



T.C.  
EGE ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü



# TARİHİ YAPILARIN DİNAMİK VE STATİK ANALİZİ – EFES ST. JEAN BAZİKILASI ÖRNEĞİ

Yüksek Lisans Tezi

Murat YILDIZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir  
2024



T.C.  
EGE ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü

**TARİHİ YAPILARIN DİNAMİK VE STATİK  
ANALİZİ – EFES ST. JEAN BAZİLİKASI ÖRNEĞİ**

Murat YILDIZ

Danışman : Doç. Dr. Ayhan NUHOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir  
2024



Murat Yıldız tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan ‘‘Tarihi Yapıların Dinamik ve Statik Analizi – Efes St. Jean Bazilikası rneği’’ başlıklı bu alışma E Lisansüstü Eğitim ve ğretim Yönetmeliği ile E Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve ğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 04/09/2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri yeleri**

**İmza**

**Jüri Başkanı** : Prof. Dr. Berra Gültekin SINIR

**Raportör ye**: Doç. Dr. Ayhan NUHOğLU

**ye** : Prof. Dr. Bengi ARISOY



# EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Tarihi Yapıların Dinamik ve Statik Analizi – Efes St. Jean Bazilikası Örneği” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

04/09/2024

İmzası

Murat YILDIZ



**ÖZET****Tarihi Yapıların Dinamik ve Statik Analizi – Efes St. Jean  
Bazilikası Örneği**

YILDIZ, Murat

YL Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ayhan NUHOĞLU

Eylül 2024, 90 sayfa

Tarihi yapılar inşa edildikleri dönemin kültürel, beşeri, ekonomik, dini, sosyal özelliklerini yansıtan önemli unsurlardır. Kültürel mirasın aktarımında en önemli faktörlerden birisi olan bu yapılar, inşa edildikleri dönemin coğrafi özellikleri, meteorolojik etkileri gibi faktörlere bağlı olarak yapısal çeşitlilik göstermektedirler. Gerek günümüzde stabilitesini koruyarak ayakta kalan tarihi yapıların, gerek bir kısmı yıkılarak zarar görmüş olan yapıların şiddetli deprem tesirindeki yapı davranışı günümüzde ilginin arttığı araştırma alanlarından biri olarak ön plana çıkmaktadır. Kültürel mirasın gelecek nesillere aktarımı için büyük önem arz eden yapıların üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturularak olası şiddetli bir deprem veya doğal afet etkisinde yapısal güvenliği ve deprem performansı belirlenebilmektedir.

Bu çalışmada, örnek yapı olarak seçilen İzmir ili Selçuk ilçesi Ayasuluk mevkinde yer alan St. Jean Bazilikası'nın yapısal davranışı ele alınmıştır. Çalışma kapsamında halihazırda yıkılmış durumda olan bir kısmı restore edilerek ayağa kaldırılmış yapının malzeme özellikleri ve taşıyıcı sistemi yerinde incelenmiş, ardından alınan malzeme numuneleri üzerinden yapının taşıyıcı sistemini oluşturan malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Analiz aşamasında, St. Jean Bazilikasına ait ana kütleli oluşturan kemerli kubbe ile örtülü olan bölümünün üç boyutlu sonlu eleman metodu ile analiz modeli oluşturulmuştur. Yapı modeli statik ve dinamik analizlere tabi tutulmuş, dinamik analizlerde geçmişte meydana gelmiş farklı depremlere ait kayıtlar ve spektrum fonksiyonlar dikkate alınarak olası şiddetli bir deprem kuvveti etkisi altında sergileyeceği davranış ortaya koyulmuştur. Bunun yanı sıra yapıda meydana gelen şekil değiştirme ve gerilme dağılımları dikkate alınarak yapının

geçmişte meydana gelmiş olası elverişsiz bir yük altında nasıl (deprem, meteoroloji etkiler, dış yükler vb.) yıkıma uğramış olabileceğine dair çıkarımlarda bulunulmuştur.

**Anahtar sözcükler:** Tarihi yapı, Yığma yapı, Sonlu elemanlar metodu, Sayısal modelleme, Kubbeli sistemler.



**ABSTRACT****Static and Dynamic Analysis of Historical Buildings: Efes St. Jean  
Basilica Example**

YILDIZ, Murat

MSc in Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ayhan NUHOĞLU

September 2024, 90 pages

Historical structures are important elements that reflect the cultural, human, economic, religious and social characteristics of the period in which they were built. These structures, which are one of the most important factors in the transmission of cultural heritage, create structural diversity depending on factors such as the period in which they were built, their geographical location and meteorological effects. The behavior of buildings that are still standing today in a state of stability or whose parts have been damaged by collapse, under the influence of earthquakes that occurred in the past or possible severe earthquakes, stands out as one of the research areas of increasing interest today. By creating three-dimensional finite element models of these structures, it is possible to determine their structural safety and seismic performance under potential severe earthquakes or natural disasters, which is of great importance for transferring cultural heritage to future generations.

In this study, the structural behavior of St. Jean Basilica located in Ayasuluk location in Selçuk District in İzmir, was examined as a case study. Within the scope of the study, the material properties and carrier system of the building, a part of which was already demolished and restored, were examined on site, and then the mechanical properties of the materials forming the load-bearing system of the building were determined based on the material samples taken. During the analysis phase, a three-dimensional analysis model of the section covered with an arched dome, which constitutes the main mass of St. Jean Basilica, was created using the three-dimensional finite element method. The building model was subjected to static and dynamic analyses, and its behavior under the influence of a possible severe earthquake force was

revealed by taking into account the records and spectrum functions of different earthquakes that occurred in the past. In addition, by taking into account the deformation and stress distributions that occurred in the structure, inferences were made about what kind of force the structure was destroyed in the past (earthquake, meteorological effects, external loads, etc.).

**Keywords:** Historical building, Masonry structure, Finite element method, Numerical modeling, Domed systems.



## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, tarihi yapıların statik ve dinamik analizlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, örnek yapı olarak seçilen St. Jean Bazilika örneği yerinde incelenmiş ve benzer mimari oluşuma sahip kemerli kubbe tipi yapılarla ilgili literatür araştırması yapılmıştır.

Bahse konu dini tarihi yapı bilgisayar ortamında modellenerek olası elverişsiz deprem yükü etkisindeki davranışı yorumlanmıştır. Yapıya ait elde edilen statik ve dinamik analiz sonuçları dikkate alınarak kültürel mirasın korunması ve aktarımında önemli rol oynayan tarihi yığma yapılar hakkında genel çıkarımlar elde edilmiştir.

İZMİR

04/09/2024

*Murat YILDIZ*



## İÇİNDEKİLER

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| İÇ KAPAK . . . . .  | ii           |
| KABUL VE ONAY SAYFASI . . . . .                                 | iii          |
| ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI . . . . .                        | v            |
| ÖZET . . . . .  | vii          |
| ABSTRACT . . . . .  | ix           |
| ÖNSÖZ . . . . .   | xi           |
| İÇİNDEKİLER . . . . .   | xiii         |
| ŞEKİLLER DİZİNİ . . . . .                                       | xvii         |
| TABLolar DİZİNİ . . . . .                                       | xxiii        |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ . . . . .                        | xxv          |
| 1 GİRİŞ . . . . .   | 1            |
| 1.1 Literatür Özeti . . . . .                                   | 2            |
| 2 TARİHİ YIĞMA YAPILAR . . . . .                                | 15           |
| 2.1 Yapıların Gelişimi . . . . .                                | 15           |
| 2.2 Kubbe Sistemli Tarihi Dini Yapı Örnekleri . . . . .         | 15           |
| 2.3 Tarihi Yığma Yapı Malzemeleri . . . . .                     | 19           |
| 2.3.1 Doğal taşlar . . . . .                                    | 20           |
| 2.3.2 Harman tuğlası . . . . .                                  | 21           |
| 2.3.3 Harçlar . . . . .   | 22           |
| 2.3.4 Kerpiç . . . . .  | 23           |
| 2.3.5 Ahşap . . . . .   | 24           |
| 2.4 Tarihi Yığma Yapılarda Taşıyıcı Sistem Elemanları . . . . . | 24           |
| 2.4.1 Taşıyıcı duvarlar . . . . .                               | 24           |
| 2.4.2 Temeller . . . . .  | 26           |
| 2.4.3 Kemerler . . . . .  | 26           |
| 2.4.4 Kubbeler . . . . .  | 28           |
| 2.4.5 Döşemeler . . . . .                                       | 30           |
| 2.4.6 Sütun ve ayaklar . . . . .                                | 31           |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.4.7 | Tonoz . . . . .   | 32 |
| 3     | TARİHİ YIĞMA YAPILARIN ANALİZİ . . . . .                                | 33 |
| 3.1   | Tarihi Yapılar İçin Deprem Kılavuzuna Göre Modelleme Esasları . . . . . | 33 |
| 3.2   | Modelleme Yöntem ve İlkeleri . . . . .                                  | 34 |
| 3.2.1 | Sonlu elemanlar metodu . . . . .  | 35 |
| 3.2.2 | Makro modelleme . . . . .   | 37 |
| 3.2.3 | Mikro modelleme . . . . .   | 38 |
| 3.3   | Yapıya Etki Eden Yükler . . . . .                                       | 39 |
| 3.3.1 | Sabit (zati) yükler . . . . .   | 40 |
| 3.3.2 | Hareketli yükler . . . . .  | 40 |
| 3.3.3 | Rüzgar ve kar yükü . . . . .  | 40 |
| 3.3.4 | Mesnet çökmesi . . . . .  | 40 |
| 3.3.5 | Deprem yükü . . . . .   | 41 |
| 3.4   | Analiz Yöntemi . . . . .  | 41 |
| 3.4.1 | Düşey ve yatay yükler altında statik analiz . . . . .                   | 42 |
| 3.4.2 | Dinamik analiz . . . . .  | 43 |
| 4     | ÖRNEK ÇALIŞMA: EFES ST. JEAN BAZİLİKASI . . . . .                       | 46 |
| 4.1   | Selçuk Ayasuluk Tepesi Coğrafi Özellikleri . . . . .                    | 46 |
| 4.2   | St. Jean Bazilikasının Yapısal Özellikleri . . . . .                    | 46 |
| 4.3   | St. Jean Bazilikası'nın Taşıyıcı Sistem Özellikleri . . . . .           | 47 |
| 4.4   | Bazilika Kalıntılarında Gözlemler ve Laboratuvar Çalışmaları . . . . .  | 48 |
| 4.4.1 | Mahalinde gözlem ve incelemeler . . . . .                               | 48 |
| 4.4.2 | Laboratuvarda yapılan fiziksel ve mekanik deneyler . . . . .            | 50 |
| 4.5   | Sonlu Eleman Modeli . . . . .   | 57 |
| 4.6   | Statik Analiz . . . . .   | 58 |
| 4.7   | Modal Analiz . . . . .  | 60 |
| 4.8   | Dinamik Analiz . . . . .  | 61 |
| 4.8.1 | Eşdeğer deprem yükü yöntemi . . . . .                                   | 61 |
| 4.8.2 | Davranış Spektrum Analizi (Response Spektrum) Yöntemi . . . . .         | 74 |
| 5     | SONUÇ . . . . .   | 80 |
|       | KAYNAKLAR DİZİNİ . . . . .  | 82 |
|       | TEŞEKKÜR . . . . .  | 89 |

ÖZGEÇMİŞ . . . . . 90





## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Şekil</u>  | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 1.1 St. Jean Bazilikası görünüşü (www.efes2000vakfi.com) . . . . .  | 2            |
| 1.2 Hırka-i Şerif Cami görseli (www.hirkaiserifvakfi.com) ve sonlu<br>elemanlar modeli (Dabanlı, 2008) . . . . .  | 3            |
| 1.3 S33 gerilme dağılımı a)gergisiz sistem b)gergili sistem (Güner, 2018)   | 4            |
| 1.4 Mehmet Ağa Cami ve sonlu eleman modeli (Gedik, 2008) . . . . .  | 5            |
| 1.5 Bursa Ördekli Cami A-A kesiti ve yapının bilgisayar ortamında<br>modellenmiş hali (Bağbanlı, 2009) . . . . .  | 5            |
| 1.6 Kubbeli örtü sistemine sahip cami örneklerinin sonlu eleman mo-<br>delleri (Bilgin, 2006) . . . . .   | 6            |
| 1.7 Sao Vicente de Fora Manastırına ait kemer yapısının ölçekli laborac-<br>tuvar modeli ve ABAQUS sonlu eleman modeli (Giordano et al.,<br>2002) . . . . . | 7            |
| 1.8 Süleymaniye Cami mevcut durum payandalı sistem için gerilme ve<br>yerdeğiştirme dağılımı (İzol, 2022) . . . . .   | 7            |
| 1.9 a)Kuvvet-yer değiştirme diyagramı, b)maksimum yükteki defor-<br>masyonlar, c)Nihai yükteki deformasyonlar (Lourenço, 2006) . . . . .                    | 8            |
| 1.10 Hekimoğlu Ali Paşa Cami, İstanbul Fethiye Cami ve Davutpaşa<br>Cami sonlu eleman modeli (Can ve Ünay, 2012) . . . . .                                  | 9            |
| 1.11 Küçük Ayasofya Cami dış görünüşü (Koçak, 1999) . . . . .   | 10           |
| 1.12 Küçük Ayasofya Cami sonlu eleman modeli (Koçak, 1999) . . . . .  | 10           |
| 1.13 Tokat Yağlıbasan Medresesi görünüşü (Türkecul, 2022) . . . . .   | 11           |
| 1.14 Yapının sonlu eleman modelleri: (a) yarım kubbeli (b) tam kubbeli<br>durum (Türkecul, 2022) . . . . .  | 11           |
| 1.15 Elekçi Köprüsü görünüşü ve sonlu eleman modeli (Anadut, 2016) . . . . .  | 12           |
| 1.16 Yozgat Saat Kulesi görünüşü ve sonlu eleman modeli (Anadut, 2016)  | 13           |
| 1.17 Ayasofya minareleri modelleri (Çarhoğlu vd., 2013) . . . . .   | 14           |
| 2.1 Ayasofya iç ve dış görünüşü (depositphotos.com) . . . . .   | 16           |
| 2.2 Ayasofya Cami planı (Yağlı, 2010) . . . . .   | 16           |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.3  | San Vitale Kilisesine ait iç görünüş ve plan (tr.wikipedia.org(b)) . . .  | 17 |
| 2.4  | Kariye Cami görünüşü ve mimari planı (Vakıflar Genel Müd. Arşivi)   | 18 |
| 2.5  | Süleymaniye Cami görünüş (www.fatih.gov.tr) ve planı (Orbeyi,<br>2012) . . . . .  | 18 |
| 2.6  | Selimiye Cami dış görünüş (Foto Enver Şengül) ve planı (Yağlı,<br>2010) . . . . .   | 19 |
| 2.7  | Yığma taş yapılar: a)moloz taş, b)kesme taş, c)iri kesme taş<br>(Lourenço, 1998) . . . . .  | 20 |
| 2.8  | Örgü tekniklerine göre tuğla çeşitleri: a)basit, b)çapraz, c)flaman<br>(Lourenço, 1998) . . . . .   | 21 |
| 2.9  | Romalılar zamanından yığma duvar örnekleri: a)bağlanmış tuğla<br>duvar örneği, b)baş tarafından bağlanmış tuğla duvar örneği,<br>c)yan yüzü tuğla olan ortası dolgu duvar örneği (Uğuz, 2016) . . . | 25 |
| 2.10 | Yığma duvar örneğinde normal ve kesme kuvvetleri (cdn.vgm.gov.tr)<br>. . . . .  | 25 |
| 2.11 | Yığma yapı temel çeşitleri: a)kalın duvar, b)ampatmanlı temel,<br>c)ters tonoz d)kazık temel (cdn.vgm.gov.tr) . . . . .   | 26 |
| 2.12 | Kemer yapısı (Armağan, 2012) . . . . .  | 27 |
| 2.13 | Kemer yük tipleri (Sa'nchez, 2007) . . . . .  | 27 |
| 2.14 | Kemer bindirme hatları (Sa'nchez, 2007) . . . . .   | 28 |
| 2.15 | Kubbe çekme ve basınç bölgeleri (Kara, 2009) . . . . .  | 29 |
| 2.16 | (a) Kare köşegenini çap kabul eden pandantif örneği, (b) Karenin<br>bir kenarını çap kabul eden pandantif örneği (Hasol, 1998) . . .  | 29 |
| 2.17 | Kubbe geçiş elemanları sınıflandırması (Hasol, 1998) . . . . .  | 30 |
| 2.18 | Sütun bölümleri (Mülâyim, 2010) . . . . .   | 31 |
| 2.19 | Tonoz türleri (Kara, 2009) . . . . .  | 32 |
| 3.1  | Yığma malzemelerin homojenleştirilmesi (Lourenço, 2006) . . . . .   | 34 |
| 3.2  | Sonlu elemanlarla oluşturulmuş sistem örneği (Hutton, 2004) . . . . .   | 35 |
| 3.3  | Sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanlar (Ergin vd.,<br>2000) . . . . .  | 36 |
| 3.4  | a)Model oluşum alanı, b)üçgen, c)dörtgen, d)dörtgen ve yamuk<br>alansal elemanlar (Hutton, 2004) . . . . .  | 36 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.5  | Detaylı mikro modelleme, basit mikro modelleme, makro modelleme (Lourenço, 2006) . . . . .  | 37 |
| 3.6  | Makro modelleme yöntemi (Tetik, 2015) . . . . .   | 37 |
| 3.7  | a)Kuvvet-yer değiştirme diyagramı, b) nihai yükte deformasyon (Lourenço, 1998) . . . . .  | 38 |
| 3.8  | Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği(Lourenço, 1998) . . . . .  | 39 |
| 3.9  | a)Kuvvet-yer değiştirme diyagramı, b)maksimum yükteki deformasyonlar, c)Nihai yükteki deformasyonlar (Lourenço, 1998) . . . . .       | 39 |
| 3.10 | Yüke bağlı yer değiştirme (Dabanlı, 2008) . . . . .   | 42 |
| 3.11 | (a) DBYBHY (2007)'ye göre yatay elastik tasarım ivme spektrumu, (b) TBDY (2018)'e göre yatay elastik tasarım ivme spektrumu . . . . . | 45 |
| 4.1  | St. Jean Bazilikası üst görünüş (www.efes2000vakfi.com) . . . . .   | 46 |
| 4.2  | St. Jean Bazilikası plan görünüş (Baranaydın, 2020) . . . . .   | 48 |
| 4.3  | St. Jean Bazilikası'na ait maket çalışmasına ait görüntü . . . . .  | 49 |
| 4.4  | St. Jean Bazilikası'na ait restore edilmiş sütunlu kısım . . . . .  | 49 |
| 4.5  | St.Jean Bazilikası'na ait kalıntıların genel görünümü . . . . .   | 50 |
| 4.6  | St.Jean Bazilikasına ait taşıyıcı sistemlerin malzeme detayları . . . . .   | 50 |
| 4.7  | Yerinde inceleme esnasında alınan malzeme numuneleri . . . . .  | 51 |
| 4.8  | Özgül ağırlık-yoğunluk tartı deney düzeneği . . . . .   | 52 |
| 4.9  | Tek eksenli basınç deneyine ait laboratuvar çalışmaları . . . . .   | 54 |
| 4.10 | Yapının SAP 2000 ortamında sonlu eleman modeli . . . . .  | 58 |
| 4.11 | Kendi (G) ağırlığı altında S11 gerilmeleri . . . . .  | 58 |
| 4.12 | Kendi (G) ağırlığı altında S22 gerilmeleri . . . . .  | 59 |
| 4.13 | Kendi (G) ağırlığı altında S33 gerilmeleri . . . . .  | 59 |
| 4.14 | Kendi (G) ağırlığı altında S13 gerilmeleri . . . . .  | 59 |
| 4.15 | Yapı modal analiz sonuçlarından elde edilen mod şekilleri . . . . .   | 61 |
| 4.16 | (G+E-DEPX) S11 gerilme dağılımı X yönü . . . . .  | 63 |
| 4.17 | (G+E-DEPX) S22 gerilme dağılımı X yönü . . . . .  | 63 |
| 4.18 | (G+E-DEPX) S33 gerilme dağılımı X yönü -1 . . . . .   | 64 |
| 4.19 | (G+E-DEPX) S33 gerilme dağılımı X yönü -2 . . . . .   | 64 |
| 4.20 | (G+E-DEPX) gerilme yığılmasının yoğunlaştığı elemanlardan birinin gösterimi . . . . .   | 65 |
| 4.21 | (G+E-DEPX) S13 gerilme dağılımı . . . . .   | 65 |

|  |    |
|--|----|
| 4.22 (G+E-DEPY) S11 gerilme dağılımı Y yönü . . . . .  | 66 |
| 4.23 (G+E-DEPY) S22 gerilme dağılımı Y yönü . . . . .  | 66 |
| 4.24 (G+E-DEPY) S33 gerilme dağılımı Y yönü -1 . . . . .   | 67 |
| 4.25 (G+E-DEPY) S33 gerilme dağılımı Y yönü -2 . . . . .   | 67 |
| 4.26 (G+E-DEPY) S13 gerilme dağılımı Y yönü . . . . .  | 68 |
| 4.27 (G+E-DEP) 45 derecelik açıyla uygulanan yük altında S11 gerilme<br>dağılımı . . . . .   | 68 |
| 4.28 (G+E-DEP) 45 derecelik açıyla uygulanan yük altında S22 gerilme<br>dağılımı . . . . .   | 69 |
| 4.29 (G+E-DEP) 45 derecelik açıyla uygulanan yük altında S33 gerilme<br>dağılımı-1 . . . . .   | 69 |
| 4.30 (G+E-DEP) 45 derecelik açıyla uygulanan yük altında S33 gerilme<br>dağılımı-2 . . . . .   | 70 |
| 4.31 (G+E-DEP) 45 derecelik açıyla uygulanan yük altında S13 gerilme<br>dağılımı . . . . .   | 70 |
| 4.32 (G+E-DEP) 45 derecelik açıyla uygulanan yük altında S12 gerilme<br>dağılımı . . . . .   | 71 |
| 4.33 Kubbe yükünün pandantif elamanlarla geçişinde yük aktarımı . . .  | 71 |
| 4.34 Pandantif elaman yük aktarımına ait 3 boyutlu (katı) model<br>elemanına ait görünüş . . . . .   | 72 |
| 4.35 Eşdeğer deprem yükü altında (G+E-DEPX) yer değiştirme X yönü  | 73 |
| 4.36 Eşdeğer deprem yükü altında (G+E-DEPY) maksimum yer değiştirme<br>Y yönü . . . . .  | 73 |
| 4.37 2018 Türkiye Deprem Yönetmeliği elastik ivme spektrumu (TBDY,<br>2018) . . . . .  | 74 |
| 4.38 (a) Pazarcık istasyonu 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremi<br>ivme zaman grafiği (tdth.afad.gov.tr), (b) Yarımca istasyonu 17<br>Ağustos 1999 Kocaeli depremi ivme zaman grafiği (Bakkaloğlu,<br>2007) . . . . . | 75 |
| 4.39 (G+EX KOCAELİ) Maksimum çekme gerilmesi dağılımı . . . . .  | 75 |
| 4.40 (G+EX KOCAELİ) Maksimum basınç gerilmesi dağılımı . . . . .   | 75 |
| 4.41 (G+EY KOCAELİ) Maksimum çekme gerilmesi dağılımı . . . . .  | 76 |
| 4.42 (G+EY KOCAELİ) Maksimum basınç gerilmesi dağılımı . . . . .   | 76 |

|  |    |
|--|----|
| 4.43 (G+EX KOCAELİ) Maksimum yer değiştirme . . . . .          | 76 |
| 4.44 (G+EY KOCAELİ) Maksimum yer değiştirme . . . . .          | 77 |
| 4.45 (G+EX MARAŞ) Maksimum çekme gerilmesi dağılımı . . . . .  | 77 |
| 4.46 (G+EX MARAŞ) Maksimum basınç gerilmesi dağılımı . . . . . | 77 |
| 4.47 (G+EY MARAŞ) Maksimum çekme gerilmesi dağılımı . . . . .  | 78 |
| 4.48 (G+EY MARAŞ) Maksimum basınç gerilmesi dağılımı . . . . . | 78 |
| 4.49 (G+EX MARAŞ) Maksimum yer değiştirme . . . . .            | 78 |
| 4.50 (G+EY MARAŞ) Maksimum yer değiştirme . . . . .            | 79 |





## TABLOLAR DİZİNİ

| <u>Çizelge</u>   | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| 1.1 Ayasofya cami minarelerinin boyutları (Çarhoğlu vd., 2013) . . . . .   | 14           |
| 2.1 Doğal taşlara ait ortalama fiziksel özellikler (TS EN 1467, 2012) . . . . .                                      | 20           |
| 2.2 Biçim ve basınç sınıflarına göre harman tuğlası sınıfları ve özellikleri<br>(TS EN 771-1, 2005) . . . . .        | 22           |
| 2.3 Fabrika tuğlalarının birim hacim ağırlıkları ve basınç dayanımları<br>(TS EN 705, 2005) . . . . .                | 22           |
| 3.1 Analiz tiplerinin karşılaştırılması (DBYBHY, 2007) . . . . .   | 42           |
| 3.2 Eşdeğer deprem yükünün uygulanabileceği binalar (DBYBHY, 2007) . . . . .   | 44           |
| 4.1 Yapı malzemeleri listesi . . . . .   | 47           |
| 4.2 Yapı elemanlarına ait ölçüler . . . . .  | 48           |
| 4.3 Numunelerin birim hacim ağırlık çizelgesi . . . . .  | 53           |
| 4.4 St. Jean Bazilikası'nda kullanılan tuğla yapı malzemesinin silindirik<br>basınç mukavemeti . . . . .             | 55           |
| 4.5 St. Jean Bazilikası'nda kullanılan doğal-kesme taş yapı malzemesi-<br>nin silindirik basınç mukavemeti . . . . . | 55           |
| 4.6 St. Jean Bazilikası'nda kullanılan harç yapı malzemesinin silindirik<br>basınç mukavemeti . . . . .              | 56           |
| 4.7 Analizlerde kullanılan yapı malzemelerinin mekanik özellikleri . . . . .   | 57           |
| 4.8 Yapı elemanı-model tipi . . . . .  | 57           |
| 4.9 Modal periods and frequencies . . . . .  | 60           |



**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

| <u>Simgeler</u> | <u>Açıklama</u>                    |
|-----------------|------------------------------------|
| $kg$            | Kilogram                           |
| $mm$            | Milimetre                          |
| $cm$            | Santimetre                         |
| $dm$            | Desimetre                          |
| $m$             | Metre                              |
| $N$             | Newton                             |
| $kgf$           | Kilogram-kuvvet                    |
| $f_b$           | Taş veya tuğla basınç mukavameti   |
| $f_m$           | Harç basınç mukavameti             |
| $f_{bk}$        | Kompozit malzeme basınç mukavameti |
| $[K]$           | Rijitlik matrisi                   |
| $\{u\}$         | Yer değiştirme vektörü             |
| $\{F\}$         | Dış yük vektörü                    |
| $\lambda$       | Birim hacim ağırlık                |

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

| <u>Simgeler</u> | <u>Açıklama</u>     |
|-----------------|---------------------|
| $\varepsilon_x$ | Yanal gerilme       |
| $\varepsilon_y$ | Eksenel gerilme     |
| $T$             | Periyot             |
| $f$             | Frekans             |
| $f_b$           | Basınç dayanımı     |
| $f_ç$           | Çekme dayanımı      |
| $P$             | Kırılma yükü        |
| $A$             | Yük uygulanan alan  |
| $\nu$           | Poisson oranı       |
| $G_k$           | Kuru ağırlık        |
| $G_{ds}$        | Suya doymuş ağırlık |
| $G_s$           | Su içindeki ağırlık |
| $MPa$           | Megapaskal          |
| $g$             | Gram                |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

| <u>Simgeler</u>    | <u>Açıklama</u>                    |
|--------------------|------------------------------------|
| $V_t$              | Toplam eşdeğer deprem yükü         |
| $W$                | Yapı toplam ağırlığı               |
| $I$                | Bina önem katsayısı                |
| $A_o$              | Etkin yer ivme katsayısı           |
| $R$                | Taşıyıcı sistem davranış katsayısı |
| $A(T)$             | Spektral ivme katsayısı            |
| $t$                | Zaman                              |
| $F$                | Kuvvet                             |
| $S(T)$             | Spektrum katsayısı sabiti          |
| $R(T)$             | Deprem yükü azaltma katsayısı      |
| <u>Kısaltmalar</u> | <u>Açıklama</u>                    |
| $FRP$              | Fiber takviyeli polimer malzeme    |



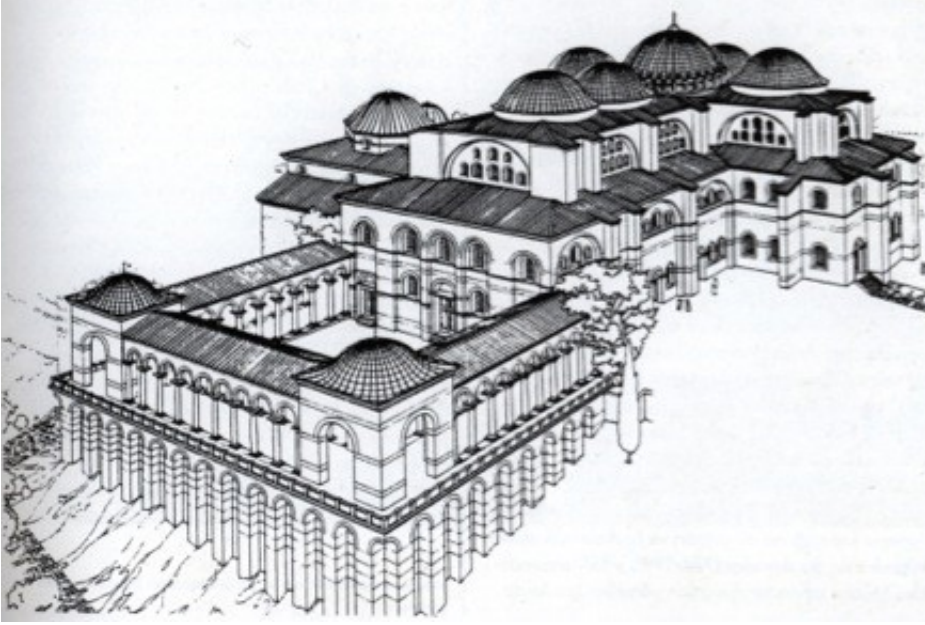
# 1 GİRİŞ

Tarihi yapılar geçmişten günümüze kadar gelen süreçte, buldukları coğrafyada yaşayan toplumların özelliklerini yansıtan önemli göstergelerdir. Bu yapılar, aynı zamanda kültürel mirasın aktarılmasında da başlıca rol alan unsurlardır. Günümüze kadar gelebilen tarihi eserlerin mimari ve yapısal oluşumları incelendiğinde, doğal taş, harman tuğlası, kireç veya çamur esaslı harçlar, kerpiç ve ahşap gibi çeşitli malzemelerin kombinasyonlarıyla genellikle kompozit formda oluşturulduğu görülmektedir. Zaman içerisinde tarihi yapıların meteorolojik etkiler, savaşlar, doğal afetler (deprem, sel, heyelan) nedeniyle hasar görme ve yok olma tehlikesiyle karşı karşıya kaldıkları da bilinmektedir. Bu nedenle, halihazırda ayakta kalabilen eser ve kalıntıların alınabilecek önlemlerle korunması büyük önem taşımaktadır.

Tarihi yapıların hem taşıyıcı sistemlerinin yapısal davranış prensiplerinin daha gerçekçi anlaşılması, hem de hasar oluşum şekillerinin tespit edilerek önlem alınabilmesi için birçok dinamik ve statik analiz yaklaşımı geliştirilmiştir. Günümüzün teknolojik gelişmeleri sayesinde yapı analizleri hem daha hızlı hem de daha detaylı olarak kısa sürede yapılabilmektedir. İncelenen yapı, öncelikle bilgisayar ortamında sonlu elemanlar metodu ile idealize edilmekte, akabinde olası elverişsiz yüklerin etkisi altında meydana gelebilecek hasar oluşum şekilleri, deprem performansı gibi parametreler kısa sürede değerlendirilebilmektedir. Böylece yeterli dayanıma sahip olmadığı görülen yapının teorik hesap modeli üzerinde güçlendirme uygulamaları için alternatif çözümler geliştirilebilmektedir. Tarihi yapıların analizinde sonlu elemanlar metodu sıklıkla tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasında, İzmir Selçuk İlçesi Ayasuluk Kalesi yanında yer alan St. Jean Bazilikası'nın (Şekil 1.1) özellikle olası şiddetli deprem etkisi altındaki davranışı ele alınmıştır. Beton duvarları ve kemer yapıları tuğla ve doğal kesme taş, kaide ve sütunları (kolonlar) mermer yapı elemanlarından oluşan tarihi yapı halihazırda yıkılmış durumdadır. Harabe durumundaki yapının global taşıyıcı sistemini oluşturan elemanlar yerinde gözlemlenmiş ve yapısal

özellikleri detaylı şekilde belirlenmeye çalışılmıştır. Yerinde mevcut olan kalıntılardan alınan taş, tuğla ve kireç esaslı harç numuneleri üzerinden laboratuvar ortamında mekanik testler uygulanmıştır. Ardından yapının ana kütesini oluşturan kemerli kubbe ile örtülü olan bölümünün sonlu eleman metodu ile üç boyutlu analiz modeli oluşturulmuştur. Geçmişte meydana gelmiş farklı deprem ivme kayıtları ve Deprem Yönetmeliklerinde tanımlanmış olan spektrum fonksiyonları dikkate alınarak statik ve dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Ekstremum (maksimum, minimum) yer değiştirmeler, ekstremum gerilmeler (basınç, çekme), modal analiz parametleri ve yapının deprem performansına bağlı taşıma gücü kapasitesi elde edilmiştir. Böylece yapının olası şiddetli bir deprem etkisindeki stabilite davranışı hakkında kapsamlı değerlendirmeler yapılmıştır.



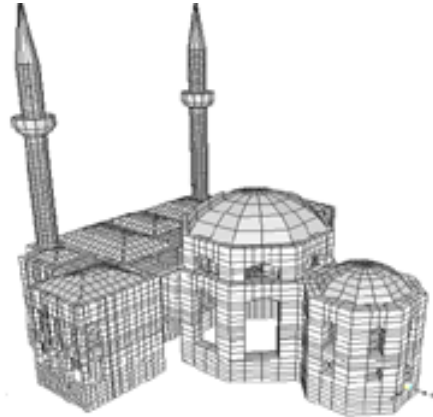
Şekil 1.1: St. Jean Bazilikası görünüş (www.efes2000vakfi.com)

## 1.1 Literatür Özeti

Geçmişten günümüze gelen tarihi yapıların olası elverişsiz yüklere karşı güvenle ayakta kalması kapsamında birçok akademik çalışma yapılmaktadır. Tarihi yapılar gerek tip gerekse zaman açısından oldukça geniş bir yelpazede

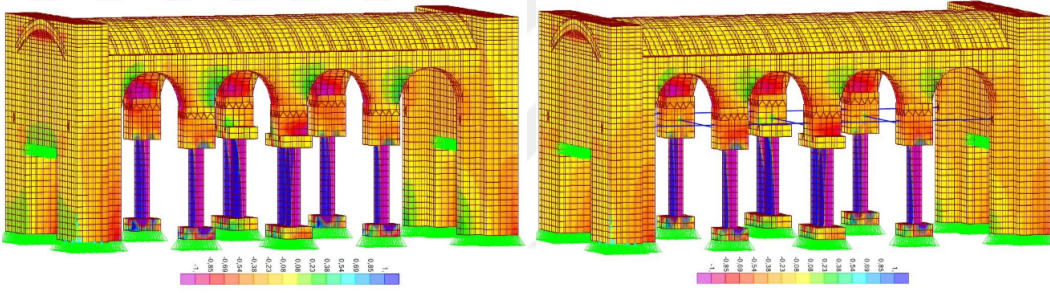
çeşitliliğe sahip olduğundan bu konudaki çalışma alanı da oldukça geniştir. Bu tez çalışması kapsamında kemerli kubbe tipi tarihi yığma yapılarla ilgili önceki yıllarda yapılmış çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

Dabanlı (2008) tarafından yapılan çalışmada İstanbul Fatih'te bulunan Hırka-i Şerif Cami'nin olası şiddetli depreme karşı yapısal davranışı ele alınmıştır. Bu kapsamda, taşıyıcı sistemi oluşturan malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmiş sonlu elemanlar metodu ile bilgisayar ortamında modellenerek seçilen deprem ivme kayıtları ile analiz edilmiştir. Analiz sonucunda elverişsiz yükler etkisinde yapıda oluşan hasarların büyük çoğunluğunun zemin hareketlerine bağlı olarak caminin üzerine oturduğu dolgu platformda olduğu tespit edilmiştir. Yapının bütününde yapısal bir tehlikenin bulunmadığı ancak minarelerin yapıya birleştiği kaide birleşimleri kayma gerilmeleri açısından değerlendirildiğinde yapı güvensiz bulunmuştur. Minare üzerinde 3 MPa'ı aşan çekme gerilmeleri nedeniyle deprem etkisi altında minare üzerinde yoğun çatlakların oluşabileceği öngörülmüştür. Çalışma neticesinde yapının olası şiddetli bir depremde zarar görmemesi için temelin oturduğu platform tabakanın kazıklarla güçlendirilmesi, minarede gerilme yığılması oluşan bölgelerin lif takviyeli polimer malzeme ve çelik bileziklerle güçlendirilmesi önerilmiştir. Şekil 1.2'de Hırka-i Şerif Cami'sine ait görsel ve sonlu eleman modeli yer almaktadır.



Şekil 1.2: Hırka-i Şerif Cami görseli ([www.hirkaiserifvakfi.com](http://www.hirkaiserifvakfi.com)) ve sonlu elemanlar modeli (Dabanlı, 2008)

Güner (2018), ardışık kemerli tonoz yapısının tekrarlı yatay yükleme altındaki davranışını incelemiştir. Çalışma kapsamında, hem laboratuvar ortamında örülmüş duvar örnekleri testlere tabi tutulmuş hem de bilgisayar ortamında modellenerek analiz edilmiştir. Farklı duvar örneklerinden yapılan çalışmalardan ilkinde taş ve tuğlanın harç ile birleşerek oluşturduğu kompozit duvar elemanı incelenmiştir. Deney ve analizler neticesinde bu yapıdaki hasarların genellikle çekme ve basınç dayanımı düşük olan harç malzemesiyle birleşim yerlerindeki yeterli aderans yüzeyinin oluşmamasından kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Bir başka deney düzeneğinde ise gergili ve gergisiz kemer sistemlerinin laboratuvar testleri ve yapı model analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Gergi çubuklarının sistemi daha stabil hale getirerek yatay deplasmanları azalttığı görülmüştür. Şekil 1.3’de sırasıyla gergisiz ve gergili sisteme dair S33 gerilme dağılımları yer almaktadır.



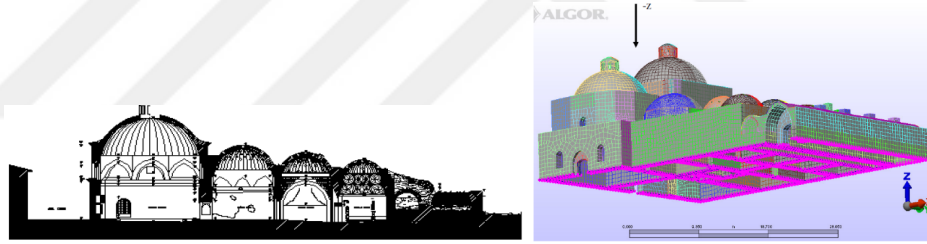
Şekil 1.3: S33 gerilme dağılımı a)gergisiz sistem b)gergili sistem (Güner, 2018)

Gedik (2008) tarafından yapılan çalışmada, tarihi yığma yapıların güçlendirilmesi kapsamında İstanbul Fatih’te bulunan Mehmet Ağa Camisi incelenmiştir. Beden duvarları tuğla, taş ve harçtan, kubbesi ise tuğladan oluşan yapıya ait malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmiş ve sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur (Şekil 1.4). Yapılan analizler sonucunda, oluşan basınç gerilmelerinin yapı bütününe tehdit etmediği, ancak çekme gerilmelerinin duvarlarda çatlaklar ve kubbe kısımlarında hasar oluşturduğu görülmüştür. Bu nedenle, kubbedeki aşırı gerilmeleri yaymak için temel güçlendirmesi yapılması veya kubbelerin FRP ile kaplanarak çekme gerilmelerinin karşılanması önerilmiştir.



Şekil 1.4: Mehmet Ağa Cami ve sonlu eleman modeli (Gedik, 2008)

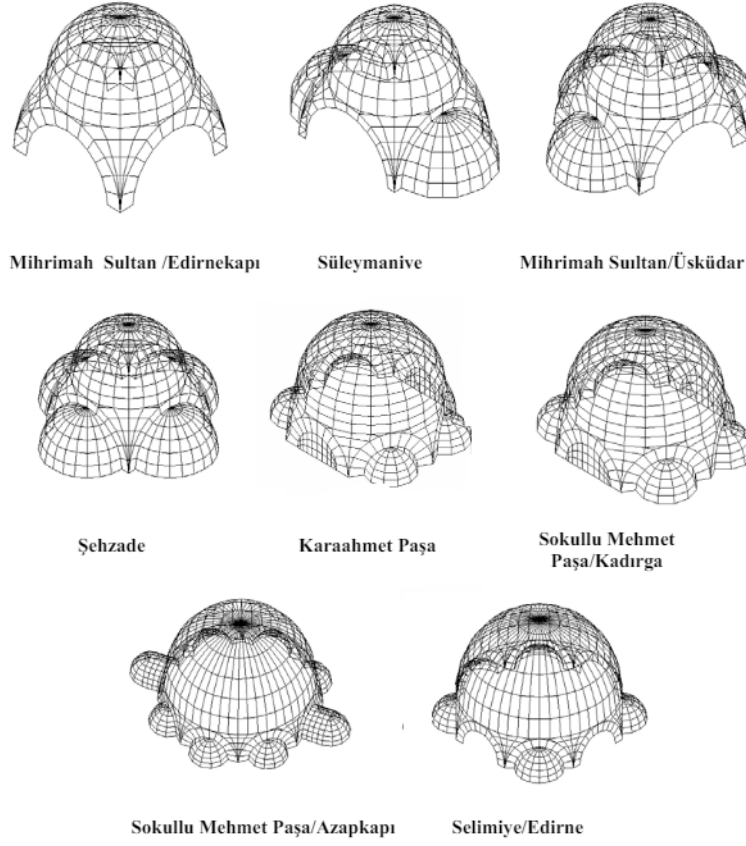
Bağbancı (2009) çalışmasında, tarihi yapıların statik ve dinamik yükler altındaki yapısal davranışını belirlemeyi amaçlamıştır. Bu kapsamda, Bursa Ördekli Hamamı bilgisayar ortamında modellenmek üzere idealize edilmiş, burulma düzensizlikleri, deprem davranışları incelenerek yıkıma uğrayan kısımların hasar alma sebepleri araştırılmıştır. Şekil 1.5’de Cami modeli ve bilgisayar ortamında oluşturulmuş sonlu eleman modeli yer almaktadır.



Şekil 1.5: Bursa Ördekli Cami A-A kesiti ve yapının bilgisayar ortamında modellenmiş hali (Bağbancı, 2009)

Bilgin (2006) çalışmasında, Mimar Sinan yapılarının kubbeli örtü sistemlerini incelemiştir. Bu çalışmada dörtgen, altıgen ve sekizgen şekilli geçiş elemanları ile oluşturulmuş kubbeli dini yapıların analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.6’da verilen kubbeli tarihi yapılar, SAP 2000 yapısal analiz programında sonlu elemanlar metodu ile idealize edilerek gerilme dağılımları ortaya konulmuştur. Genel anlamda, Mimar Sinan yapılarında örtü sistemlerine ait taşıyıcı sistem elemanlarının güvenli bir şekilde stabilitesini koruduğu, basınç gerilmelerinin yapı tarafından karşılanabilir büyüklüklerde olduğu ve çekme

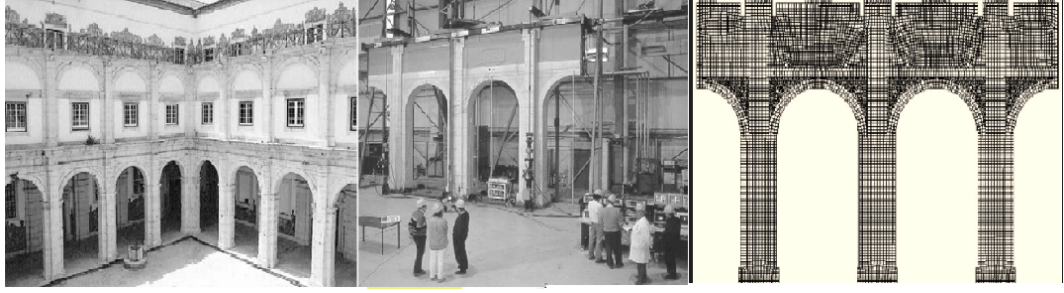
gerilmelerinin de belirli limitlere kadar karşılanabildiği görülmüştür. Bu da, Mimar Sinan yapılarında yapı tasarımı ve malzeme seçimlerinin dönemin koşullarına göre en uygun şekilde yapılmış olduğu hususu vurgulanmıştır.



Şekil 1.6: Kubbeli örtü sistemine sahip cami örneklerinin sonlu eleman modelleri (Bilgin, 2006)

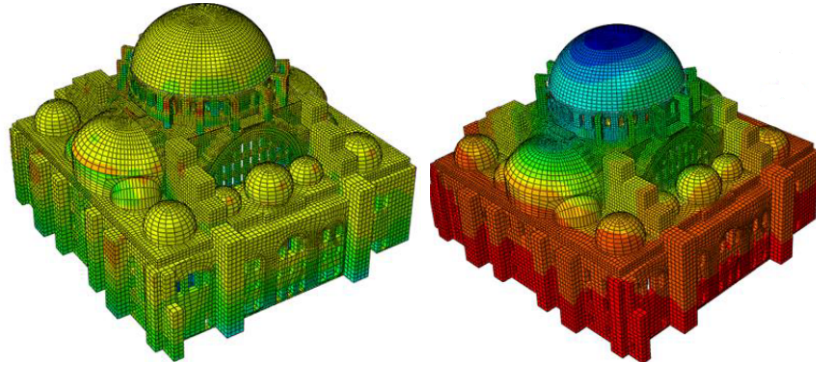
Giordano et al. (2002) ve arkadaşları çalışmalarında yığma yapıların analizi için kullanılan farklı modelleme tekniklerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında laboratuvar ortamında ölçeklenerek oluşturulmuş yapı modeli üzerinden gerçekleştirilen deneylerle malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ardından bilgisayar ortamında ABAQUS yazılımı ile oluşturulan sayısal modellemelerden elde edilen analiz sonuçları ile laboratuvar testlerinde elde edilen veriler kıyaslanmış ve birbiri ile uyumlu oldukları ifade edilmiştir. San Vicente de Fora manastırına ait görsel fotoğraf, ölçekli labo-

rotuvar modeli ve sonlu elemanlar modeli sırasıyla Şekil 1.7 'de sunulmuştur.



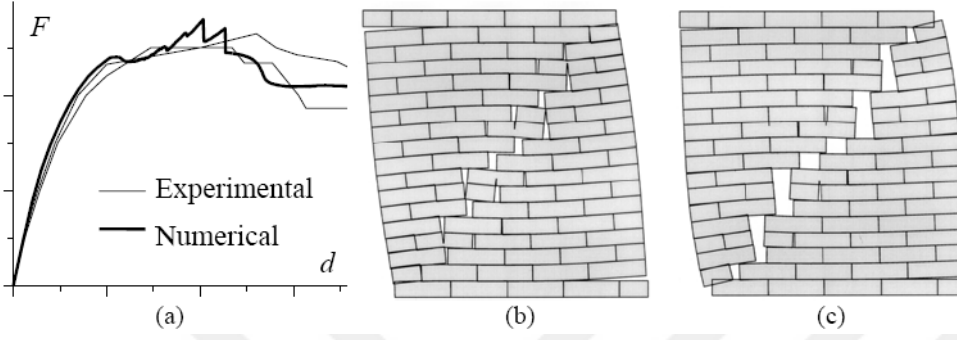
Şekil 1.7: Sao Vicente de Fora Manastırına ait kemer yapısının ölçekli laboratuvar modeli ve ABAQUS sonlu eleman modeli (Giordano et al., 2002)

İzol (2022) çalışmasında, kubbeli yığma yapıların deprem performansındaki payanda etkisini Süleymaniye Cami örneği üzerinde incelemiştir. Bu kapsamda, Süleymaniye Cami'nin mevcut payanda ölçülerinde (Şekil 1.8), %50 azaltılmış boyutlarda payandalı ve payandasız şekilde modellenmiş ve deprem davranışları irdelenmiştir. Yapılan analizlerde payanda derinliği ve geometrisinin dayanım üzerinde doğrudan etkisi olduğu görülmüştür, mevcut payandalı durumda güvenli deprem direnci sergilediği, %50 azaltılmış payanda boyutlarında ise sistemin kontrollü hasar bölgesine girdiği tespit edilmiştir. Tüm bu sonuçlar, Mimar Sinan'ın bu eserinde de ne kadar tutarlı bir tasarım yaptığını göstermekte olduğu şeklinde yorumlanmıştır.



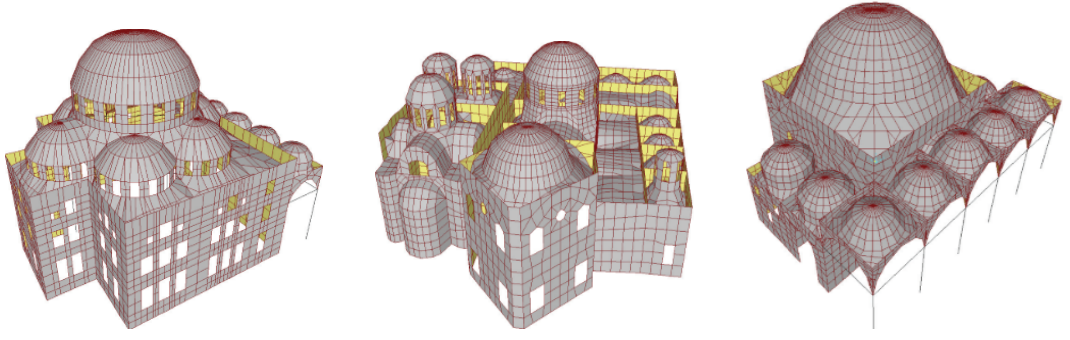
Şekil 1.8: Süleymaniye Cami mevcut durum payandalı sistem için gerilme ve yerdeğiştirme dağılımı (İzol, 2022)

Lourenço (1998) çalışmasında, duvar malzemesinin harç ile oluşturduğu kompozit yapının makro ve mikro analiz modelleri ile ele alınmıştır. Şekil 1.9 'da örnek sistem olarak seçilen yığma duvar örneğinin noktasal ve geometrik yükler altındaki deformasyon şekilleri incelenmiştir. Deneysel ve teorik modelleme sonuçları incelendiğinde elde edilen sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 1.9: a)Kuvvet-yer değiştirme diyagramı, b)maksimum yükteki deformasyonlar, c)Nihai yükteki deformasyonlar (Lourenço, 2006)

Can ve Ünay (2012) çalışmasında, tarihi yapıların sayısal hesap yöntemleri ile yapısal davranışlarının belirlenmesini amaçlamışlardır. Bu kapsamda, Hekimoğlu Ali Paşa Camisi, İstanbul Fethiye Cami ve Davutpaşa Camisi sonlu elemanlar metodu ile modellenmiştir (Şekil 1.10). Yapıların dış yükler ve deprem etkileri altındaki yapısal davranışları ortaya konulmuştur. Bu çalışmalar sonucunda tarihi yapıların ve anıtların korunması kapsamında her üç yapı içinde elde edilen analiz sonuçları incelendiğinde taşıyıcı sistemi oluşturan elemanlar arasındaki etkileşim, yük aktarım merkezi ve gerilme dağılımları ve çevresel faktörlerin yapının ayakta kalabilmesi adına önemli parametreler olduğu ve detaylı irdelenmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

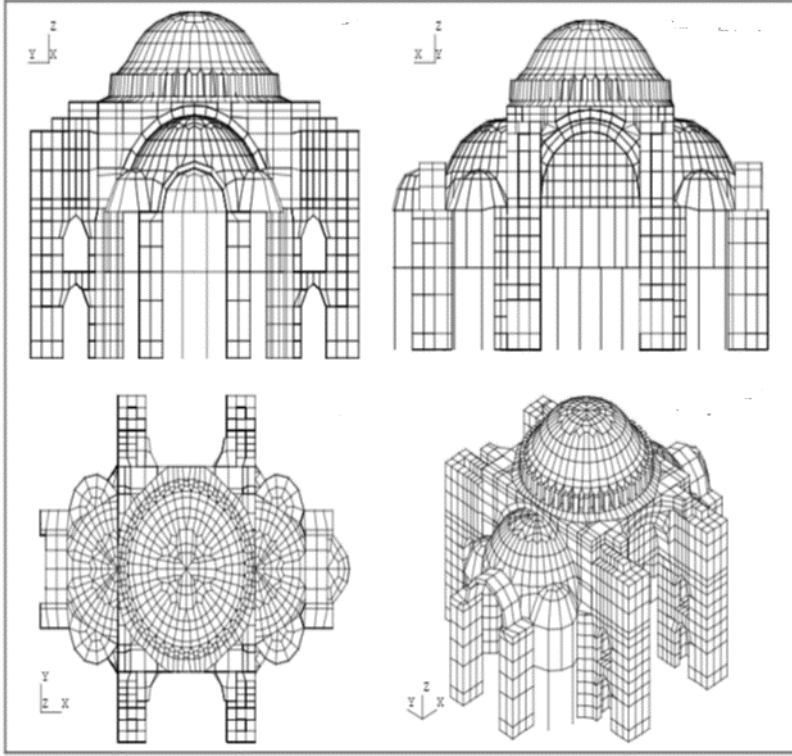


Şekil 1.10: Hekimoğlu Ali Paşa Cami, İstanbul Fethiye Cami ve Davutpaşa Cami sonlu eleman modeli (Can ve Ünay, 2012)

Koçak (1999) çalışmasında, tarihi yapılarda doğrusal olmayan analiz, yığma duvar analizleri ve üç boyutlu sonlu elemanlar metodu ile modellenen yapıların analizleri konularını ele almıştır. Uygulama örneği olarak seçilen Şekil 1.11 ve Şekil 1.12 'de görseli ve sonlu eleman modeli yer alan Küçük Ayasofya Cami'nin yapısal davranış özelliklerini derinlemesine araştırmıştır. Yapıyı ayakta tutan taşıyıcı sistemi oluşturan malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirleyerek sonlu elemanlar metodu ile yapıya ait deprem davranışlarını incelemiş ve çeşitli çıkarımlarda bulunmuştur. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde taş ve tuğla duvarların mukavemetlerini rijitliğin az olduğu harç birleşimlerinde kaybettiği tespit edilmiştir. Tuğlanın diziliş şekli ve büyüklüğünün harç kalınlığını değiştirdiği bunun sonucu olarakta harç birleşim kalınlığı artukça dayanımın düştüğü görülmüştür. Ayrıca çalışma kapsamında Küçük Ayasofya cami yapısı statik açıdan kendi ağırlığı altında ve  $M_s=5$ ,  $M_s=7$  şiddetinde deprem etkisinde analiz edilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde cami yapısında 5 şiddetinde depremde yapısal hasar beklenmemekte ancak 7 şiddetinde olası elverişsiz deprem yükü etkisinde özellikle ayak ve minare kısımlarında büyük gerilmeler ve buna bağlı hasarlar oluşabileceği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 1.11: Küçük Ayasofya Cami dış görünüşü (Koçak, 1999)



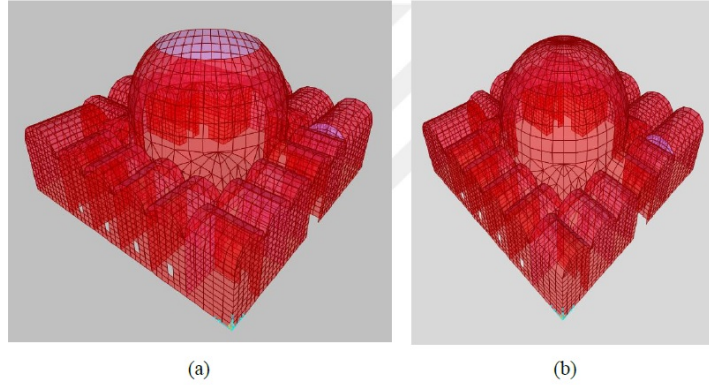
Şekil 1.12: Küçük Ayasofya Cami sonlu eleman modeli (Koçak, 1999)

Türkecul (2022) çalışmasında, tarihi Tokat Yağlıbasan Medrese örneğinin dinamik yapı davranışlarını incelemiştir. İncelenen tarihi medresenin gerçek deprem ivme kayıtları ile elverişsiz yükler altında yarım ve tam kubbeli olarak

modellenmeleri yapılmış olup her iki yapı için de gerilme dağılımları incelenerek yapı performansı için çeşitli çıkarımlarda bulunulmuştur. Yapıya ait görünüş Şekil 1.13 'de, tam ve yarım kubbeli duruma ait sonlu eleman modeli Şekil 1.14'de verilmiştir. Çalışma kapsamında 1992 Erzincan ve 1999 Kocaeli deprem ivme kayıtları altında yapı analiz edilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, gerilme yığılımlarının tam kubbeli yapıya göre düşük çıktığı ve buna bağlı hasar oluşma ihtimallinin daha düşük olduğu değerlendirilmiştir. Basınç gerilmeleri açısından her iki durumda sorun teşkil edecek gerilmeler tespit edilmediği ancak çekme gerilmeleri açısından özellikle kubbe pandantif birleşimlerinde yapıyı zorlayabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

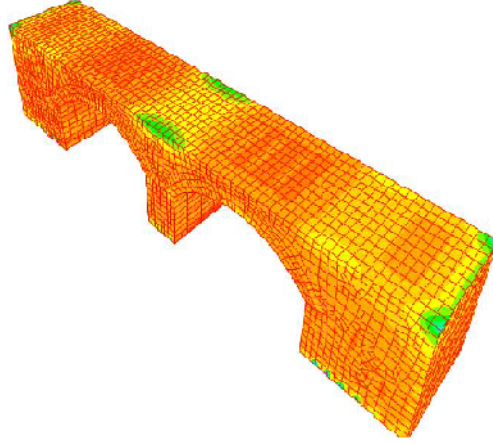


Şekil 1.13: Tokat Yağibasın Medresesi görünüş (Türkecul, 2022)



Şekil 1.14: Yapının sonlu eleman modelleri: (a) yarım kubbeli (b) tam kubbeli durum (Türkecul, 2022)

Anadut (2016) çalışmasında, Yozgat Saat Kulesi ve Elekçi Köprüsü'nün rölelerini çıkarmış ardından laboratuvar deneyleriyle malzeme özelliklerini belirlemiş ve yapıları SAP 2000 programında modelleyerek analizlerini yapmıştır (Şekil 1.15, Şekil 1.16). Deprem performansının belirlenmesi için 1992 Erzincan Deprem İvme Kayıtları kullanılmıştır. Dinamik analiz yöntemiyle ele alınan Elekçi Köprüsü ve Yozgat Saat Kulesinin mod şekilleri, frekans değerleri, yapıdaki en büyük ve en küçük yer değiştirmeler ile basınç ve çekme gerilmeleri belirlenmiş, yapılara ait deprem performansları ortaya konulmuştur. Analiz sonuçları incelendiğinde Yozgat Saat kulesi için en büyük gerilmeleri kapı, pencere boşlukları ve kat birleşimlerinde oluşurken, Elekçi köprüsü örneğinde en büyük gerilme değerlerinin köprü kemerlerinin orta bileşim noktasında bulunan ayağın taban kısımlarında ve köprü üst uç kenar bölgelerinde olduğu görülmüştür. Her iki yapıda da dinamik etkiler altında hasar oluşmaması adına, onarım ve güçlendirmenin yukarıda gerilme yığılımları belirlenen bölgelerde yapılması gerektiği belirlenmiştir.



Şekil 1.15: Elekçi Köprüsü görünüşü ve sonlu eleman modeli (Anadut, 2016)

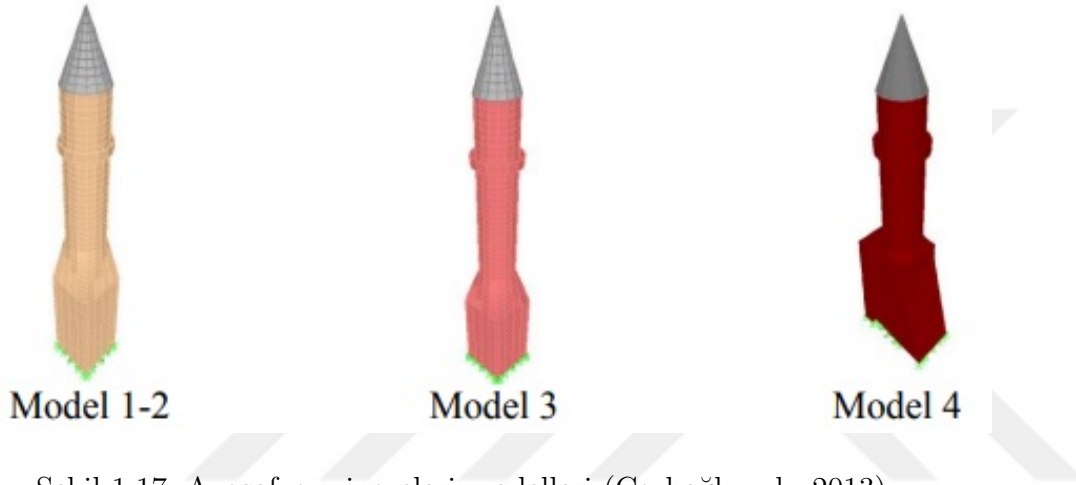


Şekil 1.16: Yozgat Saat Kulesi görünüşü ve sonlu eleman modeli (Anadut, 2016)

Çarhoğlu vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada, Ayasofya'ya ait farklı ölçülerdeki minareler modellenerek analiz sonuçlarından yer değiştirme miktarları ve gerilme dağılımları elde edilmiştir. Üçü farklı ölçülere sahip dört kubbenin ölçüleri Tablo 1.1'de, modellenmiş görüntüleri Şekil 1.17'de yer almaktadır. Üç farklı kubbenin sırasıyla 6.9 şiddetindeki Kobe, 7.1 şiddetindeki Cape Mendecino ve 7.4 şiddetindeki Kocaeli depremleri etkisindeki davranışı incelenmiştir. Kubbe yükseklikleri birbirine oldukça yakın olan bu üç kubbe yapısından analizler neticesinde en büyük yer değiştirme kubbe kalınlığı en az olan 3 numaralı kubbe modelinde 22 cm gibi büyük bir deplasman değeri ile Kobe deprem kaydı altında karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışma sonucunda, kubbe çapı ve kalınlığının en az yüksekliği kadar etkili olduğu ayrıca Kobe depreminin İstanbul'da meydana gelmiş olması durumunda yapı üzerinde geçmişte yaşanan Kocaeli depremine kıyasla çok daha büyük bir hasar oluşturacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 1.1: Ayasofya cami minarelerinin boyutları (Çarhoğlu vd., 2013)

|                              | Ayasofya 1-2 | Ayasofya 3 | Ayasofya 4 |
|------------------------------|--------------|------------|------------|
| Minare toplam yüksekliği     | 66.55        | 63.20      | 44.96      |
| Balkon sayısı                | 1            | 1          | 1          |
| Gövde yüksekliği             | 37.90        | 39.70      | 33.60      |
| Duvar kalınlığı ( <i>m</i> ) | 1.00         | 0.55       | 0.85       |
| Gövde çapı                   | 4.70         | 3.10       | .30        |



Şekil 1.17: Ayasofya minareleri modelleri (Çarhoğlu vd., 2013)

## 2 TARİHİ YIĞMA YAPILAR

### 2.1 Yapıların Gelişimi

İnsanoğlu, tarih boyunca yaşadığı dönem ve coğrafyaya bağlı kalarak çeşitli yapılar inşa etmiştir. Bu yapılar bölgenin coğrafi özellikleri, dönemin şartları, malzeme olanakları ve iklim özellikleri dikkate alınarak farklı amaçlara hizmet etmişlerdir. Yüzyıllar öncesine dayanan su kemerleri, saat kuleleri, medreseler, camiler, kiliseler, kaleler gibi eserler günümüze kadar varlığını sürdürebilmiş tarihi eser kalıntıları olarak karşımıza çıkmaktadır. Farklı mimarilere sahip bu eserler detaylı olarak incelendiğinde, oluşturuldukları dönemin kültürü, yaşam biçimi ve tarihi özellikleri hakkında önemli bilgiler edinilmesini sağlar.

İnsanlar yapıları oluştururken malzemeleri başlangıçta hammadde olarak kullanmış, gelişen ihtiyaçlar doğrultusunda bu malzemeleri dönüştürerek farklı şekillerde kullanmaya başlamışlardır. Örneğin, başlangıçta doğal taşların üst üste dizilmesiyle oluşturulan basit yapılar, harç malzemelerinin keşfedilmesi ve yapay taşların oluşturulmasıyla birlikte daha farklı amaçlara hizmet eden ve insan hayatını kolaylaştıran mimarilerin oluşmasına imkan sağlamıştır.

Tarihi yapı ve kalıntıların, doğal afetler, zemin hareketleri ve malzeme özelliklerindeki bozulmalardan etkilenmesi kaçınılmazdır. Tarihi kültürün aktarımında önemli rol oynayan bu yapıların korunmasına yönelik uygulamalar ve çalışmalar günümüzde büyük önem kazanmıştır. Modern teknoloji sayesinde, yapılar modellenerek taşıma gücü ve deprem performansları analiz edilmekte, bu doğrultuda güçlendirilerek ayakta kalmaları sağlanabilmektedir. Oluştugu dönemin kültür ve kimliğini yansıtan bu yapıların özenle korunması, nesiller arasındaki kültür aktarımının sağlanması için kritik öneme sahiptir.

### 2.2 Kubbe Sistemli Tarihi Dini Yapı Örnekleri

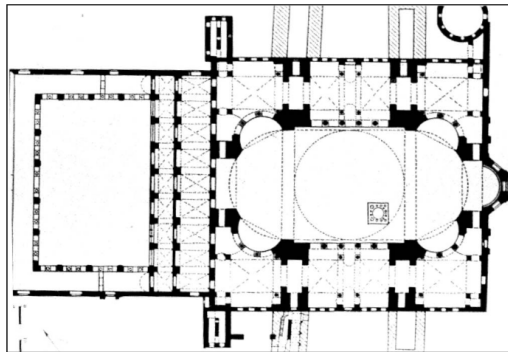
Bu tez çalışmasında, örnek yapı olarak seçilen St. Jean Bazilikası'nın oluşturulduğu dönem ve yapısal özellikleri dikkate alınarak benzer dini tarihi

eserler incelenmiştir. Yapının oluştuğu dönem ve mimarisi incelendiğinde, yapımına MS 548 yılında başlanıp 565 yılında tamamlandığı, ana ve yardımcı kubbeleri ile dönemin dini yapılarının mimarisini yansıttığı görülmektedir.

St. Jean Bazilikası ile aynı veya yakın dönemlerde yapımına başlanan veya tamamlanan tarihi yapılar incelenmeye başladığında öncelikli olarak aynı mimar tarafından yapıldığı öngörülen Ayasofya en önemli yapılardan biri olarak öne çıkmaktadır. Oluşumu 4. yy'da gerçekleşmiş olmasına rağmen çeşitli nedenlerle tahribata uğrayan yapı 532-537 yılları arasında dönemin imparatoru Justinianus tarafından yeniden yaptırılarak günümüzdeki hali oluştuğu kabul gördüğünden mevcut yapı 6.yy Bizans yapısı olarak değerlendirilmektedir. Ana kubbenin iki yarım kubbeye bağlanarak oluşturduğu bazilika benzeri plan oluşumu ile Bizans mimarisini yansıtan yapıya ait iç ve dış görünümlere ait görseller Şekil 2.1'de, planı ise Şekil 2.2'de verilmiştir.

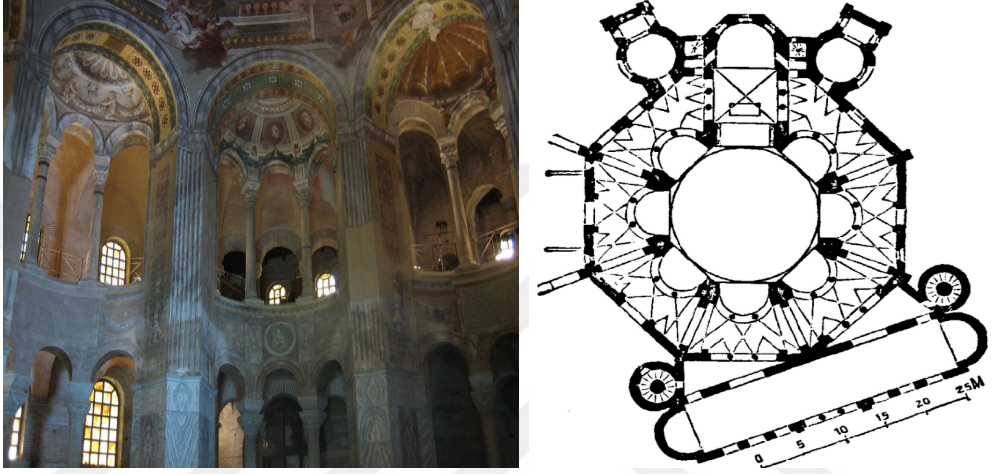


Şekil 2.1: Ayasofya iç ve dış görünüşü (depositphotos.com)



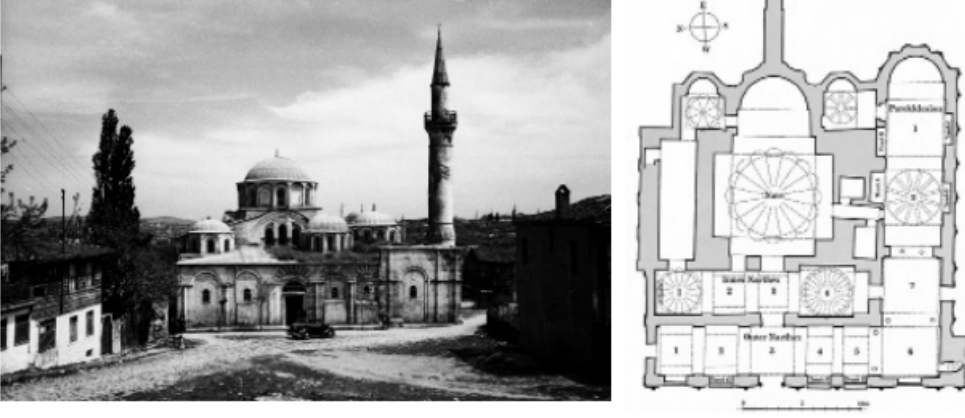
Şekil 2.2: Ayasofya Camii planı (Yağlı, 2010)

6. yüzyılda inşa edilen kubbeli dini yapılar arasında St. Jean Bazilikası ile mimari açıdan önemli benzerlik gösteren bir başka yapı olarak San Vitale Kilisesi dikkat çekmektedir. MS 537 yılında yapımına başlanan San Vitale Kilisesi sekizgen haç şeklindeki yapısıyla mimari olarak St. Jean Bazilikası ile büyük benzerlik taşımaktadır. Bizans mimarisinin yanı sıra İtalyan mimarisi izlerini de taşıyan bu kilise, kemerli kubbeleri ve mozaik kaplamaları ile öne çıkar. Kilisenin tamamı ince ve kalın tuğlaların örülmesiyle oluşturulmuştur. Yapıya ait iç görünüş ve plan Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



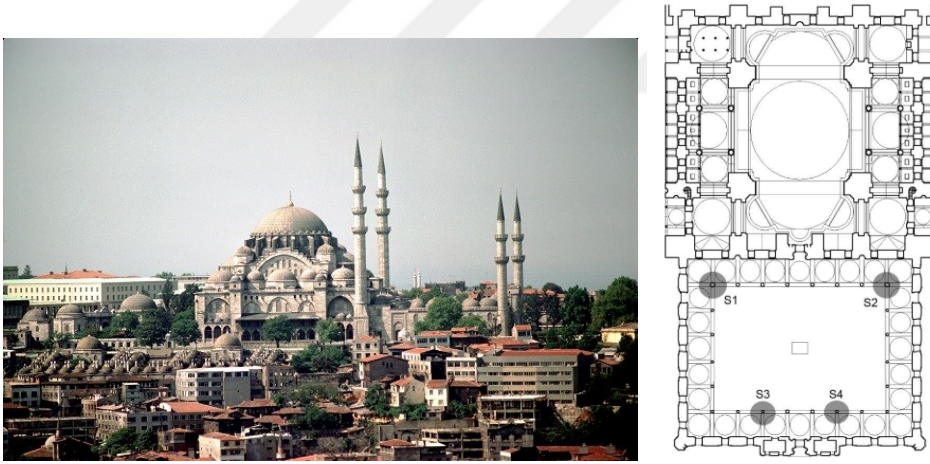
Şekil 2.3: San Vitale Kilisesine ait iç görünüş ve plan (tr.wikipedia.org(b))

Kubbeli tarihi yapı örnekleri arasında MS 500’lü yıllarda inşa edilen Kariye Cami de bulunmaktadır. İstanbul’un fethine kadar kilise olarak kullanılan bu yapı fetihden 50-60 yıl sonra cami olarak kullanılmaya başlanmıştır. Kariye Cami, dış cephesi taş ve tuğla duvarlardan, iç cephesi mozaik ve işlemeli taşlardan oluşmuş bir Bizans yapısıdır (Çağlar, 2015). Yapı Naos, anneks, iç ve dış narteks ve şapel olmak üzere 5 ana bölümden oluşmaktadır (Akyürek, 1996). Yapıya ait görünüş ve plan Şekil 2.4’de yer almaktadır.



Şekil 2.4: Kariye Cami görünüşü ve mimari planı (Vakıflar Genel Müd. Arşivi)

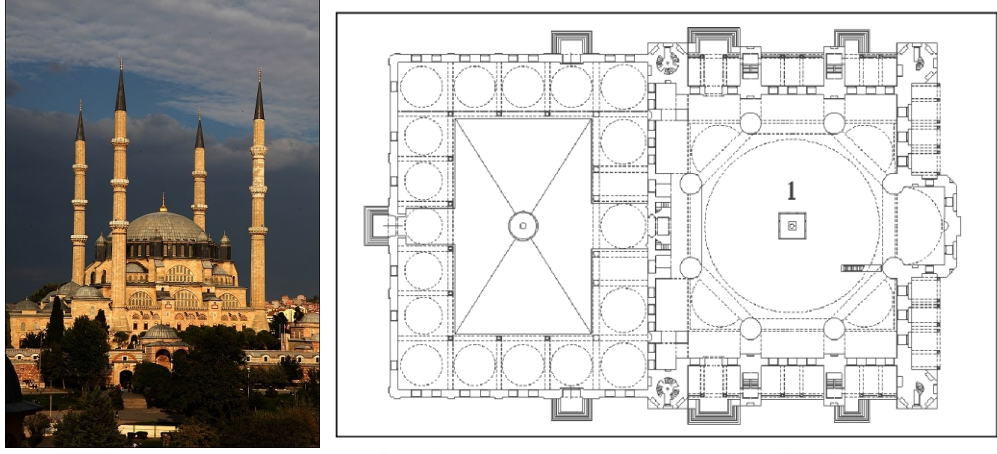
Dönemin önemli dini yapılarından biri de Süleymaniye Camisidir. 1550 yılında yapımına başlanan caminin inşası yaklaşık olarak yedi yılda tamamlanmıştır. Sütün kolonlar üzerine yerleştirilmiş 28 kubbeden oluşan yapının giriş ana kubbesi hariç tüm kubbeleri eşit ölçülerde oluşturulmuştur. Kubbeler sütün kolonlu kemer yapısı üzerine yerleşmiştir. Yapının üstten görünüşü ve plan şeması Şekil 2.5’de yer almaktadır.



Şekil 2.5: Süleymaniye Cami görünüşü (www.fatih.gov.tr) ve planı (Orbeyi, 2012)

1569-1575 yılları arasında inşa edilen Selimiye Cami, Mimar Sinan'ın ustalık eseri olarak nitelendirdiği anıtsal bir yapıdır. Edirne'nin simge ziyaret noktalarından biri olan Selimiye Cami, dört minaresi, 31.5 metre çaplı ve 43,28 metre yükseklikteki görkemli kubbesi, şadırvanlı iç avlusu, yapıyı

saran iki medresesi, arastası ve dış avlu duvarlarıyla halen etkin biçimde kullanılmaktadır (Kuban, 2000). Yapıya ait dış görünüş ve plan Şekil 2.6'da yer almaktadır.



Şekil 2.6: Selimiye Camii dış görünüşü (Foto Enver Şengül) ve planı (Yağlı, 2010)

### 2.3 Tarihi Yığma Yapı Malzemeleri

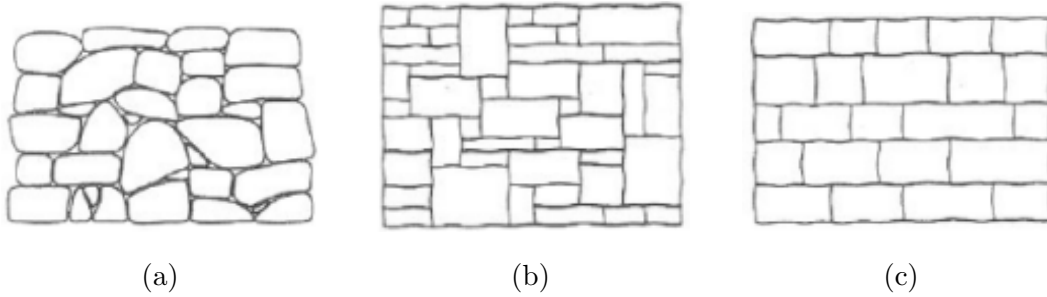
Malzeme çeşitliliği geçmişten günümüze kadar sürekli değişim ve gelişim göstermiştir. Yapıların oluşturulması özelinde bu durum incelendiğinde günümüz teknolojisinin de daha etkin kullanımı ile birlikte aynı amaca hizmet edebilecek yeni malzemelerde keşfedilmeye ve üretilmeye başlanılmıştır. Bunun yanı sıra geçmişte kullanılan malzemeler de geri dönüştürülerek halihazırda yapı elemanı olarak kullanılabilir. Yığma yapılar incelendiğinde genellikle doğal taşlar, harman tuğlası, tuğla ve kireç taşı gibi yapı elemanlarının kireç, çimento, su gibi bağlayıcı harç malzemeleri ile örülerek oluşturulduğu görülmektedir. Yapı malzemesinin ve uygun harç malzemesinin seçiminde yapının oluşturulduğu dönem ve iklim özellikleri oldukça etkili olmuştur. Geleneksel yapılarda kullanılan elemanların mekanik özelliklerinin belirlenmesi analiz aşamasında büyük önem arz etmektedir. Yığma yapılar taşlarla harç malzemelerinin farklı tekniklerde bir araya getirilmesiyle büyük duvar yapılarını oluşturmaktadır.

### 2.3.1 Doğal taşlar

Doğal taşlar, yığma yapılarda duvar oluşumunda kullanılan en eski malzemelerden biridir. Bulunabilirliğinin kolay olması, çevre şartlarına karşı dayanımı gibi yapısal özellikleri tercih edilmesinde büyük rol oynamıştır. Taş, taşıma gücü yüksek, çekme dayanımı ise zayıf bir yapı malzemesidir. Taşıma gücü özellikleri incelendiğinde basınç yüklerini alan taşlar kemer, kubbe, tonoz yapıları ve duvar yapı elemanlarının oluşumunda sıklıkla kullanılmıştır (Çamlıbel, 2000). Doğal taşlara ait dayanım değerleri Tablo 2.1’de, farklı yapıdaki taş çeşitlerinin farklı tekniklerde uygun harç ile birleştirilmesiyle oluşan duvar örnekleri Şekil 2.7’de görülmektedir.

Tablo 2.1: Doğal taşlara ait ortalama fiziksel özellikler (TS EN 1467, 2012)

| Taşın Cinsi  | Minimum Basınç Dayanımı<br>( $kg/cm^2$ ) | Eğilmede Minimum Çekme<br>Dayanımı ( $kg/cm^2$ ) |
|--|--|--|
| Kalker, traverten, kireç,<br>bağlayıcı kumtaşı       | 350                                      | 30   |
| Yoğun kalker, dolomit,<br>bazalt                     | 500                                      | 40   |
| Silis bağlayıcı kumtaşı,<br>grovak                   | 800                                      | 60   |
| Granit, siyenit, diorit,<br>melafir, diabaz, andezit | 1200                                     | 75   |
| Diğer tortul ve metamorfik<br>taşlar                 | 500                                      | 50   |
| Diğer püskürük taşlar                                | 1400                                     | 80   |

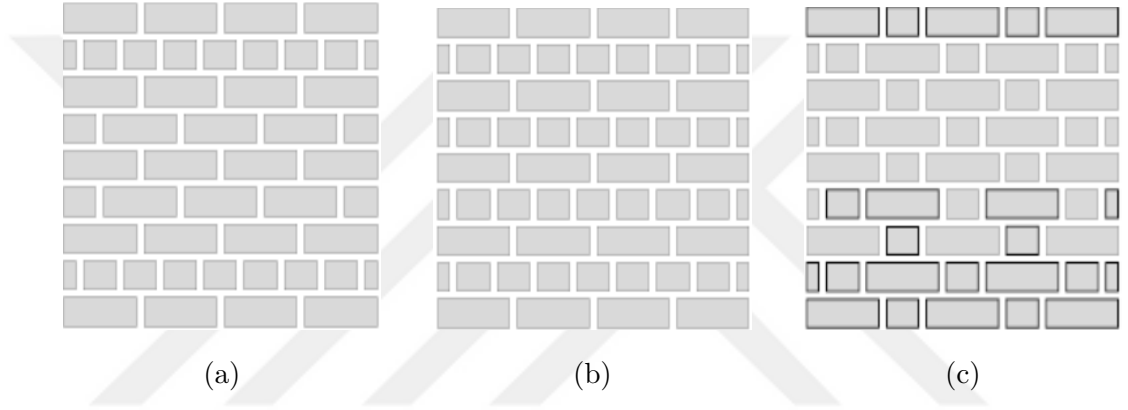


Şekil 2.7: Yığma taş yapılar: a) moloz taş, b) kesme taş, c) iri kesme taş (Lourenço, 1998)

### 2.3.2 Harman tuğlası

Tuğla, killi toprağın uygun oranda su ile yoğrulup uygun süre beklendikten sonra yüksek sıcaklıklarda fırınlarda pişirilmesiyle elde edilmektedir (Er, 2013; Bayülke, 2013). Tuğla yapı elemanı dayanım özellikleri bakımından incelendiğinde taşlara benzerlik göstermekte olup basınç dayanımı yüksek çekme dayanımı düşük bir malzeme yapısındadır. Geçmişte harman tuğlası olarak kullanılan günümüzde de yaygın olarak kullanılan tuğlaların en önemli tercih sebebi ucuz olması ve üretim kolaylığıdır.

Yapı malzemelerinin farklı geometrilerde örülmesiyle çeşitli tuğla örme teknikleri geliştirilmiştir. Şekil 2.8’de bu örgü teknikleri gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Örgü tekniklerine göre tuğla çeşitleri: a) basit, b) çapraz, c) flaman (Lourenço, 1998)

Duvar yapımında kullanılacak tuğlalara ait basınç dayanımları cinslerine göre Tablo 2.2 ve Tablo 2.3’de verilmiştir.

Tablo 2.2: Biçim ve basınç sınıflarına göre harman tuğlası sınıfları ve özellikleri  
(TS EN 771-1, 2005)

| Sınıflar               |                | Ortalama hacim kütlesi<br>( en fazla)<br>$kg/dm^3$ | Ortalama basınç dayanımı<br>(en az) $N/mm^2$<br>( $kgf/cm^2$ ) | Basınç dayanımı<br>(en az) $N/mm^2$<br>( $kgf/cm^2$ ) |
|------------------------|----------------|--|--|---|
| Dolu harman tuğlası    | Orta dayanımlı |  | 5,0 (50)   | 4,0 (40)  |
|                        | Az dayanımlı   |  | 3,0 (30)   | 2,5 (25)  |
| Delikli harman tuğlası | Orta dayanımlı | 1,40   | 5,0 (50)   | 4,0 (40)  |
|                        | Az dayanımlı   | 1,40   | 3,0 (30)   | 2,5 (25)  |

Tablo 2.3: Fabrika tuğlalarının birim hacim ağırlıkları ve basınç dayanımları  
(TS EN 705, 2005)

| Tuğla Sınıfı         | Birim Hacim<br>Ağırlık $kg/m^3$ | Delik Oranı | Tuğla Sembolleri | Ortalama Basınç<br>( $N/mm^2$ ) |
|----------------------|---------------------------------|-------------|------------------|---------------------------------|
| Dolu tuğla           | 2                               | 15%         | 2/140            | 0,25                            |
|                      |                                 |             | 2/180            | 0,18                            |
|                      |                                 |             | 2/120            | 0,12                            |
|                      | 1,8                             | 15%         | 1,8/220          | 0,22                            |
|                      |                                 |             | 1,8/150          | 0,15                            |
|                      |                                 |             | 1,8/100          | 0,10                            |
| Seyrek delikli tuğla | 1,6                             | 20%         | 1,6/220          | 0,22                            |
|                      |                                 |             | 1,6/150          | 0,15                            |
|                      |                                 |             | 1,6/100          | 0,10                            |
|                      | 1,4                             | 25%         | 1,4/220          | 0,20                            |
|                      |                                 |             | 1,4/120          | 0,12                            |
|                      |                                 |             | 1,4/80           | 0,08                            |
| Az delikli tuğla     | 1,2                             | 35%         | 1,2/150          | 0,15                            |
|                      |                                 |             | 1,2/100          | 0,10                            |
|                      |                                 |             | 1,2/60           | 0,06                            |

### 2.3.3 Harçlar

Harç malzemelerinin kullanımının öncelikli amacı, yapı bileşenlerini bir arada tutabilmektir. Yığma yapılar incelendiğinde kireç harcı, su, horasan harcı

gibi bağlayıcı malzemeler taş, tuğla gibi elemanları bir arada tutmayı sağlayan en önemli unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapının bütün olarak çalışması için harcın uygun malzemeden seçilerek uygun oranda su ile birleşmesi ve aderansın sağlanması çok önemlidir. Çünkü yığma yapılar yapısal olarak incelendiğinde genellikle duvar ve harç malzemesi arasındaki harcın kaybolması veya boşa çıkması ile kayma kırılmasına, duvar veya taş elemanlarda meydana gelen çatlama ve ezilmeler sonucu basınç kırılmasına maruz kalırlar (Ural, 2009).

Tarihi yapıların oluşum şekli incelendiğinde taş, tuğla gibi yapı malzemelerinin harç malzemesi ile bağlanarak oluşturulduğu görülmektedir. Harç malzemesi ile birleşim sonucu oluşan kompozit yapı bütün olarak düşünüldüğünde sistemi oluşturan malzemelerin elastisite modülü, poisson oranı gibi mekanik özellikleri üzerinde etkili olmaktadır. Bu nedenle, maksimum gerilmeler elde edilirken harç malzemesiyle oluşturduğu kompozit birleşimin etkisi de göz önüne alınmalıdır. EN 1996-1-1 (2005)'e göre tuğla, taş ve harçtan oluşan kompozit malzemenin mukavemeti denklem (2.1)'de verilmiştir.

$$f_{bk} = Kx f_b^\alpha x f_m^\beta \quad (2.1)$$

Burada,  $f_b$  : taş veya tuğla malzemeyle ait basınç mukavemeti,  $f_m$  : harç basınç mukavemeti,  $K$ ,  $\alpha$  ve  $\beta$  ise sabit değerlerdir.

#### 2.3.4 Kerpiç

Kerpiç, kil ve toprak malzemenin uygun miktarda su ve bitkisel katkı malzemesi ile karıştırılıp doğal gün ışığında kurutulması ile elde edilen duvar yapımında kullanılan bir yapı malzemesidir. Kerpiç malzemeler ıslandığında ve kırıldığında dayanımını oldukça kaybetmektedir. Bu nedenle, kerpiç yapı oluşturulurken çimento ve kirecin bağlayıcı olarak kullanılması durumunda ayrışmanın önlenebileceği gözlemlenmiştir (Uğuz, 2016).

Kerpiç, üretim sirkülasyonu olmayan bir malzeme olup tuğla ve doğal taşın bulunmadığı durumlarda tercih edilen bir yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca basınç dayanımı çok düşük olduğundan dağılmaya elverişli

bir malzemedir. Bu nedenle, kerpiçten oluşmuş yapılarda kullanılan harç malzemesinin seçimi taşıyıcı sistem stabilitesi açısından büyük önem taşımaktadır.

### 2.3.5 Ahşap

Ahşap malzemeler, hammadde olarak doğada ulaşılabilirliğinin fazla olması ve işlenebilme kolaylığı sebebiyle tarihi yapıların oluşumunda yapı malzemesi olarak tercih edilmişlerdir. Kagir duvarlarda hatıl, kemer açıklıklarında gergi olarak, ayrıca döşeme kirişi, lento gibi eğilmeye çalısan yerlerde, yapıların temelinde ise kazık ve ızgara olarak ahşap kullanımına rastlanmaktadır (Dabanlı, 2016). Ahşap malzemesi yapısal olarak incelendiğinde diğer yapı malzemelerinden farklı olarak ısı ile genişlemeye uğramayan boşluklu yapısı ile hava geçişine izin veren bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır (Özen, 2001). Çekme ve eğilme mukavemeti nedeniyle tarihi yığma yapılarda döşeme, bağ ve kalas elemanı olarak kullanılmıştır. Ahşap malzemelerin en büyük dezavantajları fiziksel ve kimyasal bozulma ve çürümeye karşı dayanımının ve kullanım süresinin düşük olması sebebiyle yerini bakım gerektirmeyen kullanım ömrü çok daha yüksek olan betonarme, çelik yapılar almıştır.

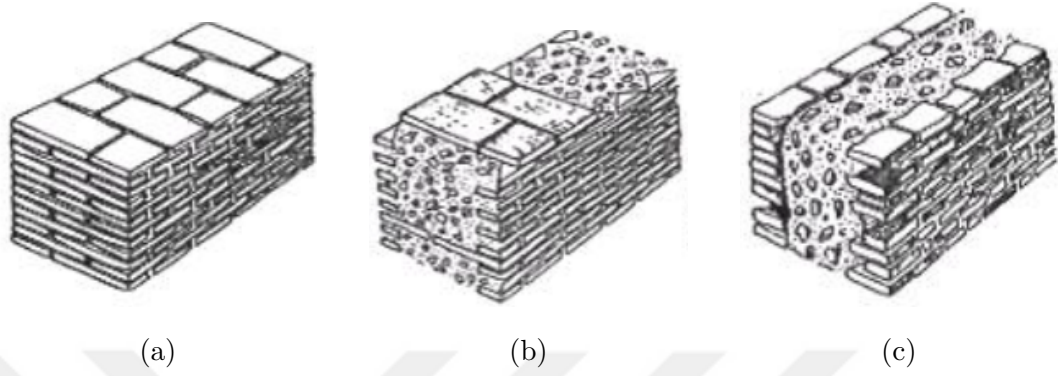
## 2.4 Tarihi Yığma Yapılarda Taşıyıcı Sistem Elemanları

### 2.4.1 Taşıyıcı duvarlar

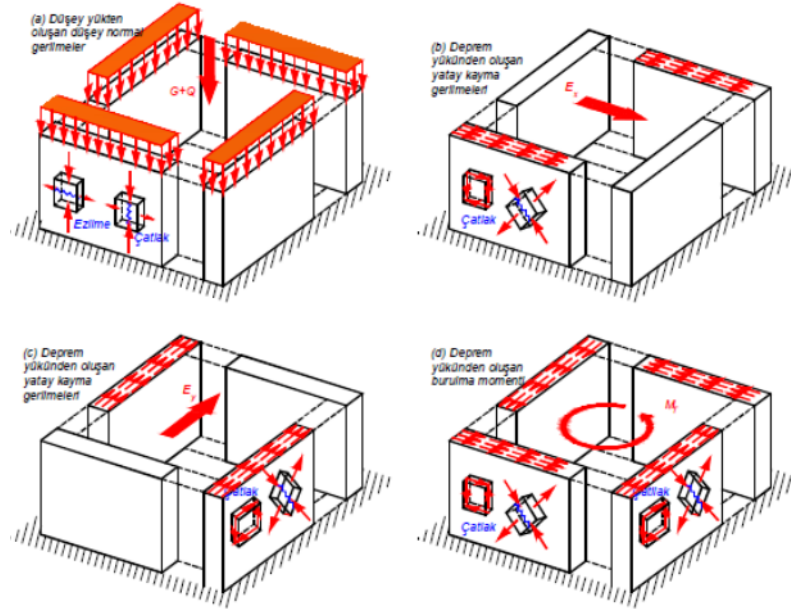
Duvar yapı elemanı yığma yapılar özelinde incelendiğinde hem taşıyıcı hem de hacimleri bölen bir yapı elemanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Taşıyıcı duvarlar düşey ve yatay yükleri taşıdığından taşıyıcı sistemde bütün olarak çalışmalıdır. Yığma yapıların taşıyıcı sistemlerini oluşturan duvar elemanlar incelendiğinde duvar boyutlarının oldukça büyük seçildiği gözlemlenmektedir. Taşıyıcı duvarların oluşumunda genellikle tuğla, kerpiç moloz ve doğal taşlar kullanılmakta olup, bağlayıcı olarak ise kireç, horasan harcı yada çamur kullanıldığı görülmektedir (Dönmezer, 1956; Bahtiyar, 1998).

Geniş bir kagir duvar içi dolu veya boşluklu olarak oluşturulabilmektedir. Duvarlar aynı yapı ve morfolojide taşlarla oluşturulabileceği gibi çeşitli ebat-

larda karma taşarlarda oluşturulabilmektedir. Duvar araları boşluklu yapıda oluşturulmadıysa harç ve moloz taşla doldurulurak birleştirilmiştir. Romalılar zamanında yapılmış farklı tip duvar oluşumları Şekil 2.9'da, yığma duvarlarda meydana gelen normal ve kesme kuvvetlerine ait şema Şekil 2.10'da yer almaktadır.



Şekil 2.9: Romalılar zamanından yığma duvar örnekleri: a)bağlanmış tuğla duvar örneği, b)baş tarafından bağlanmış tuğla duvar örneği, c)yan yüzü tuğla olan ortası dolgu duvar örneği (Uğuz, 2016)

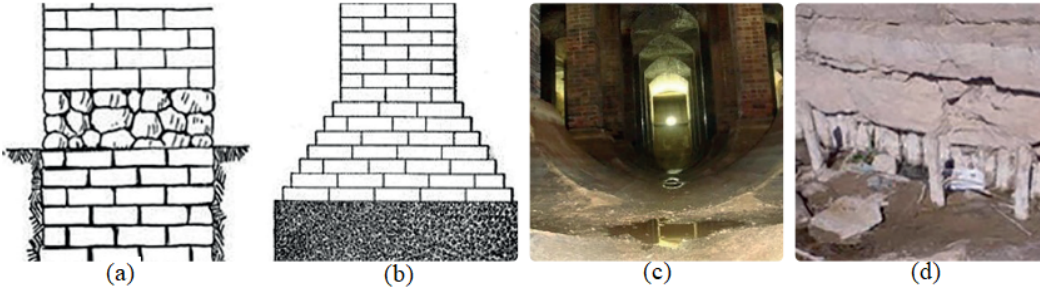


Şekil 2.10: Yığma duvar örneğinde normal ve kesme kuvvetleri (cdn.vgm.gov.tr)

### 2.4.2 Temeller

Yüzyıllar boyu farklı amaçlara hizmet etmiş olan basitten karmaşığa tüm yapılar incelendiğinde yapının bir temel üzerine inşa edildiği görülmektedir. Yapı üzerine gelen her türlü yük (hareketli ve ölü yükler), temeller yardımıyla yapı zeminine aktarılır.

Yapıya uygulanacak temel tipi belirlenirken yapılan zemin etütleri neticesinde zemine ait parametreler analiz edilmekte yapılan inceleme neticesinde zemin sonuçları sağlam olması durumunda yüzeysel temel tipleri, yumuşak olması durumunda derin temel tipleri tercih edilir. Temel oluşum şekli incelendiğinde yüzeysel temellerin genellikle sürekli temel formunda, derin temellerin ise kazık çakılarak oluşturulduğu görülmüştür. Yığma yapılarda temeller genellikle taş malzeme ile oluşturulan sürekli temel yapısında oluşturulmuştur. Yığma yapı temel çeşitlerine ait görsel Şekil 2.11’de gösterilmiştir.

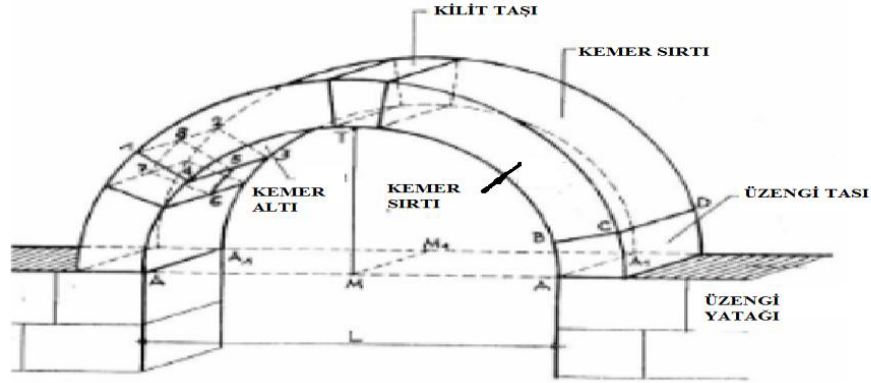


Şekil 2.11: Yığma yapı temel çeşitleri: a)kalın duvar, b)ampatmanlı temel, c)ters tonoz d)kazık temel (cdn.vgm.gov.tr)

### 2.4.3 Kemerler

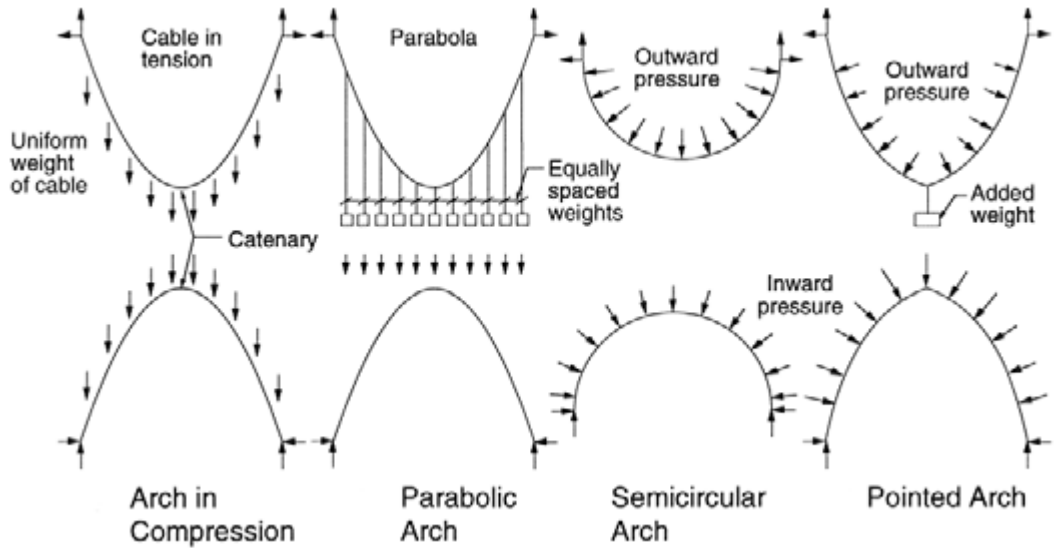
Kemerler genellikle eski yapıların mimarisinde ve köprü yapılarında öne çıkan, iki nokta arasındaki açıklığı geçmeye yarıyan eğri eksenli kiriş elemanlardır. Antik yapılar incelendiğinde kemerlerin, taş yada tuğla ile inşa edildiği görülmektedir. Kemer formun oluşum şekli incelendiğinde farklı yapıdaki taş elemanların kemerin alt ve üst kısmında örümüyle meydana

geldiği görülmektedir. Kemer formunun taşlar ile oluşum şekli, Şekil 2.12'de belirtilmiştir.

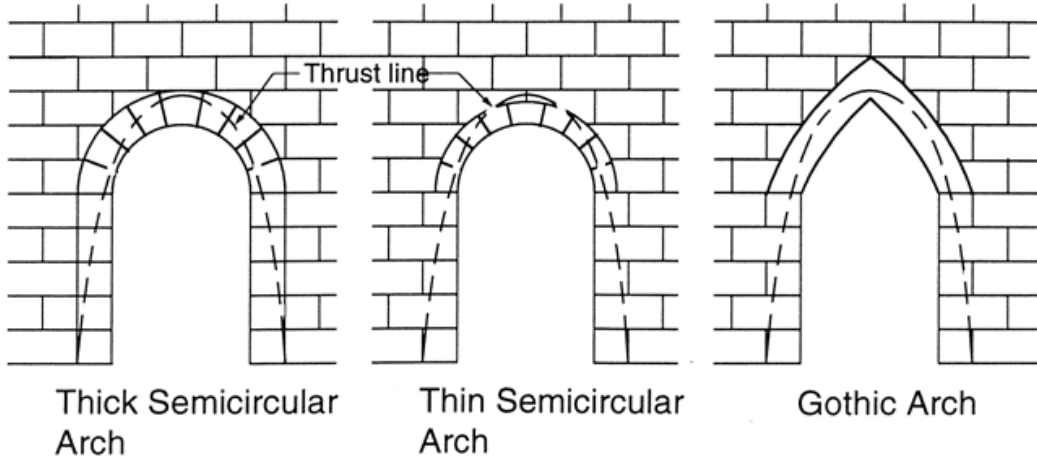


Şekil 2.12: Kemer yapısı (Armağan, 2012)

Kemer formu, yapının mimari ve taşıyıcı sistem unsurlarına göre farklı formlarda oluşturulabilmektedir. Uygulanacak kemer şekli yük modeline bağlıdır. Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'de kemer formunun çeşitli yükleme modellerinde yük aktarımı ve bindirme hatlarının şekilleri görülmektedir. Kemerler genellikle düşey üniform yükleme altında olduğundan, bindirme hattı genellikle paraboliktir.



Şekil 2.13: Kemer yük tipleri (Sa' nchez, 2007)

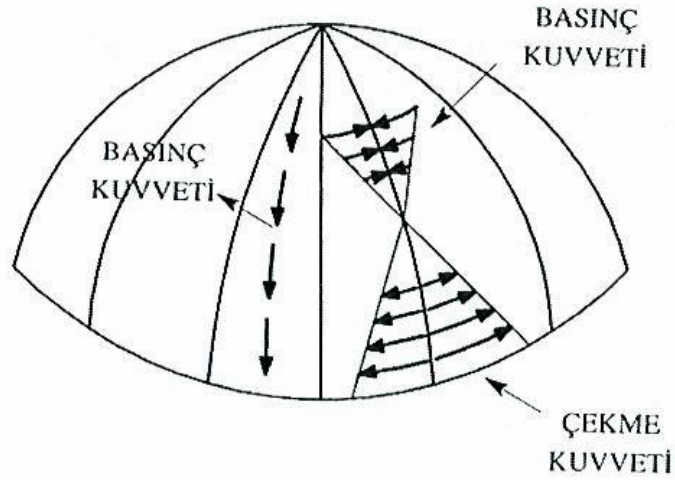


Şekil 2.14: Kemer bindirme hatları (Sa'nchez, 2007)

#### 2.4.4 Kubbeler

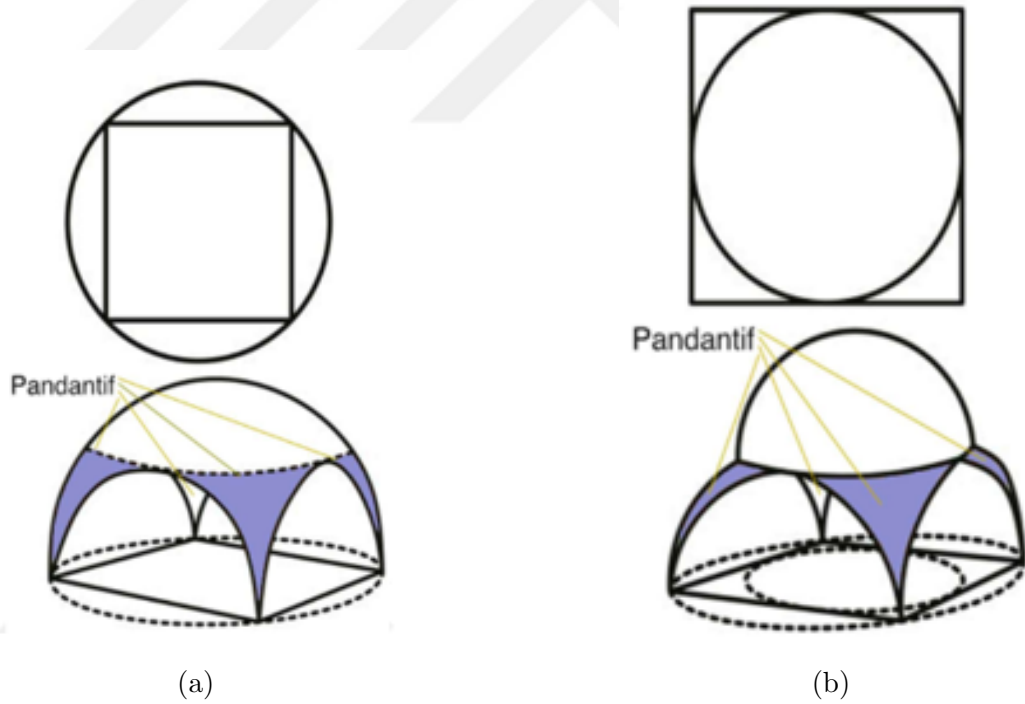
Kubbe terimi yığma yapılar için incelendiğinde geniş açıklıkların ara mesnet kullanmadan geçilmesi veya kubbe formunda bir alanda örtü sistemi oluşturulmasını sağlayan bir yapı elemanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Kubbe sisteminde çalışma prensibi tepe noktasından gelen kuvvetin güvenli bir şekilde kubbe tabanına kadar aktarımını sağlamaktır. Tabana güvenle ulaşan bu yük yatay ve dikey bileşene sahip olmaktadır. Dikey bileşendeki yükler genellikle duvar elemanlarıyla, yatay bileşendeki yükler ise kemer ve payanda gibi elemanlar yardımıyla aktarılır. Hasar almış kubbe örnekleri incelendiğinde genellikle yatay kuvvet etkisinde hasarın olduğu görülmektedir (Akaslan, 2019).

Kubbenin yükü, kubbe ayaklarından kemerlere iletilir. Kubbenin yapısal çalışma prensibi incelendiğinde alt bölgesinin çekme, üst (sırt) bölgesinin basınca çalıştığı görülmektedir. Kubbelerde çekme ve basınç bölgeleri Şekil 2.15'de özetlenmiştir.

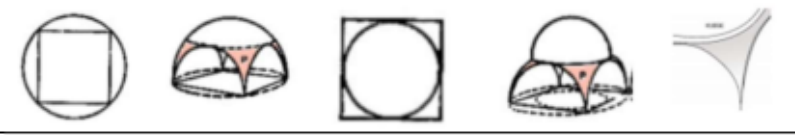
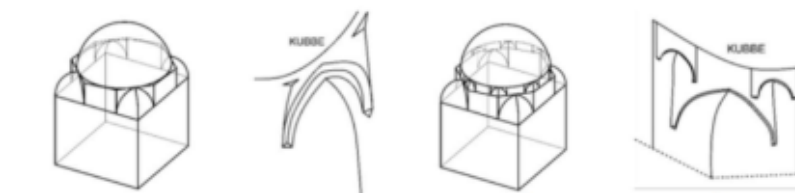
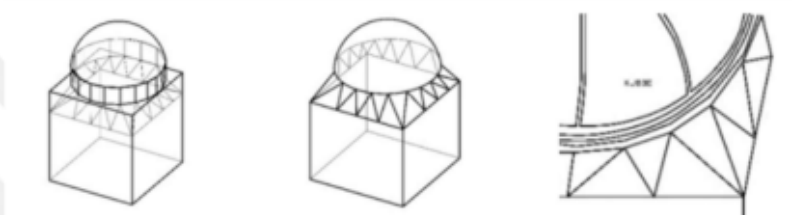
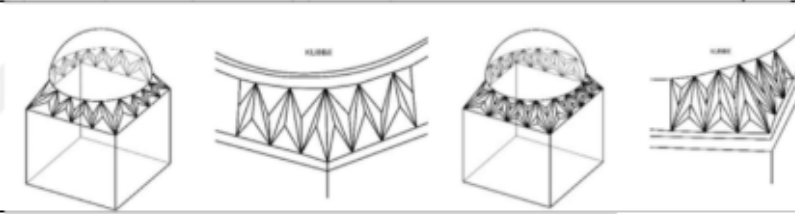
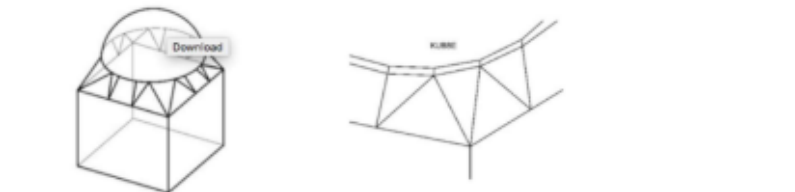
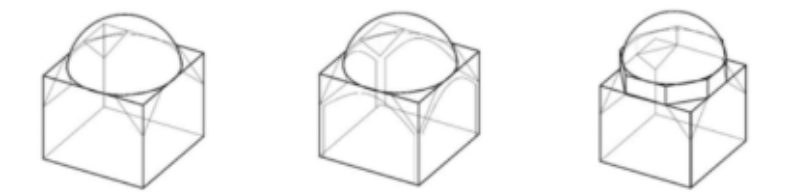



Şekil 2.15: Kubbe çekme ve basınç bölgeleri (Kara, 2009)

Kubbeler kare formda geçilmek istendiğinde düşey yükleri aktarmak için Pandantif, Tromp, Türk üçgeni, Mukarnas gibi bazı yardımcı elemanlara ihtiyaç duymuşlardır. Şekil 2.16 ve Şekil 2.17'de kubbe geçiş elemanları görülmektedir.



Şekil 2.16: (a) Kare köşegenini çap kabul eden pandantif örneği, (b) Karenin bir kenarını çap kabul eden pandantif örneği (Hasol, 1998)

|                          |  |
|--------------------------|--|
| Pandantif                |    |
| Tromp                    |    |
| Düzlem üçgenli kuşak     |    |
| Prizmatik üçgenli kuşak  |    |
| Köşe grubu üçgenli kuşak |   |
| Düzlem üçgen             |  |
| Kasnak                   |  |

Şekil 2.17: Kubbe geçiş elemanları sınıflandırması (Hasol, 1998)

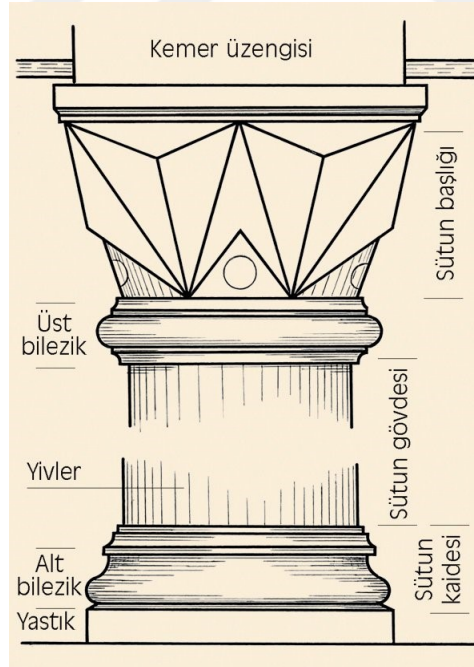
#### 2.4.5 Döşemeler

Döşemeler ölü ve hareketli yükleri düşey taşıyıcı elemanlara aktaran elemanlardır. Özellikle deprem yükü etkisiyle meydana gelen elverişsiz yatay

yükleri taşıyıcı elemanlara aktararak yapı stabilitesinin sağlanmasında önemli rol alırlar. Yığma yapı döşemeleri, kullanılan malzemeler açısından farklılıklar göstermektedir. Geleneksel yığma yapılarda döşemeler, ahşap elemanların yatay ve düşey yönde yerleştirilip üzerinin toprak vb. dolgu malzemesi ile örtülmesi ile oluşturulur (Kayırğa, 2017). Yığma yapılarda kullanımına rastlanan bir diğer döşeme sistemide volta döşemelerdir. Volta döşemede I şeklinde çelik profiller arasına taş yada tuğla örülerek döşeme sistemi oluşturulmaktadır. Hafif kavisli olan bu döşeme türünde profiller arası doldurulup harçla sıvanarak düzleştirilir.

#### 2.4.6 Sütun ve ayaklar

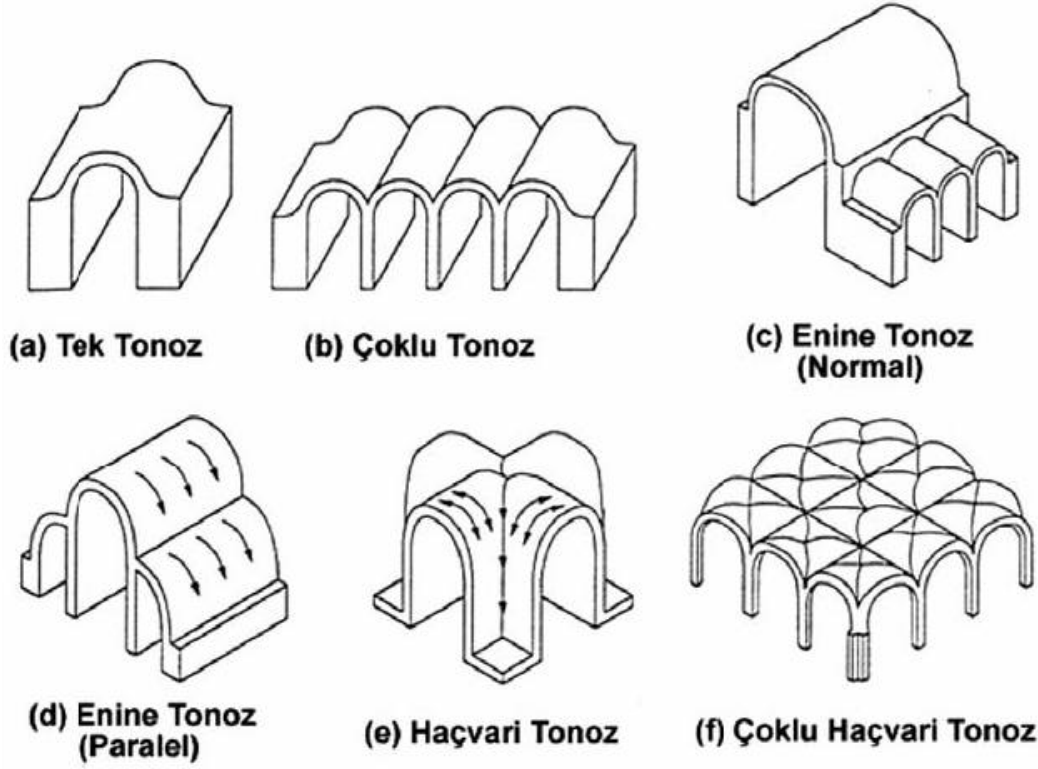
Sütun ve ayak yapı elemanları tarihi yığma yapılarda düşey taşıyıcılar olarak kullanılmışlardır. Tek parça olarak kullanılmalarının yanı sıra farklı mimari yapı elemanları ile blokların birleştirilmesiyle oluşturulmuş örnekleri de karşımıza çıkmaktadır. Kare, çokgen, daire gibi birçok farklı kesitte kullanılmışlardır. Sütun ve ayakları oluşturan yapı elemanları Şekil 2.18'de gösterilmiştir.



Şekil 2.18: Sütun bölümleri (Mülâyim, 2010)

### 2.4.7 Tonoz

Tonozlar kabuk özelliği gösteren tek eğrilikli yapı elemanıdır. Yapısal özellikleri incelendiğinde basınca çalışan elemanlar olduğu görülmektedir (Kara, 2009). Kemerin uzaydaki üç boyutlu uzantısını temsil etse de, başlangıçları, yapım teknikleri ve malzemeleri farklıdır (Sa' nchez, 2007). Tonozlar, oluşturulma şekillerine göre Şekil 2.19'da belirtildiği şekilde sınıflandırılabilir.



Şekil 2.19: Tonoz türleri (Kara, 2009)

## 3 TARİHİ YIĞMA YAPILARIN ANALİZİ

### 3.1 Tarihi Yapılar İçin Deprem Kılavuzuna Göre Modelleme Esasları

Tarihi yapıların düşey ve yatay yükler etkisinde deprem performansının belirlenmesi birçok farklı yöntemle yapılabilmekle birlikte Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanan Tarihi Yapılar için Deprem Kılavuzunda da modelleme ve analiz yöntemleri detaylı olarak tarif edilmiştir (cdn.vgm.gov.tr). Bu kapsamda, deprem yükleri altında malzeme ve yapısal oluşum özellikleri dikkate alınarak farklı modelleme teknikleri kullanılmıştır. Model türü ve hassasiyeti belirlenirken aşağıda yer alan hususlara dikkat edilmiştir;

- Yükleme durumuna bağlı olarak modelleme türü değişmektedir. Örnekleme gerekirse, yapının bir bölümü seçilip düşey yük altında incelenebilirken yatay yükler altında sistemin bütün olarak incelenmesi tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra, yapı elemanları da modelleme türünün belirlenmesinde önemlidir. Yığma bir yapıya ait modelleme teknikleri ile betonarme, çelik elemanlarla oluşturulmuş yapı modelleri farklılık arz etmektedir.

- Modeller, yapılan kabul ve idealleştirmelere göre basit ve karmaşık olabilmektedir. Basit modellemeler gerilme, yer değiştirme gibi değerlerin ve yapı analizlerinin yorumlanmasında netlik ve kolaylık sağlayacağından öncelikli tercih edilmelidir. Ayrıntılı modelleme istenmesi durumunda genellikle sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmektedir. Ayrıntılı modeli oluşturmak daha güç olmasına karşın ayrıntılı analiz sonucu elde etmek adına davranışı daha iyi yansıttığı görülmektedir.

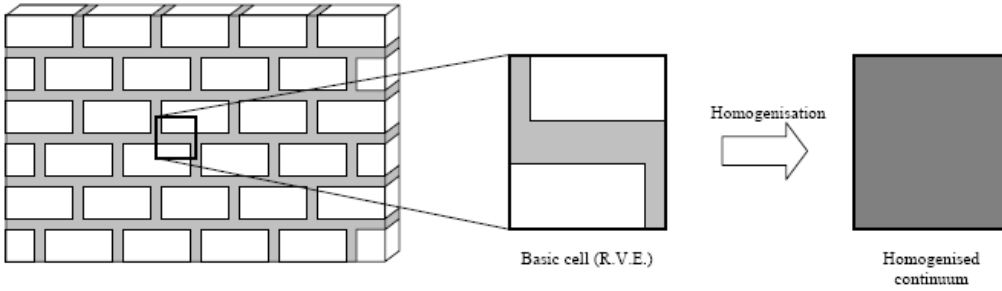
- Yapı analizinden elde edilen sonuçların gerçeklik ve yaklaşıklığı sayısal parametrelerin ne kadar tutarlı ve gerçekçi belirlendiği ile doğrudan ilişkilidir. Yapı geometrisi ve malzeme özellikleri doğru tanımlanmazsa yapılan analiz sonucu elde edilen verilerde eksik veya tutarsız olacaktır. Ayrıntılı analiz aşamasında ortalama değerler alınması gerektiğinde bu husus dikkatli bir şekilde uygulanmalıdır. Örnek vermek gerekirse, yığma duvarın modelleme-

sinden elde edilen gerilme dağılımı kullanımı yerine belirli bir duvar boyunda alınacak ortalama gerilme dağılımı kullanılabilceği ancak gerilme dağılımı belirlenirken duvarların birim uzunluğunun dikkate alınması önerilmiştir.

### 3.2 Modelleme Yöntem ve İlkeleri

Tarihi yapılar başlangıçta büyük ölçüde deneme yanılma yöntemleri ve basit yapılardaki tecrübelerin geliştirilmesiyle tasarlanmıştır. Zaman içinde teknoloji, barınma ihtiyaçlarındaki değişiklikler, nüfus ve demografik yapıdaki değişimler, savaşlar ve diğer çeşitli etkenler bu yapıların farklı amaçlara hizmet edecek şekilde geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bilimsel ve geometrik değerlendirmelerin dikkate alındığı yapıların inşası ile başlayan süreç, günümüzde gelişen bilgisayar teknolojileri, laboratuvar deneyleri, statik, dinamik ve mekanik analizlerin sentezlenmesiyle çok daha ileri bir noktaya ulaşmıştır. Bu analizlerin sağladığı verilerle, yapı inşa edilmeden önce taşıma gücü ve yapı özellikleri detaylı bir şekilde değerlendirilebilmektedir.

Tarihi yığma yapılar farklı geometrik modellerin idealleştirilmesiyle analiz edilir. Şekil 3.1’de homojenleştirilmiş bir yığma yapı örneği şematize edilmiştir.

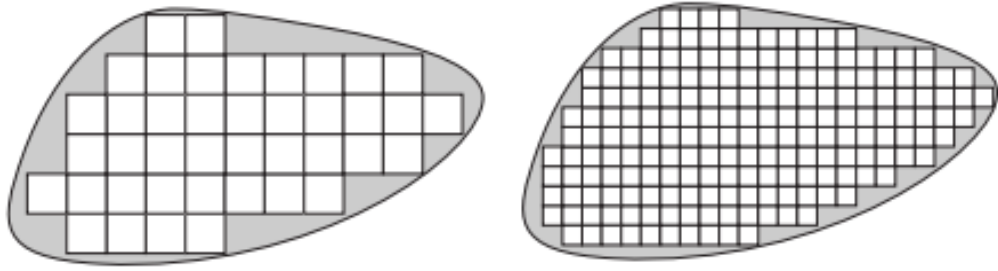


Şekil 3.1: Yığma malzemelerin homojenleştirilmesi (Lourenço, 2006)

Bu aşamada, yapı malzemeleri ve taşıyıcılar belirlenerek yapı elemanlarının bileşenleri tanımlanır ve uygun yöntemlerle bilgisayar ortamında modellenir. Modelleme sırasında yapı elemanları çubuk, kabuk veya solid eleman olarak tanımlanabilir. Yapının gerçek geometrisi ve yapılan kabuller doğrultusunda modellemenin esasları belirlenir ve analiz sonuçları yorumlanır.

### 3.2.1 Sonlu elemanlar metodu

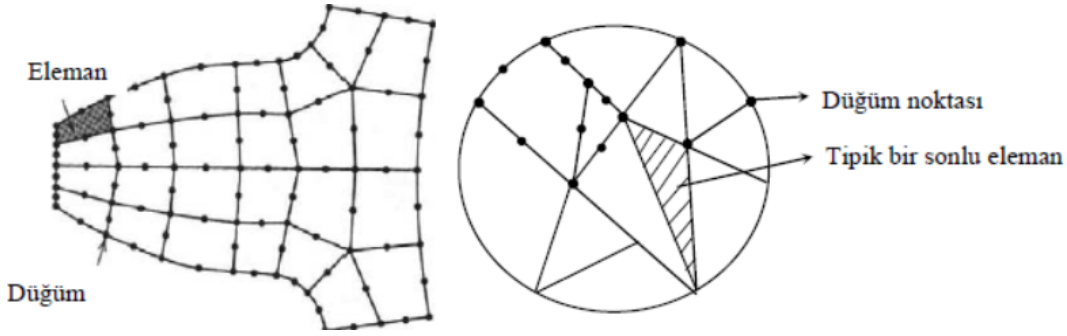
Son yıllarda, yığma yapıların bilgisayar destekli sayısal modellerle incelenmesi artış göstermiştir. Yapılan çalışmalar, sonlu elemanlar metodu uygulanarak yapılan analizlerde yapı hakkında yeterli ve iyi düzeyde bilgi elde edilebilmesi için deneysel ve sayısal sonuçların kombinasyonunun yorumlanmasının gerekli olduğunu ortaya koymuştur (Castellazzi, 2012). Sonlu elemanlar modelinin temel çalışma prensibi düğüm noktalarındaki bağlantı üzerinden gerçekleşmektedir. Sistem oluşturulurken tüm noktalar bir düğüm noktasında birleşip modelin bütünü oluşturulmaktadır. Bu nedenle, yapılan modellemede sisteme ait düğüm sayısı arttıkça eleman sayısı artmaktadır. Bu durum işlemlerin ve sistemin büyümesine bağlı olarak yapılan analizin hassasiyetinde artış oluşturarak sistemin daha doğru ve detaylı sonuca gitmesini sağlamaktadır. Ancak sadece düğüm ve eleman sayısını arttırmak sonlu elemanlar metodunda en doğru ve detaylı sonucu elde edilebileceği anlamına gelmemektedir. Yapının sayısal analizine esas olarak dizayn edilecek idealize edilmiş taşıyıcı sistemde kullanılmak üzere sonlu eleman tipi ve boyutlarının homojenliğine dikkat edilmelidir. Şekil 3.2’de farklı boyutlarda seçilmiş bir örneğin sonlu elemanlara bölünmüş hali görülmektedir (Hutton, 2004).



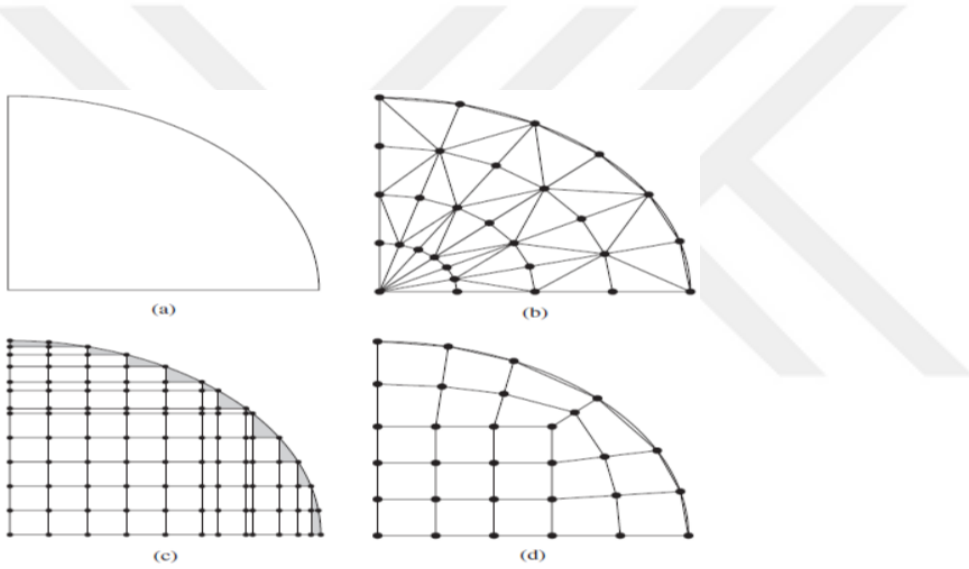
Şekil 3.2: Sonlu elemanlarla oluşturulmuş sistem örneği (Hutton, 2004)

Sonlu elemanlar metodu, günümüzde değişik tiplerde taşıyıcı sistemlerde kullanılabilirdiği gibi tarihi yapıların analizlerinde de sıklıkla kullanılabilir. Bu yöntemde elemanlar küçük parçalara ayrılabilirdiği gibi bir bütün olarak da detaylı analiz edilebilmektedir. Yapıya ait sonlu elemanlar modeli oluşturulurken çeşitli geometrilere sahip yapı elemanlarını birlikte kullanmak

mümkündür. Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de farklı geometrilere seçilen örneklere ait sonlu eleman modelleri ve düğüm noktalarının bağlantı şekillerine ait görseller yer almaktadır.

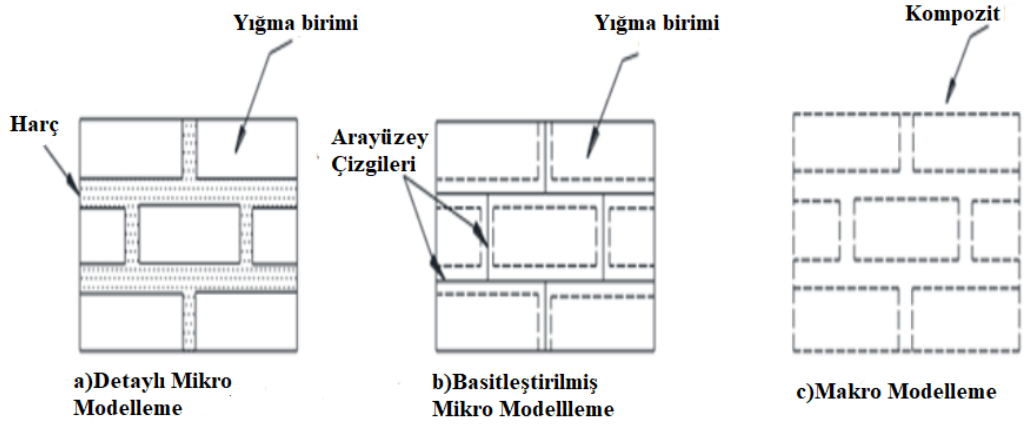


Şekil 3.3: Sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanlar (Ergin vd., 2000)



Şekil 3.4: a)Model oluşum alanı, b)üçgen, c)dörtgen, d)dörtgen ve yamuk alansal elemanlar (Hutton, 2004)

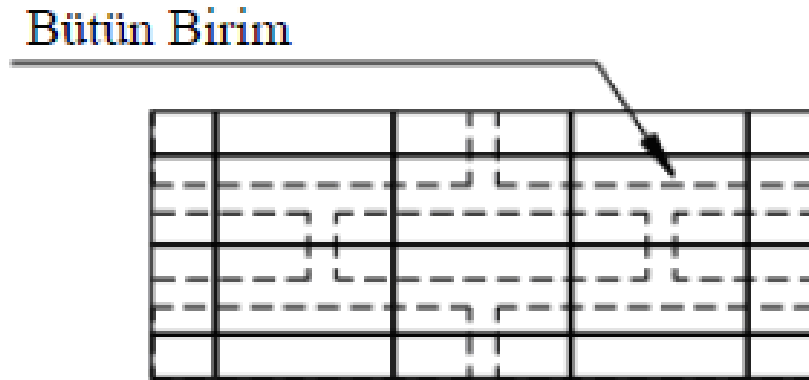
Tarihi yığma yapılar sonlu eleman metodu ile analiz edilirken yapının bir kısmının modellendiği mikro modelleme ve yapının bütün olarak modellendiği makro modelleme tekniğinden faydalanılır. Lourenço (2002) ve Asteris ve Tzamtzis (2003) çalışmalarında yığma yapıları model şekline göre sınıflandırmışlardır. Şekil 3.5’de yığma yapı modellerinin tasarım şekilleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Detaylı mikro modelleme, basit mikro modelleme, makro modelleme (Lourenço, 2006)

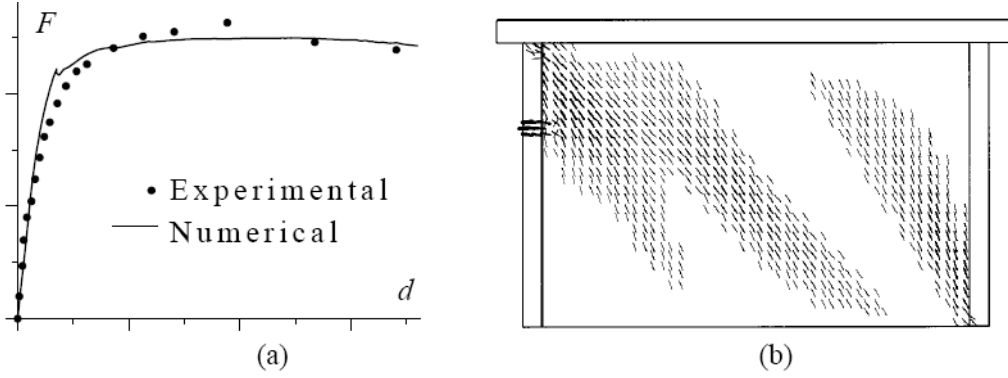
### 3.2.2 Makro modelleme

Makro modellemede tuğlalar, harç derzleri ve ara yüz tek bir bütünsel eleman olarak tanımlanır. Bu yöntemde, duvarın tamamı homojen kabul edilerek analizler gerçekleştirilir (Truong-Hong and Laefer, 2008). Yığma elemanlar ile harç arasındaki etkileşimin ihmal edildiği kabul edilerek sistem modellenir. Bu tip modellemede homojen elemanların mekanik özelliklerinin çalışma prensibi Şekil 3.6'da belirtilmiştir.



Şekil 3.6: Makro modelleme yöntemi (Tetik, 2015)

Makro modellemede malzeme tanımlamasının doğru bir şekilde yapılması elde edilecek analiz sonuçlarının doğruluğu açısından en önemli faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 3.7'de yığma bir duvar örneğinin makro model analizi görülmektedir.

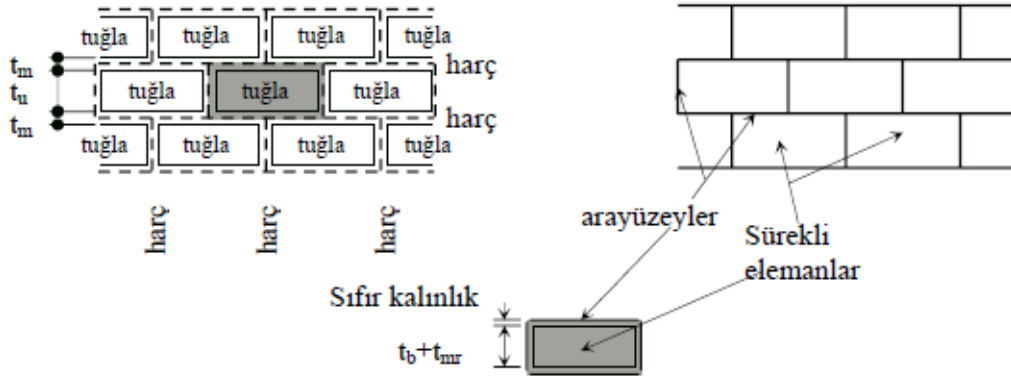


Şekil 3.7: a)Kuvvet-yer değiştirme diyagramı, b)nihai yükte deformasyon (Lourenço, 1998)

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, daha küçük parçalardan oluşan ve karmaşık sistemlerde makro modellemenin yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Bu noktada mikro modelleme yöntemi ön plana çıkmıştır.

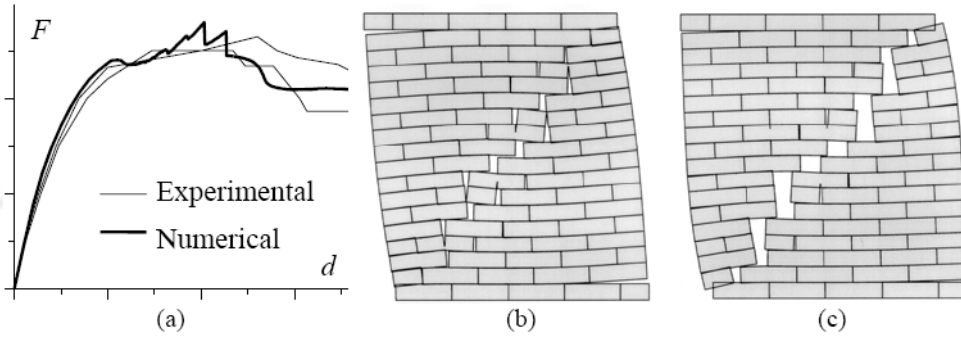
### 3.2.3 Mikro modelleme

Mikro modelleme tekniğinde yığma yapı küçük parçalara ayrılarak yapıyı oluşturan birimler ayrı ayrı modellenir. Bu teknikte makro modellemeye göre malzeme özelliklerinin daha detaylı irdelenmesi yapılabilmekte, daha küçük parçaların oluşumuna bağlı olarak düğüm ve eleman sayısının artması sebebiyle modellenecek sistemin oluşturulması ve analizi daha fazla zaman almaktadır. Basitleştirilmiş mikro modellemede yapıyı oluşturan bileşenler sürekli elemanlarla ve harç derzleriyle, arayüz ise süreksiz elemanlarla temsil edilir. Bu model ile harç derzleri göz ardı edilir ve özellikleri elemanların etkileşim davranışına dayanan ara yüz elemanları ile değiştirilir (Truong-Hong and Laefer, 2008). Şekil 3.8'de basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği şematize edilmiştir.



Şekil 3.8: Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği(Lourenço, 1998)

Detaylı mikro modellemede tuğla ve harç birimleri sürekli elemanlarla temsil edilip ayrı ayrı modellenirken, tuğla ve harç arasındaki ara yüz davranışı süreksiz elemanlarla temsil edilir. Şekil 3.9'da yığma duvara ait mikro analiz sonuçları yer almaktadır.



Şekil 3.9: a)Kuvvet-yer değiştirme diyagramı, b)maksimum yükteki deformasyonlar, c)Nihai yükteki deformasyonlar (Lourenço, 1998)

### 3.3 Yapıya Etki Eden Yükler

Tarihi yığma yapıların veya diğer tip yapıların performansının doğru bir şekilde belirlenebilmesi için yapıya etki eden yüklerin de gerçekçi bir şekilde tanımlanması esastır. Yapıya etki eden yükler aşağıda sınıflandırılmıştır.

### 3.3.1 Sabit (zati) yükler

Yapıyı ve taşıyıcı sistem elemanlarını oluşturan malzemelerin oluşturduğu ağırlıktır. Yığma yapı örnekleri için taş, ahşap, tuğla ve harç malzemelerinin mekanik özellikleri laboratuvar ortamındaki deneysel çalışmalarla belirlenebileceği gibi söz konusu malzemelere ait standartlardan da elde edilebilmektedir. Yığma yapılarda kesit boyutlarının büyük olması sebebiyle zati ağırlıklar önem arz etmektedir.

### 3.3.2 Hareketli yükler

Yapı üzerinde sürekli bir etki yaratmayan diğer bir deyişle zaman içinde değişkenlik gösteren yüklerdir. Çoğunlukla yapının kullanım amacına göre insan etkisi, araç gereçler, makina gibi yer değiştirebilen dış etkiler hareketli yük olarak kabul edilirler. Özel durumlar olmadığı takdirde esas alınacak yükler için minimum değerler TS 498 (1997)'de yer almaktadır.

### 3.3.3 Rüzgar ve kar yükü

Rüzgar ve kar yükleri değerlendirilirken yapının oluşturulduğu bölgenin iklim koşulları, yapının yüksekliği, bulunduğu coğrafya ve çatı elemanın türü dikkate alınmalıdır. Bahse konu yüklerin yapıya etki edilmesini örneklemek gerekirse, rüzgar ve kar yükünün yığma yapılara nazaran ahşap yapılarda daha etkili olduğu söylenebilir. Bunun yanında yapılan değerlendirmelerde minare gibi narin ve yüksek yapılarda rüzgar yükünün taşıyıcı sistem elemanlarını nispeten daha şiddetli etkilediği görülmektedir.

### 3.3.4 Mesnet çökmesi

Yapının üzerine oturduğu zeminin özelliklerinden kaynaklı mesnet çökmeleri ve dönmeleri üst yapı taşıyıcı sisteminde şekil değiştirme ve gerilmelere neden olmaktadır. Bu kapsamda özellikle geniş alanlara yayılmış yapıların zemin özellikleri detaylı olarak incelenmeli, uzun yıllar içerisinde maruz kalabileceği dış etkiler ve zemin oturmaları önceden tahmin edilerek gerekli

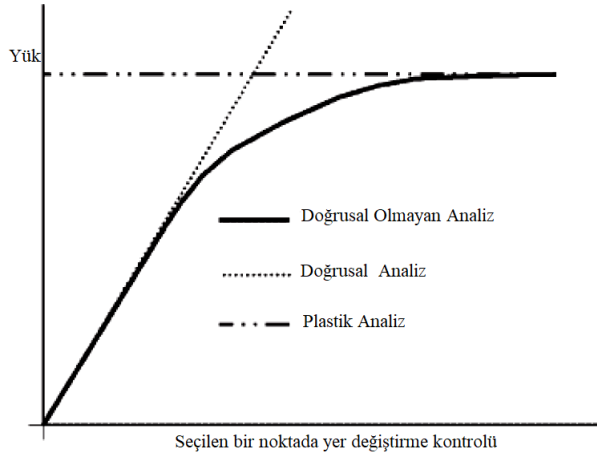
önlemler alınmalıdır (Güner, 2018).

### 3.3.5 Deprem yükü

Yapının bulunduğu coğrafi konumun riskli deprem bölgesinde yer alması nedeniyle deprem yükü önemli bir tasarım parametresi olarak ön plana çıkar. Bu sebeple, yüzyıllar öncesinde yapılan tarihi yapılardan günümüz yapılarına kadar depremin etkileri göz önünde bulundurularak yapı tasarımları gerçekleştirilmelidir. Deprem yönetmeliklerine göre kategorize edilmiş olan deprem risk bölgelerinde deprem yükleri farklı değerler alabilmektedir. Ülkemiz beş deprem bölgesine ayrılmıştır ve bu bölgeler birinci dereceden beşinci dereceye kadar sıralanmıştır.

## 3.4 Analiz Yöntemi

Tarihi yığma yapıların yapısal davranış özellikleri belirlenirken çeşitli analiz yöntemlerinden faydalanılmaktadır. Bunların seçiminde yapının tipi, taşıyıcı sistemini oluşturan yapı elemanlarının mekanik özellikleri ve inşa edildiği dönem gibi birçok etken göz önünde bulundurulmaktadır. Hem yapılan literatür çalışmaları hemde Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanmış olan deprem risklerinin yönetimi kılavuzunda tarihi yapıların analiz yöntem ve esasları kapsamlı bir şekilde belirtilmiştir. Bu analiz türleri yapıların tasarımı, güvenliği ve dayanıklılığı hakkında önemli çıkarımlarda bulunulmasını sağlamaktadır. Tarihi yığma yapıların doğrusal, doğrusal olmayan ve plastik esaslı analiz yöntemlerine ait yük-yer değiştirme mekanizması grafiği Şekil 3.10'da, gerekli sınır koşulları verilmiş olan analiz yöntemleri için yapılabilecek kabuller ise Tablo 3.1'deki gibi verilmiştir.



Şekil 3.10: Yüke bağlı yer değiştirme (Dabanlı, 2008)

Tablo 3.1: Analiz tiplerinin karşılaştırılması (DBYBHY, 2007)

| ANALİZ TİPİ             | GİRİŞ VERİSİ  | SONUÇ VERİSİ   |
|-------------------------|---|--|
| Doğrusal Analiz         | Lineer-Elastik Malzeme Özellikleri<br>Güvenlik Gerilmeleri                            | Şekil Değiştirme<br>Gerilme Dağılımı                         |
| Doğrusal Olmayan Analiz | Malzemenin Elastik ve Mukavemet Özellikleri<br>Malzemenin Elastik Olmayan Özellikleri | Şekil Değiştirme<br>Gerilme Dağılımı ve<br>Göçme Mekanizması |
| Plastik Analiz          | Malzeme Mukavemeti  | Göçme Mekanizması  |

### 3.4.1 Düşey ve yatay yükler altında statik analiz

Statik analiz ile yapı üzerine etki eden düşey ve yatay yüklerin etkisi altında yapısal davranışı belirlenmektedir. Bu yöntemde, analizler zamana bağlı olmadan gerçekleştirilmektedir. Statik analizde yapı üzerine etki eden yükler ve yapı elemanlarının geometrisi de göz önüne alınarak yapıya ait yer değiştirmeler ve gerilmeler hesaplanmaktadır. Taşıyıcı sistemde meydana gelebilecek deformasyonlar, gerilmeler, elverişsiz yükler ve yer değiştirme parametreleri hakkında tasarım öncesi öngörü imkanı veren bu yöntem sayesinde esere ait tasarımın yapı stabilitesini güvenli bir biçimde taşıyabileceği öngörüsünün yapılması sağlamaktadır. Deplasman yöntemiyle statik analizde

yer değiştirmelerin tespit edilebilmesi için Denklem (3.1)'deki genel ifade kullanılmaktadır.

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (3.1)$$

Burada;  $[K]$  rijitlik matrisi,  $\{u\}$  yer değiştirme vektörü,  $\{F\}$  dış yük vektörünü temsil etmektedir.

### 3.4.2 Dinamik analiz

Yapıya tesir eden yüklerin zamana bağlı değişiminin dikkate alındığı analiz tipidir. Dinamik analiz yapıyı ayakta tutacak olan taşıyıcı sistemin titreşim tepkilerini ve dinamik yükler altındaki davranışlarını belirler. Dinamik analiz türleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

- **Modal Analiz**

Bu analiz yönteminde yapıya ait periyot değerleri, yüke bağlı oluşan mod şekilleri ve kütle katılım oranları gibi parametreler belirlenir. Her ne kadar matematik olarak bir dayanağa sahip olsa dahi daha detaylı analiz verisinin elde edilebilmesi amacıyla modal analiz sonuçlarının lineer statik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir (Dabanlı, 2008).

- **Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi**

Eşdeğer deprem yüğü tüm yapılar için geçerli bir analiz yöntemi değildir. Bu yöntemin uygulama sınırları belirlenmiş olup koşullar Tablo 3.2'de belirtilmiştir. Eşdeğer deprem yüğü hesabında öncelikle katların toplam kütleleri ve buna bağlı olarak katlara etki edecek olan yükler belirlenir. Bu veriler ışığında toplam yapı yükünede bağlı olarak hesaplanıp katlaraya etkiyen eşdeğer deprem yüğü dağıtılarak gerek x gerekse y yönünde etki ettirilir. Yapıda oluşan düzensizlikler ve görel kat ötelemeleri tespit edilir. Yapının kullanım amacına göre etki ettirilecek tesirler yük azaltma katsayıları dikkate alınarak işlemlere dahil edilmelidir.

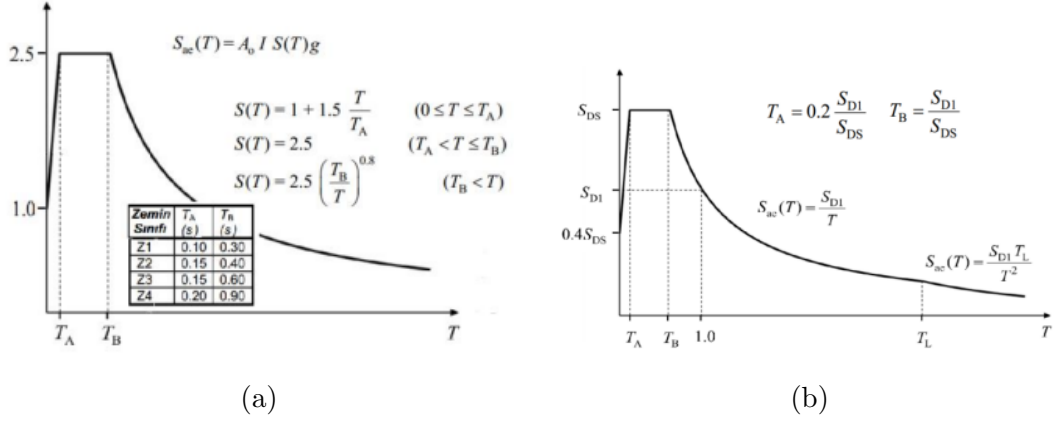
Tablo 3.2: Eşdeğer deprem yükünün uygulanabileceği binalar (DBYBHY, 2007)

| Deprem Bölgesi | Bina Türü  | Toplam Yükseklik Sınırı |
|----------------|--|-------------------------|
| 1-2            | Her bir katta burulma düzensizliği katsayısının $\eta_{bi} \leq 2,0$ koşulunu sağladığı binalar  | $H_N \leq 25$           |
| 1-2            | Her bir katta burulma düzensizliği katsayısının $\eta_{bi} \leq 2,0$ koşulunu sağladığı ve ayrıca B2 türü düzensizliğinin olmadığı binalar | $H_N \leq 40$           |
| 3-4            | Tüm binalar  | $H_N \leq 40$           |

### • Mod Birleştirme Yöntemi

Davranış spektrumlarının dikkate alındığı bu yöntemde, oluşturulabilecek yer değiştirmeler, oluşan maksimum iç kuvvetler göz önünde bulundurulurken analizler gerçekleştirilir. Modların birleştirilmesi yaklaşımında en elverişsiz yük durumuna göre hesaplamalar gerçekleştirildiğinden sayısal çözümleme süresi kısa bir yöntemdir. Bu yöntemde birden fazla mod değerinin etkisi incelenebildiğinden eşdeğer deprem yükünden farklı olarak tüm binalara daha gerçekçi olarak uygulanabilmektedir. Spektrum eğrileri mod birleştirme yönteminde maksimum değeri bulmak için oluşturulduğundan çeşitli durumlarda yetersiz gelir ve farklı matematiksel çözüm metodları kullanılmasına ihtiyaç duyulur.

Gerçek deprem ivme kayıtları yönetmeliklerde belirtilen spektrum eğrilerinden farklılık gösterebildiğinden bu durumlarda spektrum eğrileri ölçeklendirilmesi durumuna gidilmektedir. Çeşitli deprem yönetmeliklerinde belirtilen yatay elastik spektrum eğrilerine ait örnekler Şekil 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3.11: (a) DBYBHY (2007)'ye göre yatay elastik tasarım ivme spektrumu, (b) TBDY (2018)'e göre yatay elastik tasarım ivme spektrumu

### • Zaman Tanım Alanında Analiz

Analizi yapılan idealize edilmiş bir taşıyıcı sistemin zaman içerisindeki değişkenlik gösteren davranış fonksiyonunu esas alan analiz türüdür. Yapının kütle, sönüm ve rijitlik özelliklerinin seçimi yapılan bir deprem ivme kaydı ile ele alındığı analiz yöntemidir. Uygulanacak olan analizde, yapının bulunduğu coğrafi konum ve zemin parametrelerine göre ölçeklenmiş spektrum eğrileriyle birlikte belirli sayıda deprem kaydının kullanılması gerekli olmaktadır. Gerçekleştirilen analiz neticesinde yapının belirli bir zaman periyodu içerisindeki deprem kuvvetleri etkisi altındaki davranışı yorumlanır. Deprem kuvvetleri etkisinde yapıya ait gerilme, iç kuvvetler, şekil değiştirme ve yerdeğiştirmeler ayrıntılı olarak elde edilebilmektedir. Depreme dayanıklı yapı tasarlanmasında sık kullanılmakta olan zaman tanım alanında hesap prosedüründe yapay ya da gerçek bir deprem ivme kaydıyla çalışılabilmektedir. Yapı üzerinde seçilen deprem ivme kaydı doğrultusunda uygulanan deprem etkisi altında çözümlere ulaşılır.

## 4 ÖRNEK ÇALIŞMA: EFES ST. JEAN BAZİLİKASI

### 4.1 Selçuk Ayasuluk Tepesi Coğrafi Özellikleri

Bu çalışmada yapısal davranışı ele alınan St. Jean Bazilikası birçok medeniyete ev sahipliği yapan İzmir ili Selçuk ilçesinde yer almaktadır. Hz. İsa'nın 12 havarisinden biri olarak bilinen St. Jean, Aziz Yahya olarak da bilinir. Selçuk ilçesi Efes antik kentinin 2 *km* kuzeydoğusundadır ([tr.wikipedia.org\(a\)](http://tr.wikipedia.org(a))). 1. Derece Arkeolojik Sit Alanı olan bölge, dünyanın bilinen en eski yerleşim yerlerinden olan Efes antik kentinin ilk kurulum yerlerinden olduğu bilinen Ayasuluk Kalesi ve çevresi kültürel olarak birçok yapısal zenginliği barındırmaktadır. Batı Anadolu'nun önemli ticaret merkezlerinden kabul edilen Efes antik kentinde, ayasuluk kalesi yanına, asya eyaletinin yedi büyük kilisesinden biri olan St. Jean Bazilikası I. Justinianus tarafından yaptırılmıştır (Büyükkolancı, 2001). Şekil 4.1'de St. Jean Bazilikası'na ait kalıntıların bulunduğu alanın üstten görünüşü yer almaktadır.



Şekil 4.1: St. Jean Bazilikası üst görünüş ([www.efes2000vakfi.com](http://www.efes2000vakfi.com))

### 4.2 St. Jean Bazilikasının Yapısal Özellikleri

St. Jean Bazilikası İzmir'in Selçuk ilçesinde, Ayasuluk Tepesinin eteklerinde sur duvarları altında yer almaktadır. Yandan bakıldığında haç şeklindeki

planı ve altı adet kubbeyle örtülü olmasıyla özel bir yere sahiptir. Yapının inşası 527 yılında başlayıp 565 yılında tamamlanmıştır (www.efes2000vakfi.com). Bazilikanın da içerisinde bulunduğu alanda kazı çalışmaları 2007-2019 yılları arasında Dr. Mustafa BÜYÜKKOLANCI, 2019 yılından itibaren ise Doç. Dr. Sinan MİMAROĞLU kazı başkanlığında sürdürülmektedir.

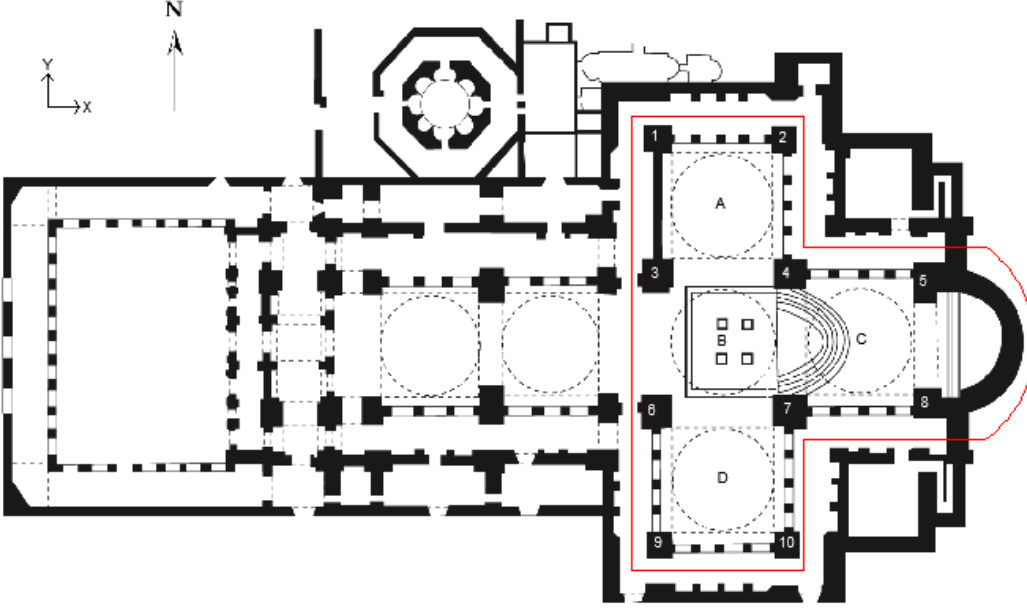
St. Jean Bazilikası, Bizans döneminde (4-6. yüzyıllar) yapılmış arkeolojik bir anıttır. Efes ile birlikte UNESCO tarafından Dünya Mirası olarak ilan edilmiştir. Bizans dönemine ait bazilikalar ve eserler, tarihi yapı malzemelerinin farklı geometrilerde birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bazilikanın tamamına yakını tuğla ve kesme taşlardan, sütunları ise mermer ve mermer kaplama malzemenen oluşturulmuştur. Yapı mimarisi incelendiğinde St. Jean'ın mezarının en ortadaki büyük kubbeli bölümün altında olduğu görülmektedir. Bu mezar, dini açıdan Hristiyanlık dünyasındaki önemi sebebiyle orta çağ boyunca en önemli ziyaret yerlerinden biri olmuştur (Akyürek, 1996; Turani, 2007).

### 4.3 St. Jean Bazilikası'nın Taşıyıcı Sistem Özellikleri

Tez çalışması kapsamında, mevcut durumdaki enkaz durumundaki yapının yıkılma şekli için literatürde bir kayda ulaşılamamıştır. St. Jean Bazilikası'nın yapısal modeli oluşturulurken yapısal literatürden elde edilen mimari plan esas alınmıştır. Mimari plan esas alınarak yapının modelleme ve analizi gerçekleştirilmiştir. Yapının malzeme bilgileri Tablo 4.1'de, mimari planı Şekil 4.2'de, elemanlara ait ölçü bilgileri Tablo 4.2'de yer almaktadır.

Tablo 4.1: Yapı malzemeleri listesi

| Yapı Elemanı | Eleman Tipi            |
|--------------|------------------------|
| Sütun Kolon  | Mermer                 |
| Duvarlar     | Doğal Kesme Taş + Harç |
| Kemerler     | Tuğla + Harç           |
| Kaideler     | Mermer                 |
| Kubbeler     | Tuğla + Harç           |



Şekil 4.2: St. Jean Bazilikası plan görünüş (Baranaydın, 2020)

Tablo 4.2: Yapı elemanlarına ait ölçüler

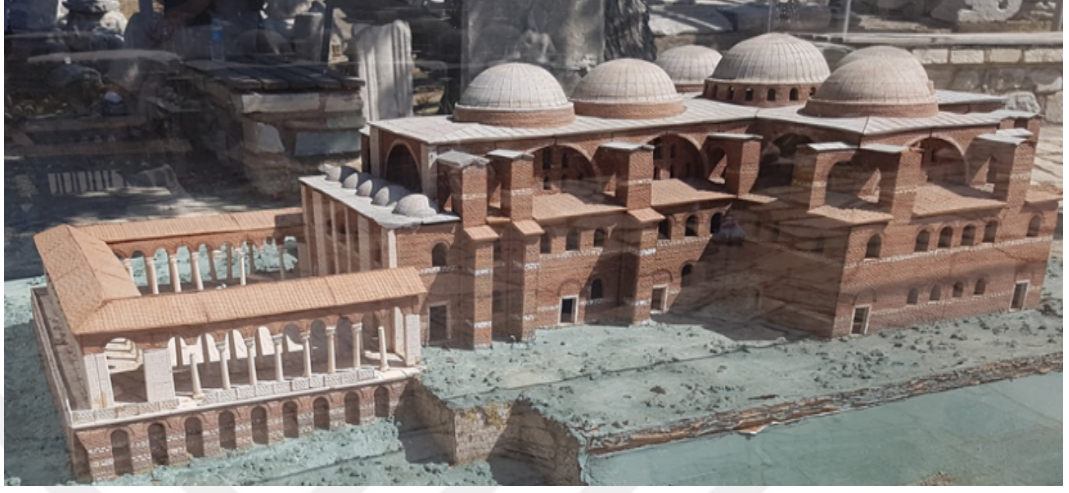
| Eleman                      | Ebatlar (m) |
|-----------------------------|-------------|
| Kolonlar (1,2,5,8,9,10)     | 3.8         |
| Kolonlar (3,4,6,7)          | 4.5         |
| Sütun Çapı                  | 0.63        |
| Sütun Başlığı (Dar)         | 0.63        |
| Sütun Başlığı (Dar Geniş)   | 1           |
| Sütun Kalınlığı             | 0.15        |
| Sütun Yüksekliği 1. Kat     | 4           |
| Sütun Yüksekliği 2. Kat     | 3           |
| Ana Kubbe Çapı (B)          | 12.5        |
| Diğer Kubbe Çapları (A,C,D) | 11.5        |

## 4.4 Bazilika Kalıntılarında Gözlemler ve Laboratuvar Çalışmaları

### 4.4.1 Mahalinde gözlem ve incelemeler

İzmir İli, Selçuk Müze Müdürlüğü ve Ayasuluk Kazı Başkanlığı sorumluluğundaki alan içerisinde gözlem ve yerinde inceleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu incelemelerde yapının oluşum şekli, tarihsel gelişimi, oluşturulduğu döne-

min diğer yapılarıyla benzerlikleri ve kullanılan yapı malzemeleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. St. Jean Bazilikası'na ait saha çalışmaları sırasında yapılan gözlem ve incelemelerde gözlemlenen maket çalışması Şekil 4.3'de, sonradan restore edilmiş sütunlu kemer yapısı Şekil 4.4'de yer almaktadır.



Şekil 4.3: St. Jean Bazilikası'na ait maket çalışmasına ait görüntü



Şekil 4.4: St. Jean Bazilikası'na ait restore edilmiş sütunlu kısım

St. Jean Bazilikası'na ait kalıntıların genel görünümü Şekil 4.5'de, yapı sistem malzemelerinin detayları da Şekil 4.6'da yer almaktadır.



Şekil 4.5: St.Jean Bazilikası'na ait kalıntıların genel görünümü



Şekil 4.6: St.Jean Bazilikasına ait taşıyıcı sistemlerin malzeme detayları

#### 4.4.2 Laboratuvarda yapılan fiziksel ve mekanik deneyler

- **Deney numunelerinin hazırlanması**

St. Jean Bazilikası'na ait taş, tuğla ve harç malzemelerine ait mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla çeşitli numuneler alınmıştır (Şekil 4.7). Selçuk Müze Müdürlüğü ve Kazı başkanlığı ile yapılan koordine ve alınan izinler neticesinde toplanan numuneler EGE Üniversitesi

İnşaat Mühendisliği laboratuvarına getirilmiştir. Malzeme numuneleri ile birim ağırlık (yoğunluk) tayini ve tek eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler ile taşıyıcı sisteme ait yapı malzemelerinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi ve böylece yapılacak modellemedeki malzeme özelliklerinin tanımlanmasında bu verilerin kullanılması amaçlanmıştır.



Şekil 4.7: Yerinde inceleme esnasında alınan malzeme numuneleri

- **Birim hacim ağırlık deneyi**

Fiziksel deneyler için hazırlanan numunelerden ağırlıkça su emme deneyleri yapılarak birim hacim ağırlık ( $\lambda, gr/cm^3$ ) elde edilmiştir. Bu kapsamda, Ege Üniversitesi Yapı Laboratuvarına getirilen taş, tuğla ve harç malzemelerine ait numuneler laboratuvar ortamında uygun sıcaklıkta belli bir süre bekletilmiştir. Ardından numunelerin kuru haldeki ağırlığı ve su emme sonrası ağırlığı özgül ağırlık deney sehpa ve düzeneği yardımı ile elektronik hassas tartı ile ölçülmüştür. Özgül ağırlık tartı düzeneği, sertleşmiş beton, tuğla, doğal ve kesme taş gibi malzemelerin yoğunluklarının belirlenmesinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Şekil 4.8'de özgül ağırlık tartı deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 4.8: Özgül ağırlık-yoğunluk tartı deney düzeneği

Malzemelere ait birim hacim ağırlıkları belirlenirken aşağıda belirtilen formül kullanılmıştır.

$$\lambda = \frac{G_k}{G_{ds} - G_s}$$

Burada  $G_k$  kuru ağırlık,  $G_{ds}$  suya doymuş ağırlık ve  $G_s$  su içindeki ağırlıktır.

**Harç+Tuğla numune yoğunluk belirlenmesi;**

$$\lambda_{\text{harç+tuğla}} = 1580 / (1790 - 797) = 1.59 \text{ g/cm}^3$$

**Tuğla numune yoğunluk belirlenmesi;**

$$\lambda_{\text{tuğla}} = 2422 / (2644 - 1283) = 1.78 \text{ g/cm}^3$$

**Doğal-kesmetaş numune yoğunluk belirlenmesi;**

$$\lambda_{\text{doğal-kesmetaş}} = 2225 / (2237 - 1196) = 2.14 \text{ g/cm}^3$$

**Harç numune yoğunluk belirlenmesi;**

$$\lambda_{\text{harç}} = 725 / (845 - 311) = 1.36 \text{ g/cm}^3$$

Kuru ve suda ağırlık ölçümler sonrası elde edilen değerler ile birim hacim ağırlıkları (yoğunluk) Tablo 4.3'de özetlenmiştir.

Tablo 4.3: Numunelerin birim hacim ağırlık çizelgesi

| Malzeme        | $(G_k)$ Kuru Ağırlık ( $g$ ) | $(G_{ds})$ Suya Doymuş Ağırlık ( $g$ ) | $(G_s)$ Su İçindeki Ağırlık ( $g$ ) | Birim Hacim Ağırlığı ( $g/cm^3$ ) |
|----------------|------------------------------|--|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Tuğla+Harç     | 1580                         | 1790                                   | 797                                 | 1.59                              |
| Tuğla          | 2422                         | 2644                                   | 1283                                | 1.78                              |
| Doğal-Kesmetaş | 2225                         | 2237                                   | 1196                                | 2.14                              |
| Harç           | 725                          | 845                                    | 311                                 | 1.36                              |

- **Poisson oranının belirlenmesi**

Poisson oranı (katsayısı) yanal gerinme ve eksenel gerinme arasındaki bağıntı ile elde edilmekte olup ( $\nu$ ) ile gösterilir.

$$\text{Poisson Oranı}(\nu) = \text{Yanal Gerinme } \varepsilon_x / \text{Eksenel Gerinme } \varepsilon_y$$

Poisson oranı malzemeye bağlı bir katsayıdır. Litaratür taraması neticesinde yığma ve tarihi yapılar ile ilgili yapısal analiz çalışmaları incelendiğinde poisson oranının genellikle çelik, alüminyum, bakırda  $\nu = 0.32$ , doğal taş kesme taş, tuğla, harç malzemelerinde  $\nu = 0.20$  civarındadır. Genel olarak poisson oranı  $0 < \nu < 0.5$  aralığında değişen değerler almaktadır. Bu çalışmada yapılacak modelleme ve analizlerde poisson oranı 0.20 değerinde dikkate alınmıştır (Akaslan, 2019; Dabanlı, 2008; Lourenço, 2006).

- **Tek eksenli basınç deneyi ile basınç dayanımı ve elastisite modülünün belirlenmesi**

Taş, tuğla ve harç malzeme örneklerine ait numunelerden karot makinesi ile silindir numune alımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.9). Alınan karot numuneleri mümkün olduğunca (çap/yükseklik oranı 1/1 olacak şekilde) taş kesme aleti ile düzeltilmiştir. Bu numuneler, uygun oda sıcaklığında laboratuvar ortamında bekletilmiş, deney gerçekleştirilirken öncelikle numunelerin çapları ve yükseklikleri ölçülmüştür. Birim ağırlığının belirlenmesi için ölçüm ve tartım işleminden sonra düzeltilen yüzeylere başlık hazırlanır. Başlığın ayarlanmasından sonra başlıklı yükseklik ( $h, mm$ ) ölçülür. Bu numunelerde tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır

(Zienkiewicz and Taylor, 1988).

Tek eksenli basınç dayanım testleri için her yapı malzemesinde en az üçer numune alınması hedeflenmiştir. Ancak harç malzemesi çok gevrek malzeme olduğundan karot ile numune alım sırasında dağılmaya uğradığı için tek silindir numune örneği alınabilmiştir. Ayrıca mermer kaidelerden ve sütunlardan saha ziyaretinde numune alınamamıştır. Üç adet tuğla numunesi, üç adet taş numunesi, bir adet harç numunesinin basınç dayanımları belirlenerek her malzeme için bulunan maksimum kırılma dayanımlarında elde edilen gerilme değerlerinin ortalaması alınmıştır. Mermerin mekanik özellikleri için geçmiş literatür çalışmalarından ortalama bir dayanım değeri baz alınmıştır. Ayrıca yapılan literatür çalışmalarında çekme mukavemeti değerinin basınç dayanımının %5 ile %20 arasında değişen değerlerde olduğu görülmektedir. Bu çalışmada malzemelerin çekme dayanımı ( $f_c$ ) basınç dayanımının ( $f_b$ ) %5 ve %20 değerlerinin ortalaması olan %12.5 olarak alınmıştır (Akaslan, 2019; Dabanlı, 2008; Lourenço, 1998).



Şekil 4.9: Tek eksenli basınç deneyine ait laboratuvar çalışmaları

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen tek eksenli basınç dayanımı testleri ile malzemenin düşey yük altındaki dayanımı elde edilmiştir. Buna göre basınç dayanımı Denklem 4.1 bağıntısı ile hesaplanmıştır.

$$f_b = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

Burada,  $f_b$  Basınç dayanımı ( $N/mm^2$ ),  $P$  Kırılma yükü ( $N$ ) ve  $A$  Yük uygulanan alan ( $mm^2$ ) olarak tanımlanmaktadır.

Tarihi yapının kalıntılarında alınan taş örnekleri laboratuvar ortamında karot makinası yardımı ile alınan silindirik numuneler üzerinden basınç mukavemetleri belirlenmek üzere test edilmiştir. Bu test yönteminde, 45 mm çapında değişik boylarda numuneler için elde edilen deney sonuçları Tablo 4.4, Tablo 4.5 ve Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.4: St. Jean Bazilikası'nda kullanılan tuğla yapı malzemesinin silindirik basınç mukavemeti

| Numune   | Çap (mm) | Boy (mm) | Kırılma Yükü (N) | Basınç Dayanımı (N/mm) |
|----------|----------|----------|------------------|------------------------|
| Tuğla1   | 45       | 35       | 10800            | 8.74                   |
| Tuğla2   | 45       | 38       | 10900            | 8.12                   |
| Tuğla3   | 45       | 41       | 11100            | 7.66                   |
| Ortalama |          |          |                  | 8.17                   |

Tablo 4.5: St. Jean Bazilikası'nda kullanılan doğal-kesme taş yapı malzemesinin silindirik basınç mukavemeti

| Numune   | Çap (mm) | Boy (mm) | Kırılma Yükü (N) | Basınç Dayanımı (N/mm) |
|----------|----------|----------|------------------|------------------------|
| Tuğla1   | 45       | 45       | 80600            | 50.72                  |
| Tuğla2   | 45       | 45       | 95000            | 59.79                  |
| Tuğla3   | 45       | 45       | 91600            | 57.65                  |
| Ortalama |          |          |                  | 56.05                  |

Tablo 4.6: St. Jean Bazilikası'nda kullanılan harç yapı malzemesinin silindirik basınç mukavemeti

| Numune | Çap(mm) | Boy(mm) | Kırılma Yüğü(N) | Basınç Dayanımı(N/mm) |
|--------|---------|---------|-----------------|-----------------------|
| Harç   | 45      | 36      | 6100            | 4.8                   |

Söz konusu yapının oluşum şekli incelendiğinde, yığma taşıyıcı sisteme ait yapı elemanlarının harç malzemesiyle birleşerek yapı bütünü oluşturduğu görülmektedir. Dolayısıyla harç malzemesinin diğer yapı malzemeleriyle birleştiği kompozit bir oluşum görülmektedir. Maksimum gerilmeler elde edilirken harç malzemesiyle oluşturduğu kompozit birleşimin etkisi de göz önüne alınmalıdır. Hesaplamalarda kullanılan kompozit malzemenin mukavemeti EN 1996-1-1 (2005)'e göre tuğla, taş ve harçtan oluşan fbk, denklem (4.2)'ye göre elde edilmiştir.

$$f_{bk} = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (4.2)$$

Burada,  $f_b$  taş veya tuğla basınç mukavemeti,  $f_m$  harç basınç mukavemeti,  $K$ ,  $\alpha$  ve  $\beta$  ise sabit değerlerdir.  $K$  sabitinin değeri, yığma sistemin morfolojik yapısına göre 0.4 ile 0.6 arasında,  $\alpha$  ve  $\beta$  sabitleri için ise düzgün şekilli yığmalarda sırasıyla 0.7 ve 0.3 kaba örülmüş yığmalarda ise 0.65 ve 0.25 değerleri önerilmiştir (Ercan, 2010). Bu çalışmada,  $K$  sabiti 0.5 olarak alınmıştır.

$$f_{bk} = K \cdot f_{tuğla/taş}^{0.65} \cdot f_{harç}^{0.25} \quad (4.3)$$

Bu tip yığma yapıların Elastisite modülünün belirlenmesi için literatürde birçok farklı yöntem ve kabul yer almakla birlikte Avrupa Birliği Standartı olan EN 1996-1-1 (2005)'de yer alan denklem (4.4)'den yararlanılmıştır.

$$E = 1000 \cdot f_{bk} \quad (4.4)$$

Sonlu elemanlar modelini oluşturan malzemelere ait mekanik özellikler harç ile birleştiği durum esas alınarak (4.2) ve (4.3) denklemlerine

göre hesaplanmış elde edilen değerler Tablo 4.7’de özetlenmiştir. Mermer malzemeden yerinde numune alınmadığı için malzeme özellikleri literatür çalışmalarından ortalama değer referans alınmıştır (Akaslan, 2019; Dabanlı, 2008; Lourenço, 2006).

Tablo 4.7: Analizlerde kullanılan yapı malzemelerinin mekanik özellikleri

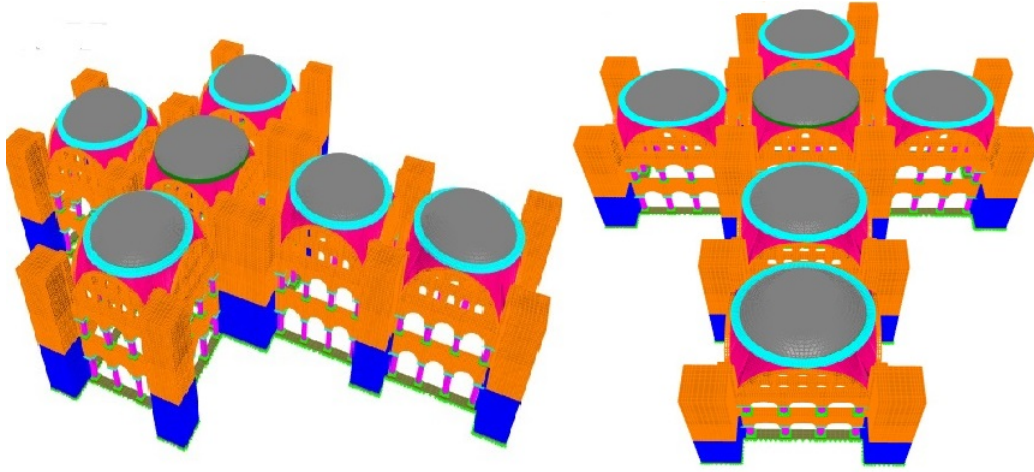
| Yapı Malzemesi       | Elastisite Modülü<br>(MPa) | Poisson Oranı | Birim Hacim Ağırlığı<br>( $t/m^3$ ) |
|----------------------|----------------------------|---------------|-------------------------------------|
| Tuğla (Harç ile)     | 2910                       | 0.2           | 1.78                                |
| Doğal Taş (Harç ile) | 10140                      | 0.2           | 2.14                                |
| Mermer (Harç ile)    | 12000                      | 0.2           | 2.40                                |

## 4.5 Sonlu Eleman Modeli

St. Jean Bazilikası’na ait yapı malzemelerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesine müteakiben yapıyı ayakta tutan yığma taşıyıcı sistemin analiz modeli bilgisayar ortamında (SAP 2000) dizayn edilmiştir. Ana kütleli oluşturan kemerli kubbe ile örtülü olan bölümünün analiz modeli üç boyutlu sonlu eleman metodu ile oluşturulmuştur. Modellemede kullanılan sonlu eleman tipleri Tablo 4.8’de yer aldığı şekilde idealize edilmiştir. Nihayetinde oluşturulan global model Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Söz konusu modelde toplam 506108 düğüm noktası, 375504 solid eleman kullanılmıştır.

Tablo 4.8: Yapı elemanı-model tipi

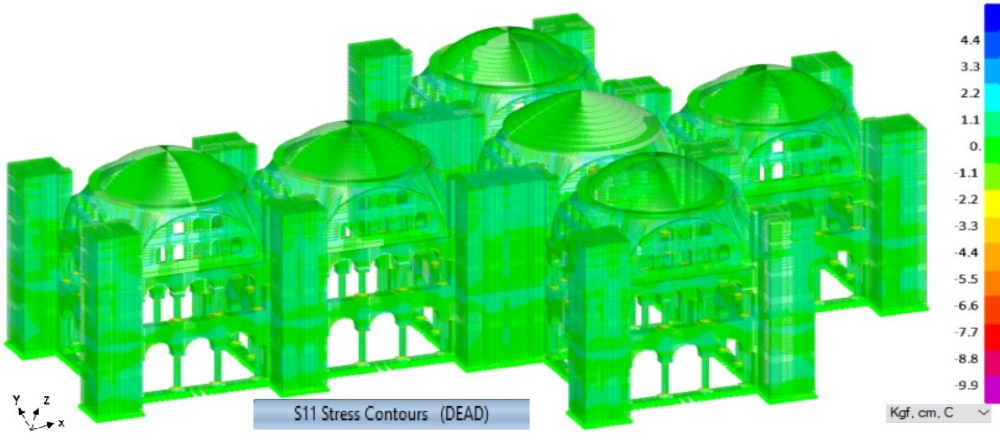
| Yapı Elemanı | Eleman Tipi            | Model Eleman Tipi |
|--------------|------------------------|-------------------|
| Sütun Kolon  | Mermer                 | Katı (Solid)      |
| Duvarlar     | Doğal Kesme Taş + Harç | Katı (Solid)      |
| Kemerler     | Tuğla + Harç           | Katı (Solid)      |
| Kaideler     | Mermer                 | Katı (Solid)      |
| Kubbeler     | Tuğla + Harç           | Katı (Solid)      |



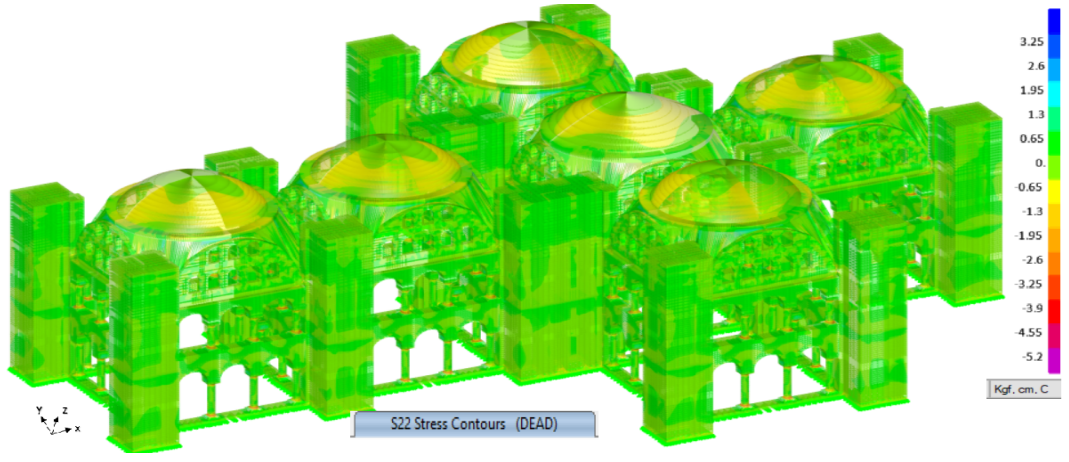
Şekil 4.10: Yapının SAP 2000 ortamında sonlu eleman modeli

## 4.6 Statik Analiz

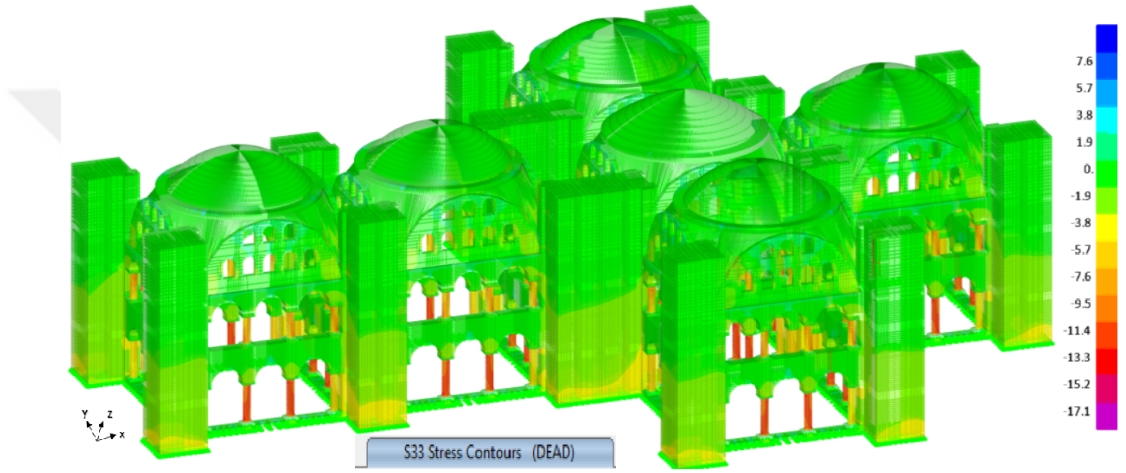
Sonlu elemanlar ile oluşturulan global taşıyıcı sistemin öncelikle düşey yükler altındaki statik analizleri yapılmış böylece oluşan gerilme dağılımları ve yer değiştirmeler hesaplanmıştır. Bu kapsamda oluşan ölü yükler, malzemelerin birim hacim ağırlıkları ile tanımlanmıştır. Buna göre elde edilen gerilmeler (S11, S22, S33, S13) Şekil 4.11 - Şekil 4.14 arasındaki görsellerde sırasıyla verilmiştir.



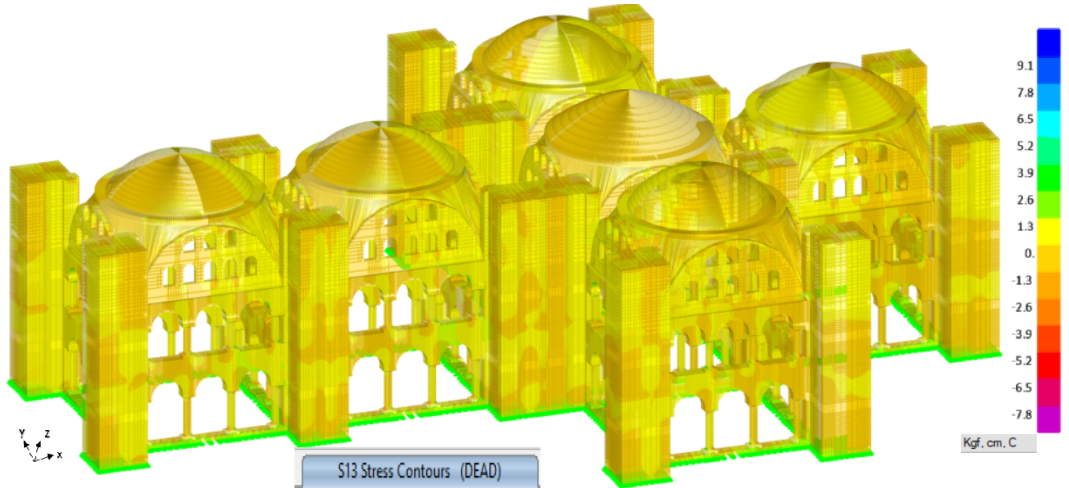
Şekil 4.11: Kendi (G) ağırlığı altında S11 gerilmeleri



Şekil 4.12: Kendi (G) ağırlığı altında S22 gerilmeleri



Şekil 4.13: Kendi (G) ağırlığı altında S33 gerilmeleri



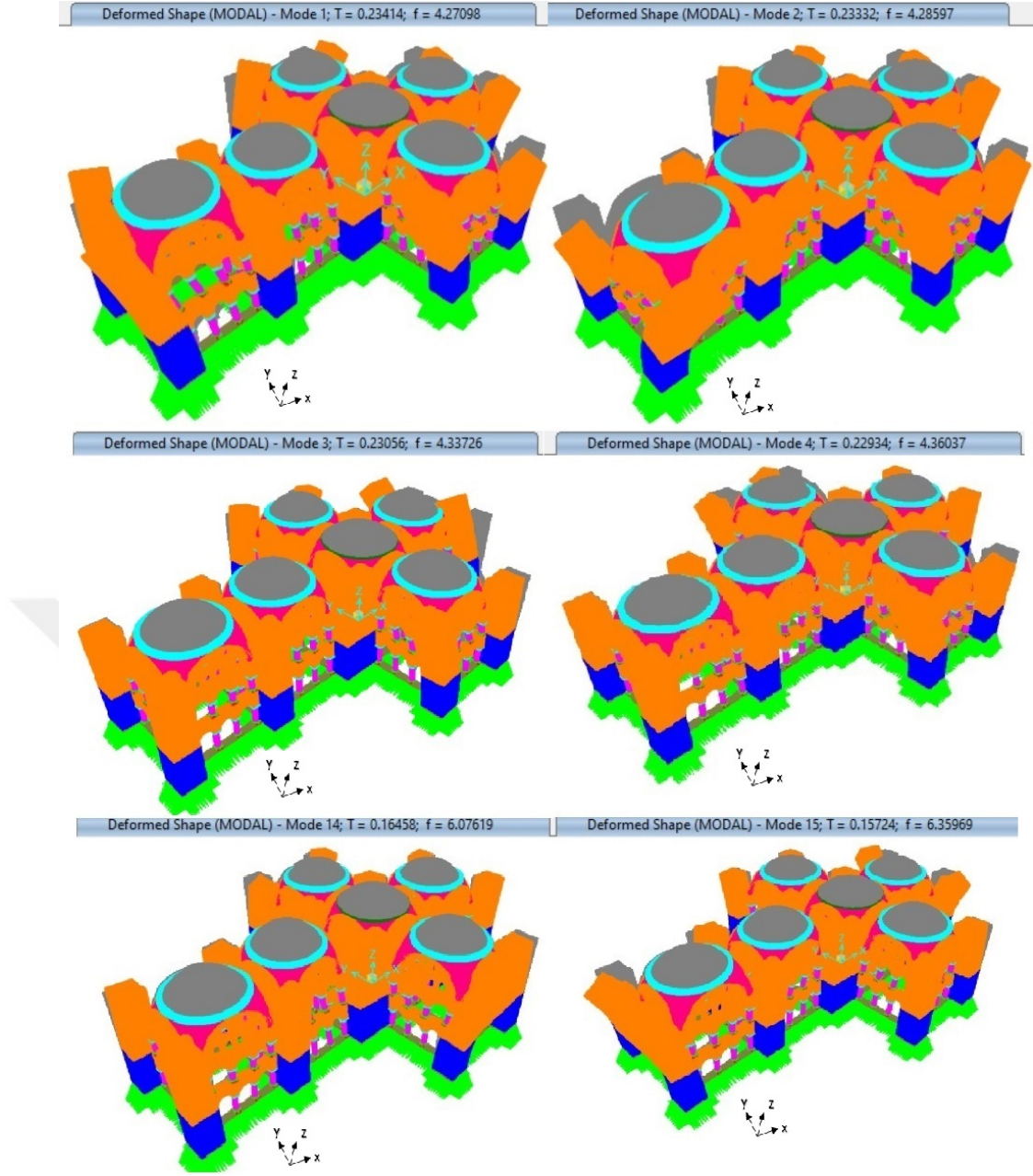
Şekil 4.14: Kendi (G) ağırlığı altında S13 gerilmeleri

## 4.7 Modal Analiz

Bu çalışma kapsamında, St. Jean Bazilikası için SAP2000 ortamında oluşturulan katı (solid) üzerinde modal analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz ile yapının serbest titreşim periyotları ve mod şekilleri ilk 15 mod için hesaplanmıştır. Modal analize ait ilk 15 mod için elde edilen veriler Tablo 4.9'da, Mod şekillerine ait görseller Şekil 4.15'de gösterilmiştir.

Tablo 4.9: Modal periods and frequencies

| OutputCase | StepType | StepNum  | Period   | Frequency   |
|------------|----------|----------|----------|-------------|
| Text       | Text     | Unitless | Sec      | Cyc/sec     |
| MODAL      | Mode     | 1        | 0.234138 | 4.270978861 |
| MODAL      | Mode     | 2        | 0.233319 | 4.285970833 |
| MODAL      | Mode     | 3        | 0.23056  | 4.337257838 |
| MODAL      | Mode     | 4        | 0.229338 | 4.360372129 |
| MODAL      | Mode     | 5        | 0.220939 | 4.526134984 |
| MODAL      | Mode     | 6        | 0.20654  | 4.841669766 |
| MODAL      | Mode     | 7        | 0.206045 | 4.853315697 |
| MODAL      | Mode     | 8        | 0.196685 | 5.084275256 |
| MODAL      | Mode     | 9        | 0.194379 | 5.144592997 |
| MODAL      | Mode     | 10       | 0.187999 | 5.319188548 |
| MODAL      | Mode     | 11       | 0.178799 | 5.592864925 |
| MODAL      | Mode     | 12       | 0.174587 | 5.72781849  |
| MODAL      | Mode     | 13       | 0.170849 | 5.853119051 |
| MODAL      | Mode     | 14       | 0.164577 | 6.0761942   |
| MODAL      | Mode     | 15       | 0.15724  | 6.359693664 |



Şekil 4.15: Yapı modal analiz sonuçlarından elde edilen mod şekilleri

## 4.8 Dinamik Analiz

### 4.8.1 Eşdeğer deprem yükü yöntemi

Sonlu eleman modeli oluşturulan yapıya ait eşdeğer deprem yükü hesabı Türk Deprem Yönetmeliklerinde eşdeğer deprem yükü hesabı için verilen denklemlerle elde edilecektir. Deprem yükü hesabında kullanılmak üzere oluşturulan sonlu eleman modeli yardımıyla toplam yapı ağırlığı 29728 ton

olarak elde edilmiştir. Yapıya etki eden eşdeğer deprem yükü hesabı için deprem yönetmeliğinde belirtildiği gibi yapı ağırlığının yarısı etki ettirilecek şekilde 14864 ton üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. X ve Y yönünde etkiyen deprem yükü hesabı için 2007 deprem yönetmeliğinde aşağıda yer alan denklem kullanılmıştır.

$$V_t = \frac{WA(T_1)}{R_a(T_1)} \geq 0.10A_0IW \quad (4.5)$$

$V_t$ : toplam eş değer deprem yükü,

W: Yapının toplam ağırlığı,

A(T): Spektral ivme katsayısı,

I: Bina önem katsayısı,

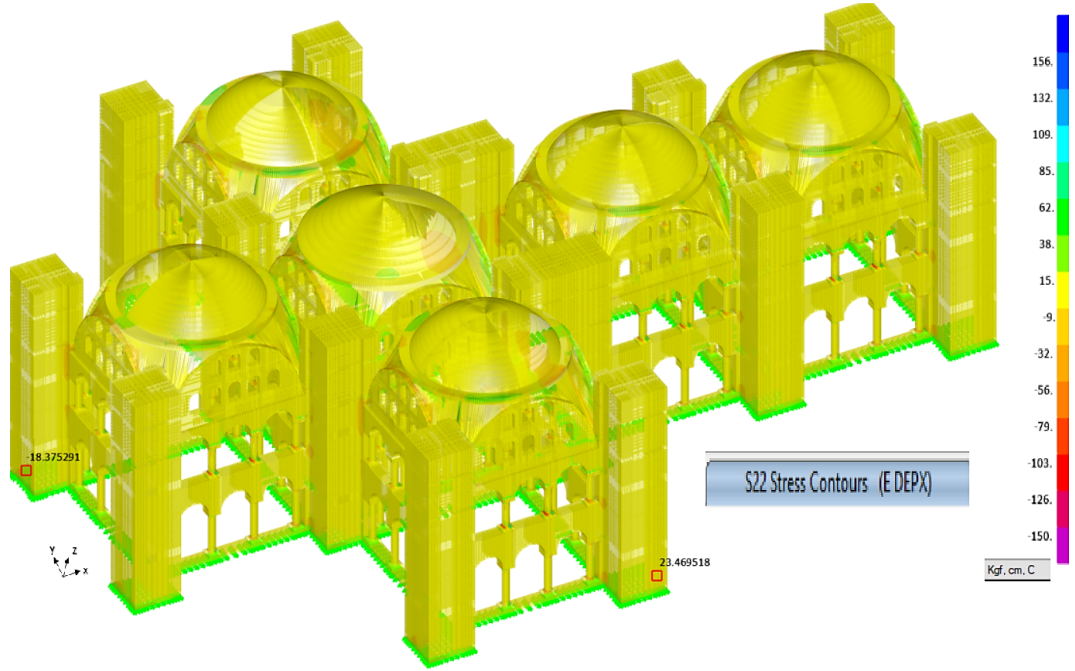
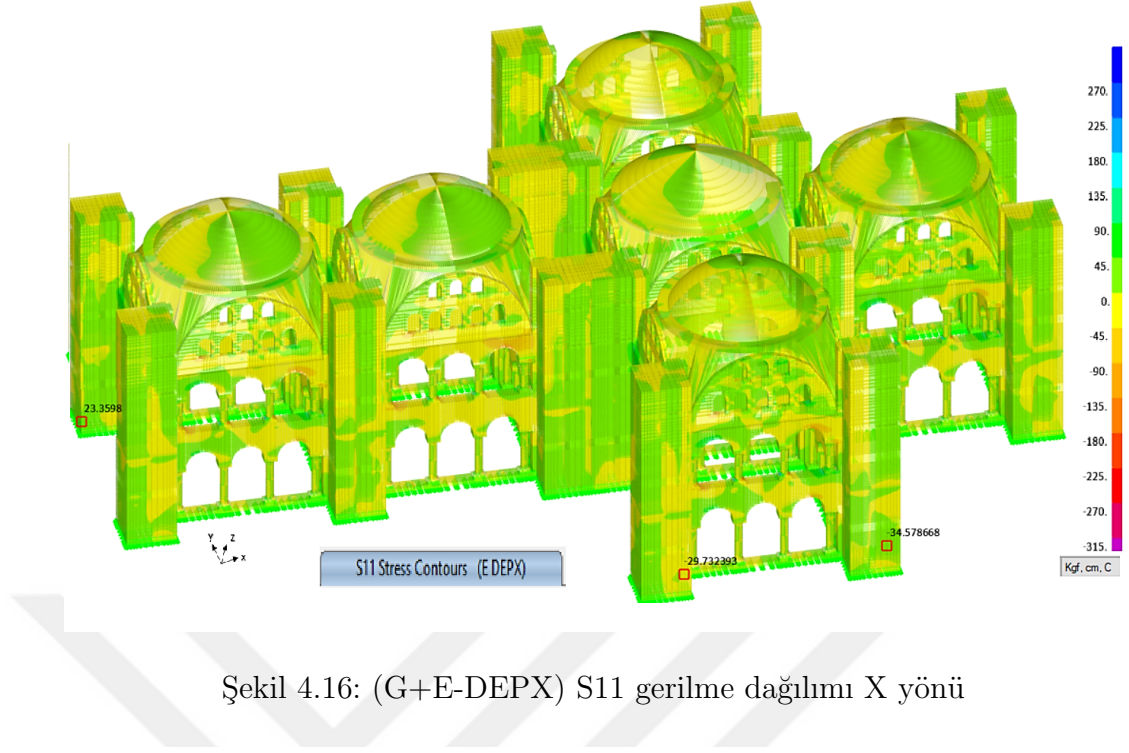
$A_0$ : Etkin yer ivmesi katsayısı,

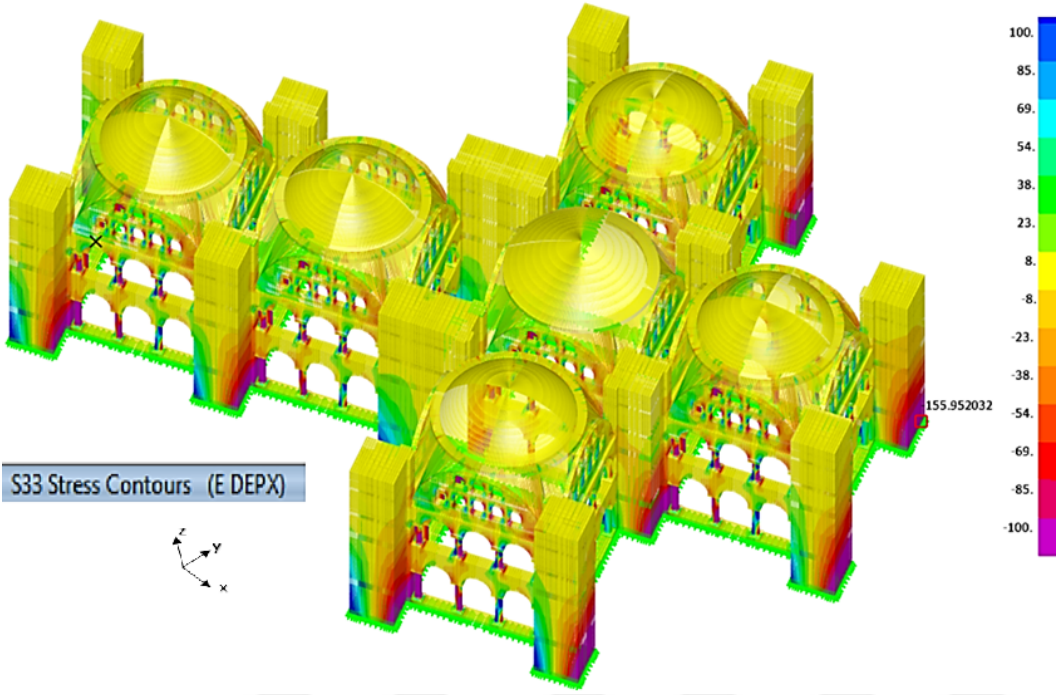
R: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı

Burada  $A(T) = A_0IS(T)$  denklemi ile hesaplanmalıdır.

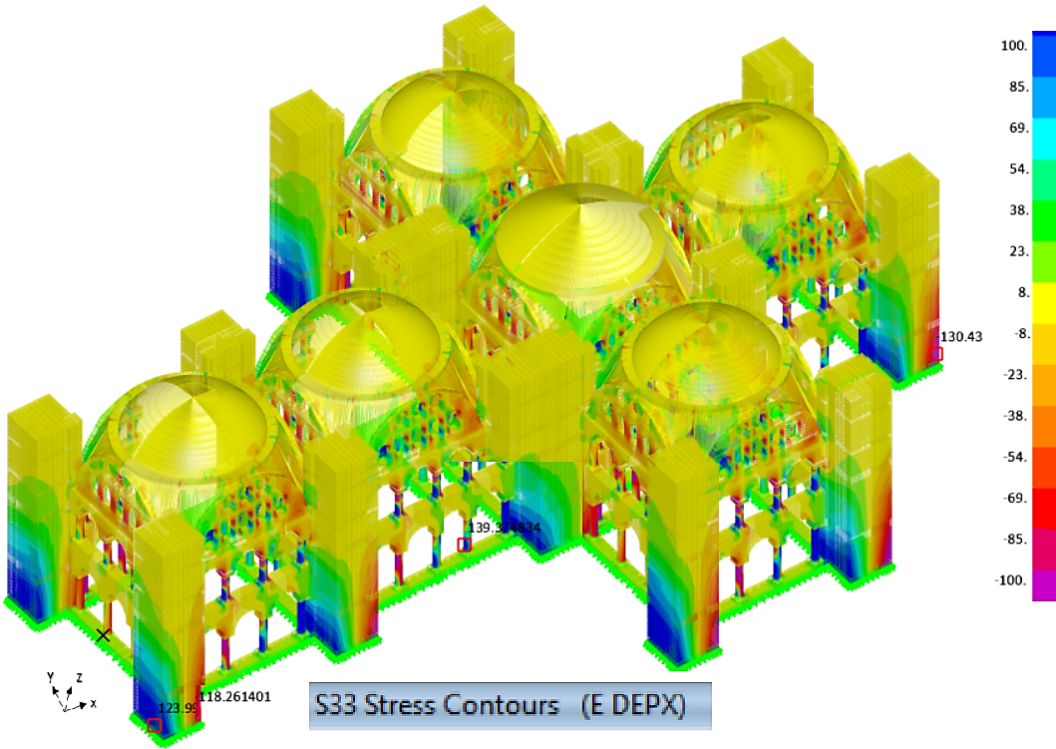
$$V_t = \frac{14864 * 1.5}{2} = 11148 \text{ ton} \quad (4.6)$$

Elde edilen kuvvet değeri, sütun kemerli kubbe yapısı üzerindeki 1. ve 2. katta yer alan toplam nokta sayısına bölünerek etki ettirilmiştir. Eşdeğer deprem yükü altında yapıya ait X ve Y yönündeki gerilme dağılımları ve yer değiştirme değerleri Şekil 4.16 - Şekil 4.36 arasındaki görsellerde görülmektedir.

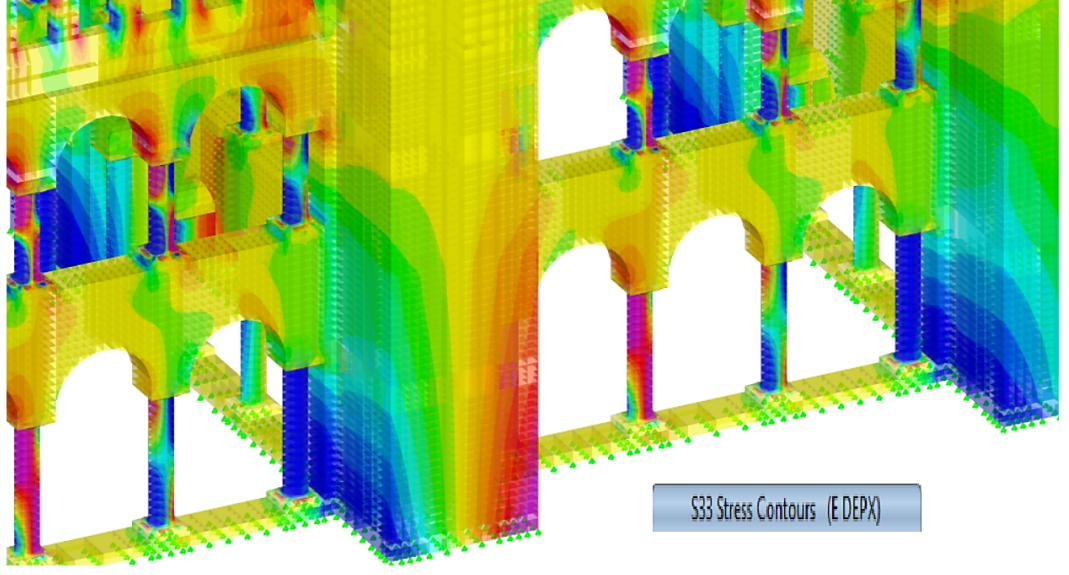




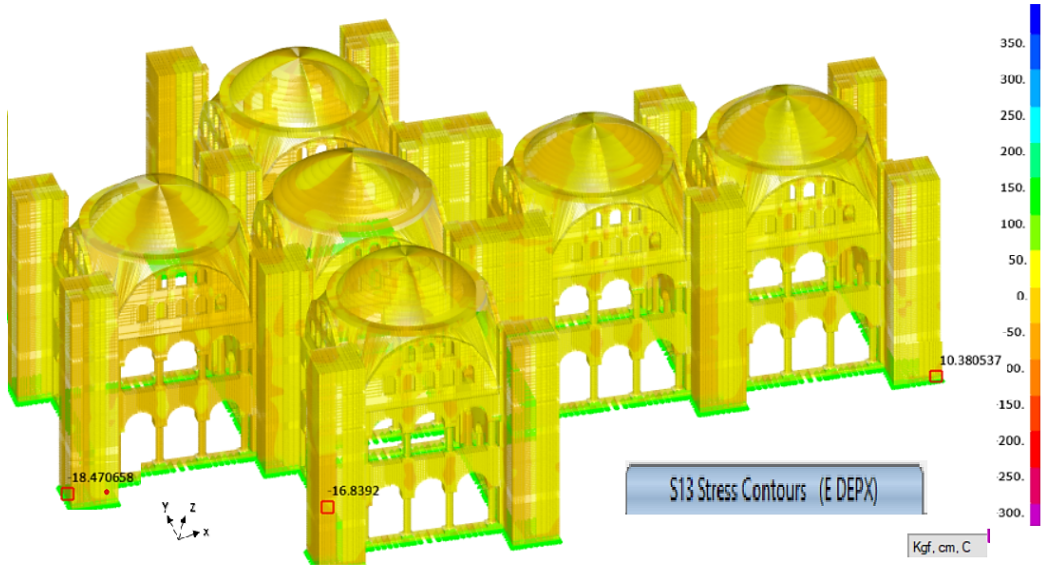
Şekil 4.18: (G+E-DEPX) S33 gerilme dağılımı X yönü -1



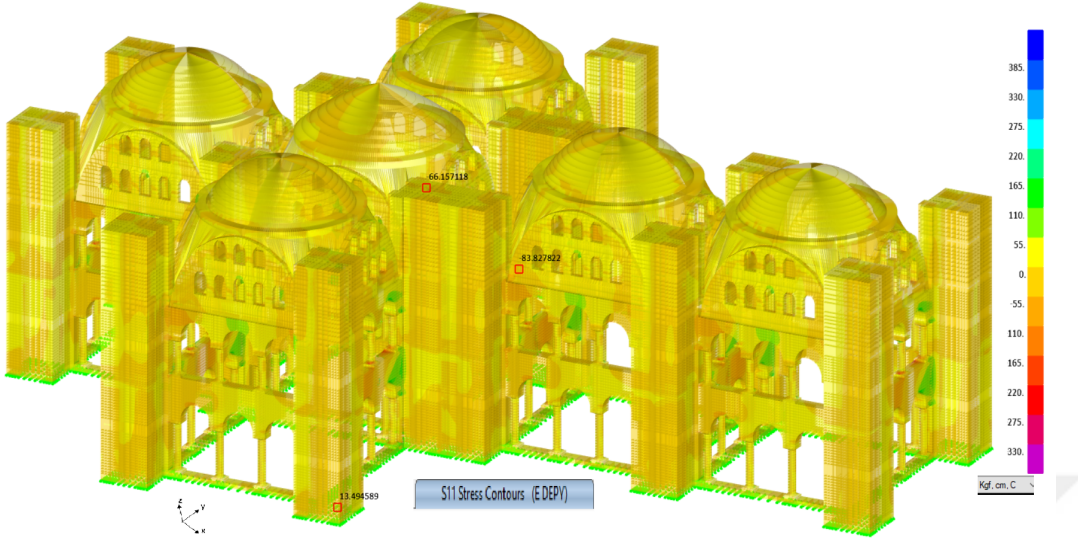
Şekil 4.19: (G+E-DEPX) S33 gerilme dağılımı X yönü -2



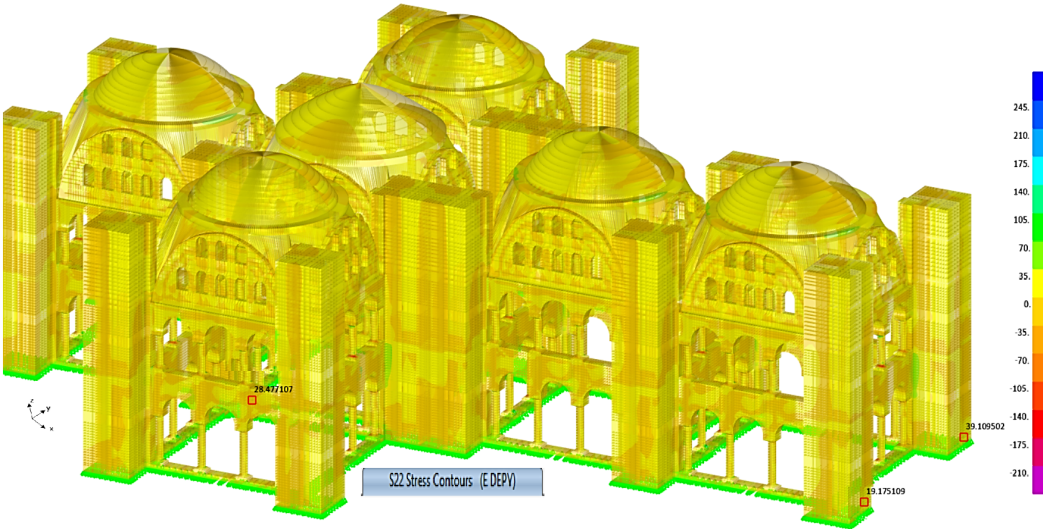
Şekil 4.20: (G+E-DEPX) gerilme yığılmasının yoğunlaştığı elemanlardan birinin gösterimi



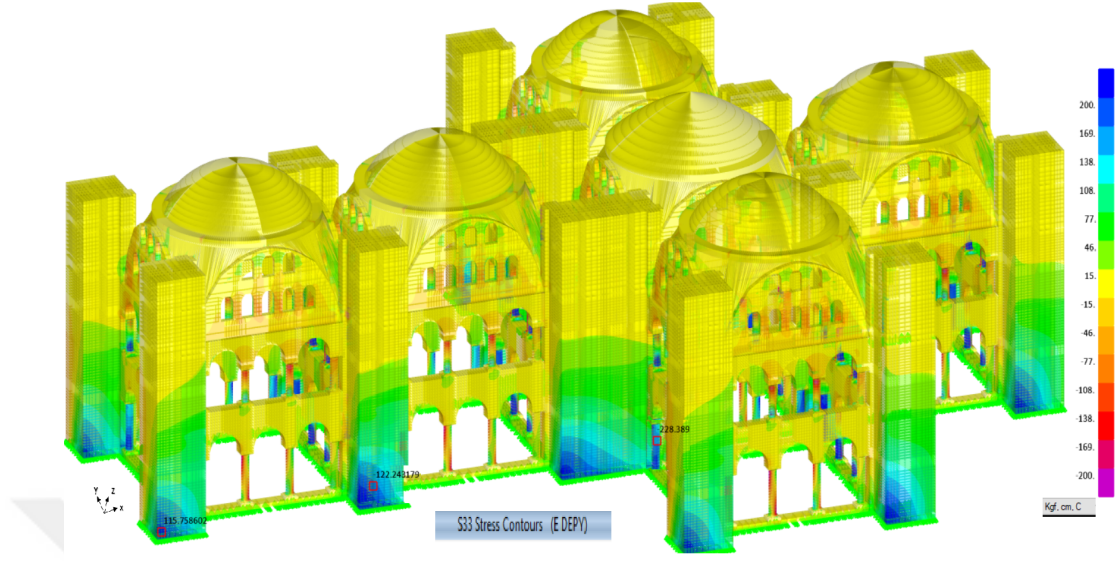
Şekil 4.21: (G+E-DEPX) S13 gerilme dağılımı



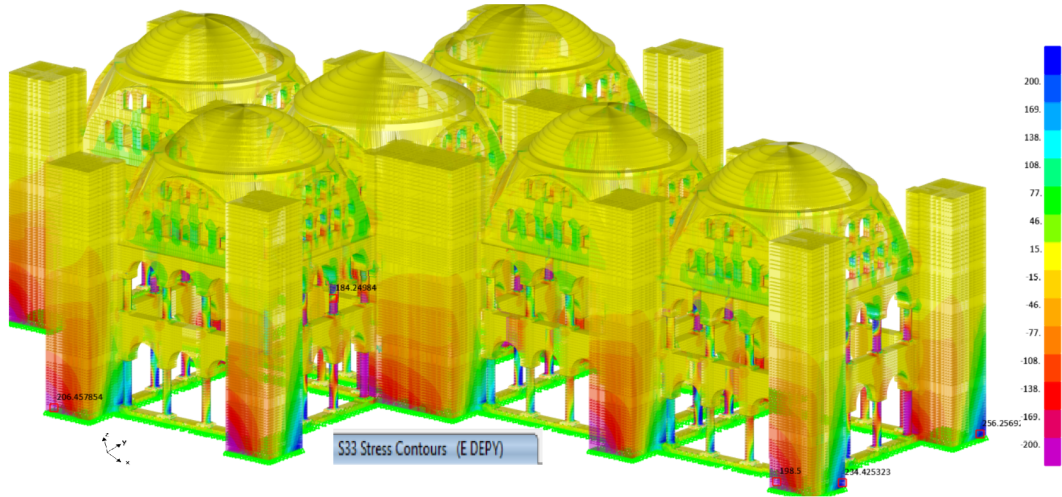
Şekil 4.22: (G+E-DEPY) S11 gerilme dağılımı Y yönü



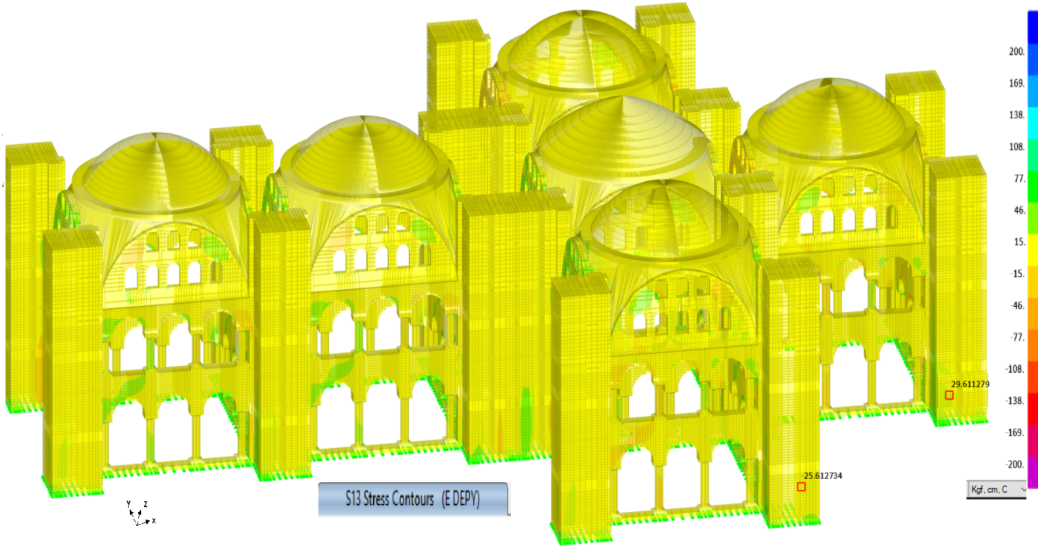
Şekil 4.23: (G+E-DEPY) S22 gerilme dağılımı Y yönü



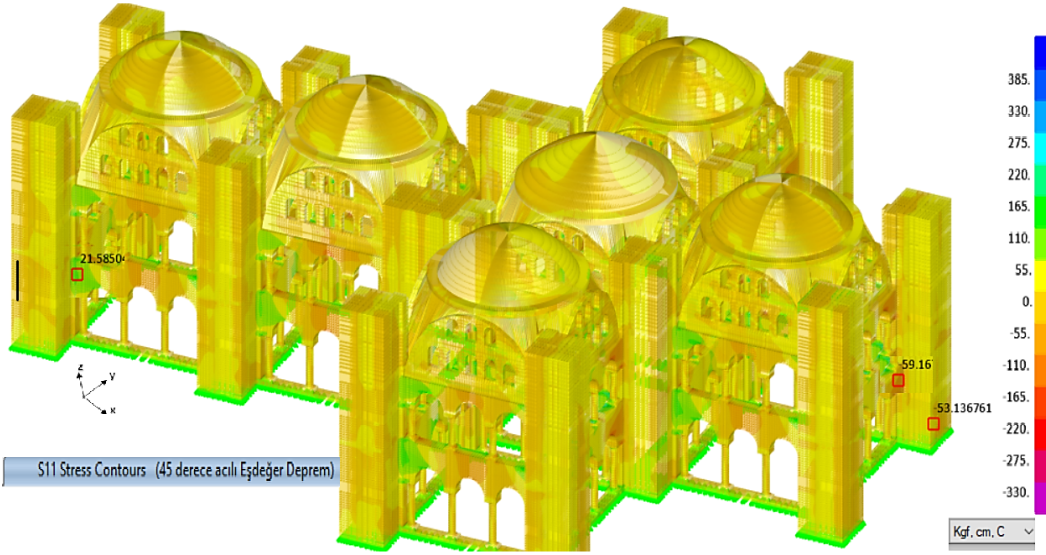
Şekil 4.24: (G+E-DEPY) S33 gerilme dağılımı Y yönü -1



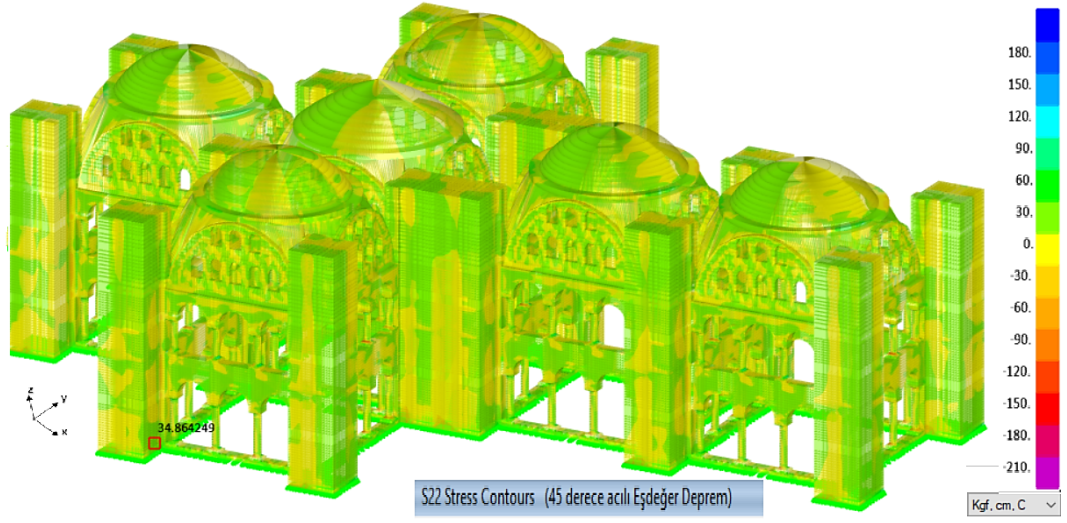
Şekil 4.25: (G+E-DEPY) S33 gerilme dağılımı Y yönü -2



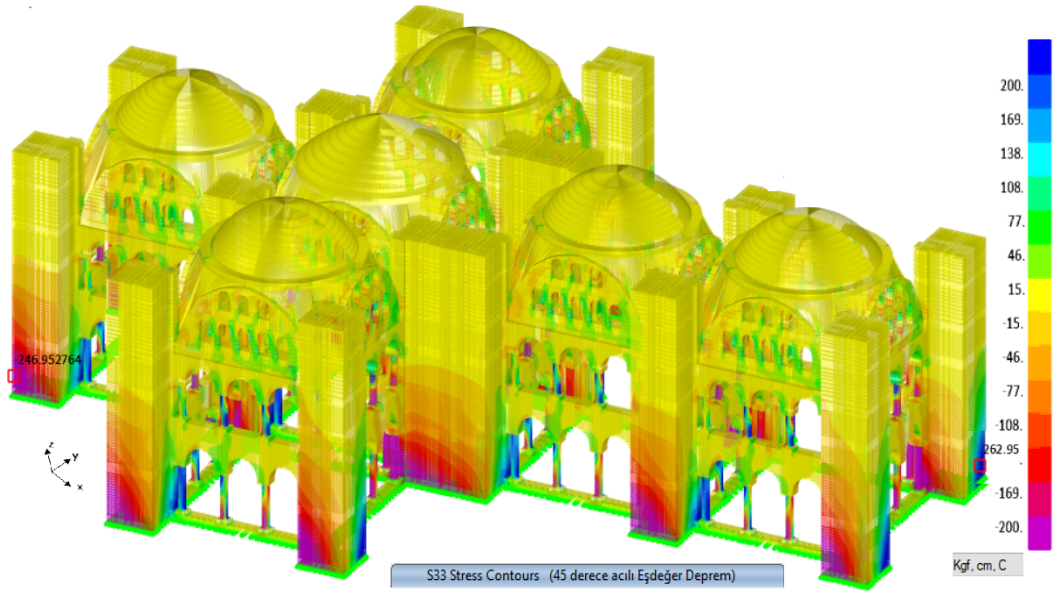
Şekil 4.26: (G+E-DEPY) S13 gerilme dağılımı Y yönü



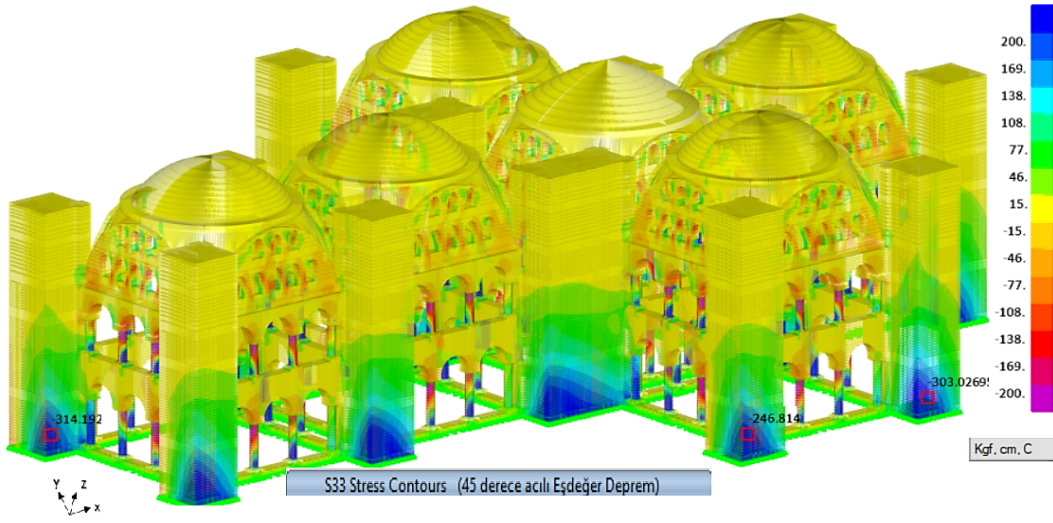
Şekil 4.27: (G+E-DEP) 45 derecelik açıyla uygulanan yük altında S11 gerilme dağılımı



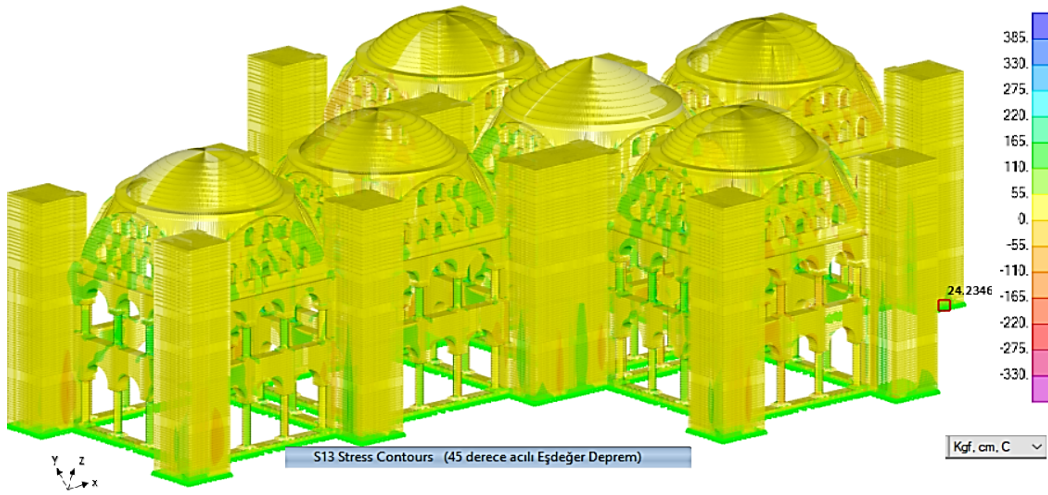
Şekil 4.28: (G+E-DEP) 45 derecelik açıyla uygulanan yük altında S22 gerilme dağılımı



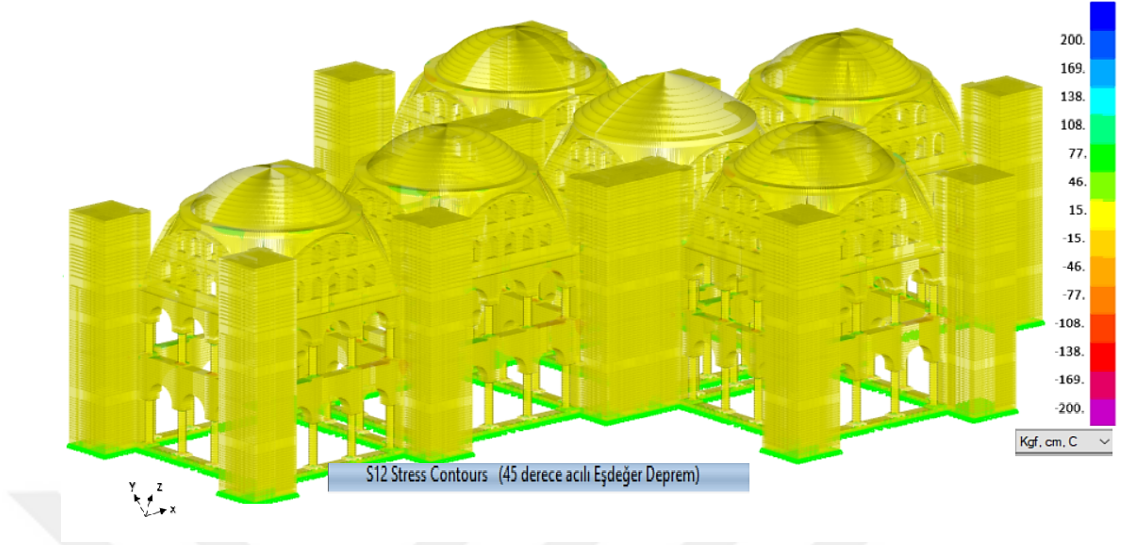
Şekil 4.29: (G+E-DEP) 45 derecelik açıyla uygulanan yük altında S33 gerilme dağılımı-1



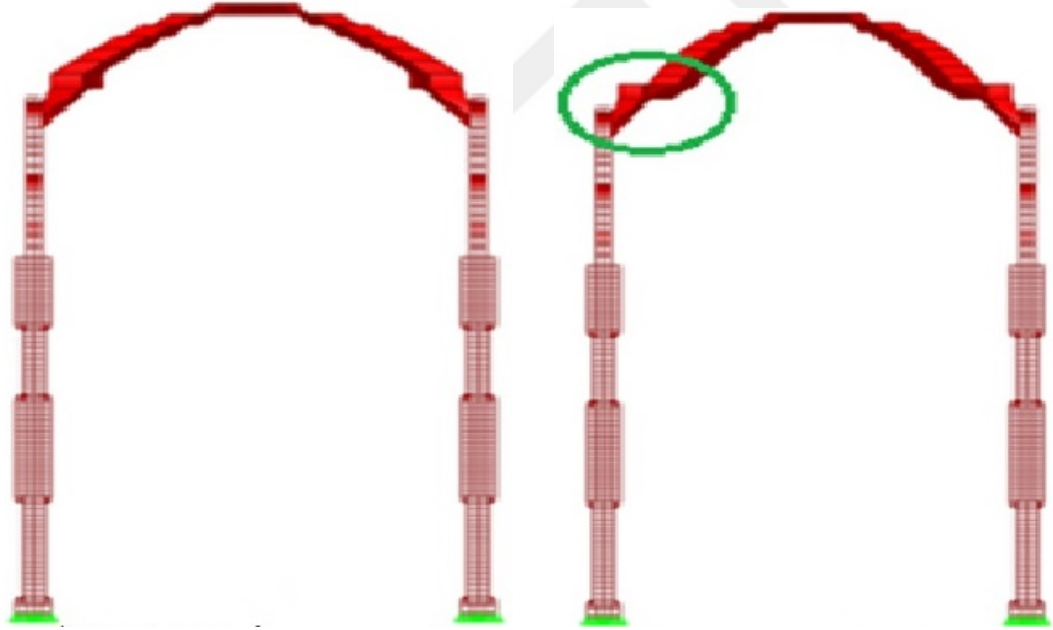
Şekil 4.30: (G+E-DEP) 45 derecelik açıyla uygulanan yük altında S33 gerilme dağılımı-2



Şekil 4.31: (G+E-DEP) 45 derecelik açıyla uygulanan yük altında S13 gerilme dağılımı



Şekil 4.32: (G+E-DEP) 45 derecelik açıyla uygulanan yük altında S12 gerilme dağılımı

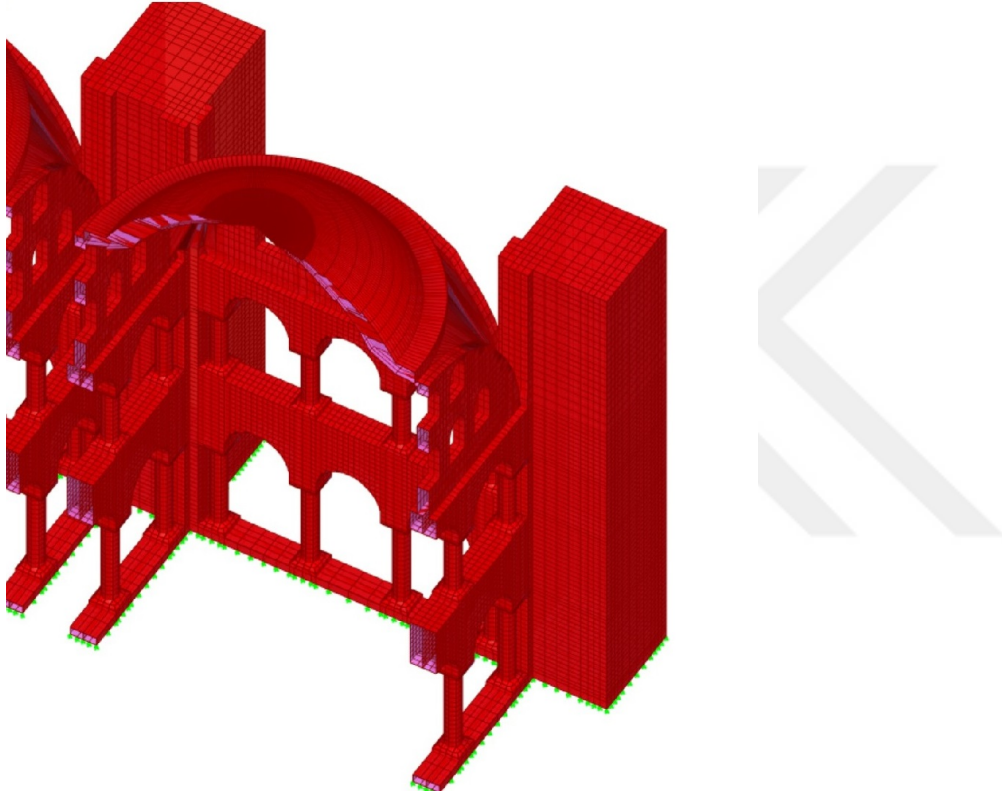


(a) 12.5 m çapındaki ana kubbe

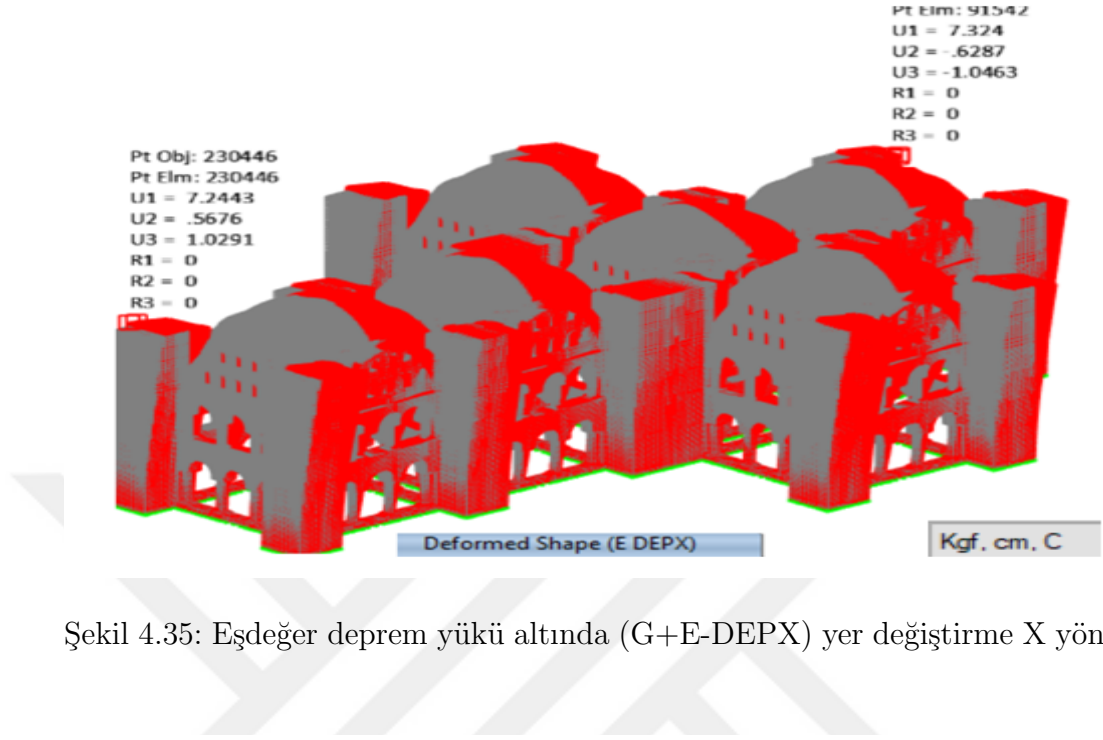
(b) 11.5 m çapındaki kubbe

Şekil 4.33: Kubbe yükünün pandantif elamanlarla geçişinde yük aktarımı

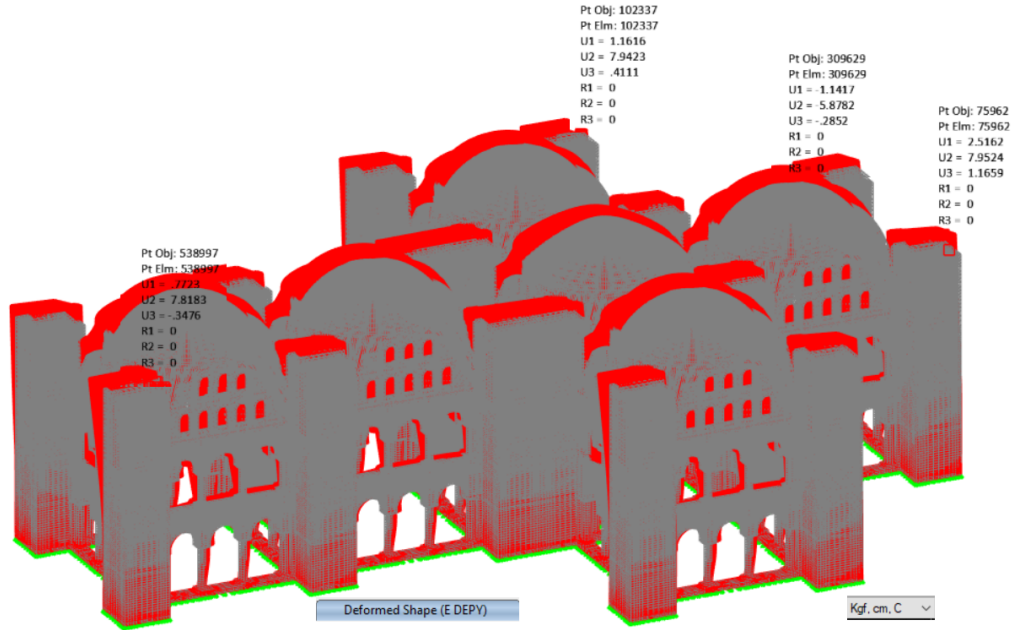
Şekil 4.33 incelendiğinde kubbeden ayak bölgesine geçiş elemanı olarak kullanılan pandantif elemanlarda yük aktarımında meydana gelen süreksizlik şematik olarak gösterilmiştir. Yük aktarım şemalarından kıyasla 12.5 metrelik çapdaki yük dağılımının 11.5 metrelik kubbeye göre daha düzenli olduğu, tasarımda kubbe çaplarının küçük seçimi sebebiyle bu bölgelerin hasar alma açısından risk oluşturduğu ve yapı genelinde meydana geçen göçmenin kubbe çaplarının uygun seçilmemesinden kaynaklı yük aktarımında sürekliliğin sağlanamamasından oluşabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 4.34: Pandantif eleman yük aktarımına ait 3 boyutlu (katı) model elemanına ait görünüş



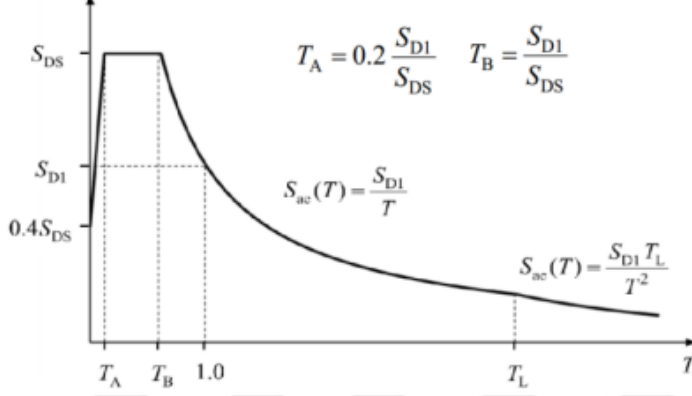
Şekil 4.35: Eşdeğer deprem yükü altında (G+E-DEPX) yer değiştirme X yönü



Şekil 4.36: Eşdeğer deprem yükü altında (G+E-DEPY) maksimum yer değiştirme Y yönü

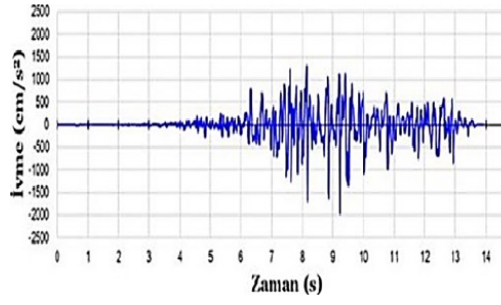
#### 4.8.2 Davranış Spektrum Analizi (Response Spektrum) Yöntemi

2018 Türkiye Deprem Yönetmeliği'nde davranış spektrum analizinin kullanılması aşamasında deprem yükü azaltma katsayısı uygulanarak ivme kayıtlarının kullanılması önerilmiştir. Şekil 4.37'de elastik ivme spektrum grafiği yer almaktadır.

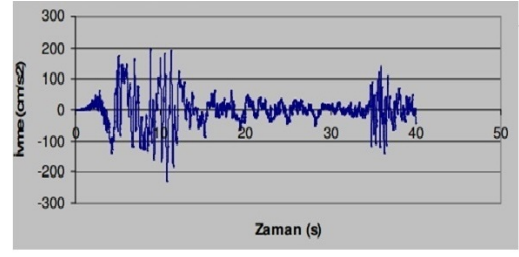


Şekil 4.37: 2018 Türkiye Deprem Yönetmeliği elastik ivme spektrumu (TBDY, 2018)

Bu kapsamda, Şekil 4.37'de yer alan elastik ivme spektrumu grafiği ve denklemlerde sunulan elastik ivme spektrumu hesaplanarak analizler yapılmıştır. ZD zemin sınıfı için Türkiye deprem tehlikeleri haritalarından elde edilen spektrum değer ve eğrileri kullanılarak hesaplama ve analizler gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasının dinamik analiz aşamasında 2 farklı deprem ivme kaydı kullanılmıştır (Şekil 4.38). 17 Ağustos 1999 Kocaeli ve 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş deprem ivme kayıtları spektrum eğrileri için ölçeklenmiş olup ölçekli ivme kayıtlarına ait davranış spektrum analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler neticesinde elde edilen maksimum, minimum gerilme dağılımları ve maksimum yer değiştirme miktarları Şekil 4.39 - Şekil 4.50 arasında yer alan görsellerde sunulmuştur.

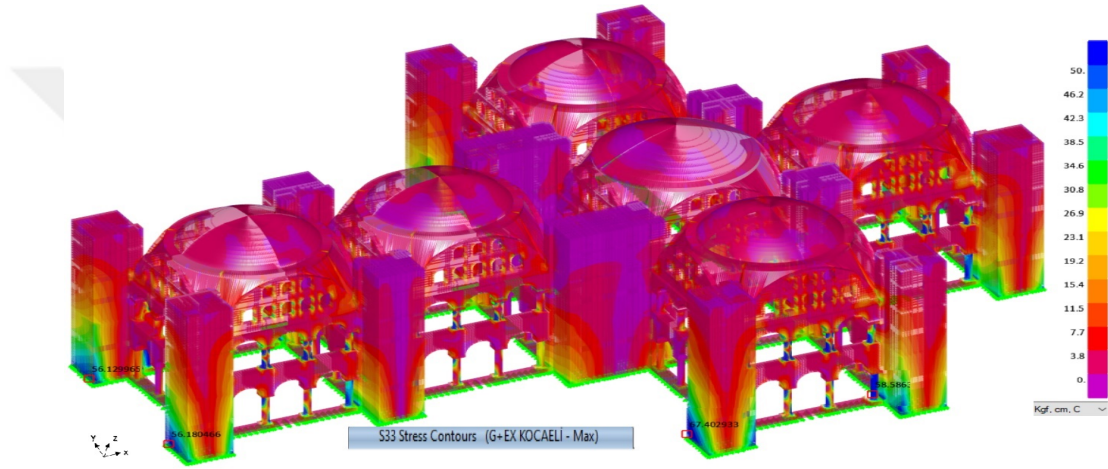


(a)

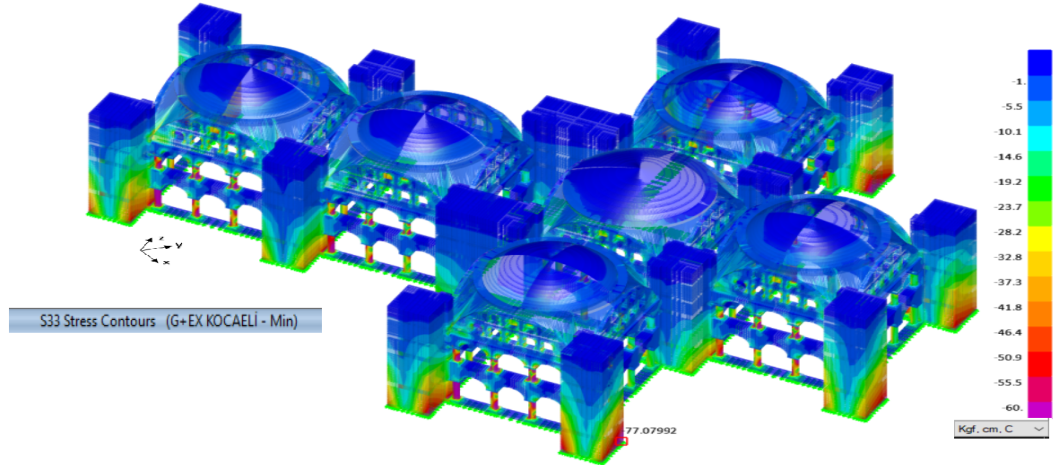


(b)

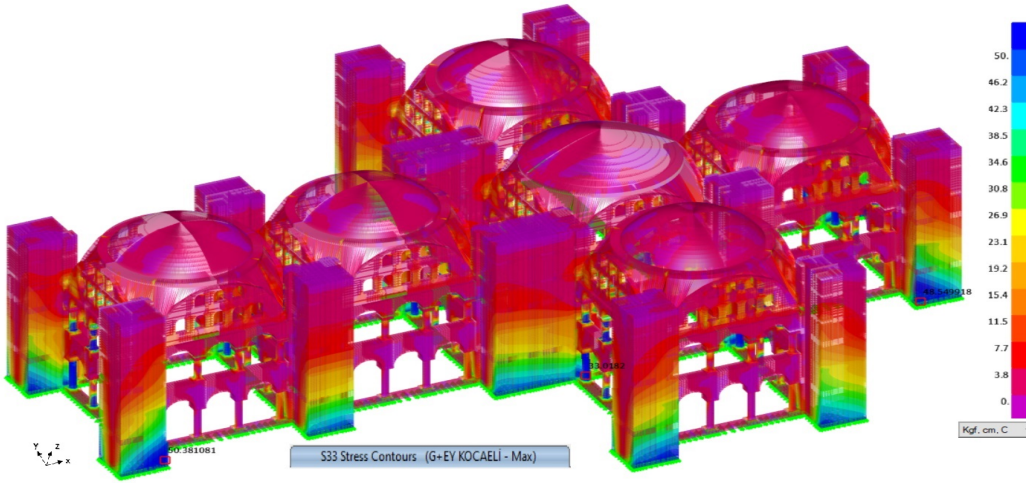
Şekil 4.38: (a) Pazarcık istasyonu 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremi ivme zaman grafiği (tdth.afad.gov.tr), (b) Yarımca istasyonu 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi ivme zaman grafiği (Bakkaloğlu, 2007)



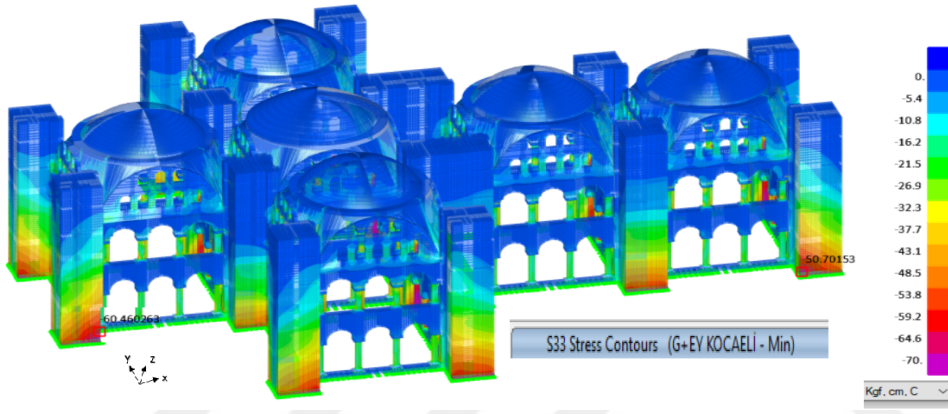
Şekil 4.39: (G+EX KOCAELİ) Maksimum çekme gerilmesi dağılımı



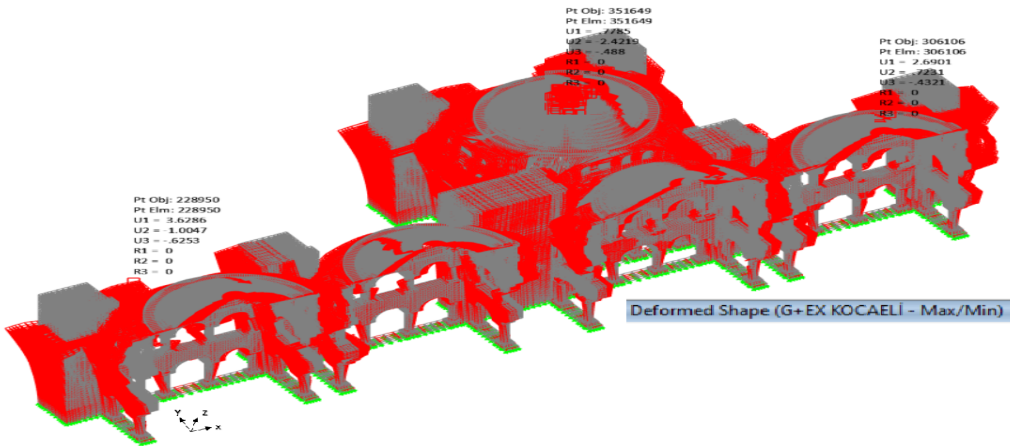
Şekil 4.40: (G+EX KOCAELİ) Maksimum basınç gerilmesi dağılımı



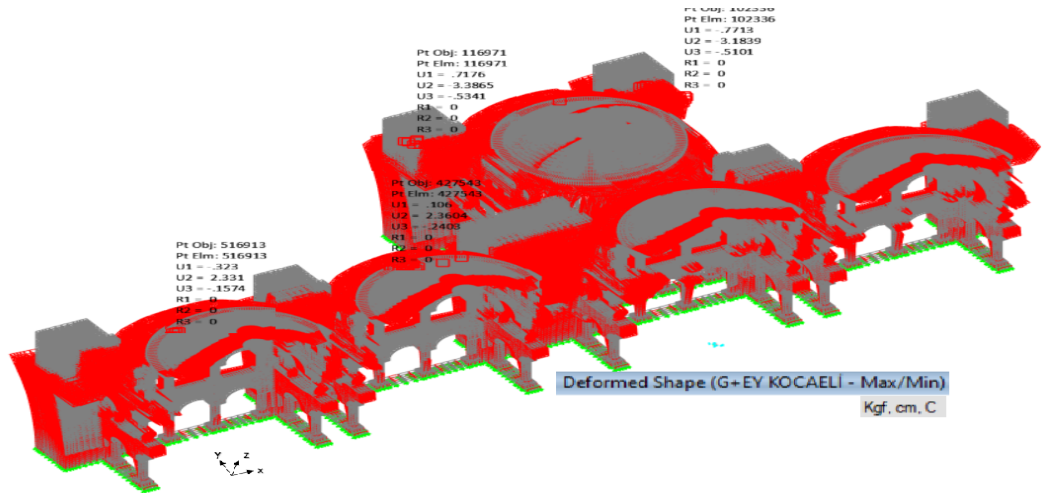
Şekil 4.41: (G+EY KOCAELİ) Maksimum çekme gerilmesi dağılımı



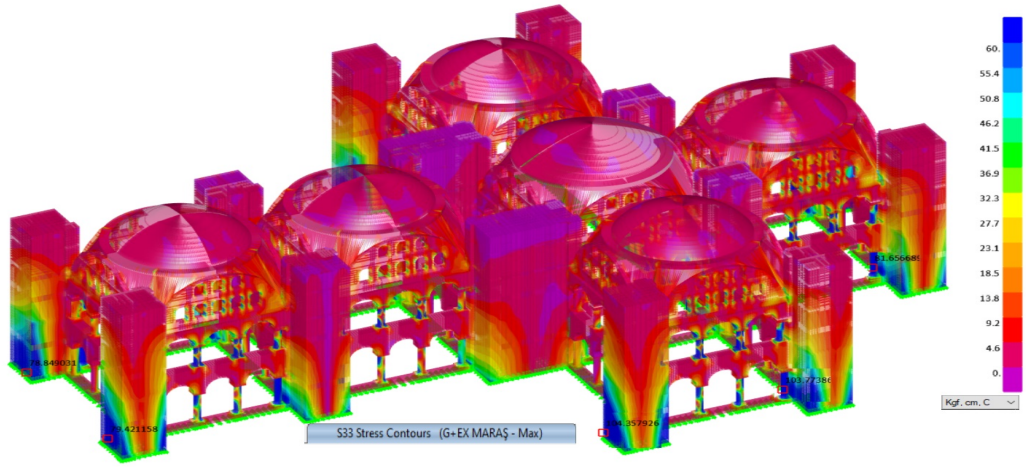
Şekil 4.42: (G+EY KOCAELİ) Maksimum basınç gerilmesi dağılımı



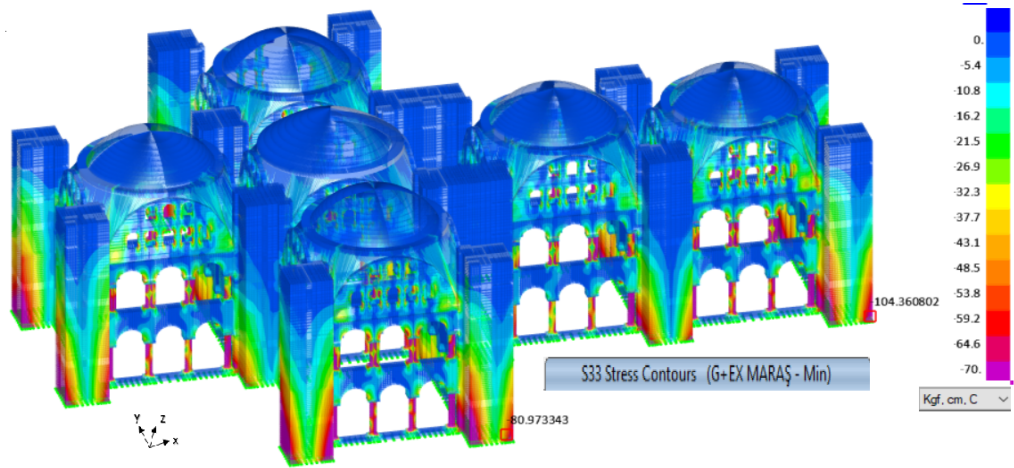
Şekil 4.43: (G+EX KOCAELİ) Maksimum yer değiştirme



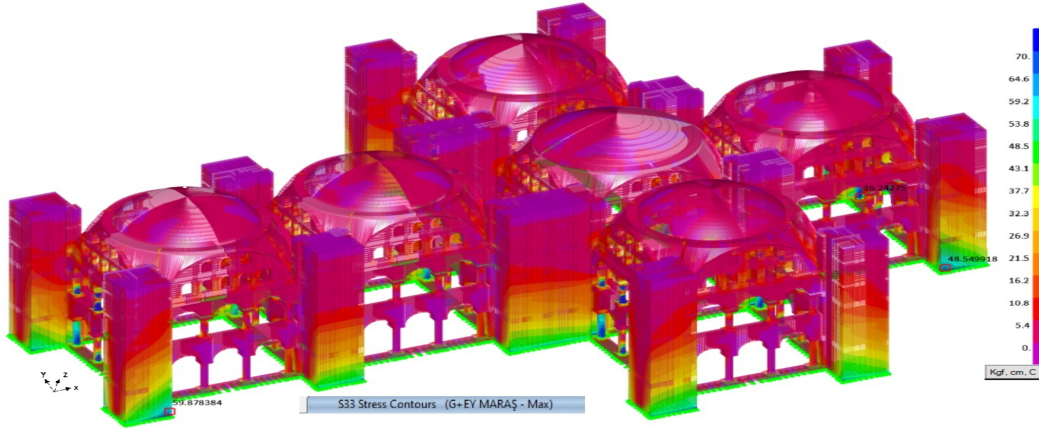
Şekil 4.44: (G+EX KOCAELİ) Maksimum yer değıştirme



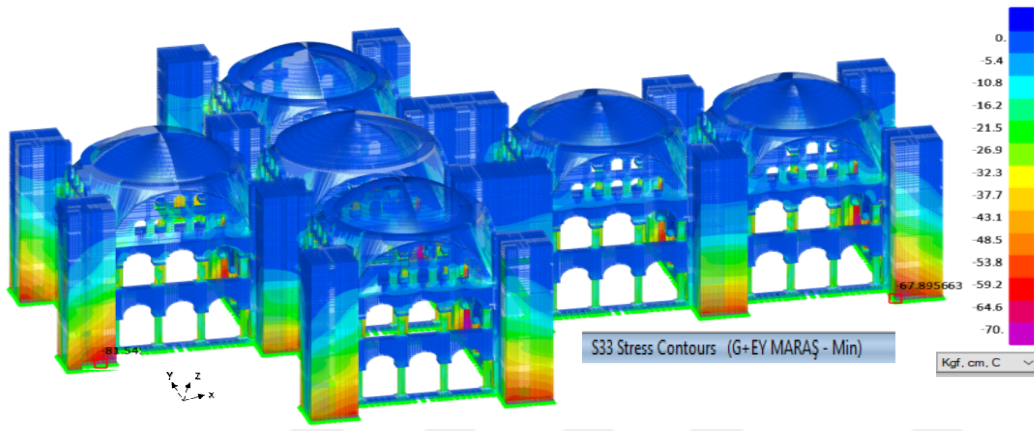
Şekil 4.45: (G+EX MARAŞ) Maksimum çekme gerilmesi dağılımı



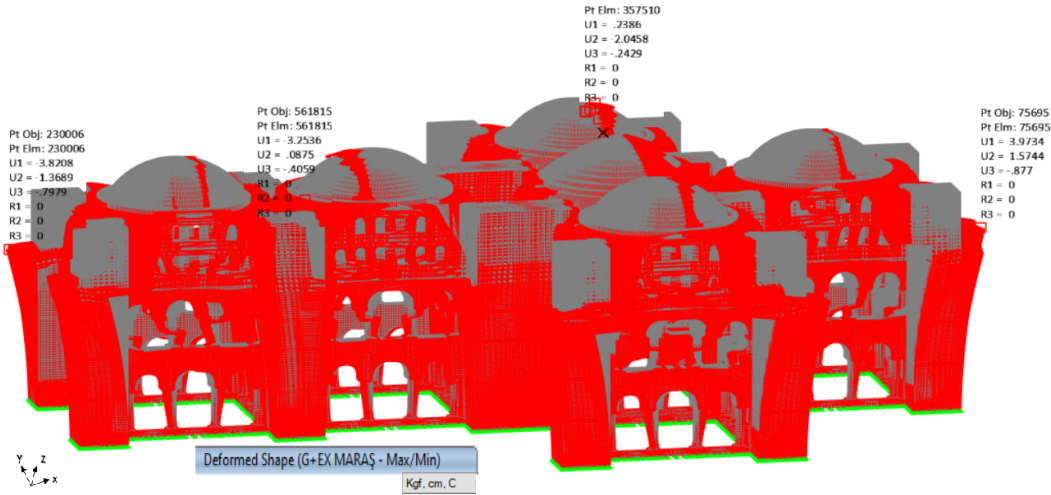
Şekil 4.46: (G+EX MARAŞ) Maksimum basınç gerilmesi dağılımı



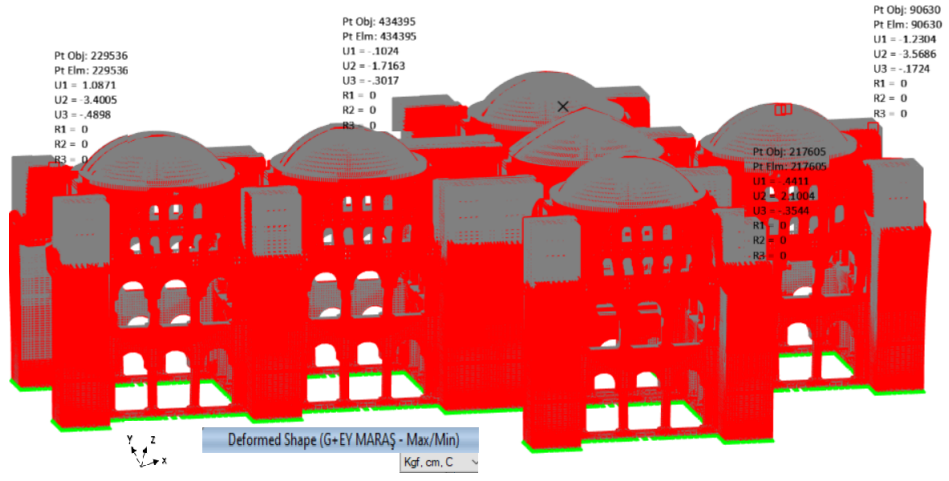
Şekil 4.47: (G+EY MARAŞ) Maksimum çekme gerilmesi dağılımı



Şekil 4.48: (G+EY MARAŞ) Maksimum basınç gerilmesi dağılımı



Şekil 4.49: (G+EX MARAŞ) Maksimum yer değıştirme



Şekil 4.50: (G+EY MARAŞ) Maksimum yer değiştirme



## 5 SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında, İzmir ili Selçuk ilçesi sınırları içerisinde yer alan St. Jean Bazilikası'nın ana kütleli oluşturulan altı adet kemerli kubbe ile örtülü olan bölümünün sonlu eleman metodu ile üç boyutlu analiz modeli oluşturulmuştur. Bu kapsamda, öncelikle yığma taşıyıcı sistemi oluşturulan malzemelerin mekanik özellikleri laboratuvar ortamında belirlenmiştir. Ardından SAP2000 programında yapının öncelikle kendi ağırlığı altında statik analizleri incelenmiş, ardından modal analizle doğal titreşim frekanslarına bağlı olarak periyot ve mod şekilleri tespit edilmiş, akabinde eşdeğer deprem yükü ve 17 Ağustos 1999 Kocaeli ve 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş deprem ivme kayıtları dikkate alınarak yapılan davranış spektrumu analizlerinden elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

- Modal analizden elde edilen titreşim modlarına ait şekiller incelendiğinde, periyot değerlerinin ilk 15 adım için 0.234 ile 0.157 sn aralığında değişen değerlere sahip olduğu görülmüştür. Planda haç şekline benzer yapıda mimariyle oluşturulan yapının ilk modlarında burulma davranışına zorlandığı görülmüştür.
- Yapının kendi ağırlığı altında yapılan statik analiz sonuçları, basınç gerilmeleri 0.7 Mpa, çekme gerilmelerinin ise 0.15 Mpa değerlerine ulaştığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, maksimum gerilme yığılmalarının büyük kütleli kubbe yapılarını taşıyan sütun mermer kolonlar üzerinde meydana geldiği ancak yapının kendi ağırlığı altında oluşan maksimum basınç ve çekme gerilmelerini kabul edilebilir seviyede güvenle karşılayabileceği değerlendirilmiştir.
- Deprem yüküne bağlı (eşdeğer deprem yükü ve davranış spektrum) analizler incelendiğinde, maksimum normal gerilmelerin (çekme ve basınç) emniyetli gerilme değerlerini aştığı tespit edilmiştir. Maksimum çekme gerilmelerinin özellikle sütun kolonların bulunduğu ayak bölgelerinde ve yan beden duvarlarında olduğu, kolon (sütün) ayakların her ne kadar mermer elemandan oluşup basınç dayanımı yüksek olsa dahi yapıda

oluşan çekme gerilmelerini karşılamakta yetersiz kaldığı, hatta kubbeli kemer yapısının stabilitesini koruyamayacağı değerlendirilmiştir.

- Yapının eşdeğer deprem yükü ve davranış spektrum analizi altında X ve Y yönünde maksimum yer değiştirmelerine bakıldığında X yönünde 7.32 cm, Y yönünde 7.95 cm, mertebelerinde olduğu görülmüştür. Maksimum deplasmanların doğal olarak tepe noktalarda olduğu gözlemlenmiştir. Bu derece büyük deplasmanların yapı stabilitesinin korunması noktasında büyük risk teşkil edeceği kanaatine varılmıştır.
- Dinamik ve statik analiz sonuçları ile laboratuvar çalışmaları bir bütün olarak değerlendirildiğinde halihazırda yıkıma uğramış durumdaki kemerli kubbe yapısındaki St. Jean bazilikasının yaklaşık 60 cm çaplarındaki dörder ayak üzerine oturtulmuş olan kemerli kubbeli kısımlarının gerek yapının ağırlığı gerekse büyük kubbe çapları sebebiyle mermer kolon (sütun) ayaklar üzerinde yoğun gerilmeler oluşturduğu görülmüştür. Analizler neticesinde elde edilen bir diğer husus ise pandantif elemanların yük aktarımında özellikle 11.5 cm çapındaki kubbelerin ayaklar ile arasında meydana gelen süreksizliktir. Yük aktarımında meydana gelen bu süreksizliğin göçme riski oluşturması kaçınılmaz bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Analizlerden elde edilen tüm unsurlar birlikte değerlendirildiğinde geçmişte yaşanmış şiddetli bir sarsıntı tesirinde yapının stabilitesini koruyamayarak ağır kubbelerin altında yer alan narin ayak kısımlarından çökmüş olabileceği kanaatine varılmıştır.
- Selçuk Efes St. Jean Bazilikası yığma taşıyıcı sisteminin sahip olduğu ana taşıyıcı elemanları oluşturan sütunlu kemer yapısının bu tür kubbeli bir mimari oluşumda özellikle deprem yüklerinin karşılanması anlamında yetersiz kaldığı, eğer bahse konu yapının deprem etkisi altında yıkılması söz konusu ise yapılan çalışmada elde edilen parametre ve analiz sonuçlarının çok önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

## Kaynaklar

- Akaslan, S. A., (2019). Tarihi Yapıların Deprem Etkisi Altında Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 117s.
- Akyürek, E., (1996) Bizans'ta Sanat ve Ritüel, Kariye Güney Şapelinin İkonografisi ve İşlevi, Kabalcı Yayınevi, İstanbul, 292s.
- Anadut, H. O., (2016). Tarihi Yapıların Dinamik Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yozgat, 95s.
- Armağan, K., (2012). Tarihi Yapılarda Kullanılan Fonksiyonelliğin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Asteris, P. G. and Tzamtzis, A. D., (2003). On the use of a regular yield surface for the analysis of unreinforced masonry walls, *Electronic Journal of Structural Engineering*, 3, 23–42 pp.
- Bağbancı, M. B., (2009). Tarihi Yapıların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizinin Bursa Ördekli Hamamı Örneğinde İncelenmesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, 232s.
- Bakkaloglu, E., (2007). Düşeyde düzensiz bir yapının depreme dayanıklılığının incelenmesi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 106s.
- Bahtiyar, M., (1998). Restorasyonda Strüktürel Sorunlar: taş yapılarda konunun iredelenmesi ve örnekler, Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 171s.
- Baktır, S., (2006). Yapı Malzemelerindeki Teknolojik Gelişmelerin Mimari Biçimlemeye Etkileri, Gazi Üni., Fen Bilimleri Ens., Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

- Baranaydin, F., (2020). Ephesos St. Jean Kilisesi Kiborion Sütünü 1963 Yılı Restorasyonuna Güncel Bir Yaklaşım, *Amisos*, 5(8), 31-50 s.
- Bayülke, N., (2013). Yığma yapılar: Taş ve Tuğla, İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, 237-267.
- Bilgin, H., (2006). Mimar Sinan Yapılarında Kubbeli Örtü Sistemlerinin Yapısal Analiz, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 21(3), 119-128s.
- Büyükkolancı, M., (2001). The Life and Monument of St. John. Selçuk-Izmir: Efes 2000 Foundation.
- Büyükkolancı M., (2008). Selçuk Ayasuluk Tepesi (Eski Efes) 'Apasas' mı?, Batı Anadolu ve Doğu Akdeniz Geç Tunç Çağı Kültürleri Üzerine Yeni Araştırmalar, eds: Erkanal – Öktü A., Günel S., Deniz U., Hacettepe Üniversitesi Yayınları, Ankara, 41-55 s.
- Can, H. ve Unay, A. İ., (2012). Tarihi Yapıların Deprem Davranışını Belirlemek İçin Sayısal Analiz Yöntemleri, *Gazi Üni. Müh. ve Mim. Fak. Der.*, 27(1), 211-217 s.
- Castellazzi, G., De Miranda S. and Mazzotti, C., (2012). Finite Element Modelling Tuned on Experimental Testing for the Structural Health Assessment of an Ancient Masonry Arch Bridge, *Mathematical Problems in Engineering*, doi:10.1155/2012/495019.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N., (2004) Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı, Beta Yayınları, İstanbul.
- Çağlar, B., (2015). Kariye Camisi'ndeki (Chora Manastırı Kilisesi) Duvar Resimlerinin Koruma Ve Onarım Süreçleri Üzerine, *Sanat ve Tasarım Dergisi*, 15, 45-59s.
- Çamlıbel, N., (2000). Yapıların Taşıma Gücünün İyileştirilmesi, Birsen Yayınevi, İstanbul, 150s.

Çarhoğlu, A. I., Usta, P. ve Korkmaz, A., (2013). Ayasofya Örneğinde Tarihi Mimari Yapılarının Sismik Davranışın İncelenmesi, SDU International Technologic Science, 5(1), 36-43s.

Dabanlı, Ö., (2008). Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansının belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 185s.

Dabanlı, Ö., (2016). Nur-U Osmaniye Cami'nin Deprem Performansının Belirlenmesi ve Koruma Önerileri, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 540s.

DBYBHY, (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 159 s.

Depositphotos, <https://depositphotos.com/tr/photos/ayasofya-cami.html> (Erişim tarihi: 10 Haziran 2024).

Dönmezer, H., (1956). Zemin Mekaniği, Osman Yalçın Matbaası Yayını, İstanbul, 512 s.

Efes Vakfı, <https://www.efes2000vakfi.com/styled-6/index.html> (Erişim tarihi: 10 Haziran 2024).

EN 1996-1-1, (2005). European Committee for Standardization, EUROCODE 6: Design of masonry structures, Brussels.

Er, A. C., (2013). Geleneksel Harman Tuğlası ve Üretimi, Mesleki Bilimler Dergisi, 2(2), 61-70 s.

Ercan, E., (2010). Tarihi Yığma Yapıların Güvenliklerinin Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 253s.

Ergin, A., Bayraktarkatal, E. ve Ünsan, Y., (2000). Sonlu Elemanlar Metodu ve Gemi İnşaatı Sektöründeki Uygulamaları: Seminer Kitabı, Yapım Matbaacılık, İstanbul, 89s.

- Gedik, Y. H., (2008). Tarihi Yiğma Yapıların Analizi, Onarım Ve Güçlendirilmesi: Mehmet Ağa Cami Örneği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği Enstitüsü, İstanbul, 88s.
- Giordano, A., Mele, E. and De Luca, A., (2002). Modelling of Historical Masonry Structures: Comparison of Different Approaches Through A Case Study, *Engineering Structures*, 24, 1057-1069 pp.
- Güner, Y., (2018). Mevcut Tarihi Yiğma Yapıların Performans Analizi, Yüksek lisans tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, 164s.
- Hasol, D., (1998). Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü, Yem Yayın, İstanbul.
- Hirka-i Şerif, <http://www.hirkaiserivakfi.com/TR/805/Hirka-i-Serif-Cami-ve-Mustemilati/Hirka-i-Serif-Cami-1851.aspx> (Erişim Tarihi: 26.07.2024).
- Housner G. W., Martel R. R. and Alford J. L.,(1953), Spectrum analysis of strong-motion earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 43(2), 97-119 pp.
- Hutton, D. V., (2004). Fundamentals of The Finite Element Analysis, The Mc-Graw Hill Companies, London.
- İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, <https://tdth.afad.gov.tr> (Erişim Tarihi: 11.09.2024).
- İzol, R. (2022). Yiğma Yapılarının Deprem Direnci Üzerinde Payanda Formunun Etkisi ve Süleymaniye Camisi'nin Payanda Sisteminin İrdelenmesi, Doktora Tezi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa.
- Kara, H. G., (2009). Tarihi yiğma yapıların taşıyıcı sistemleri, güvenliğinin incelenmesi, onarım ve güçlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 187s.
- Kayırga, O. M., (2017). Yiğma Yapıların Deprem Davranışının Analitik ve Deneysel Olarak Belirlenmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, 185s.

- Koçak, A., (1999). Tarihi Yapıların Statik Ve Dinamik Yükler Altında Lineer Ve Non-Lineer Analizi: Küçük Ayasofya Cami Örneği, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 185s.
- Kuban, D., (2000). Tarihi Çevre Korumanın Mimarlık Boyutu, YEM Yayınları, İstanbul, 207s.
- Lourenço, P. B., (1998). Experimental and Numerical Issues in the Modelling of the Mechanical Behaviour of Masonry, Structural Analysis of Historical Constructions II, Barcelona, 57-91p.
- Lourenço, P. B., (2002) Computations on Historic Masonry Structures, Progress in Structural Engineering and Materials, 4(3), 301–319 pp.
- Lourenço, P.B., (2006). Structural behavior of civil engineering structures: Highlight in historical and masonry structures 1st workshop on civil engineering research, Universidade do Minho, Portugal.
- Mülâyim, S. (2010). Sütun, TDVİA, C: XXXVIII, İstanbul, 181-182 s.
- Orbeyi, N. K. (2012). Mimar Sinan Camileri revak sütunları üzerine bir araştırma: Süleymaniye Camisi, Selimiye Camisi ve Kara Ahmet Paşa Camisi örnekleri, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 28(3): 175-185 s.
- Özen, R. (2001). İnşaat Malzemesi Olarak Ahşap: Avantajları ve Dezavantajları, (ed: Özköse, A.), Ahşap Kültürü: Anadolu'nun Ahşap Evleri, Ankara: Kültür Bakanlığı Yayınları.
- Sánchez, I. B., (2007). Strengthening of arched masonry structures with composite materials, Ph.D. Dissertation, University of Minho, Julho, Portugal.
- Şen, B., (2003). Modeling and analysis of historical masonry structures, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Ankara.
- T.C. Fatih Kaymakamlığı, <http://www.fatih.gov.tr/suleymaniye-cami>(Erişim tarihi: 10 Haziran 2024).

Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü, <https://parselorgu.tkgm.gov.tr> (Erişim tarihi: 10 Haziran 2024).

TBDY, (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

Tetik, T., (2015). Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansı ve Güçlendirme Teknikleri. İstanbul Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul,141s.

Truong-Hong, L. and Laefer D. F., (2008). Micro vs macro models for predicting building damage underground movements, Page 1/11 CSM2008 The international Conference on Computational Solid Mechanics November, Hochiminh City, Vietnam, 27-30 pp.

TS EN 1467, (2012) Doğal Taşlar-Ham Bloklar Özellikleri,Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

TS 498, (1997) Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri, Ankara, Türkiye.

TS EN 705, (2005) Fabrika tuğlaları-Duvarlar için dolu ve düşey delikli, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 771-1, (2005) Kagir Birimler-Özellikler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

Turani, A., (2007). Dünya Sanat Tarihi, Remzi Kitabevi, İstanbul.

Türkecul, H. (2019). Yarım kubbeli tarihi medreselerin dinamik davranışlarının incelenmesi: Tokat Yağbasan (Çukur) Medrese örneği, Yüksek lisans tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Tokat.

Uğuz, S., (2016). Tarihi Yığma Bir Binanın Deprem Güvenlik Analizi: Tarihi Konya-Gazi Lisesi (Darül Muallim) Örneği, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 121s.

Ural, A.(2009). Yığma Yapıların Doğrusal ve Doğrusal Olamayan Davranışlarının İncelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon, 251s.

Vakıflar Genel Müdürlüğü, 2018, “Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu”, [https://cdn.vgm.gov.tr/organizasyon/organizasyon12\\_030619/kilavuz.pdf](https://cdn.vgm.gov.tr/organizasyon/organizasyon12_030619/kilavuz.pdf) (Erişim Tarihi: 04.07.2024).

Wikipedia(a), <https://tr.wikipedia.org/wiki/Sel%C3%A7uk> (Erişim tarihi: 10 Haziran 2024).

Wikipedia(b), [https://tr.wikipedia.org/wiki/San\\_Vitale\\_Kilisesi](https://tr.wikipedia.org/wiki/San_Vitale_Kilisesi) (Erişim tarihi: 10 Haziran 2024).

Yağlı, B. M., (2010). Mimar Sinan’ın Şehzade, Süleymaniye Ve Selimiye Camilerinin Tektonik Karakterlerinin Çözümlemesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Mimarlık Anabilim Dalı, Ankara, 201.

Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L., (1988). The Finite Element Method, Publisher, Mcgraw-Hill, 22, 456-478 pp.

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamda, tez konusunun belirlenmesinden son aşamasına kadar her türlü bilgi birikimini, tecrübesini, katkılarını esirgemeyerek büyük bir ilgi ve sabır ile çalışmama yön veren danışman hocam Doç. Dr. Ayhan NUHOĞLU'na, yüksek lisansa başlama sürecimde desteğiyle vesile olan çok değerli hocam merhum Prof. Dr. Vecdi Aytaç'a teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışması kapsamında, örnek yapı olarak seçilen St. Jean Anıtı'nı tez konusu olarak çalışma müzadesi veren Kültür Turizm Bakanlığı İzmir Efes Müze Müdürlüğü'ne, Ayasuluk ve St. Jean Anıtı Kazı Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Tüm çalışma sürecimde hem akademik bilgi ve tecrübesini, hem de desteğini bir an olsun esirgemeyen eşim Zeliha KARTAL YILDIZ'a, motivasyon kaynağım kızım Hilal YILDIZ'a, bugünlere gelmemde büyük emekleri olan desteklerini ömür boyu hissettiğim annem, babam ve kardeşlerime çok teşekkür ederim.

Tez hazırlık sürecimde ilgileri, mesleki tecrübe ve katkılarıyla büyük destek veren meslektaşlarım İnş. Yük. Müh. Emre KALFA'ya, İnş. Müh. Emre EREN'e, İnş. Yük. Müh. Ercan TUNA'ya, ayrıca yüksek lisans eğitiminin tamamlanması sürecinde anlayış, destek ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen tüm amirlerime ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

04/09/2024

İmzası

Murat YILDIZ

## ÖZGEÇMİŞ

Murat YILDIZ ilk ve orta öğrenimini İzmir Gazi İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini Mersin Anamur Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2011 yılında Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek öğrenimine başlamış olup 2015 yılında tamamlamıştır. Bir süre özel sektör deneyiminin ardından Milli Savunma Bakanlığı bünyesinde çalışmaya başlamış olup halen aynı kurumda çalışmalarını sürdürmektedir.

