hem güney-kuzey cephelerin kemer duvar birleşim yerlerinde, hem de iç kemer sisteminin kemer kolon birleşim bölgelerinde oluşmaktadır. Maksimum gerilme güney cephede ortadaki büyük kemerin duvar-kolon birleşim bölgesinde 11.34 MPa olarak ölçülmüştür (Şekil 70, Şekil 72 a, Şekil 74 , Şekil 75) . Güney cephenin ortada bulunan en büyük kemerin sağında ve solunda her iki iç yüzeyde olmak üzere toplamda 2 noktada maksimum gerilmeler oluşmaktadır. Kemer duvar birleşim bölgelerindeki maksimum gerilme içlere ve üstlere doğru azalmaktadır. Güney cephede en dış kemerlerdeki gerilmeler ise 9.4 MPa olduğu gözlemlenmiştir. Aynı şekilde kuzey cephede de; maksimum gerilme ortadaki büyük kemerin duvar birleşim bölgesinde 9.7 MPa olarak ölçülmüştür (Şekil 68, Şekil 72 b). Kuzey cephenin en dıştaki kemerlerinde gerilmeler 9.4 MPa olarak gözlemlenmiştir. Kuzey cephe ile güney cephedeki gerilme davranışları birbirine paralellik göstermektedir. İç kısımlardaki kemerlerde ise, güney cepheye yakın olan iç kemer sisteminde orta kemerin kolonla birleşim bölgesinde 10.9 Mpa (Şekil 71, Şekil 73 a) , kuzey cepheye yakın olan iç kemer sisteminde orta kemerin kolonla birleşim bölgesinde 10.8 Mpa (Şekil 69, Şekil 73 b) gibi güney cephedeki kemerlere yakın gerilmeler meydana gelmektedir.



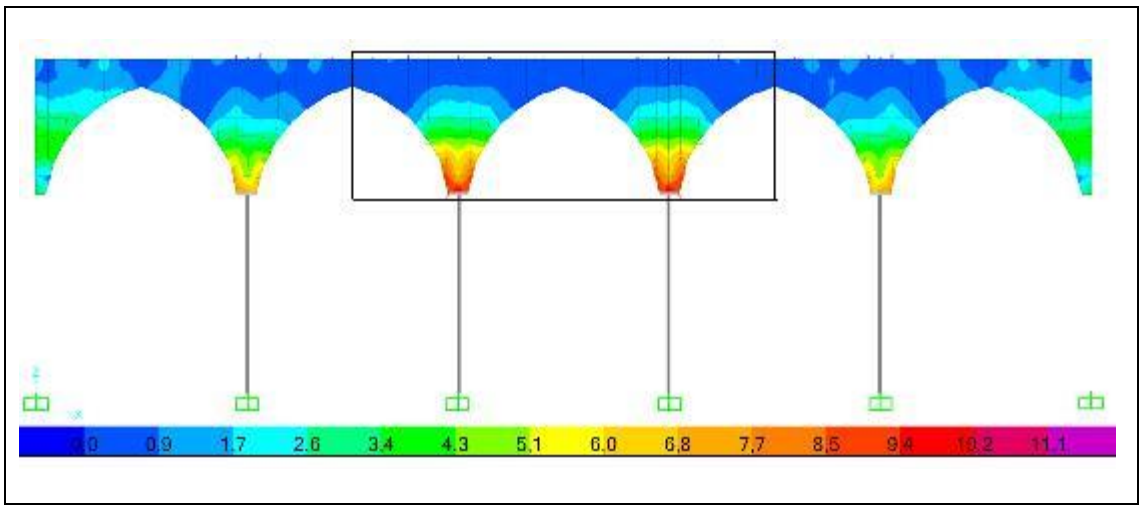
Şekil 68 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire kuzey cephe GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri. (Deprem; EY-TD yönü)



Şekil 69 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire iç kemer sitemi (kuzey cephe sonrası LD doğrultusu) GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri. (Deprem; EY-TD yönü)

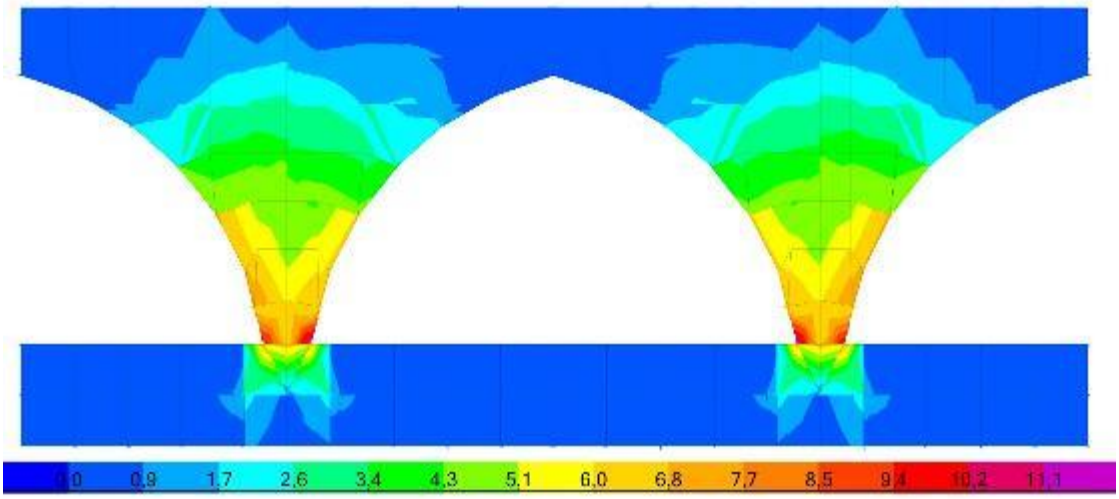


Şekil 70 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire güney cephe GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri. (Deprem; EY-TD yönü)

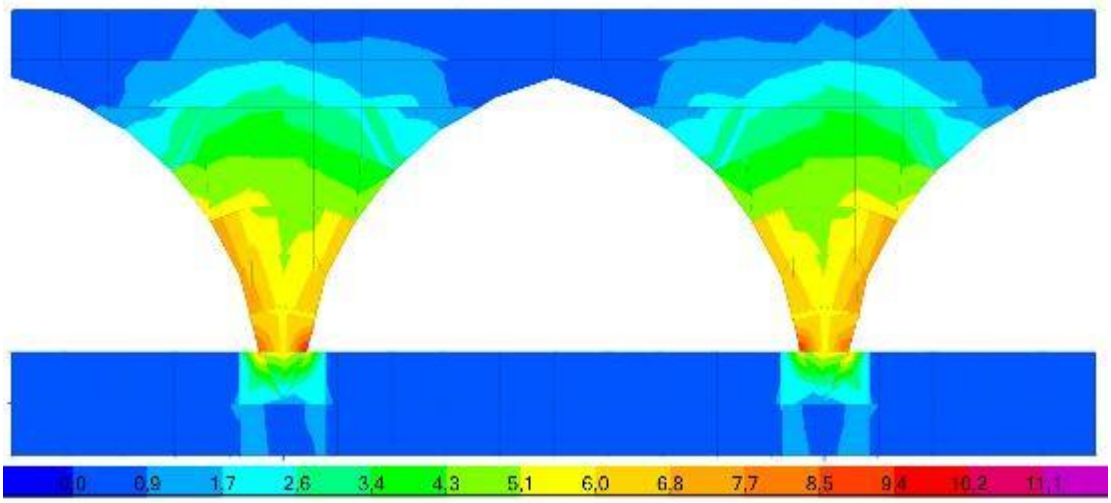


Şekil 71 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire iç kemer sitemi (güney cephe öncesi LD doğrultusu) GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri. (Deprem; EY-TD yönü)

S22 (dikey) gerilmelerinde; EY-TD doğrultusundaki deprem gerilmeleri hem kuzey hem de güney cephedeki maksimum gerilmeler orta kemer bölgelerinde kemer ile duvar birleşim noktalarında meydana gelmiştir (Şekil 72a, Şekil 72b).



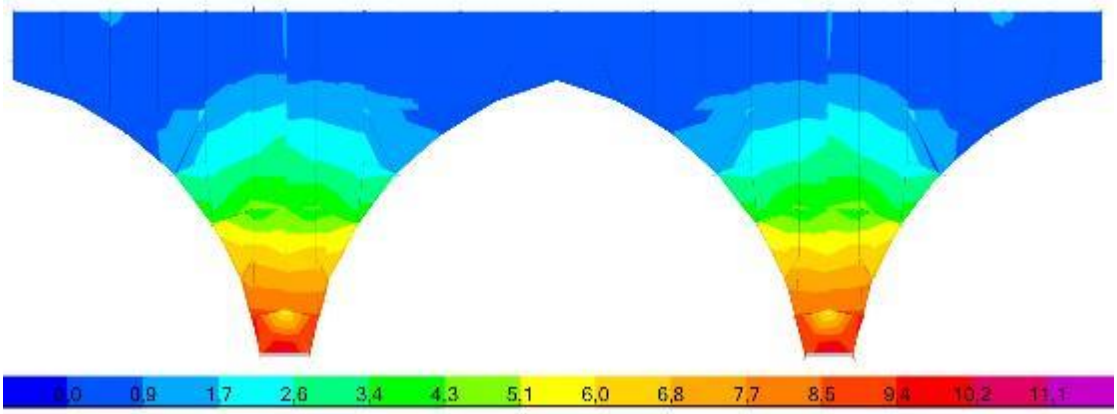
(a) LD doğrultusu güney cephe orta kemer



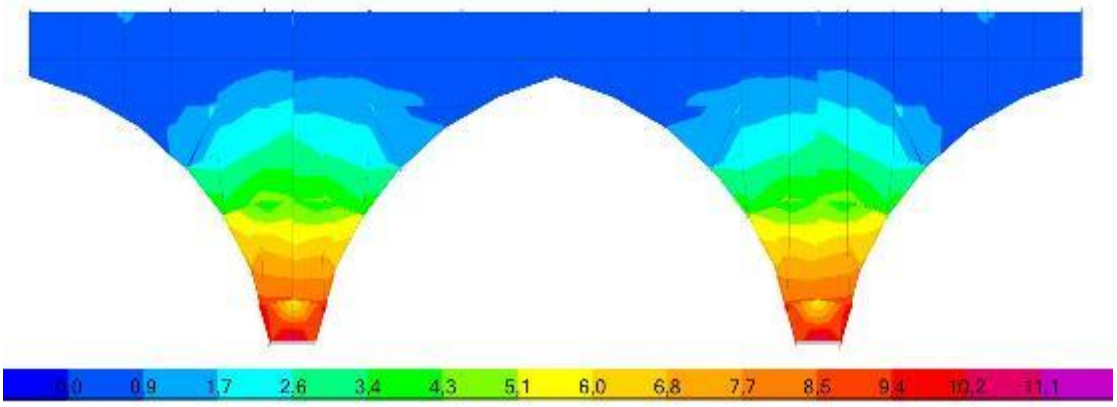
(b) LD doğrultusu kuzey cephe orta kemer

Şekil 72 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında kritik DSA kritik cephe gerilmeleri. (Deprem; EY-TD yönü)

Ayrıca iç kemerlerde oluşan gerilmeler dış kemerlerde oluşan gerilmelere yakın olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 73a, Şekil 73b).



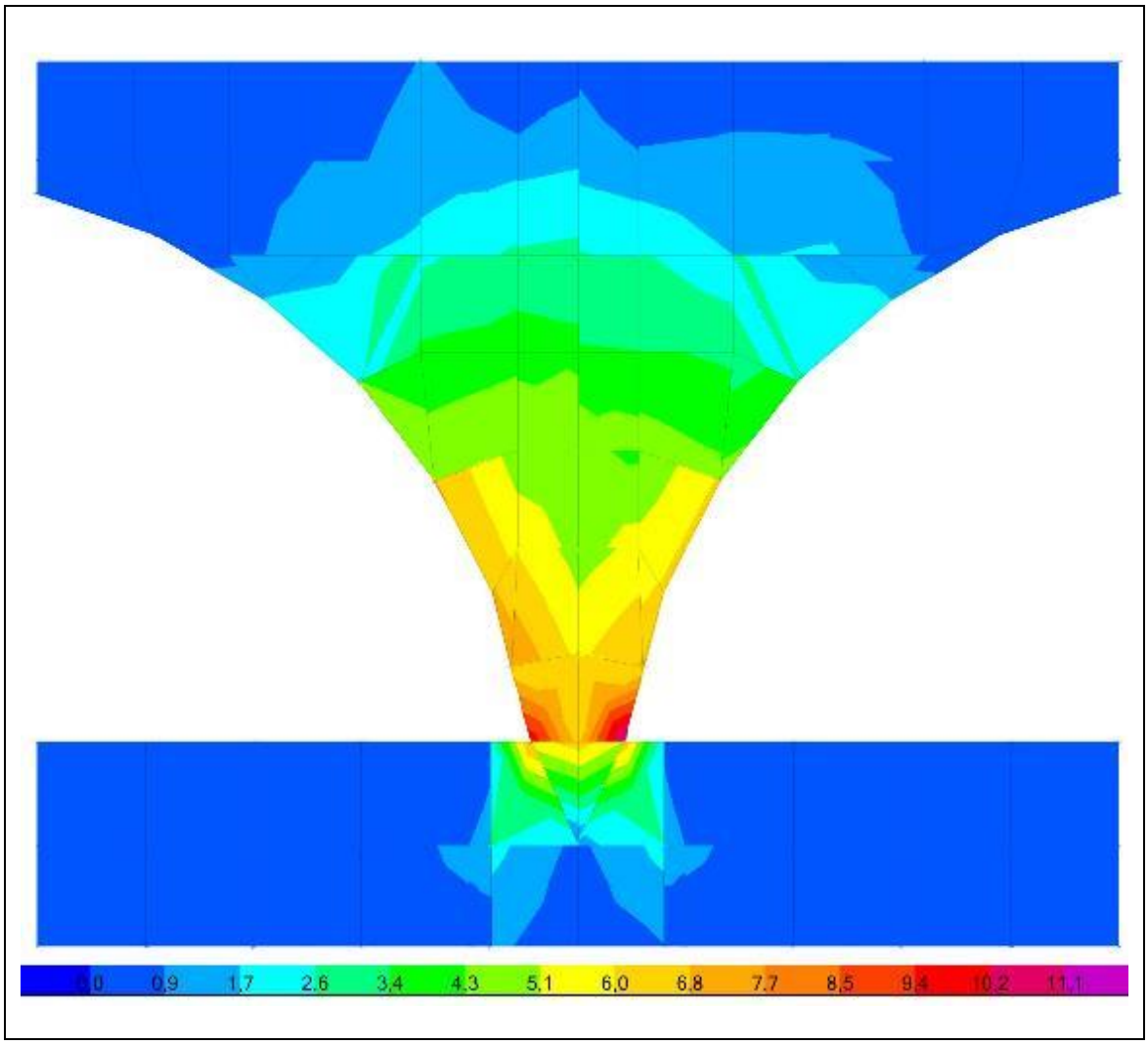
(a) LD doğrultusu güney cephe öncesi iç taraf orta kemer 1



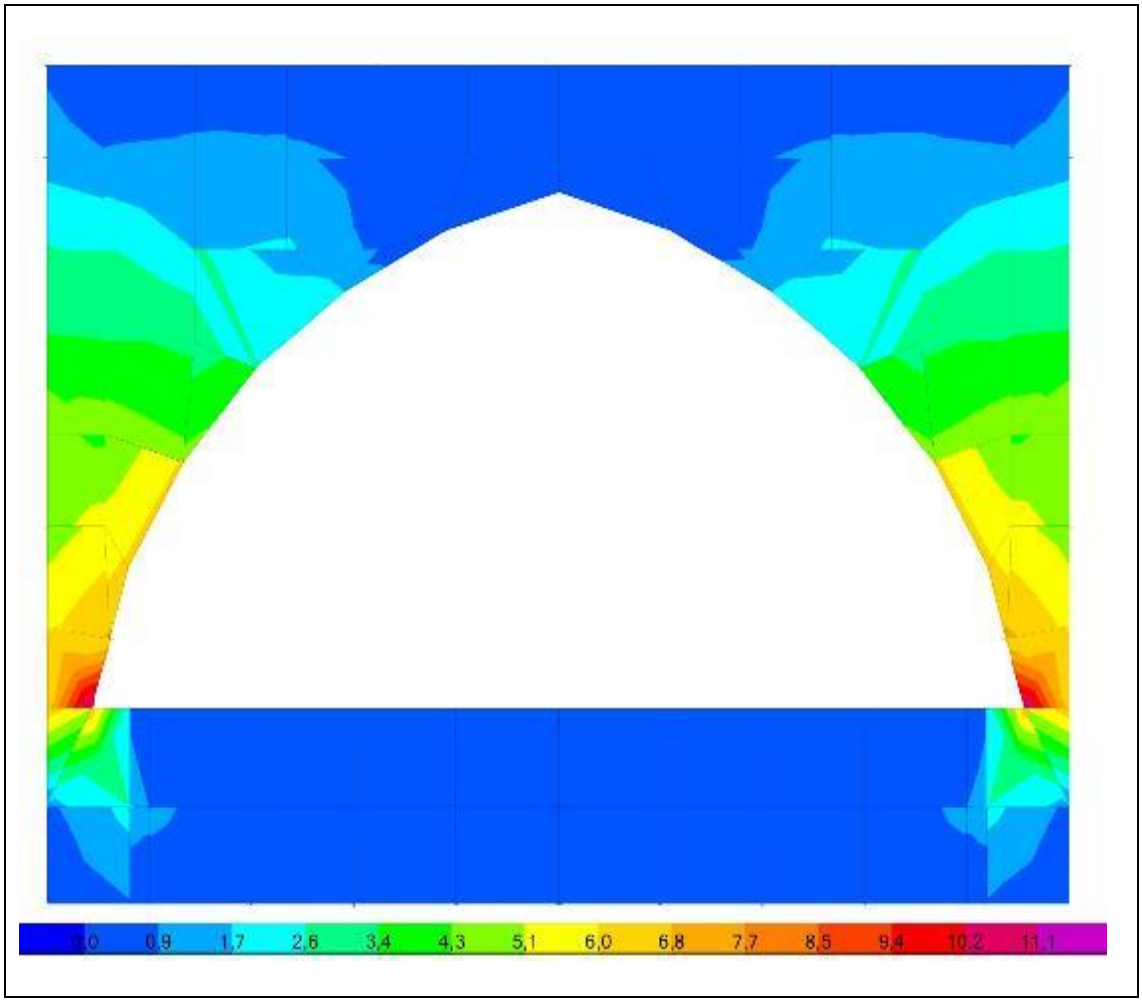
(b) LD doğrultusu kuzey cephe sonrası iç taraf orta kemer 2

Şekil 73 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında kritik DSA kritik iç kemer gerilmeleri. (Deprem; EY-TD yönü)

Yapıdaki kritik gerilmeler S22 (dikey) EY-TD deprem yönünde meydana gelmekte ve Şekil 74'de görüldüğü gibi kemerin her iki dış yüzeyinde oluşmaktadır. Maksimum gerilmeler ise Şekil 75'te görüldüğü gibi güney cephedeki büyük (orta) kemerin her iki ucunda duvar birleşim bölgesinde 11.34 MPa'a yakın çıkmaktadır.

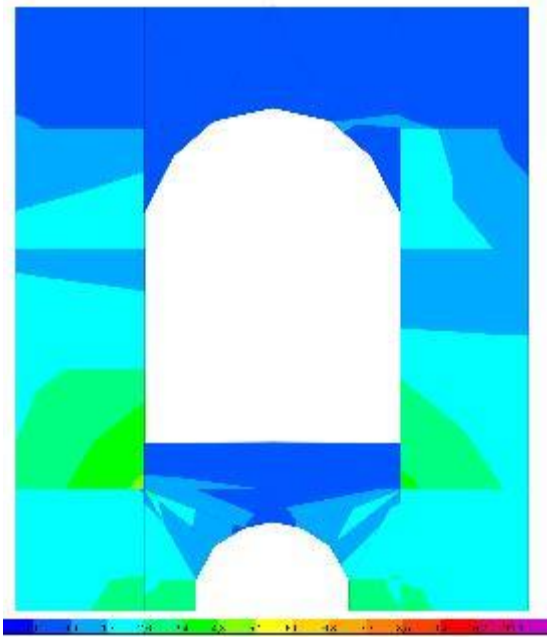


Şekil 74 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında maksimum DSA gerilmeleri (Güney cephe orta kemer), (Deprem; EY-TD yönü).

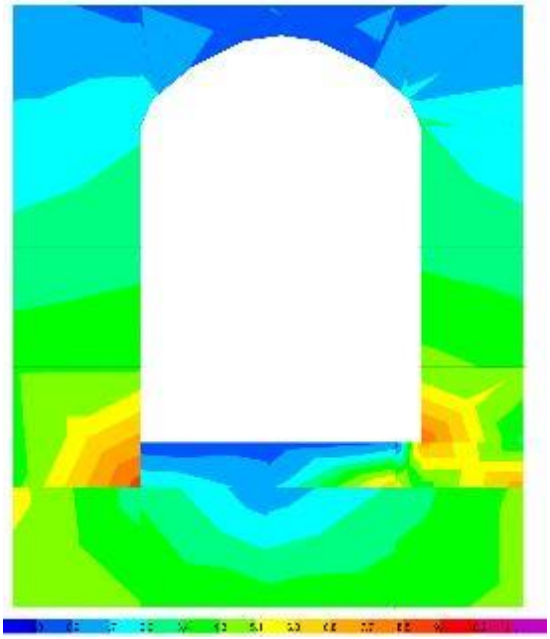


Şekil 75 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında maksimum DSA gerilmeleri (Güney cephe orta kemer), (Deprem; EY-TD yönü).

S22 (dikey) gerilmeleri, EY-TD deprem doğrultusunda irdelendiğinde yapının deprem altındaki davranışları şu şekildedir. Kuzey cephede kapı, pencere boşluklarında fazla bir gerilme gözlemlenmemiştir. Burada Kuzey cephedeki kapı boşluğu ele alındığında (Şekil 76 a), maksimum gerilme 4.4 MPa olduğu görülmüştür. Bu gerilmeler kapının alt kısmında 90 ^{0}C 'lik yatay ve dikey duvarların birleşim bölgesinde meydana gelmiştir. Kapı pencere boşluklarının üst kısmındaki kemer örgü sistemi ile duvarın en üst seviyesi arasındaki duvar gerilmeleri 1 MPa altındadır. Ayrıca, kuzey cephenin orta bölgesinde temel seviyesi ile kapı, pencere boşlukları alt seviyesi arasında maksimum gerilmeler 6.5 MPa olup; bu gerilmeler kuzey cephede bulunan dört adet kolondan ortadaki iki adet kolonun temel seviyesinde meydana gelmektedir (Şekil 77 a).



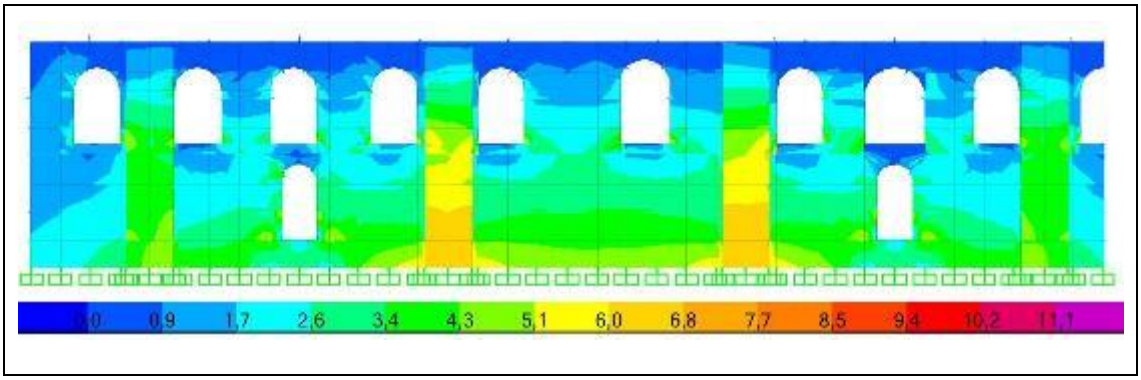
(a) Kuzey cephe girş kapısı kesiti



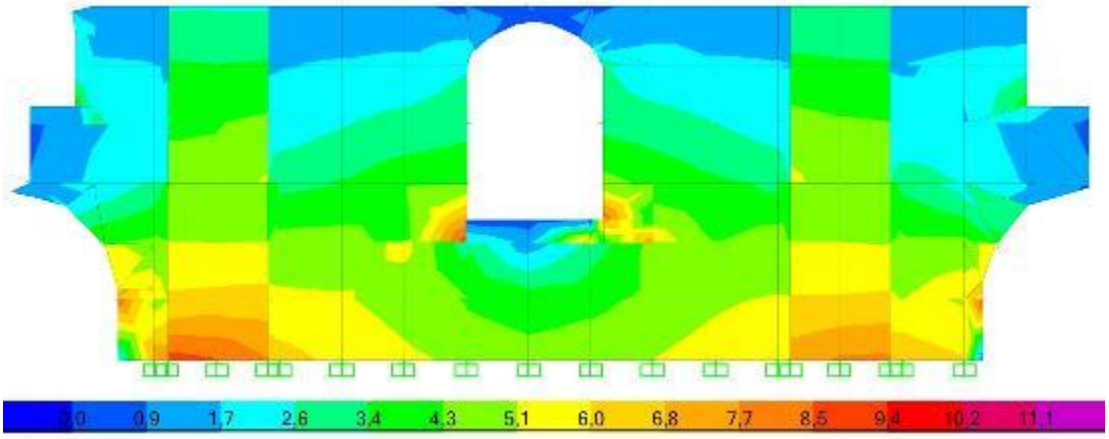
(b) güney cephe girş kapısı kesiti

Şekil 76 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (kapı, pencere), (Deprem; EY-TD yönü).

Aynı şekilde güney cephe ele alındığında; kapı pencere boşlukları üst seviyesinden yukarılara doğru duvarlardaki maksimum gerilme 1 MPa altında olup, kemerlerle duvarların birleştiği bölgelerde gerilmeler 8MPa'a kadar çıkmaktadır. Buradaki ana giriş kapısı ele alındığında, kapı boşluğunun alt seviyesinde her iki köşe birleşim yerlerindeki gerilmeler maksimum 9 MPa'ı bulunmuştur (Şekil 76 b). Güney cephe orta bölgede, ana giriş kapısının sağında ve solunda yer alan ortadaki kolonların temel seviyesine yakın yerde maksimum gerilmeler 8.7 MPa olarak gözlemlenmiştir (Şekil 77 b). Burada kullanılan malzeme küfeki taşı olarak seçilmiştir.



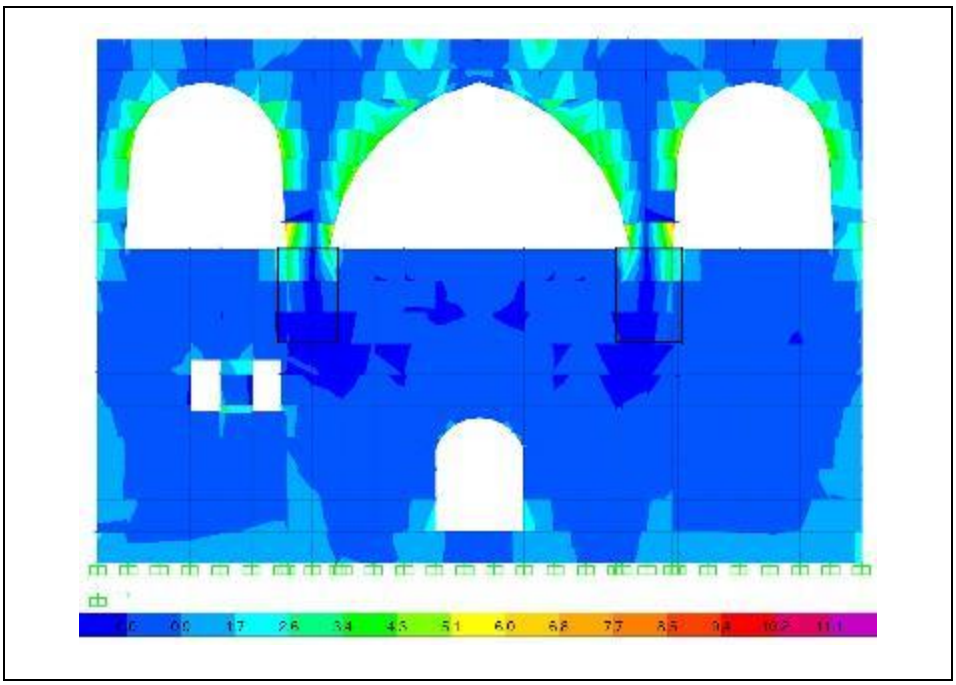
(a) Kuzey cephe orta bölge kapı pencere alt seviyesi ile temel seviyesi arası gerilmeler



(b) Güney cephe orta bölge kapı pencere alt seviyesi ile temel seviyesi arası gerilmeler

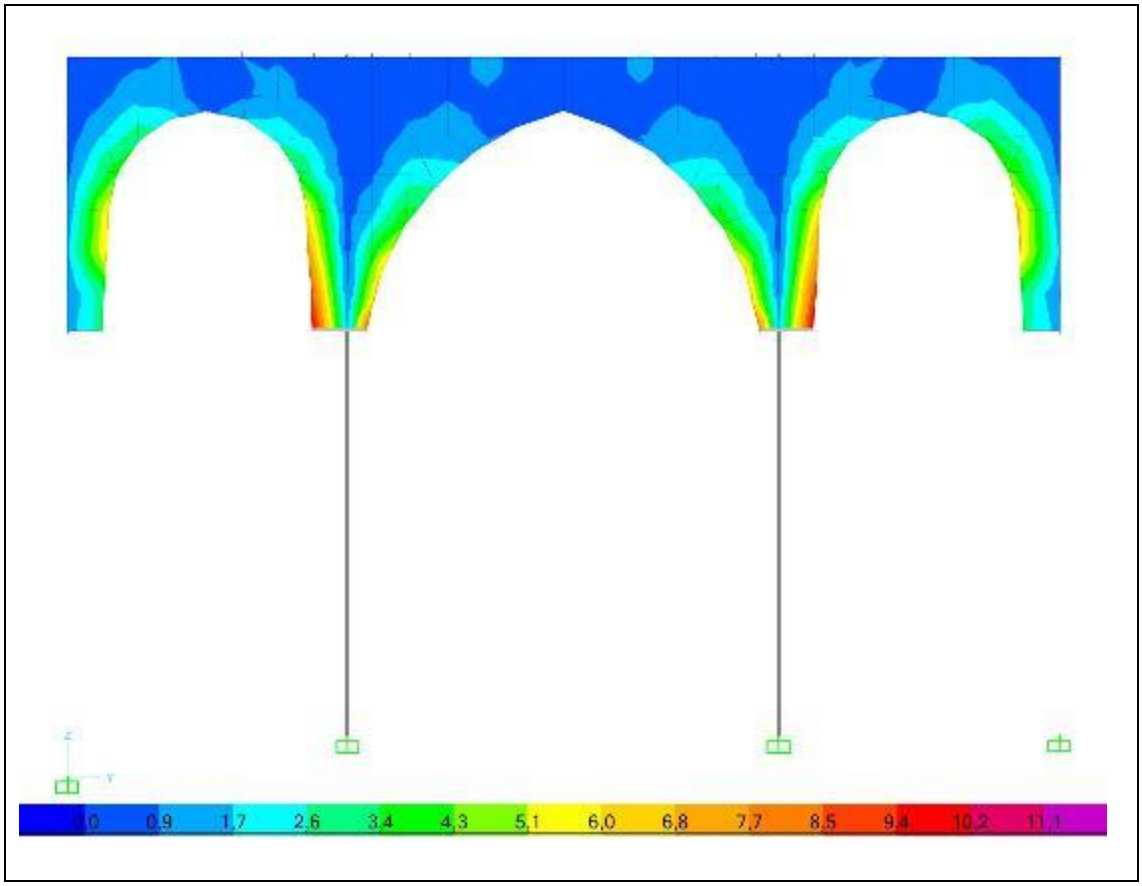
Şekil 77 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (temel seviyesi), (Deprem; EY-TD yönü).

S22 (dikey) GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmelerinde, EY-TD doğrultusundaki deprem kuvvetlerine göre minimum gerilmeler batı cephesindeki kolonlarda -0.85 MPa olarak gözlemlenmiştir (Şekil 78).



Şekil 78 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen minimum deprem altında DSA gerilmeleri YZ doğrultusu batı (eminönü) cephesi (Deprem; EY-TD yönü).

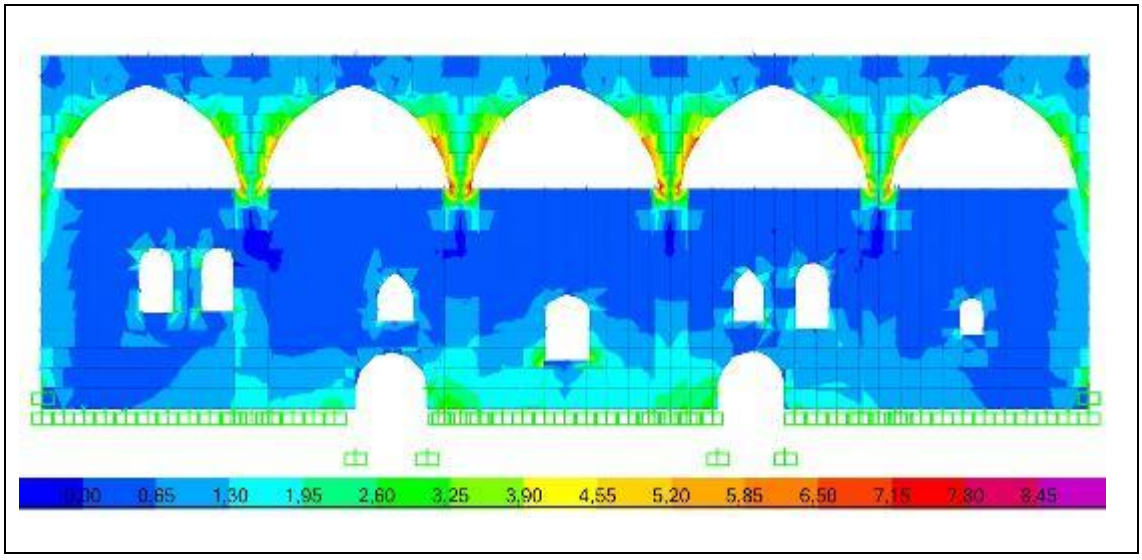
S22 (dikey) GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmelerinde, EY-TD doğrultusundaki deprem kuvvetlerine göre doğu ve batı cephelerinde düşük gerilmeler oluşmakta, ancak Y-Z doğrultusundaki iç kemerlerde (büyük kubbenin olduğu bölge) 10 MPa'ya yakın gerilmeler oluşmaktadır (Şekil 79).



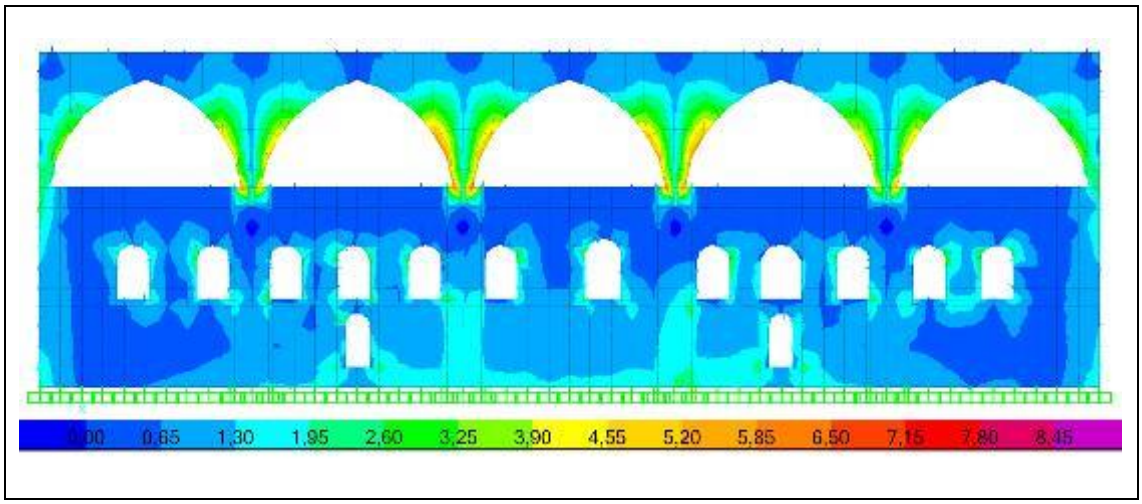
Şekil 79 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri YZ doğrultusu iç kemer (Deprem; EY-TD yönü).

S22 (dikey) GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmelerinde, EX-LD doğrultusundaki deprem kuvvetlerine göre maksimum gerilmeler kuzey ve güney cephede gözlemlenmiştir. Güney cephede maksimum gerilmeler kemerlerin yüzeyleri boyunca meydana gelmektedir. En fazla oluşan gerilme 8.43 MPa olarak orta kemerin iç duvar birleşim bölgesinde oluşmaktadır. Ayrıca kemerlerin olduğu bölgeler dışındaki gerilmeler 3.35 MPa'yı aşmamaktadır. Güney cephedeki kolonlarda minimum -0.40 MPa'ya varan gerilmeler oluşmaktadır (Şekil 80). Kuzey cephede ise, güney cephede olduğu gibi maksimum gerilmeler kemerlerin yüzeyleri boyunca meydana gelmektedir. En fazla oluşan gerilme 7.8 MPa olarak orta kemerin iç duvar birleşim bölgesinde oluşmaktadır. Ayrıca kemerlerin olduğu bölgeler

dışındaki gerilmeler 2 MPa'yı aşmamaktadır (Şekil 81Şekil 80). Kuzey cephedeki minimum gerilmeler ise cephede yer alan kolonların kemer birleşim bölgesine yakın kısımlarında -0.529 MPa olarak gerçekleşmektedir (Şekil 81).



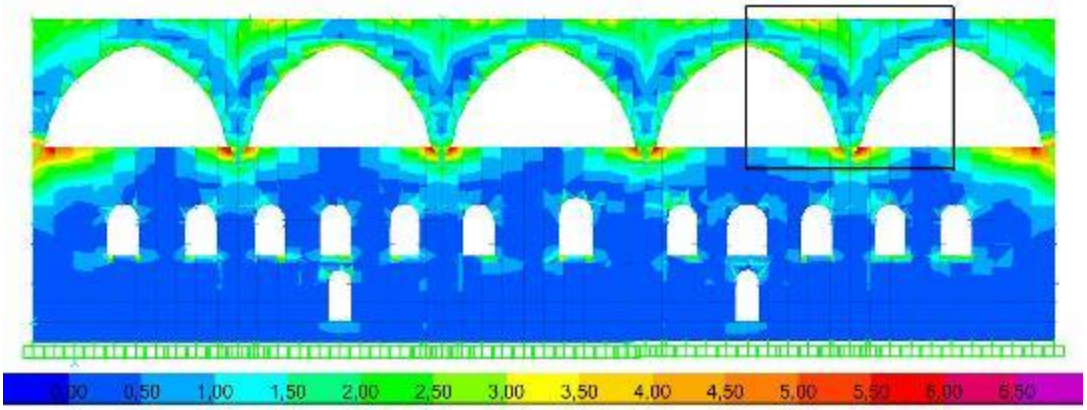
Şekil 80 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA güney cephe gerilmeleri , (Deprem; EX-LD yönü).



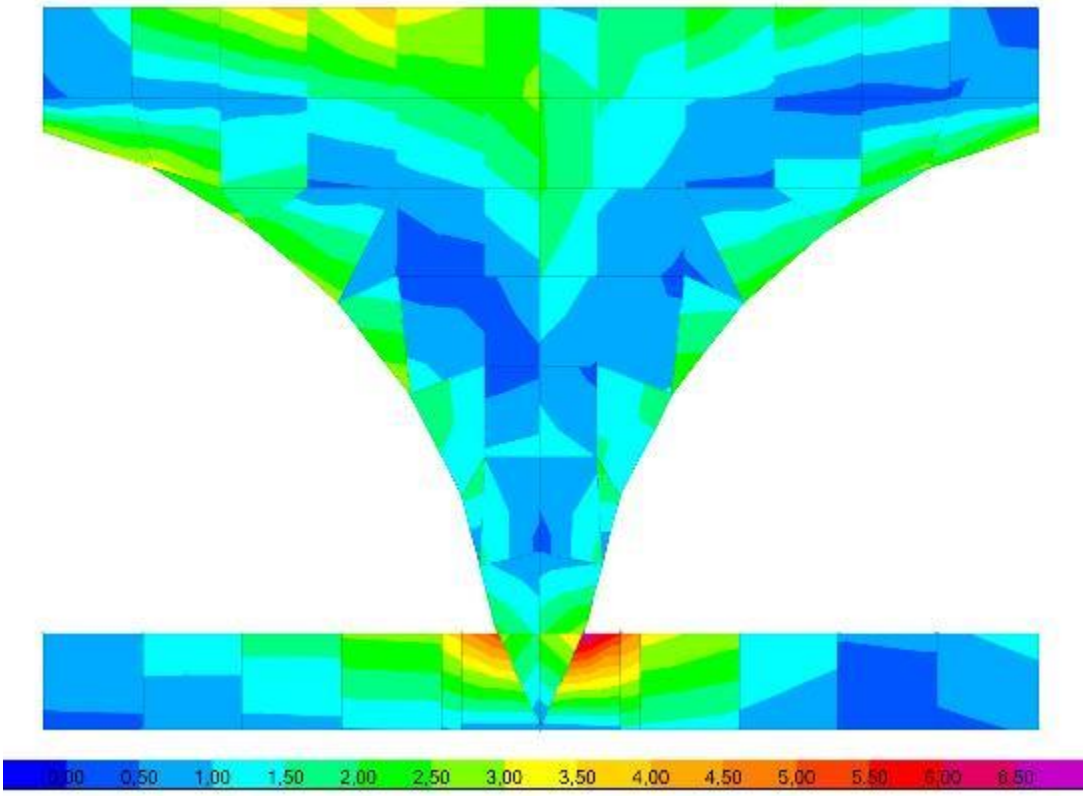
Şekil 81 S22 (dikey) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA kuzey cephe gerilmeleri , (Deprem; EX-LD yönü).

S11 (yatay) GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmelerinde, EX-LD doğrultusundaki deprem kuvvetlerine göre maksimum gerilmeler kuzey cephede gözlemlenmiştir. S11 (yatay) gerilmeleri EX-LD yönündeki deprem kuvvetine göre; maksimum gerilme kuzey cephede son kemerin (doğuya yakın kemer) duvar birleşim noktasında 6.65 MPa olarak gerçekleşmektedir. Kuzey cephede ilk

kemerin (batıya yakın kemer) duvar birleşim noktasında ise 6.60 MPa'lık gerilme meydana gelmekte olup, diğer kemer duvar birleşim bölgelerinde de 6MPa'a yakın gerilmeler oluşmaktadır (Şekil 82).



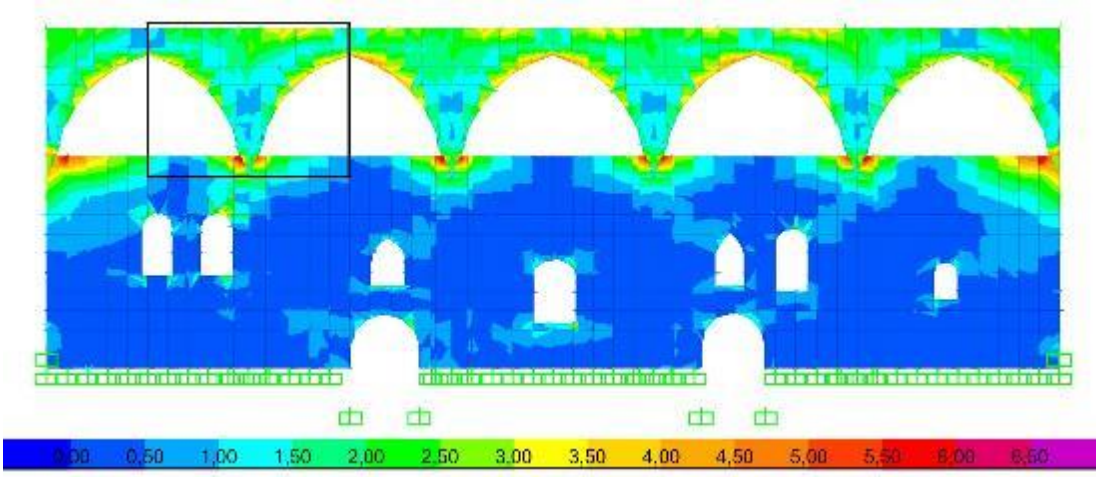
(a) S11 (yatay) kuzey cephe



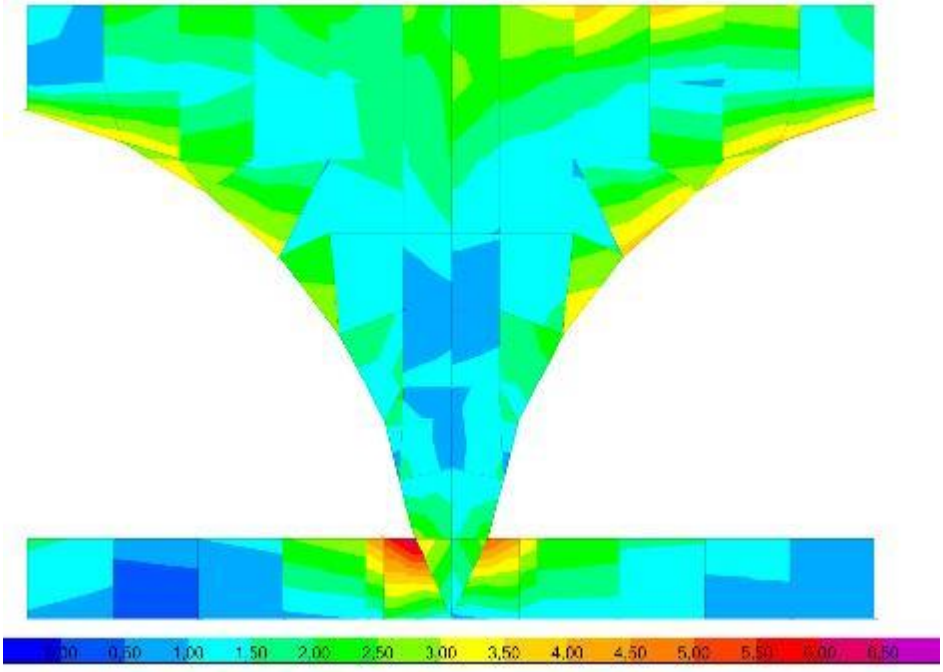
(b) S11 (yatay) kuzey cephe kritik gerilme (İlk kemer)

Şekil 82 S11 (yatay) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (kuzey cephe), (Deprem; EX-LD yönü).

Güney cephede; maksimum gerilme ilk kemerin (batıya yakın kemer) duvar birleşim noktasında 6.54 MPa olarak gerçekleşmektedir. Ayrıca güney cephede son kemerin (doğuya yakın kemer) duvar birleşim noktasında ise 6.35 MPa'lık gerilme meydana gelmekte olup, diğer kemer duvar birleşim bölgelerinde de 5.90 MPa'ya yakın gerilmeler oluşmaktadır (Şekil 83).



(a) S11 (yatay) güney cephe

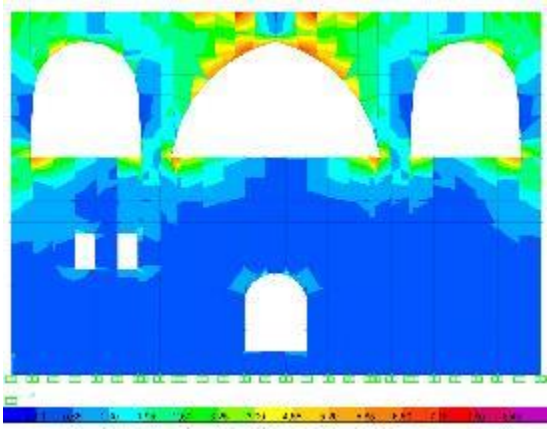


(b) S11 (yatay) güney cephe kritik gerilme (son kemer)

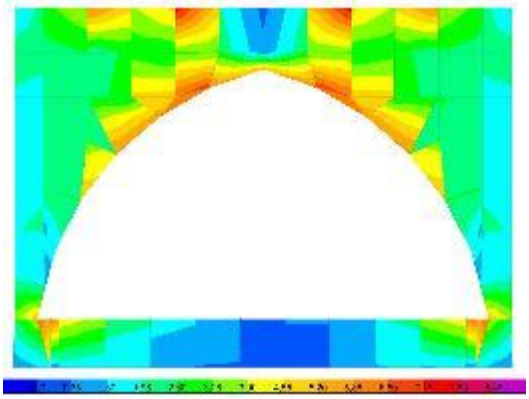
Şekil 83 S11 (yatay) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (güney cephe), (Deprem; EX-LD yönü).

S11 (yatay) GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmelerinde, EY-TD doğrultusundaki deprem kuvvetlerine göre maksimum gerilmeler doğu ve batı cepheleri ile dış cephelere yakın her iki iç kemer sisteminde gözlemlenmiştir.

S11 (yatay) gerilmeleri EY-TD yönündeki deprem kuvvetine göre; Batı (Eminönü) cephede orta (büyük) kemerin üstündeki duvarın bitiş noktasında 7.50 MPa olduğu görülmüştür (Şekil 84). Batı cephesindeki gerilmeler, kemer sistemin altına doğru temel seviyesine kadar azalmakla birlikte üste doğru artmaktadır.



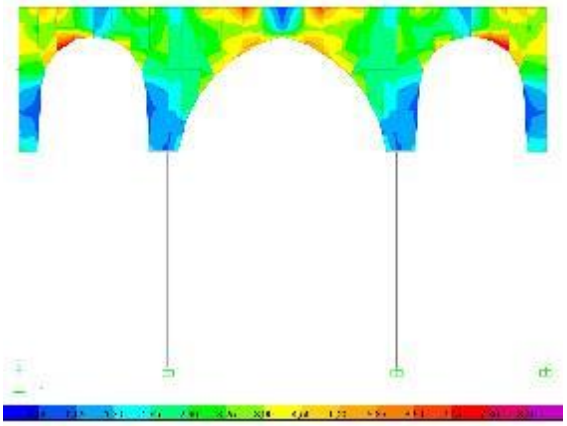
(a) S11 (yatay) Bat-Eminönü cephesi gerilmeler



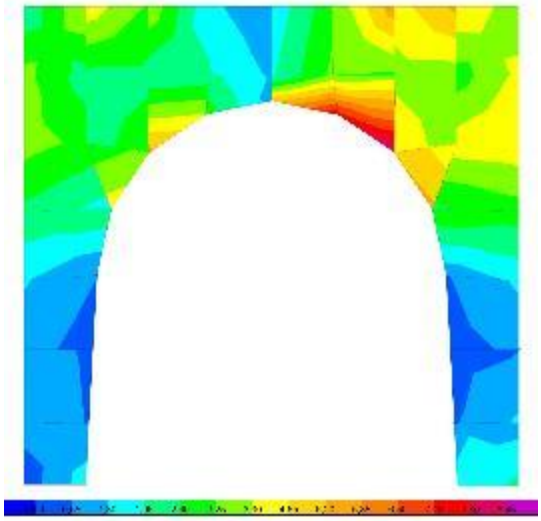
(b) S11 (yatay) Batı cephe kritik gerilme (orta-büyük kemer)

Şekil 84 S11 (yatay) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (Batı-Eminönü cephe), (Deprem; EY-TD yönü).

S11 (yatay) gerilmeleri EY-TD yönündeki deprem kuvvetine göre; Batı cephesinden sonra gelen ilk iç kemer kolon sisteminde maksimum gerilmeler meydana gelmektedir. Bu gerilmeler iç kemer sisteminin her iki küçük kemerin cephelere yakın kesitinde yüzeye yakın bölgelerde 8.51 MPa'ya yakın oluşmaktadır (Şekil 85 b). Ayrıca orta (büyük) kemerin en üstünde ise gerilmeler 7.3 MPa olarak gerçekleşmektedir (Şekil 85 a).



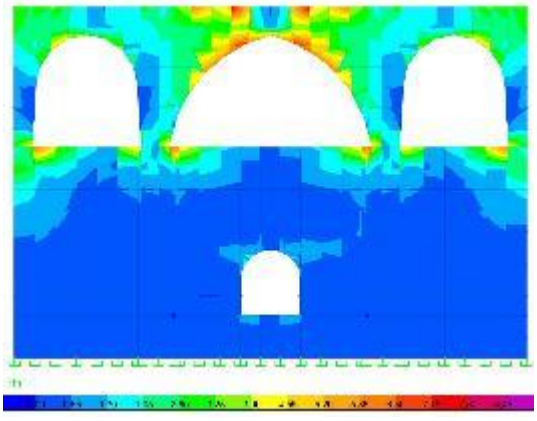
(a) S11 (yatay) Bat-Eminönü cephesi sonrası iç kemer sistemi gerilmeler



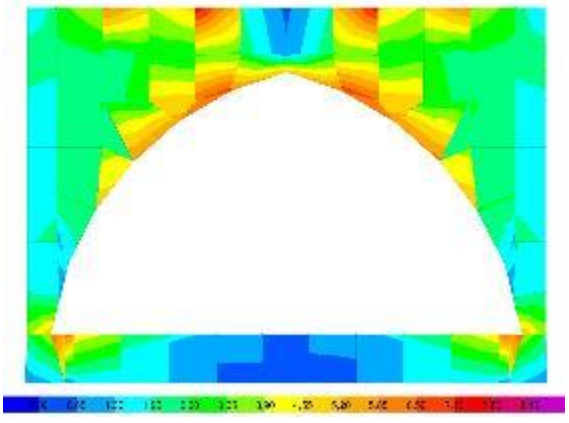
(b) S11 (yatay) Batı cephe sonrası ilk kemer sistemindeki kritik gerilme

Şekil 85 S11 (yatay) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (Batı-Eminönü cephe sonrası iç kemer sistemi), (Deprem; EY-TD yönü).

S11 (yatay) gerilmeleri EY-TD yönündeki deprem kuvvetine göre; Doğu (Beşiktaş) cephede orta (büyük) kemerin üstündeki duvarın bitiş noktasında 7.6 MPa olduğu görülmüştür (Şekil 86).



(a) S11 (yatay) Doğu-Beşiktaş cephesi gerilmeler

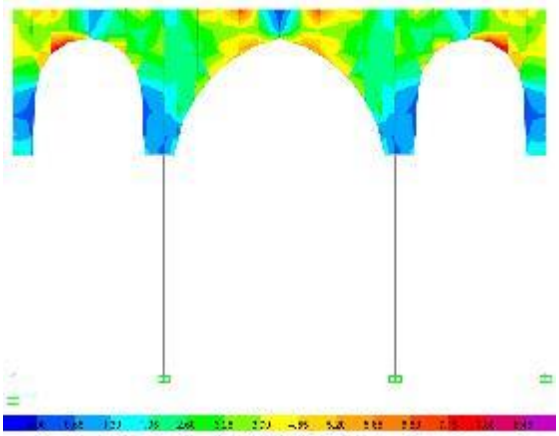


(b) S11 (yatay) Doğu cephe kritik gerilme (orta-büyük kemer)

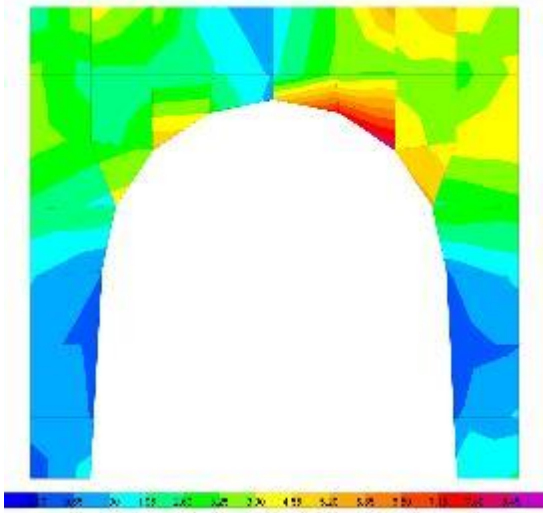
Şekil 86 S11 (yatay) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (Doğu-Beşiktaş cephe), (Deprem; EY-TD yönü).

S11 (yatay) gerilmeleri EY-TD yönündeki deprem kuvvetine göre; Doğu cephesinden önce gelen ilk iç kemer kolon sisteminde maksimum gerilmeler meydana

gelmektedir. Bu gerilmeler iç kemer sisteminin her iki küçük kemerin cephelere yakın kesitinde yüzeye yakın bölgelerde 8.48 MPa'ya yakın oluşmaktadır (Şekil 85Şekil 87 b). Ayrıca orta (büyük) kemerin en üstünde ise gerilmeler 7.2 MPa olarak gerçekleşmektedir (Şekil 87 a).



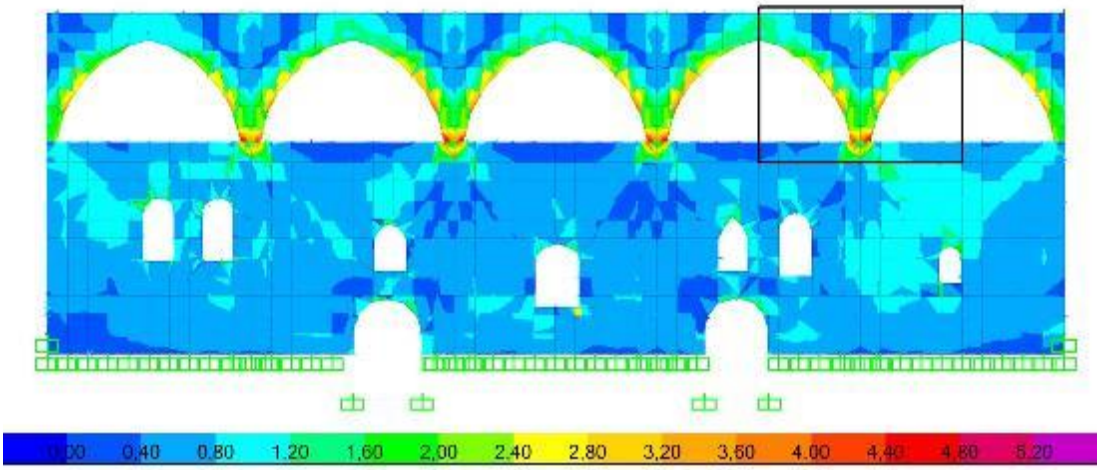
(a) S11 (yatay) Doğu cephesi öncesi iç kemer sistemi gerilmeler



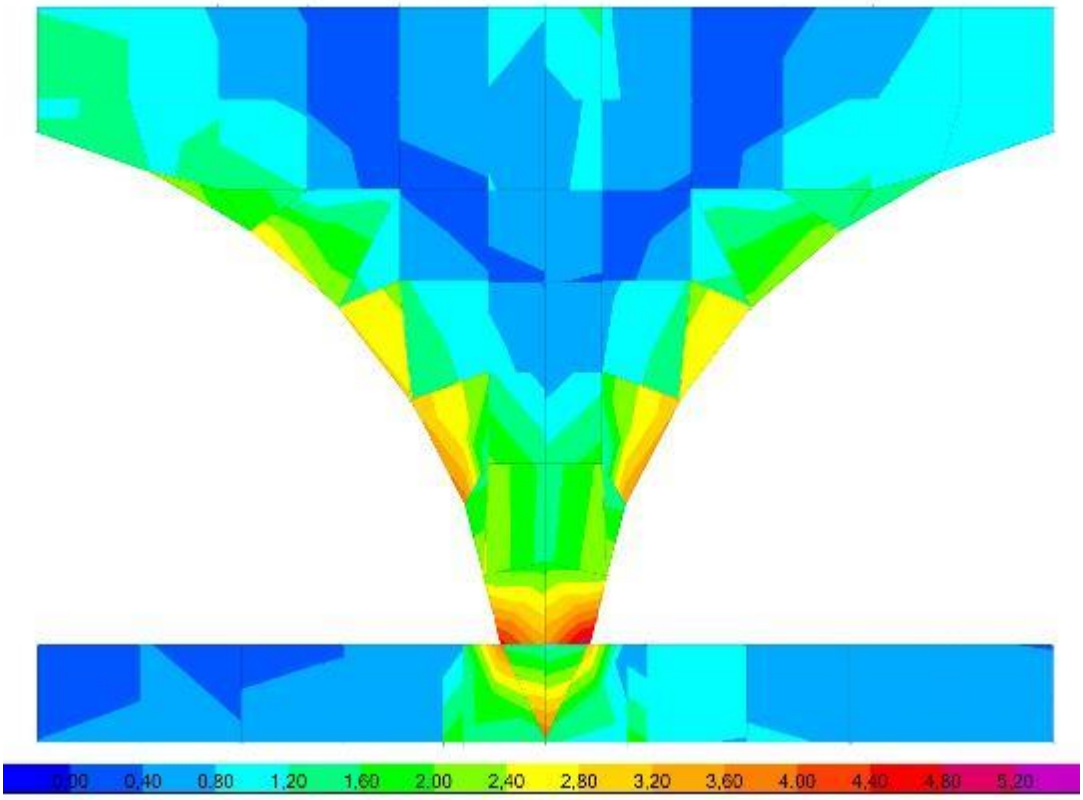
(b) S11 (yatay) Doğu cephe öncesi ilk kemer sistemindeki kritik gerilme

Şekil 87 S11 (yatay) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (Doğu-Beşiktaş cephe öncesi iç kemer sistemi), (Deprem; EY-TD yönü).

S12 (kesme) GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmelerinde, EX-LD doğrultusundaki deprem kuvvetlerine göre maksimum gerilmeler kuzey ve güney cephede gözlemlenmiştir. S12 (kesme) gerilmeleri EX-LD yönündeki deprem kuvvetine göre; güney cephede son kemerin (doğu cephesine yakın) duvar birleşim noktasında 5.14 MPa, diğer kemerlerde ise kemer duvar birleşim noktalarında 5MPa'a varan gerilmeler oluşmaktadır (Şekil 88). Maksimum gerilmeler kemer yüzeylerinde meydana gelmektedir.



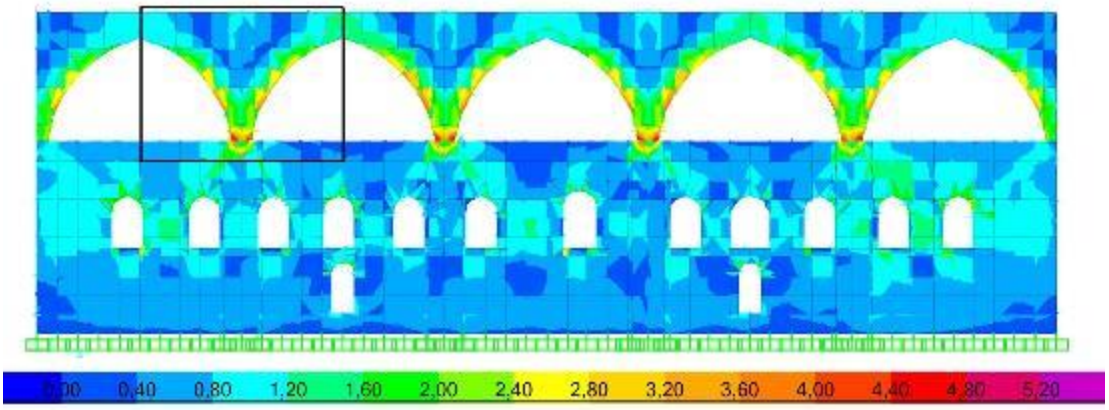
(a) S12 (kesme) güney cephe



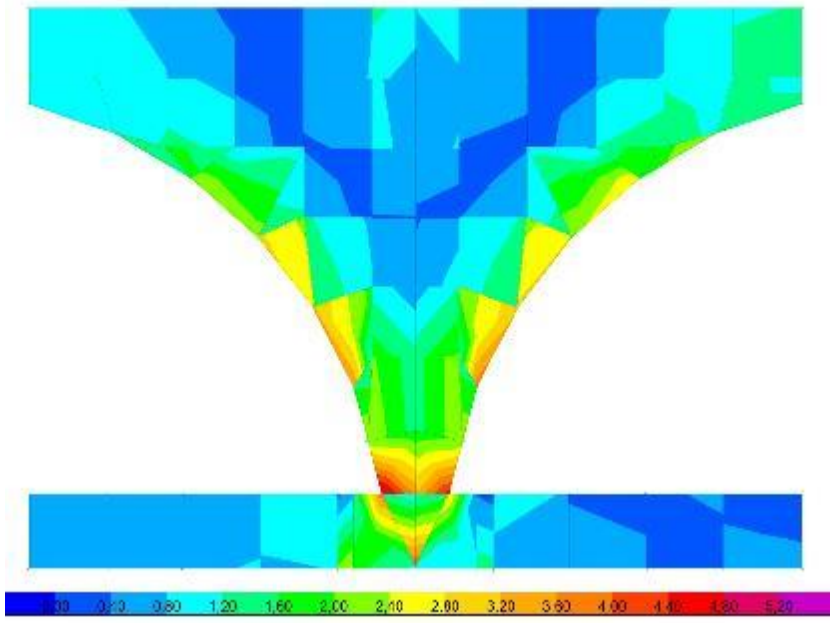
(b) S12 (kesme) güney cephe kritik gerilme (İlk kemer)

Şekil 88 S12 (kesme) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (güney cephe), (Deprem; EX-LD yönü).

Kuzey cephede ise S12 (kesme) gerilmeleri EX-LD yönündeki deprem kuvvetine göre; ilk kemerin (batı cepheye yakın) duvar birleşim noktasında 5.10 MPa, diğer kemerlerde ise kemer duvar birleşim noktalarında 4.95 MPa'ya varan gerilmeler oluşmaktadır (Şekil 89). Güney cepheyle aynı şekilde maksimum gerilmeler kemer yüzeylerinde oluşmaktadır.



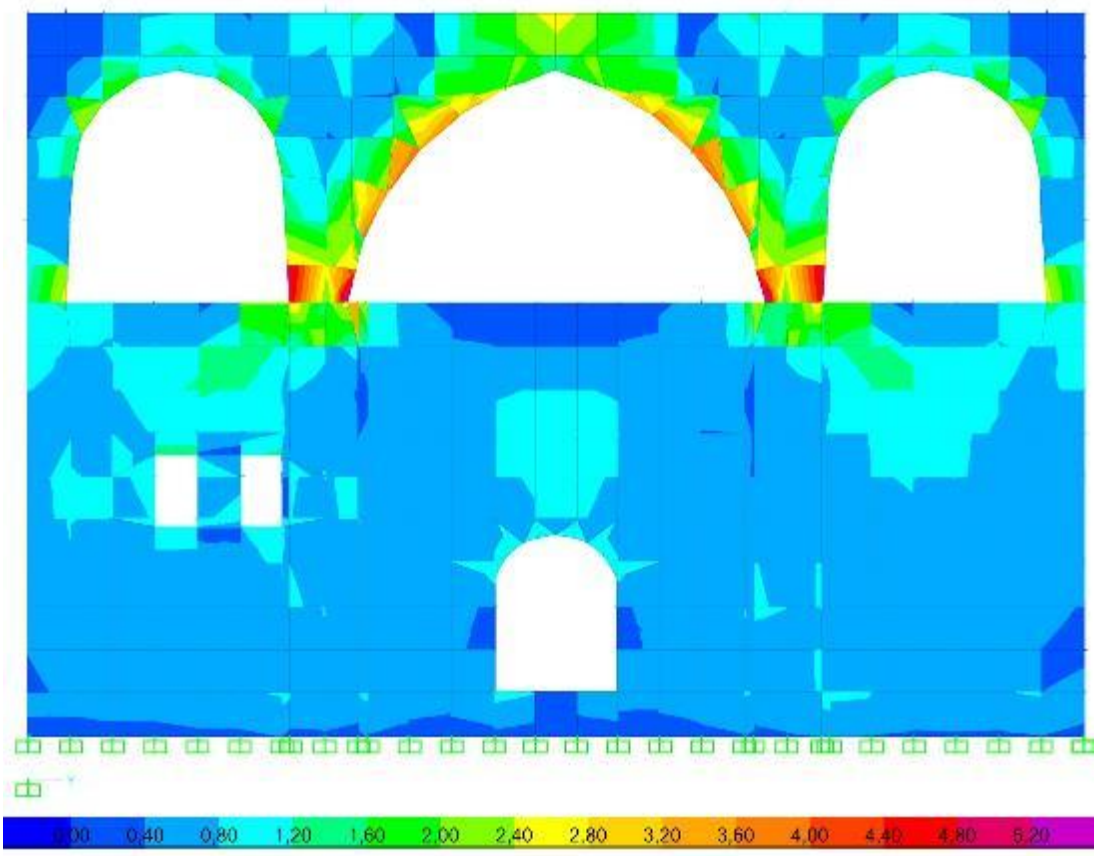
(a) S12 (kesme) kuzey cephe



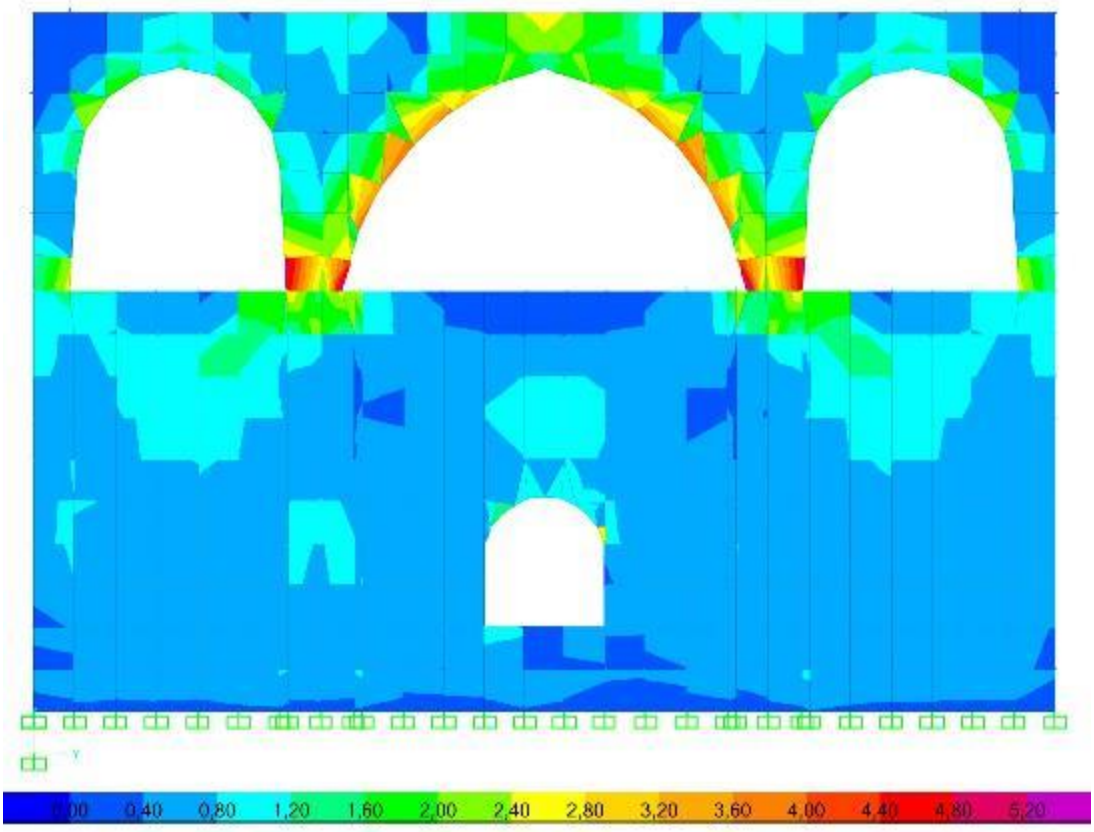
(b) S12 (kesme) kuzey cephe kritik gerilme (son kemer)

Şekil 89 S12 (kesme) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (güney cephe), (Deprem; EX-LD yönü).

S12 (kesme) GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmelerinde, EY-TD doğrultusundaki deprem kuvvetlerine göre maksimum gerilmeler doğu ve batı cepheleri gözlemlenmiştir. Batı cephesinin büyük (orta) kemerin duvar birleşim bölgesi ile küçük kemerlerin büyük kemerlere yakın noktalarındaki duvar birleşim bölgelerinde maksimum gerilmeler meydana gelmektedir. Batı (Eminönü) cephesinin büyük (orta) kemerin kuzey cepheye yakın taraftaki iç bölgesinde maksimum gerilme 5.53 MPa, diğer iç bölgede 5.36 MPa gözlemlenmiştir (Şekil 90 a). Aynı şekilde doğu (Beşiktaş) cephesinde büyük (orta) kemerin iç bölgesinde her iki duvar birleşim yerlerinde maksimum gerilme 5.50 MPa olduğu (Şekil 90 b) gözlemlenmiştir. Maksimum gerileme kemerlerin iç yüzeylerinde meydana gelmektedir.



(a) S12 (kesme) batı (Eminönü) cephe

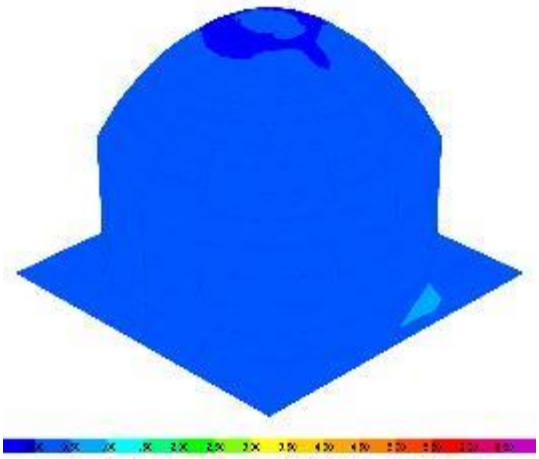


(b) S12 (kesme) doğu (Beşiktaş) cephe kritik gerilme (son kemer)

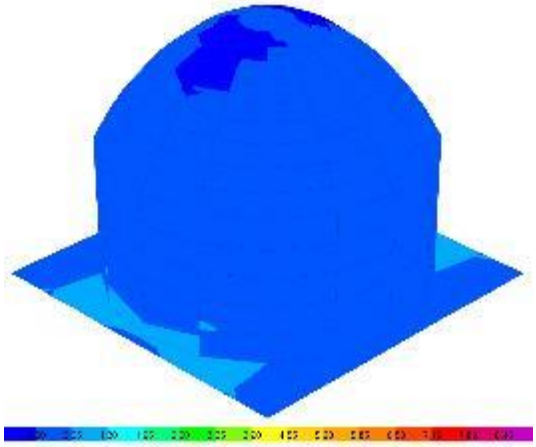
Şekil 90 S12 (kesme) Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (batı-doğu), (Deprem; EY-TD yönü).

Tophâne-i Âmirenin üst örtü sistemi kubbe, tonoz pandantif sisteminden oluşmaktadır. Böylelikle basınca göre çalışan bu sistem, malzeme özellikleri bakımından hafifliği de göz önünde bulundurularak tuğla malzeme seçilmiştir. Sitemin kritik bölgelerinde basıncın yüksek olacağı yerlerde ise küfeki taşına dönülmüştür. Üst örtü sisteminin kolon ile duvar birleşim yerlerinde ve kemerlerde özellikle küfeki taşı kullanılmıştır. Bu sebeple bazı yerlerde tuğla malzeme dolgu görevi görmektedir. Şekil 91 (a), (b) 'de S11(yatay) gerilmeleri, tepe noktasında negatif gerilmeler meydana gelmiş ve EX-LT doğrultusundaki deprem kuvvetlerine göre minimum -0.115 MPa gerilmeler oluşmuş, EY-TD doğrultusundaki deprem kuvvetlerine göre de -0.101 MPa gerilmeler meydana gelmiştir. Kubbenin diğer bölgelerde ise maksimum gerilme 0.5 MPa olarak gözlemlenmiştir. Şekil 91 (c), (d)'de S22 dikey gerilmeleri, tepe noktasında negatif gerilmeler meydana gelmiş, EX-LT doğrultusundaki deprem kuvvetlerine göre minimum

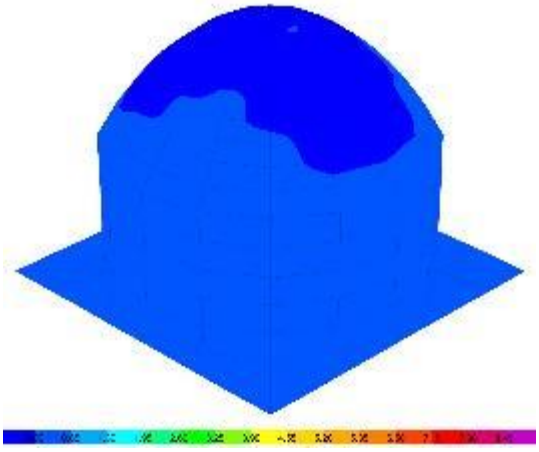
-0.07 MPa gerilmeler oluşmuş, EY-TD doğrultusundaki deprem kuvvetlerine göre de -0.08 MPa gerilmeler meydana gelmiştir. EX-LD yönünde maksimum gerilme 0.5 MPa ile EY-TD yönünde maksimum gerilme 1 MPa olarak gözlemlenmiştir. Şekil 91 (e), (f)'de S12 dikey gerilmeleri, EX-LD yönünde maksimum gerilme 0.5 MPa ile EY-TD yönünde maksimum gerilme 0.8 MPa olarak gözlemlenmiştir.



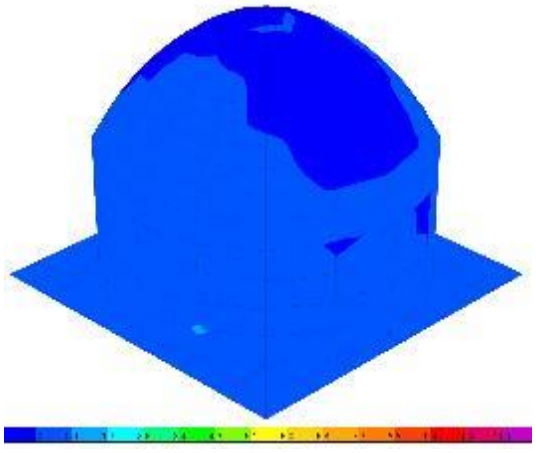
(a) S11 (yatay) gerilmeleri EX-LD doğrultudaki deprem



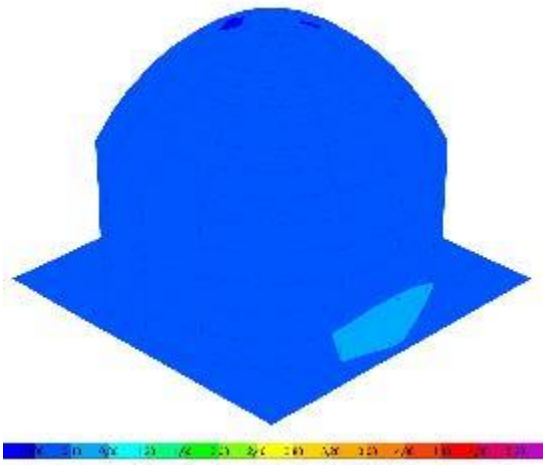
(b) S11 (yatay) gerilmeleri EY-TD doğrultudaki deprem



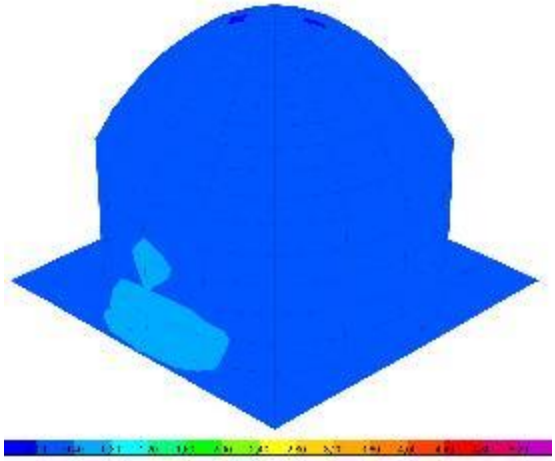
(c) S22 (dikey) gerilmeleri EX-LD doğrultudaki deprem



(d) S22 (dikey) gerilmeleri EY-TD doğrultudaki deprem



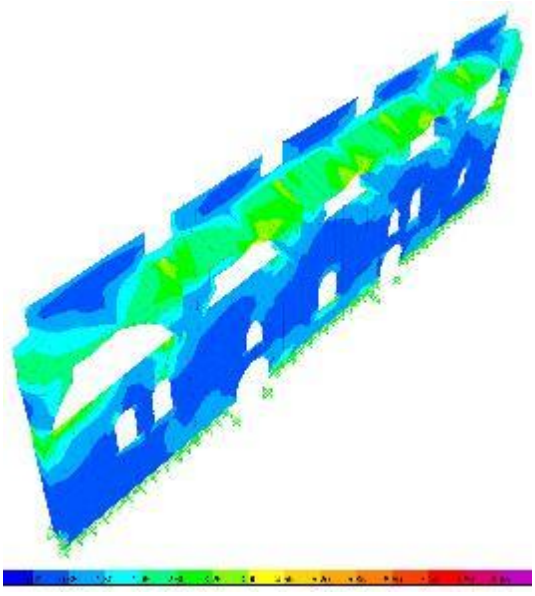
(e) S12 (kesme) gerilmeleri EX-LD doğrultudaki deprem



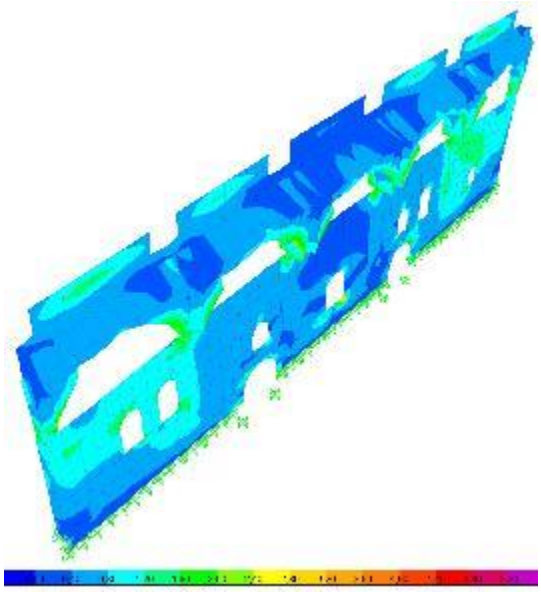
(f) S12 (kesme) gerilmeleri EY-TD doğrultudaki deprem

Şekil 91 Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında DSA gerilmeleri (orta büyük kubbe).

S11 (yatay) gerilmeleri ile S12 (kesme) gerilmeleri EY-TD deprem doğrultusunda güney cephe kemer bölgesi, düzlem dışı hareket Şekil 92'daki gibidir. Burada taşıyıcı sistemin bir parçası olan kemer sistemi Y-TD doğrultusunda daha fazla hareket etmektedir.



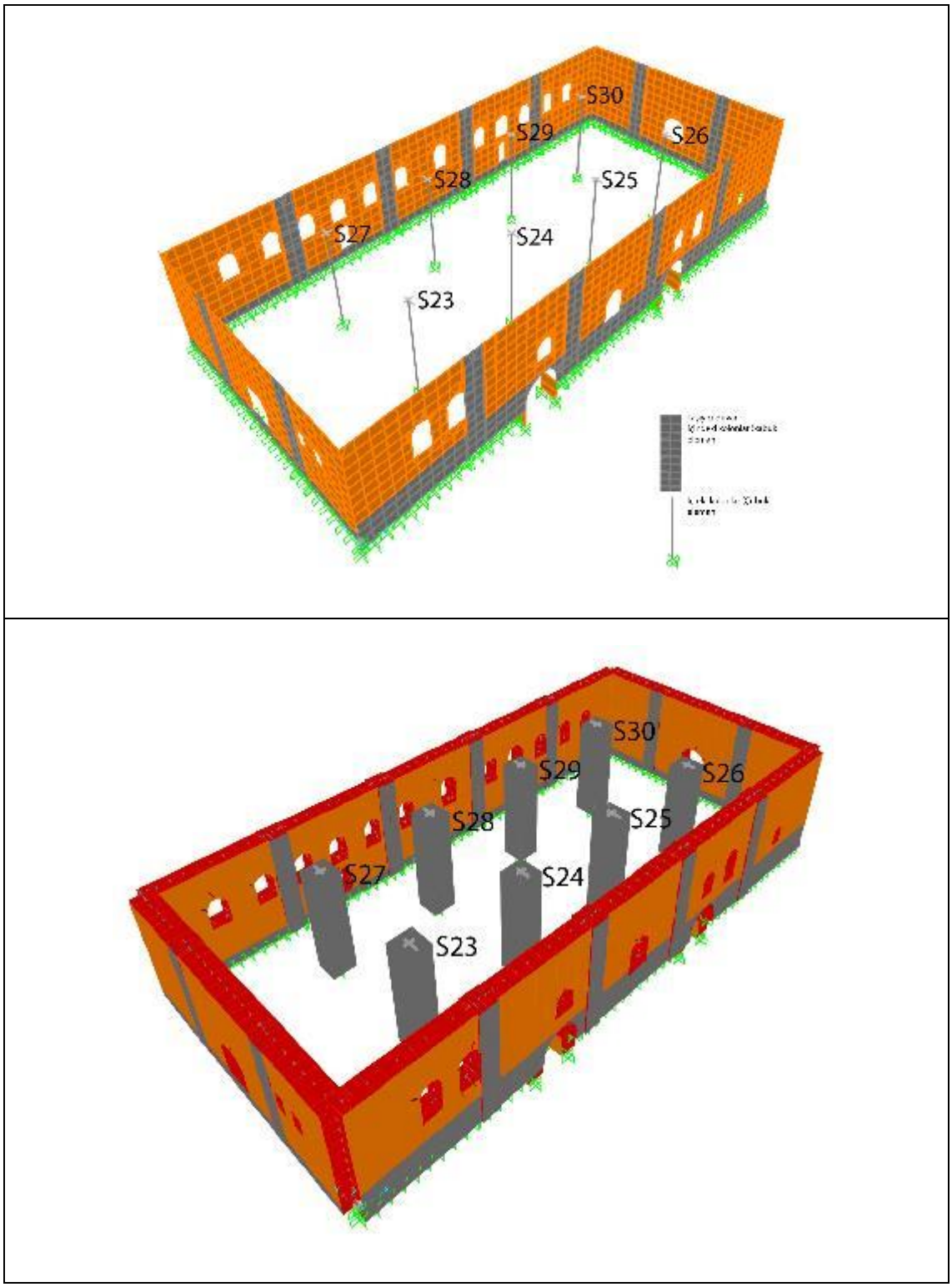
(a) S11 (yatay) güney cephe düzlem dışı hareket



(b) S12 (kesme) güney cephe düzlem dışı hareket

Şekil 92 Tophâne-i Âmire GSM % 5 sönüm oranı için düşünülen maksimum deprem altında güney cephe DSA gerilmeleri (düzlemdışı hareket).

Tophâne-i Âmirenin ortasında bulunan sekiz adet 2.1m x 2.1m kolon sayısal modelde çubuk eleman olarak tanımlanmıştır. Diğer on iki adet kolon ise taşıyıcı duvar içerisinde kaldığından kabuk eleman olarak tanımlanmıştır. Burada duvar içerisinde kalan on iki adet kolon, kabuk elemanlar olarak analizleri yukarıda yapılmıştır. Şekil 93'te görülen S23, S24, S25, S26, S27, S28, S29, S30 çubuk elemanlardan S24, S25, S28 ve S29 elemanlarda maksimum moment gerilmeleri oluşmaktadır. S24 çubuk elemanı için; zayıf ve kuvvetli istikamette etkiyen toplam moment gerilme değeri ''0'' mm istasyonunda -14.60 MPa, S25 çubuk elemanı için; zayıf ve kuvvetli istikamette etkiyen toplam moment gerilme değeri ''0'' mm istasyonunda -14.58 MPa, S28 çubuk elemanı için; zayıf ve kuvvetli istikamette etkiyen toplam moment gerilme değeri ''0'' mm istasyonunda -14.15 MPa, S29 çubuk elemanı için; zayıf ve kuvvetli istikamette etkiyen toplam moment gerilme değeri ''0'' mm istasyonunda -14.11 MPa olarak oluşmaktadır. Oluşan bu maksimum moment gerilmeleri EY-TD yönündeki deprem kuvvetlerinden oluşmaktadır. Aynı şekilde oluşan maksimum kesme gerilmeleri; S24, S25, S28 ve S29 çubuk elemanlarının ''4720 mm ile 9440 mm'' istasyonlarında, EY-TD yönündeki deprem kuvvetleri altında 1.09 MPa olarak meydana gelmektedir. Frame elemanlarda oluşan basınç gerilmeleri ise; minimum 1.43 MPa, maksimum ise 1.55 MPa'a yakın olarak S26, S27, S28, S29 ve S30 kolonlarında ''0'' mm istasyonunda meydana gelmektedir.



Şekil 93 Tophâne-i Âmire taşıyıcı duvar ve kolon (kabuk ile çubuk eleman) görünümü

Fuat Aras ve diğ. [23], [24] Taşıyıcı sistemleri yığma olan yapılar, sismik aktivitelerle karşı karşıya kaldığı durumlarda taşıyıcı elemanlarında çekme ve kesme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu kesme ve çekme gerilmeleri yapılarda oluşan başlıca

hasarların nedenleri olarak göze çarpmaktadır. Yazarlar Beylerbeyi sarayında yapmış oldukları araştırmada; duvar ve harç örnekleri alınarak laboratuvar ortamında bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Bu deney sonucunda yapıdaki yığma tuğla duvarların basınç dayanımını 10MPa, çekme dayanımını ise 0,85 MPa olarak bulmuşlardır. Ayrıca literatür araştırmalarında küfeki taşının ortalama basınç dayanımı 16 MPa ile ortalama çekme dayanımı 3.2 MPa olduğu bilgisine ulaşılmıştır. Tophane-i Âmiredeki gerilmelerin fazla olduğu bölgelerde küfeki taşı kullanılmıştır. Ancak yapıda kullanılan malzemelerin basınç ve çekme dayanımı ile ilgili herhangi bir bilgi bulunmadığından yapının güvenli tarafta kalıp kalmayacağı bu bilgiler ışığında değerlendirilebilecektir. Ancak olası hasarın kemer duvar birleşim bölgelerinde oluşabileceği değerlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan model ayarlama işlemlerinin yapının maruz kaldığı deprem yüklerine olan etkiside değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan analizler lineer davranış spektrumu ile yapıldığı için model ayarlamadan önce ve sonra yapının peryotlarının alacağı spektral ivmelere bu konuda fikir verecektir. Model ayarlama işleminden önce yapının ilk peryodu davranış spektrumunda yatay bölgeyi T_B'den büyük olduğu için geçtiği, diğer periyodların T_B'den küçük olduğu görülmektedir. Model ayarlama işleminden sonra ise tüm önemli periyotların T_B'den küçük kaldığı ve yapının davranış spektrumundan yatay bölgeden ivme aldığı görülmektedir. Bu nedenle model ayarlama işlemleri nedeniyle yapıya gelen kuvvetlerin küçük bir miktarda arttığı görülmektedir.

BÖLÜM 5. SONUÇ

Mevcut kültürel mirasımızın gelecek nesillere aktarılabilmesi için tarihi yapılarımızın korunması gerekmektedir. Bunun içinde tez konusu olan çalışmanın daha yaygın hale getirilerek tarihi yapılarımızın yapı sağlığının irdelenmesi ve izlenmesi gerekmektedir. Kültürel mirasımızın korunmasının en iyi yolu, tarihi yapıların hasar almadan önce bu yapılar üzerinde yapılacak olan deneysel ve sayısal çalışmalar ışığında gerekli müdahalelerin yapılmasıdır. Öncelikle deneysel çalışmalar yapılması, sonrasında sayısal model oluşturulması, oluşturulan sayısal modelin deneysel çalışmalarla elde edilen verilerle güncellenmesi, nihayetinde de güncellenmiş sayısal model üzerinde statik ve dinamik analizlerin yapılması gerekmektedir. Ortaya çıkan analiz sonuçları ile yapının güvenli tarafta kalıp kalmayacağı değerlendirilerek gerekli çalışmalar yapılabilmektedir. Bu tez konusu araştırma Tophâne-i Âmire için bir altlık oluşturmuş ve ileriki yıllarda yapılacak olan çalışmalara referans olma özelliği taşımaktadır.

Tarihi Tophâne-i Âmirenin modal frekansları, sönüm oranları ve mod şekilleri ortam titreşim araştırması ve sayısal model ile belirlenmiştir. Yapının geometrisi dikdörtgen olup üst örtü sisteminde kubbe ve tonozlar bulunmaktadır. Dikdörtgen ve kubbe geometrili yapının ikinci, beşinci ve yedinci mod şekilleri LD yönünde birinci, üçüncü, dördüncü, altıncı ve sekizinci mod şekilleri TD yönünde dokuzuncu mod şekli TD, LD ve yerçekimi yönünde onuncu, on birinci ve on ikinci mod şekilleri ise TD ve hafif yerçekimi yönündedir. Farklı ve homojen malzeme özelliğine sahip yapının sayısal modal analizinde, modal davranışın yerel modlarla karakterize olduğu ortaya çıkmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçları kullanılarak daha doğru bir sayısal model elde edilmeye çalışılmıştır. Deneysel verilerle sayısal veriler birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Bunun nedeni ise yapının geometrisinin çok iyi modellenmesinden kaynaklanmaktadır. Üç ayrı malzemenin elastisite modülü tek aşamada ayarlanarak yapının sayısal modellemesi güncellenmiştir. Güncelleme parametresi olan elastisite modülleri sırasıyla; E1=9500 MPa, E2=5450 MPa ve E3=2500 MPa olarak elde edilmiştir. Güncellenmiş sayısal model ile ilk oluşturulan sayısal modelin kütle katılım oranları hemen hemen aynı olduğu ortaya çıkmıştır. Her iki yönde kütle katılım oranlarının %90 üzerinde olması için 200 mod gerekmiştir.

Güncellenmiş sayısal modelde, yapının üst örtüsünde kullanılan malzemenin elastisite modülünün daha düşük olduğu (E3), yapının temel hizasında, kolonlarda ve kemerlerde kullanılan malzemenin elastisite modülünün daha yüksek olduğu anlaşılmıştır (E1). Tophâne-i Âmirenin taşıyıcı sistemleri çok iyi kurgulanmıştır. Temel seviyesinde, kemerlerde ve kolonlarda oluşabilecek yüksek gerilmelerin karşılanabilmesi için bu bölgelerde küfeki taşı kullanılmış, üst örtüde ise yapıya fazla yük gelmemesi ve basınca fazla maruz kalmadığı için tuğla kullanılmıştır. Taşıyıcı duvarlarda ise bu iki malzeme birer sıra arayla birlikte örülmüştür.

Deneysel yöntemlerle yapı sağlığı izlenirken, elde edilen verilerde bir miktar farklılıklar oluşsa da, yapı sağlığı izleme sonuçları uzun vadeli izleme için çok faydalı olacaktır. Uzun vadeli yapı sağlığı izleme sisteminde ölçümler sırasında, yapının dinamik parametrelerinde değişiklik meydana gelmesi durumunda yapının hasar aldığı sonucuna varılabilmektedir. Böylelikle erken yapılacak olan müdahaleler yapının gelecek nesillere daha iyi aktarılmasını sağlayacaktır. Tarihi yığma yapıların sismik güvenlik açığı değerlendirmesi, dinamik özellikler ve kısıtlama koşulları da dahil olmak üzere gerçek koşullarının bilinmesi gerekmektedir. Aynı zamanda yapıyı temsil edecek olan sayısal modelde gerçek deprem verileri kullanılarak simülasyon yapılması son derece önemlidir. Tophâne-i Âmire yapısında deneysel yöntemin ilk üç modu ile sayısal modelin birinci, ikinci ve dördüncü modları arasındaki MAC değerleri 0.92'nin üzerinde olan çok iyi oranlar elde edilmiştir. OMA'nın ilk üç modunun frekansları sırasıyla 2.905 HZ, 4.199 Hz ve 6.055 Hz olarak elde edilmiş, sayısal modelin birinci, ikinci ve dördüncü mod frekansları ise sırasıyla 2.839 Hz, 4.295 Hz, 6.693 Hz olarak ayarlanmıştır. Yapılan sismik analizde; maksimum S22 (dikey) gerilme güney cephenin ortadaki büyük kemerinde 11.34 MPa, minimum S22 (dikey) gerilme batı cephesinde -0.85 MPa olarak oluşmaktadır. Maksimum S11 (yatay) gerilme batı cephesine yakın ve paralel olan iç kemerde 8.51 MPa, maksimum S12 (kesme) gerilmesi ise batı cephesinde 5.53 MPa olarak oluşmaktadır. Çubuk elemanlarda; maksimum moment gerilmesi 14.6 MPa, maksimum kesme gerilmesi 1.09 MPa ve maksimum basınç gerilmesi 1.55 MPa olarak gözlemlenmiştir. Yapı sağlığı için referans noktası oluşturacak olan bu tez konusu çalışmada; Tophâne-i Âmirede deneysel ve sayısal yöntemlerle elde edilen verilerin literatüre kazandırılması hedeflenmiştir.

KAYNAKÇA

[1] O. CEYLAN, «Top Döküm Binaları (Tophane-i Amire) ve Onarımları,» *Tasarım Kuram,* cilt 2, no. 3, pp. 43-56, 2003.

[2] F. Aras, L. Krstevska, G. Altay ve L. Taskov, «Experimental and numerical modal analyses of a historical masonry palace,» *Construction and Building Materials,* no. 25, pp. 81-91, 2011.

[3] Sap 2000, *Yapısal Analiz Programı, Entegre Sonlu Elemanlar Analizi ve Yapı Tasarımı,* California: Analiz Referansı, Berkeley, 2006.

[4] S. A. Kahraman ve Y. Dağlı, «İki yüz Kırk Yedinci Bölüm; Tophane Şehrinin Hayır Eserleri, Görülecek Yerleri,»*Günümüz Türkçesiyle Evliya Çelebi Seyahatnamesi*, İstanbul, 1Cilt, 5. Baskı, Yapı Kredi Yayınları, 2003, pp. 395-400.

[5] H. H. Ayvansarayi, *Hadikatü'l –cevami,* cilt II, İstanbul, 1281,Mehmed Raif'de de Tophâne'nin ne zaman yapıldığının tam olarak bilinmediğini belirtir ve Fetihten önce yapılmış olabileceğine dair Ayvansarayi'nin ifadelerini kaynak göstermeksizin ifade eder (Mir'at –ı İstanbul, İstanbul 1314. S. 369).

[6] «Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü, Ani Tarihi Kenti (Kars),» T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı , [Çevrimiçi]. Available: https://kvmgm.ktb.gov.tr/TR-45340/ani-tarihi-kenti-kars.html. [Erişildi: 05 05 2020].

[7] C. Çelik ve H. Yıldız, «Anadolu Ajansı; Medeniyetler Beşiğii Havadan Görüntülendi,» 17 06 2017. [Çevrimiçi]. Available: https://www.aa.com.tr/tr/kultur-sanat/medeniyetler-besigi-havadan-goruntulendi/843405. [Erişildi: 10 05 2020].

[8] A. G. URAL, «Heterotopik Bir Mekân: Tophane-i Amire Kültür ve Sanat Merkezi,» *Mimarlık ve Yaşam Dergisi,* cilt 4, no. 1, pp. 79-91, 2019.

[9] V. Compan, P. Pachon ve M. Camara, «Ambient vibration testing and dynamic identification of a historical building. Basilica of the Fourteen Holy Helpers (Germany),» *Procedia Engineering,* no. 199, p. 3392–3397, 2017.

[10] İ. Çalik, A. Bayraktar, T. Türker ve Ö. İ. Tuluk, «Ahşap Camilerin Dinamik Davranışına Restorasyon Etkisinin Çevresel Titreşim Yöntemiyle İncelenmesi,»*5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu,* Erzurum, 1-2 Ekim 2015.

[11] P. Pachón, M. Infantes, M. Cámara, V. Compán, E. G. Macías, M. I. Friswelld ve R. C. Triguero, «Evaluation of optimal sensor placement algorithms for the Structural Health Monitoring of architectural heritage. Application to the Monastery of San Jerónimo de Buenavista (Seville, Spain),» *Engineering Structures* , cilt 202, no. 109843, 2020.

[12] C. Hansapinyo ve N. Poovarodom, «Ambient Vibration Tests and Finite Element Analysis for Dynamic Properties of Brick Masonry Inverted Bell-Shaped Chedi,» *APCBEE Procedia,* no. 9, pp. 212-216, 2014.

[13] K. Beyen, «Structural identification for post-earthquake safety analysis of the Fatih mosque after the 17 August 1999 Kocaeli earthquake,» *Engineering Structures,* no. 30, p. 2165–2184, 2008.

[14] M. A. Chiorino, R. Ceravolo, A. Spadafor, L. Z. Fragonara ve G. Abbiati, «Dynamic Characterization of Complex Masonry Structures: The Sanctuary of Vicoforte,» *INTERNATIONAL JOURNAL OF ARCHITECTURAL HERITAGE,* cilt 3, no. 5, p. 296–314, 2011.

[15] İ. Çalik, A. Bayraktar, T. Türker ve A. Ashour, «Experimental Dynamic Behaviors and Empirical Frequency Formulas for Historical Timber Mosques,» *Structural Engineering International,* cilt 29, no. 3, pp. 404-411, 2019.

[16] E. Spoldi ve S. Russo, «Damage Assessment and Dynamic Characteristics of Temples in Nepal Post Gorkha 2015 Earthquake,» *International Journal of Architectural Heritage Conservation, Analysis, and Restoration,* 2019.

[17] E. Mesquita, F. Brandão, A. Diogenes, P. Antunes ve H. Varum, «Ambient vibrational characterization of the Nossa Senhora das Dores Church,» *Engineering Structures and Technologies,* cilt 9, no. 4, pp. 170-182, 2017.

[18] İ. Kazaz, P. Gülkan ve E. Kazaz, «Numerical Assessment of Cracks on a Freestanding Masonry Minaret,» *International Journal of Architectural Heri,* p. https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1629046, 2019.

[19] Y. S. Erdoğan, T. Kocatürk ve C. Demir, «Investigation of the Seismic Behavior of a Historical Masonry Minaret Considering the Interaction with Surrounding Structures,» *Journal of Earthquake Engineering,* cilt 23, no. 112-140, 2019.

[20] K. Hamdaoui, H. Zibdeh ve K. A. Bani, «Structural Health Monitoring of a Historical Monument Based on Ambient Vibration Tests,» %1 içinde *The 11th Arab Structural Engineering Conference,* KFUPM, Dhahran, Saudi Arabia, 25-27 Ocak 2009.

[21] L. F. Ramos, R. Aguilar, P. B. Lourenço ve S. Moreira, «Dynamic Sructural Health monitoring of Saint Torcato Church,» *Mechanical Systems and Signal Processing,* no. 35, pp. 1-15, 2013.

[22] G. Milani, M. Valente ve C. Alessandri, «The narthex of the Church of the Nativity in Bethlehem: A non-linear finite element approach to predict the structural damage,» *Computers and Structures,* no. 207, p. 3–18, 2018.

[23] F. Aras ve G. Altay, «Investigation of mechanical properties of masonry in historical buildings,» *Građevinar,* cilt 67, no. 5, pp. 461-469, 2015.

[24] F. Aras ve G. Altay, «Seismic evaluation and structural control of the historical Beylerbeyi Palace,» *STRUCTURAL CONTROL AND HEALTH MONITORING,* no. 22, p. 347–364, 2015.

[25] R. Talep, F. A. Bouriche , A. Remas, M. Boukri ve F. Kehila, «Use of Ambient and Forced Vibration Tests to Evaluate Seismic Properties of an Unreinforced Masonry Building Rehabilitated by Dampers,» *15th World Conference on earthquake Engineering,* Lisboa (Portugal), 2012.

[26] G. Lacanna, M. Ripepe, E. Marchetti, M. Coli ve C. A. Garzonioc, «Dynamic response of the Baptistery of San Giovanni in Florence, Italy, based on ambient vibration test,» *Journal of Cultural Heritage,* no. 20, pp. 632-640, 2016.

[27] G. Comanducci, N. Cavalagli, M. Gioffré, M. Trequattrini ve F. Ubertini, «Ambient Vibration Testing of a monumental fountain by contact and non-contact sensing techniques,» *Procedia Engineering,* no. 199, p. 3338–3343, 2017.

[28] F. Lorenzoni, F. Casarin, C. Modena, M. Caldon, K. Islami ve F. da Porto, «Structural health monitoring of the Roman Arena of Verona, Italy,» *Journal of Civil Structural Health Monitoring,* cilt 3, no. 4, pp. 227-246, 2013.

[29] G. Bongiovanni, G. Buffarini, P. Clemente ve F. Saitta, «Time and Frequency Domain Analyses in the Experimental Dynamic Behaviour of the Marcus Aurelius' Column,» *International Journal of Architectural Heritage,* pp. 1-15, 2019, DOI: 10.1080/15583058.2019.1706785.

[30] F. Lorenzoni, M. R. Valluzzi, A. Minello, M. Salvalaggio ve C. Modena, «Calibration of the dynamic behaviour of incomplete structures in archeological sites: the case of Villa Diomede portico in Pompeii,» *Procedia Engineering,* no. 199, p. 3368–3373, 2017.

[31] T. Türker ve A. Bayraktar, «Structural safety assessment of bowstring type RC arch bridges using ambient vibration testing and finite element model calibration,» *Measurement,* no. 58, pp. 33-45, 2014.

[32] A. C. Altunisik, E. Kalkan, F. Y. Okur, K. Ozgan, O. Ş. Karahasan ve A. Bostanci, «Non-destructive modal parameter identification of historical timber bridges using ambient vibration tests after restoration,» *Measurement,* no. 146, pp. 411-424, 2019.

[33] C. Gentile ve N. Gallino, «Ambient vibration testing and structural evaluation of an historic suspension footbridge,» *Advances in Engineering Software,* no. 39, p. 356–366, 2008.

[34] T. Aoki , D. Sabia, D. Rivella ve T. Komiyama, «Structural Characterization of a Stone Arch Bridge by Experimental Tests and Numerical Model Updating,» *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration,* cilt 1, no. 3, pp. 227-250, 2007.

[35] C. Pepi, M. Gioffre`, G. Comanduccia, N. Cavalagli, A. Bonaca ve F. Ubertini, «Dynamic characterization of a severely damaged historic masonry bridge,» *Procedia Engineering,* no. 199, p. 3398–3403, 2017.

[36] B. Conde, L. F. Ramos, D. V. Oliveira, B. Riveiro ve M. Solla, «Structural assessment of masonry arch bridges by combination of non-destructive testing techniques and three-dimensional numerical modelling: Application to Vilanova bridge,» *Engineering Structures,* no. 148, p. 621–638, 2017.

[37] T. Liu, Q. Zhang, T. Zordan ve B. Briseghella, «Finite Element Model Updating of Canonica Bridge Using Experimental Modal Data and Genetic Algorithm,» *Liu, T., Zhang, Q., Zordan, T., & Briseghella, B. (2016). Finite Element Model Updating of Canonica Bridge Using Experimental MStructural Engineering International,* cilt 26, no. 1, pp. 27-36, 2006.

[38] B. Sevim, A. Bayraktar, A. C. Altunışık, S. Atamtürktür ve F. Birinci, «Finite element model calibration effects on the earth quake response of masonry arch bridges,» *Finite Elements in Analysis and Design* , no. 47, p. 621–634, 2011.

[39] G. Fiorentino, D. Lavorato, G. Quaranta, A. Pagliaroli, G. Carlucci, C. Nuti, F. Sabetta, G. D. Monica, M. Piersanti, G. Lanzo, G. C. Marano, G. Monti, N. Squeglia ve R. Bartelletti, «Numerical and experimental analysis of the leaning Tower of Pisa under earthquake,» *Procedia Engineering* , no. 199, p. 3350–3355, 2017.

[40] C. Gentile ve S. Saisi, «Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment,» *Construction and Building Materials,* no. 21, p. 1311–1321, 2007.

[41] D. Pellegrini, M. Girardi, P. B. Lourenço, M. G. Masciotta, N. Mendes, C. Padovani ve L. F. Ramos, «Modal analysis of historical masonry structures: Linear perturbation and software benchmarking,» *Construction and Building Materials,* no. 189, p. 1232–1250, 2018.

[42] D. Foti, M. Diaferio, N. I. Giannoccaro ve M. Mongelli, «Ambient vibration testing, dynamic identification and model updating of a historic tower,» *NDT&E International,* no. 47, pp. 88-95, 2012.

[43] S. Castellaro, L. Perricone, M. Bartolomei ve S. Isani, «Dynamic Characterization of the Eiffel Tower,» *Procedia Engineering,* no. 199, p. 3332–3337, 2017.

[44] R. Sancibrian, I. Lombillo, E. G. Sarabia, Y. Boffill, H. Wong ve L. Villegas, «Dynamic identification and condition assessment of an old masonry chimney by using modal testing,» *Procedia Engineering,* no. 199, p. 3410–3415, 2017.

[45] F. Peña , P. B. Lourenço, N. Mendes ve D. V. Oliveira, «Numerical models for the seismic assessment of an old masonry tower,» *Engineering Structures ,* no. 32, pp. 1466-1478, 2010.

[46] E. G. Macías, L. Ierimonti, I. Venanzi ve F. Ubertini, «An Innovative Methodology for Online Surrogate Based Model Updating of Historic Buildings Using Monitoring Data,» *International Journal of Architectural Heritage : Conservation, Analysis, and Restoration,* pp. 1-21, 2019: DOI:10.1080/15583058.2019.1668495.

[47] C. Gentile, A. Saisi ve A. Cabboi, «Structural Identification of a Masonry Tower Based on Operational Modal Analysis,» *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration,* cilt 9, no. 2, pp. 98-110, 2014.

[48] R. M. Azzara, M. Girardi, V. Iafolla, D. M. Lucchesi, C. Padovani ve D. Pellegrini, «Ambient Vibrations of Age-old Masonry Towers: Results of Long-term Dynamic Monitoring in the Historic Centre of Lucca,» *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration,* 2019, DOI: 10.1080/15583058.2019.1695155.

[49] D. Sabia, T. Aoki, R. M. Cosentini ve R. Lancellotta, «Model Updating to Forecast the Dynamic Behavior of the Ghirlandina Tower in Modena, Italy,» *Journal of Earthquake Engineering,* cilt 19, no. 1, pp. 1-24, 2015.

[50] S. V. Calcina, L. Piroddi ve G. Ranieri, «Vibration analysis of historic bell towers by means of contact and remote sensing measurements,» *Nondestructive Testing and Evaluation,* cilt 31, no. 4, pp. 331-359, 2016.

[51] G. Standoli, E. Giordano, G. Milani ve F. Clementi, «Model Updating of Historical Belfries Based on Oma Identification Techniques,» *International Journal of Architectural Heritage,* pp. 1-25, 2020, DOI: 10.1080/15583058.2020.1723735.

[52] G. Osmancikli, Ş. Uçak, F. N. Turan, T. Türker ve A. Bayraktar, «Investigation of restoration effects on the dynamic characteristics of the Hagia Sophia bell-tower by ambient vibration test,» *Construction and Building Materials,* no. 29, p. 564–572, 2012.

[53] C. A. Altunışık, S. Adanur, A. F. Genc, M. Günaydın ve F. Y. Okur, «Non-destructive testing of an ancient Masonry Bastion,» *Journal of Cultural Heritage,* no. 22, pp. 1049-1054, 2016.

[54] S. Tiberti, M. Acito ve G. Milani, «Comprehensive FE numerical insight into Finale Emilia Castle behavior under 2012 Emilia Romagna seismic sequence: Damage causes and seismic vulnerability mitigation hypothesis,» *Engineering Structures,* no. 117, p. 397–421, 2016.

[55] A. Nour, A. Cherfaoui, V. Gocevski ve P. Léger, «Probabilistic seismic safety assessment of a CANDU 6 nuclear power plant including ambient vibration tests: Case study,» *Nuclear Engineering and Design,* no. 304, p. 125–138, 2016.

[56] H. Kim, Y. -N. Ko ve J. -M. Cho, «Evaluation of Ambient Vibration Test Method for Historic Wooden Buildings Based on the Rigid Diaphragm Assumption,» *Journal of Asian Architecture and Building Engineering,* cilt 15, no. 2, pp. 287-294, 2016.

[57] I. Prowell, A. Elgamal, J. E. Luco ve J. P. Conte, «In-situ Ambient Vibration Study of a 900-kw Wind Tirbune,» *Journal of Earthquake Engineering,* pp. 1-12, 2019, DOI:10.1080/13632469.2019.1662344.

[58] B. Sevim, A. C. Altunışık ve A. Bayraktar, «Earthquake Behavior of Berke Arch Dam Using Ambient Vibration Test Results,» *Journal Of Performance Of Constructed Facılıtıes,* cilt 26, no. 6, pp. 780-792, 2012.

[59] B. J. Schwarz ve M. Richardson, Experimental Modal Analysis, Orlando, USA: CSI Reliability Week, 1999.

[60] R. Cantieni, Experimental methods used in system identification of civil engineering structures, İsviçre: rci dynamics, Structural Dynamics Consultants, 2004.

[61] T. Türker, *Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti Ve Değerlendirilmesi,* Trabzon : KATÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü/İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 2011.

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

[63] R. Brincker, L. Zhang ve P. Andersen, «Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition,» *SMART MATERIALS AND STRUCTURES,* cilt 10, pp. 441-445, 2001.

[64] J. S. Bendat ve A. G. Piersol, Random Data: Analysis and Measurement Procedures, USA: 3th Edition, John Wiley and Sons, 2004.

[65] D.-. J. Yu ve W.-. X. Ren, «EMD-based stochastic subspace identification of structures from operational vibration measurements,» *Engineering Structures,* cilt 27, pp. 1741-1745, 2005.

[66] V. Yerlici ve H. Luş, Yapı Dinamiğine Giriş, İstanbul: Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi, İkinci Baskı, 2014.

[67] A. K. Chopra, Yapı Dinamiği, Teori ve Deprem Mühendisliği Uygulamaları, Ankara: Palme Yayıncılık, Dördüncü Baskıdan Çeviri, 2015.

[68] M. I. Friswell ve J. E. Mottershead, Finite element model updating in structural dynamics, The Netherlands: Dordrecht: Kluwer Academic, 1995.

[69] E. B. Şapolyo, «Türk Kültür Tarihi, Tophaneler,» *Önasya, Aylık Türkoloji Fikir ve Aktüalite Mecmuası,* cilt 5, no. 50, 5 (1968).

[70] A. Y. Kubilay, «Tophane-i Âmire,» *Dünden Bugüne İstanbul Ansiklopedisi,* cilt 7, pp. 278-280, 1994.

[71] M. Cezar, «Osmanlı devrinde İstanbul yapılarında tahribat yapan yangınlar ve tabii afetler,» *Güzel Sanatlar Akademisi Türk Sanʾatı Tarihi Enstitüsü yayınları ,* cilt 1, pp. 327-414, (1963).

[72] Ayverdi, «Osmanlı Mimarisinde Fatih Devri,» cilt IV, p. 662.

[73] A. Refik, «XII. Asırda İstanbul Hayatı,» p. 157, 1998.

[74] Hammer, «Tophâne-i Âmire Dökümhanesi'nin binasi için lâzim taşlar Kavak iskelesi civarinda bulunan taş ocaklanndan temin edilmiştir (Ö. L. Barkan, Süleymaniye Cami ve imareti inşaati: 1550-1557, Ankara 1979,1,354),» %1 içinde *Constantınopolis,*, cilt II, p. 178.

[75] S. Aydüz, «İstanbul'un Gümüş Sehri: Tophane ve Tophâne-i Âmire,» *Akademik Arajtirmalar Dergisi,* no. 47-48, pp. 131-160, 2010-2011.

[76] T. İzzî, «Târih, *İstanbul 1784, Orhonlu, Tophâne*, İstanbul, 1784, pp. 27-28.

[77] U. Derman, «"İstanbul, Hat",» *DİA,* cilt XXIII, p. 270, İstanbul, 2001.

[78] P. Ğ. İnciciyan, A. Tercüme ve H.D, XVIII. Asırda İstanbul, İstanbul: İstanbul Fetih Cemiyeti, 1976.

[79] M. V. R. A. I. M. (.-1. Fıransız Seyyah, Artist, *İstanbul Gravürlerinden Tophâne-İ Âmire Ve Çevresinden Görünümler.* [Art]. Voyage Pittoresque Constantinople Et Des Reives Du Bosphore , Paris, 1819.

[80] M. Erdoğan, «Osmanlı Mimarisi Tarihinin Otantik Yazma Kaynakları,»*Vakıflar Dergisi*, İstanbul, Baha Matbaası, 1965, Sayı: VI, pp. 133-136.

[81] G. F. A. D. Choıseul-Gourffıer, Artist, *İstanbul'da Tophane Meydanı manzarası. Arka planda İmparatorluk Cephaneliği ve Kılıç Ali Paşa Camii.* [Art]. Aikaterini Laskaridis Vakfı Kütüphanesi, 1822.

[82] J. F. Lewis ve (1805-1876), Artists, *Tophane Büyük Top Döküm Binası Kapısı Giriş Saçağı Ve Rampa (Lewis (1837) J.F. Lewis Illustrarions Of Constantinopole Made During A Residence İn That Citiy İn The Years.* [Art]. Londra, 1835, 1836.

[83] Ş. Tunç, «Tophane-i Amire ve Osmanlı Devleti'nde Top döküm Faaliyetleri,» İstanbul, 2004, p. 11.

[84] M. Kütükoğlu, «Baruthâne-i Âmire,» *İslam Ansiklopedisi,* cilt 5, pp. 96-98, 1940, İstanbul.

[85] E. Gönen, «The Metamorphosis of an imperial arsenal (Tophane-i Amire in İstanbul),» *World Heritage and Sustainable Development,* cilt 2, pp. 679-688, 2008.

[86] C. Cangül, «Galata Kulesi'nden Tophane-i Amire,» [Çevrimiçi]. Available: https://tr.pinterest.com/pin/614037730418060369/. [Erişildi: 12 05 2020].

[87] N. KAHRAMAN ve R. ARIKAN, *BAŞBAKANLIK OSMANLI ARŞİVİ BELGELERİNDE KARAMÜRSEL TAŞI VE İZMİT BÖLGESİ DİĞER TAŞ OCAKLARI,* Kocaeli: Kocaeli Büyükşehir Belediyesi.

[88] J. Pervititch, Artist, *Jacques Pervititich Sigorta Haritalarında İstanbul.* [Art]. Tarih Vakfı Yurt Yayınları, Kent Araştırmaları Dizisi, 1927.

[89] E. Gönen, «Sur La Rehabilitation Et L'avenir De La Fonderie Imperiale D'istanbul (Tophane-I Amire),» %1 içinde *Anatolia Moderna VIII.*, Paris, 1999, 220-236.

[90] T. Öz, İstanbul'da Fatih Tophanesi, Ankara: Türk Tarih Kurumu, 1970.

[91] A. İ. Ünay, Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, Ankara: ODTÜ Mimarlık Fakültesi, 2002.

[92] H. Böke, S. Akkurt ve B. İpekoğlu, «Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harcı ve Sıvaların Özellikleri,» *Yapı Dergisi,* cilt 69, pp. 90-95, 2004.

[93] N. Çamlıbel, Geleneksel Yapılarda Stabilitenin İyileştirilmesi, İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, 1983.

[94] M. Kumral , G. Şans, C. Yalçın, M. Kaya ve M. Budakoğlu, «Çatalca (İstanbul) Civarındaki Tarihi Küfeki Taşının Oluşumunda Fiziksel Ve Kimyasal Özelliklerin Etkileri,» *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* cilt 8, no. 1, pp. 278-287, 2019.

[95] A. Ajansı, «Yarım asırdır "küfeki taşı" keserek geçimini sağlıyor,» TRT Haber, [Çevrimiçi]. Available: https://www.trthaber.com/haber/yasam/yarim-asirdir-kufeki-tasi-keserek-gecimini-sagliyor-391545.html. [Erişildi: 12 05 2020].

[96] E. Arıoğlu ve N. Arıoğlu, «Mimar Sinanın Taşıyıcı Olarak Kullandığı Küfeki Taşının Mühendislik Gizemi,» *Mimar Sinan Dönemi Yapı Etkinlikleri Semineri*, Çamlıca/İstanbul, 1999.

[97] N. Arıoğlu ve N. Arıoğlu, «Engineering mystery of master architect Sinan's ''Kufeki shell limestone,» *Archit Sci Rev* , cilt 48, pp. 72-163, 2005.

[98] A. M. Türk ve C. Cosgun, «Seismic Behaviour and Retrofit of Historic Masonry Minaret,» *Građevinar,* cilt 64, no. 1, pp. 39-45, 2019.

[99] C. Demir ve A. İlki, «Characterization of the materials used in the multi-leaf masonry walls of monumental structures in Istanbul, Turkey,» *Construction and Building Materials* , cilt 64, p. 398–413, 2014.

[100] M. S. Giampiccoli , Artist, *Tophanei amire (kağıt üzerinde oyma) görünümü. Marco Sebastiano Giampiccoli tarafından Cosimo Comidas de Carbognano'dan sonra, Carbognano'dan, Mevcut durumun topografik açıklaması, Konstantinopolisin figürlerle zenginleşmesi.* [Art]. Bassano, 1794.

[101] O. T. Yarım ve Ö. Özkan, «İstanbul İli, Beyoğlu İlçesi, 2498 Ada 71-72-73-74 Parsellerde Yapılması Planlanan Galataport – Salıpazarı Kruvaziyer Liman Projesine Ait Zemin Etüt Raporu,» Yayımlanmamış, İstanbul, 2014.

[102] AFAD, «Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması (Detaylı Rapor),» T.C. İÇİŞLERİ BAKANLIĞI (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı), [Çevrimiçi]. Available: https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/detayliRapor.xhtml. [Erişildi: 15 05 2020].

[103] AFAD, «Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması,» T.C. İÇİŞLERİ BAKANLIĞI (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı), [Çevrimiçi]. Available: https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml. [Erişildi: 12 05 2020].

[104] R. A. Votsis, N. Kyriakides, C. Z. Chrysostomou, E. Tantele ve T. Demetriou, «Ambient vibration testing of two masonry monuments in Cyprus,» *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, no. 43, pp. 58-68, 2012.

[105] H. Şahenk, Artist, *TOPHANE-İ ÂMİRE YIKILIRKEN*. [Art]. ALMAN ARKEOLOJİ ENSTİTÜSÜ FOTOĞRAF-HARİTA ARŞİVİ, 1950.

[106] T. C. Kars Valiliği, «Ani Antik Kenti,» [Çevrimiçi]. Available: http://www.kars.gov.tr/ani-antik-kenti. [Erişildi: 13 05 2020].

[107] Tarihçi İzzi, «Târih,» İstanbul, 1784, pp. 27-28.