

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TARİHİ YAPILARIN MODELLENMESİ VE  
DEPREM GÜVENLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Pelin YILMAZ**

**Enstitü Bilim Dalı : YAPI EĞİTİMİ**  
**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Zeki ÖZCAN**

**Mayıs 2006**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## TARİHİ YAPILARIN MODELLENMESİ VE DEPREM GÜVENLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Pelin YILMAZ

Enstitü Anabilim Dalı : YAPI EĞİTİMİ

Bu tez 16 / 06 /2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet Celal  
APAY  
Jüri Başkanı

Yrd. Doç. Dr. Zeki  
ÖZCAN  
Üye

Yrd. Doç. Dr. Mustafa  
KUTANİS  
Üye

## TEŞEKKÜR

Tezin hazırlanması aşamasında bana her tŒrlŒ desteği veren danıŐman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Zeki ÖZCAN`a, hoŐgŒrŒsŒ ve desteği için Prof. Dr. Ahmet APAY `a, gŒrŒŐlerini benimle paylaŐan sevgili arkadaŐım ArŐ. GŒr. Emine Aydın`a ve ęalıŐma arkadaŐlarım, Őzverisi, anlayıŐı, yardımı ve gŒveni için eŐim S. Anıl YILMAZ `a ve desteğini esirgemeyen aileme teŐekkŒr ederim.

Mayıs 2006

PELİN YILMAZ

## İÇİNDEKİLER

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| TEŞEKKÜR.....                        | ii  |
| İÇİNDEKİLER.....                     | iii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ..... | v   |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....                | vii |
| TABLolar LİSTESİ.....                | ix  |
| ÖZET.....                            | xi  |
| SUMMARY.....                         | xii |

### BÖLÜM 1.

|   |   |
|---|---|
| GİRİŞ.....                                  | 1 |
| 1.1.Konunun Tanımı.....                     | 1 |
| 1.2.Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar..... | 2 |

### BÖLÜM 2.

|   |    |
|---|----|
| MODELLEME VE ANALİZ YÖNTEMLERİ.....                   | 5  |
| 2.1.Modelleme Yöntemleri.....                         | 5  |
| 2.1.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....                   | 5  |
| 2.1.2. Ayrık Eleman Yöntemi.....                      | 13 |
| 2.1.3. Sonlu Eleman Yöntemi-Ayrık Eleman Yöntemi..... | 14 |
| 2.2. Analiz Yöntemleri.....                           | 14 |
| 2.2.1. Zaman Tanım Alanında Hesaplama Yöntemi.....    | 14 |
| 2.2.2. Mod Birleştirme Yöntemi.....                   | 15 |

### BÖLÜM 3.

|  |    |
|--|----|
| TARİHİ YAPILARIN DEPREM İNCELENMESİ.....               | 16 |
| 3.1. Yığma Yapılar İçin Yöntemler.....                 | 16 |
| 3.1.1. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi.....        | 16 |
| 3.1.1.1. Harç.....                                     | 17 |
| 3.1.1.2. Tuğla.....                                    | 17 |
| 3.1.1.3. Doğal Taş.....                                | 18 |
| 3.1.1.4. Ahşap.....                                    | 19 |
| 3.1.2. Ortak Malzeme Parametrelerin Belirlenmesi.....  | 19 |
| 3.2. Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistemler.....          | 21 |
| 3.3. Depreme Dayanıklı Tasarım için Temel İlkeler..... | 24 |
| 3.4. Tarihi Yapıların Deprem Davranışı.....            | 26 |
| <br>   |    |
| BÖLÜM 4.   |    |
| TARİHİ RAHİME SULTAN CAMİİ ÖRNEĞİ.....                 | 28 |
| 4.1. Caminin Konumu.....                               | 28 |
| 4.2. Tarihçe.....                                      | 29 |
| 4.3. Bölgenin Jeolojik Yapısı.....                     | 30 |
| 4.4. Caminin Mevcut Durumu.....                        | 31 |
| 4.5. Yapı Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi.....   | 41 |
| 4.6. Sayısal Çözümler.....                             | 43 |
| <br>   |    |
| BÖLÜM 5.   |    |
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....                              | 57 |
| <br>   |    |
| KAYNAKLAR.....   | 59 |
| ÖZGEÇMİŞ.....  | 61 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

|            |  |
|------------|--|
| $A_0$      | : Deprem bölgesi etkin yer ivmesi katsayısı                |
| $A(T)$     | : Spektral ivme katsayısı                                  |
| $a$        | : En   |
| $\partial$ | : Türev operatörü  |
| $b$        | : Boy  |
| $[B]$      | : Gerilme-deplasman matrisi                                |
| $c$        | : Sönüm matrisi, yükseklik                                 |
| $E$        | : Elastiklik modülü  |
| $f$        | : Kuvvet   |
| $[D]$      | : Malzeme süreklilik matrisi                               |
| $E_h$      | : Harç elastisite modülü                                   |
| $E_t$      | : Tuğla elastisite modülü                                  |
| $E_{th}$   | : Ortak elastisite modülü                                  |
| $g$        | : Yerçekimi ivmesi   |
| $H$        | : Ağırlık katsayısı  |
| $I$        | : Yapı önem katsayısı, Kiriş kesit alanının ikinci momenti |
| $j$        | : Düğüm noktası  |
| $[k]$      | : Rijitlik matrisi   |
| $[K]$      | : Cismin tümel direngenlik matrisi                         |
| $m$        | : Kütle matrisi, Eleman atalet matrisi, metre              |
| mm         | : Milimetre  |
| $N$        | : Yer değiştirme fonksiyonu                                |
| $\{P\}$    | : Düğümlere uygulanan dış kuvvetler                        |

|                    |   |
|--------------------|---|
| $q_n$              | : Kuvvet  |
| $R$                | : Taşıyıcı sistem davranış katsayısı              |
| $x$                | : Yer değiştirme matrisi                          |
| $t_h$              | : Harç kalınlığı                                  |
| $t_t$              | : Tuğla kalınlığı                                 |
| $T$                | : Binanın doğal titreşim periyodu, Kinetik enerji |
| $U$                | : Şekil değiştirme enerjisi                       |
| $\{u\}$            | : Düğüm noktalarının yer değiştirmeleri           |
| $u$                | : Eleman yer değiştirme bileşenleri               |
| $v$                | : Eleman yer değiştirme bileşenleri               |
| $v$                | : yerdeğiştirme matrisi                           |
| $w$                | : Eleman yer değiştirme bileşenleri               |
| $W$                | : Uygulanan kuvvet tarafından yapılan iş          |
| $x$                | : Doğrultu  |
| $y$                | : Doğrultu  |
| $z$                | : Doğrultu  |
| $\nu$              | : Poisson oranı                                   |
| $\{\sigma\}$       | : Gerilme bileşeni                                |
| $\{\epsilon\}$     | : Şekil değiştirme bileşeni                       |
| $\{\tau\}$         | : Kayma bileşeni                                  |
| $\delta$           | : Kuvvet yöneticisi                               |
| $\{\delta\}$       | : Düğümlerin yer değiştirmeleri                   |
| $\xi, \eta, \zeta$ | : İzoparametrik koordinatlar                      |
| $\rho$             | : Kütle birim hacim                               |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|  |    |
|--|----|
| Şekil 2.1. Tek serbestlik dereceli sistem.....   | 7  |
| Şekil 2.2. Üç boyutlu dikdörtgen bir eleman.....   | 8  |
| Şekil 3.1. Ortak malzeme parametresinin belirlenmesi yöntemi.....                          | 20 |
| Şekil 3.2. Kemer örgü şekilleri.....   | 22 |
| Şekil 3.3. Tonoz çeşitleri.....  | 23 |
| Şekil 3.4. Kubbe üst ve yan görünüş.....   | 24 |
| Şekil 3.5. Türkiye deprem haritası.....  | 26 |
| Şekil 4.1. Türkiye haritası, Sakarya ili.....  | 28 |
| Şekil 4.2. Rahime Sultan Camii.....  | 30 |
| Şekil 4.3. Rahime Sultan Camii kuzey-batı perspektif görünüşü .....                        | 32 |
| Şekil 4.4. Rahime Sultan Camii minare kaidesinin görünüşü.....                             | 32 |
| Şekil 4.5. Rahime Sultan Camii normal, asma kat ve çatı planları.....                      | 34 |
| Şekil 4.6. Rahime Sultan Camii ön ve arka görünüşleri.....                                 | 35 |
| Şekil 4.7. Rahime Sultan Camii sağ ve sol görünüşleri.....                                 | 35 |
| Şekil 4.8. A-A ve B-B kesitleri.....   | 35 |
| Şekil 4.9. Rahime Sultan Camii pencere-duvar kesit görünüşü.....                           | 36 |
| Şekil 4.10. Rahime Sultan Camii ön görünüş(kuzey).....                                     | 36 |
| Şekil 4.11. Rahime Sultan Camii yan görünüş(batı).....                                     | 37 |
| Şekil 4.12. Rahime Sultan Camii arka görünüş(güney).....                                   | 37 |
| Şekil 4.13. Rahime Sultan Camii pencere görünüşleri.....                                   | 38 |
| Şekil 4.14. Gergi çubukları.....   | 38 |
| Şekil 4.15. Asma kat görünüşü.....   | 39 |
| Şekil 4.16. Dökme demirden imal edilmiş asma katı tutan dairesel kolon<br>görünüşleri..... | 39 |



|  |    |
|--|----|
| Şekil 4.17. Kubbe duvar birleşimi.....   | 40 |
| Şekil 4.18. Caminin giriş cephesinde bulunan padişah tuğrası ve cami kitabesi.....   | 41 |
| Şekil 4.19. 1999 Marmara depreminden kaynaklanan asma katta oluşan çatlaklar.....  | 42 |
| Şekil 4.20. Rahime Sultan Camii analizinde kullanılan 3 boyutlu sonlu eleman modeli.....   | 44 |
| Şekil 4.21. Statik yükleme durumunda elde edilen $\sigma_{33}$ gerilme dağılımı (KN/m <sup>2</sup> ).....  | 45 |
| Şekil 4.22. Statik yükleme durumunda elde edilen yer değiştirmeler (mm).   | 46 |
| Şekil 4.23. İlk dört serbest titreşim mod biçimi.....  | 47 |
| Şekil 4.24. Z3 zemin sınıfı ve Marmara depremi ivme spektrum eğrileri...   | 48 |
| Şekil 4.25. Z3 zemin sınıfı için doğu-batı ve kuzey güney doğrultusunda elde edilen $\sigma_{33}$ gerilme dağılımı (KN/m <sup>2</sup> ).....                                     | 49 |
| Şekil 4.26. Doğru-batı ve kuzey-güney doğrultusunda deprem kuvveti uygulanması sonucu Z3 zemin sınıfı için elde edilen yer değiştirmeler (mm).....                               | 52 |
| Şekil 4.27. Marmara depremi için doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusunda deprem spektrumu uygulanması sonucu elde edilen $\sigma_{33}$ gerilme dağılımı (KN/m <sup>2</sup> )..... | 53 |
| Şekil 4.28. Marmara depremi için doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusunda deprem spektrumu uygulanması sonucu elde edilen yer değiştirmeler (mm).....                              | 56 |

## TABLolar LİSTESİ

|   |    |
|---|----|
| Tablo 3.1. Tuğlaların ortalama fiziksel özellikleri.....  | 18 |
| Tablo 3.2. Doğal yapı taşlarının ortalama fiziksel özellikleri.....   | 18 |
| Tablo 4.1. Urla Kamanlı, Bursa yeşil türbe ve Ayasofya ile ilgili yapılmış olan çalışmalarından yararlanılan malzeme parametreleri .....  | 42 |
| Tablo 4.2. Analizde kullanılan malzeme parametreleri.....   | 43 |
| Tablo 4.3. Statik yükleme durumunda yapı üzerinde seçilen bazı elemanların $\sigma_{33}$ gerilmeleri açısından incelenmesi (KPa).....   | 44 |
| Tablo 4.4. Statik yükleme durumunda yapı üzerinde seçilen bazı elemanların yer değiştirmeleri (mm).....   | 46 |
| Tablo 4.5. Doğu-batı doğrultusunda deprem kuvveti uygulanması sonucu Z3 zemin sınıfı için yapı üzerinde seçilen bazı elemanlarda hesaplanan normal ve kayma gerilmeleri (KPa).....    | 50 |
| Tablo 4.6. Kuzey-güney doğrultusunda deprem kuvveti uygulanması sonucu Z3 zemin sınıfı için yapı üzerinde seçilen bazı elemanlarda hesaplanan normal ve kayma gerilmeleri (KPa).....  | 51 |
| Tablo 4.7. Doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusunda deprem kuvveti uygulanması sonucu Z3 zemin sınıfı için elde edilen yer değiştirmeler (mm).....                                      | 51 |
| Tablo 4.8. Yapı üzerinde seçilen bazı elemanlarda Marmara depremi için kuzey-güney doğrultusunda deprem spektrumu uygulanması sonucu elde edilen yer değiştirmeler (mm).....          | 54 |
| Tablo 4.9. Yapı üzerinde seçilen bazı elemanlarda Marmara depremi için doğu-batı doğrultusunda deprem spektrumu uygulanması sonucu elde edilen normal ve kayma gerilmeleri (KPa)..... | 55 |

|  |    |
|--|----|
| Tablo 4.10. Yapı üzerinde seçilen bazı elemanlarda Marmara depremi için<br>kuzey-güney doğrultusunda deprem spektrumu uygulanması sonucu elde<br>edilen normal ve kayma gerilmeleri (KPa)..... | 55 |
|--|----|

## ÖZET

Anahtar Kelimeler: Tarihi yapılar, Rahime Sultan Camii, deprem, sonlu elemanlar yöntemi.

Bu çalışmanın amacı, kültür miraslarımız olan tarihi yapıların gelecek nesillere sağlıklı olarak aktarılmasını sağlamak ve bu amaca yönelik çalışmalar yapmaktır. Bu nedenle tarihi yapıların mevcut durumlarının değerlendirilmesi, olası depremlerde ve zaman içindeki davranışlarının bilinmesi son derece önemlidir. Bu kapsamda, Sakarya ili, Sapanca ilçesi içinde bulunan Rahime Sultan Camii ele alınarak, deprem davranışını belirlemek ve gelecek nesillere ulaştırabilmek için yapılması gerekenler araştırılmıştır.

Birinci bölümde, konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelenerek özetlenmiştir.

İkinci bölümde, deprem davranışlarının belirlenmesine yönelik model ve analiz yöntemleri incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, tarihi yapıların deprem davranışı açısından incelenmesi, malzeme özellikleri ve inceleme yöntemlerinden bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde, incelenen Rahime Sultan Cami'nin deprem davranışı araştırılmıştır. Bu tarihi yapının, konumu, mevcut durumu ortaya konularak sonlu eleman modeli oluşturulmuş, sayısal çözümleri yapılmıştır.

Son bölümde ise sonuçlar değerlendirilerek özetlenmiş, bulunan veriler ışığında görüşler ve tavsiyeler verilmiştir.

# **EARTHQUAKE SAFETY EVALUATION OF HISTORICAL STRUCTURES**

## **SUMMARY**

Key Words: Rahime Sultan Mosque, historical structures, finite element method.

The aim of this report is to make a study on the magnificent structures which have been built by our ancestors, as part of our historic heritage and to contribute to conservation and restoration of these historic structures.

There is a retaining increased importance for the assessment of the structural safety and earthquake behavior of existing historic structures in this millennium. In this study, the Rahime Sultan Mosque of Sapanca District is investigated. Within this activity, its finite element model is established and earthquake response of 17th of August, 1999 Marmara earthquake is determined.

In the first chapter of this report, a literature study is performed and current studies are summarized.

The second chapter includes the modeling and analysis methods for determining earthquake behavior of historic structures.

At third chapter, characteristics of material properties and structural analysis methods are discussed. Then, the methods of earthquake behavior of the historical structures are overviewed.

In the forth chapter, the earthquake behavior of Rahime Sultan Mosque is investigated. Using its finite element model, a numerical analysis is conducted.

In the last chapter, the results obtained are discussed and recommendations for future studies are made.

# BÖLÜM 1. GİRİŞ

## 1.1. Konunun Tanımı

Geçmiş kültürlerin günümüze yansıması olan tarihi yapılar, birçok olumsuzluğa rağmen genellikle varlıklarını sürdürmektedirler. Günümüzde birçok yapı, depreme karşı yeterli dayanım gösteremezken, bu denli eski yapıların sağlam olması merak konusudur. Tarihi yapıların deprem güvenliklerini belirleyebilmek için, yapının depreme karşı dayanımının bilinmesi gerekmektedir. Dolayısıyla bu tür yapılar üzerinde gerekli bilimsel çalışmalar arttırılmalı, yapıların malzeme ve dayanım açısından güçlendirilmesi için gerekli parametreler saptanmalıdır. Bu parametreler doğrultusunda yapıların iyileştirilmesi için uygulamaya dönük ilkeleri saptamak çağımızın bir gereğidir.

Tarihi yapılar, deprem etkisine karşı genellikle rijit cisim davranışı gösterirler. Yatay zemin hareketleri sonucu, yapının her bir noktası yaklaşık olarak aynı hareketi yapar. Geleneksel yapılar çok kısa periyotlu yapılar olup, periyotları genellikle  $T= 0.15$  sn ve  $T= 0.45$  sn arasında değişmektedir [1]. Yapı ağırlığının fazla olması nedeniyle de bu yapılara gelen deprem kuvvetleri de büyük olacağından bu tür yapılarda deprem riski yüksektir. Zaman içerisinde çevre şartlarının etkisiyle meydana gelen veya gelmesi muhtemel etkilerle, yapının depreme karşı dayanıklılığı da azalmaktadır.

Bu çalışmada, Sakarya ili Sapanca ilçesinde bulunan Rahime Sultan Camii incelenmiş ve SAP2000 bilgisayar programı ile yapısal analizi yapılmıştır. Yapının serbest titreşim periyotları hesaplanmış ve spektral analizi yapılmıştır. Rahime Sultan Camii'nin sonlu eleman analiz sonuçlarının yorumlanmasında yer değiştirme ve gerilmeler kullanılmıştır. Bulunan sonuçlar tablo ve şekillerle gösterilmiştir.

## 1.2. Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar

**Erdik, M., ve Durukal, E., (1993);** Yaklaşık 15 yüzyıldır ayakta duran Ayasofya Müzesini incelemişlerdir. Sap90 kullanılarak yapılan sonlu eleman modeli için 363 çerçeve elemanı, 720 kabuk elemanı, 2826 katı cisim elemanı kullanılmıştır. Tanımlanan 5000'e yakın düğüm noktası yaklaşık 17000 serbestlik dereceli bir sistem oluşturmuştur. Model yapıda gerçekleştirilen çevrel titreşim deneyleri sonuçları ışığında düzeltilmiştir. 1992 Karacabey depremi, Ayasofya'da bulunan ivmeölçer ile kayıt edilerek gerçek dinamik davranışın belirlenmesinde etkili olmuştur. Sonlu eleman modelinin analizi sayesinde Ayasofya'nın genel yapısal özellikleri ve yapısal elemanları arasındaki etkileşim belirlenmiştir. Modelin dinamik analizinin çevrel titreşim deneyleri ve deprem kayıtları sonuçlarıyla uyum içinde olması sayısal model çalışmalarının bu tip araştırmalarda önemli bir yeri olduğunu göstermiştir [2].

**Çakmak, A. Ş., ve diğerleri (1994);** yapılışından itibaren sekiz yüzyıl süre ile dünyanın en büyük kubbeli mekanı olan Ayasofya müzesinin mevcut durumundaki deprem davranışını incelemişlerdir. Yapının sayısal modeli sonlu eleman yöntemiyle oluşturulmuştur. Disiplinler arası yaklaşım Ayasofya'nın dinamik davranışı ile ilgili çalışmalara uygulanarak, yapısal analiz, geoteknik ve malzemeye yönelik yapılan araştırmalarla birleştirilmiştir. Malzeme alanındaki çalışmalar yapıda kullanılan harcın karakteristikleri ve tuğla duvarın yoğunluk, rijitlik ve dayanımı hakkında fikir sahibi olunmasını sağlamıştır. Bu disiplinler arası çalışma Ayasofya'nın deprem davranışını kontrol etmek ve güçlendirmede yapılması gerekenleri detaylandırmak için önemlidir [3].

**Selahiye A., ve diğerleri (1995);** 1549-1557 yılları arasında Mimar Sinan tarafından Kanuni Sultan Süleyman adına inşa edilmiş Süleymaniye Camii'ni incelemişlerdir. 1993 yılında çevrel titreşim deneylerinden yapısal sistemin doğal titreşim frekanslarını saptamışlardır. Caminin taşıyıcı sistemi tümü ile sonlu elemanlar metodu kullanılarak modellenmiş ve serbest titreşim analizi yapılmıştır. 1994 yılında ise camiye dokuz adet kuvvetli yer hareketi kaydedicisi yerleştirilerek gerçek deprem kayıtlarından doğal

titreşim frekanslarını elde etmişlerdir. Analiz sonucu bulunan değerlerle gerçek deprem kayıtlarından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen doğal titreşim frekansları, bazı küçük farklar dışında çevrel titreşim deneylerinde ulaşılan verilerle aynı olduğu görülmüştür. Bu sonuç, gerek yapılan çevrel titreşim deneylerinin ve gerekse uygulanan analiz yöntemlerinin sağlığı hakkında iyi bir fikir vermektedir [4].

**Yüzüğüllü Ö., ve diğerleri (1997);** M.S. 527 -536 yılları arasında inşa edilmiş ve İstanbul'da kullanılabilir durumdaki en eski yapılardan biri olan Küçük Ayasofya Cami'sini incelemişlerdir. Duvar dayanımları belirlenerek sonlu eleman modellemesi yapılmıştır. Analiz neticesinde yer değiştirmelerin bir kısmına mesnet hareketi, bir kısmına da önceki yıllarda meydana gelen deprem kuvvetlerinin neden olduğu ortaya konmuştur [5].

**Timur T., (2001);** 1562 -1565 yılları arasında inşa edilmiş ve çeşitli depremlere maruz kalmış Edirnekapi Mihrimah Sultan Cami'sini incelemiştir. Yapının serbest titreşim modlarını belirlemek amacı ile sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Hasar tespiti yapıldıktan sonra, 1999 Marmara Depremine ait iki ayrı ivme kaydı kullanılarak analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre yapının kuzey cephesinin, güney cephesine oranla daha az yatay yer değiştirme yaptığı görülmüştür. Böylece bu cephenin daha rijit olduğu, güney cephesinin daha çok zorlandığı ve hasarın büyük kısmının burada oluştuğu görülmüştür [6].

**Özcan Z., (2004);** MS. 558 -562 yılları arasında Sakarya nehrinin eski yatağı üzerine inşa edilen Tarihi Sangarius (Sakarya) Köprüsünü incelemiştir. Bu çalışmada kullanılan malzeme parametreleri yapıya ait taş ve bağlayıcı numuneler üzerinde yapılan basınç testlerinden belirlenmiştir. Yapının dinamik analizlerinde sonlu eleman yöntemi kullanılmıştır. Köprü gövdesinin 3 boyutlu modeli SAP2000 programı ile oluşturulmuştur. Yapının Sonlu Eleman yöntemi kullanılarak serbest titreşim periyotları ve 1999 Marmara depremine cevabı incelenmiştir [7].



**Teomete E., Aktaş E., (2004);** Urla Kamanlı Camii üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Yapısal analizleri sonlu eleman yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Yapının test ve gözlemler sonucu elde edilen geometrik ve malzeme verileri bu modelde kullanılmıştır. Yapının sonlu eleman analizi, LUSAS programı ile yapılmıştır. Yapıya öz yük, sismik yükler ve olası oturma senaryoları için elastik lineer analizler uygulanmış ve yapıdaki sorunlu bölgeler irdelenmiştir. Ayrıca doğrusal olmayan analizler sayesinde yapıdaki mevcut durum açıklanmaya çalışılmıştır [8].

**Akan A. E., Özen Ö., (2005);** 1421 yılında Yıldırım Beyazıt'ın oğlu Çelebi Sultan Mehmed tarafından yaptırılmış olan, sekizgen planlı Yeşil Türbe'yi incelemişlerdir. 1855 yılındaki depremde türbenin dış cephesi hasar görmüştür. Yeşil Türbe'nin deprem analizi Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. Hazırlanan sonlu eleman modelinde, 6384 adet solid elemanı oluşturmak için 8013 adet düğüm noktası kullanılmıştır. Elde edilen modelin mod biçimleri belirlenerek, uygulanacak olan deprem yüküne karar verilmiştir. Deprem davranışı EUROCODE8 tepki spektrumu kullanılarak belirlenmiştir. Yapı, analiz sonucunda basınç gerilmelerine karşı beklenen dayanımı göstermiştir. Çekme gerilmelerin kapı ve pencere boşluklarının köşelerinde ve yatay yük cephesinde olduğu gözlenmiştir [9].

**Ural A., (2005);** taş kemerli köprülerin yapısal davranışını incelemek amacıyla Trabzon'un Maçka ilçesinde bulunan Coşandere (Kınalı) köprüsünü SAP2000 yapısal analiz programında modellemiştir. Hazırlanan modelde 4394 adet 3-boyutlu (solid) eleman kullanılmıştır. Yapı modelinin kendi ağırlığından meydana gelen davranışını belirlemek için statik analiz, mod şekillerinin ve yapı periyotlarını belirlemek içinde modal analizleri yapılmıştır. Yapı Modeline 1940 - ELCENTRO depreminin kuzey-güney bileşeni uygulanarak bu yapının dinamik etkiler altındaki davranışı izlenmiştir. Analiz sonucunda yapı, kendi ağırlığından meydana gelen gerilmeleri güvenle taşıyabildiği düşünölmektedir [10].

## **BÖLÜM 2. MODELLEME VE ANALİZ YÖNTEMLERİ**

### **2.1. Modelleme Yöntemleri**

Sonlu eleman yöntemi, ayırık eleman yöntemi ve her ikisinin bir arada kullanıldığı karma yöntemler modelleme yöntemleri olarak sayılabilir.

#### **2.1.1. Sonlu eleman yöntemi**

Sonlu Eleman Yöntemi; yapıların üç boyutlu doğrusal ve doğrusal olmayan, statik ve dinamik analizlerinin yapılabildiği sayısal bir yöntemdir. Sonuçlar sayısal ve grafik ortamda elde edilebilmektedir [11].

Sonlu eleman yönteminin üstünlüklerini sıralamak gerekirse;

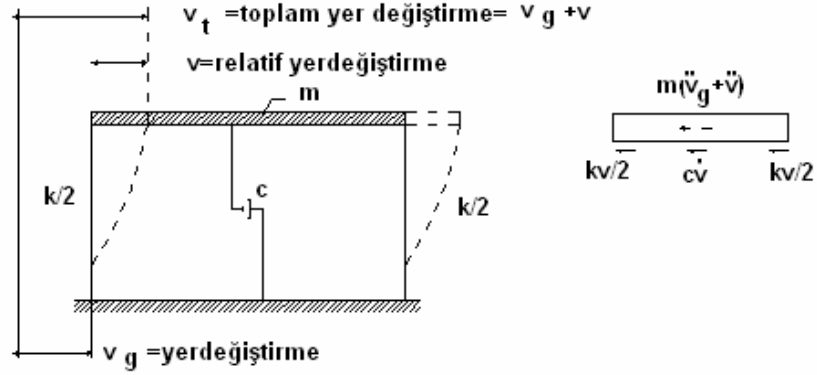
- Bitişik elemanlardaki malzeme özellikleri aynı olmayabilir. Bu özellik bir kaç malzemenin birleştirildiği cisimlerde uygulanabilmesine imkan vermektedir.
- Düzgün olmayan sınırlara sahip şekiller, eğri kenarlı elemanlar kullanılarak analiz edilebilirler.
- Eleman boyutları kullanıcı tarafından değiştirilebilir. Böylece önemli değişiklikler beklenen bölgelerde daha küçük elemanlar kullanılarak hassas işlemler yapılabilirken, aynı parçanın diğer bölgeleri büyük elemanlara bölünerek işlem hızı artırılabilir.
- Sınır şartları kolayca uygulanır.
- Sonlu eleman metodunun çok yönlülük ve esnekliği karmaşık yapılarda, sürekli ortam, alan ve diğer problemlerde sebep sonuç ilişkilerini hesaplamak için çok etkin bir şekilde kullanılabilir [12].

- Sonlu eleman yönteminde uygulanan temel adımlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.
- Taşıyıcı sistem küçük parçalara (sonlu eleman) bölünür.
- Sonlu eleman şekil fonksiyonları belirlenir.
- Eleman matrisleri belirlenir.
- Eleman matrisleri birleştirilerek sistem matrisleri elde edilir.
- Sınır şartları uygulanır.
- Sistem denge denklemi çözülür.
- Çözümlerin ve istenilen değerlerin ileri hesaplaması yapılır [13].

Sonlu eleman analizinin en önemli adımı, bir takım elemanlar tarafından verilen alanı tanımlamaktır. Problemin analizi ve istenen doğruluk derecesi için eleman tipinin, eleman sayılarının ve eleman yoğunluğunun seçilmesi alanın geometrisine bağlıdır.

Bir yapının yer hareketi altında incelenmesi sırasında ilk adım, basit bir modelle temsil edilmesidir. Bir yapının titreşim durumundaki konumunun belirlenmesi için gerekli olan parametre sayısı serbestlik derecesi olarak isimlendirilir. Günümüzde yaygın olan bilgisayar çözümü için sistem ayrıklaştırılır ve çok serbestlik dereceli sistem haline getirilir. Bunun yanında çok serbestlik dereceli sistemlerin çoğu, basit yaklaşımla, tek serbestlik dereceli kabul edilerek uygun yaklaşıklıkta sonuçlar elde edilir.

Bir sistemin hareket halinde bulunduğu konum, tek bir parametrenin verilmesi ile belirlenebiliyorsa, bu tür sistem tek serbestlik dereceli olarak (Şekil 2.1.), eğer birden fazla parametrenin verilmesi ile belirlenebiliyorsa, çok serbestlik dereceli sistem olarak isimlendirilir [1].



Şekil 2.1. Tek serbestlik dereceli sistem [1].

$$m\ddot{v} + kv = 0 \quad (2.1)$$

$$m\ddot{v} + c\dot{v} + kv = -m\ddot{v}_g \quad (2.2)$$

Denklem 2.1.'de ki sönümsüz serbest titreşim denkleminde yapının mod biçimleri ve titreşim periyotları hesaplanabilir. Denklem 2.2. de sönümlü zorlanmış titreşim denklemi verilmiştir. Burada verilen  $m$  kütle matrisi,  $c$  sönüm matrisi,  $k$  rijitlik matrisi ve  $v$  yer değiştirme matrisidir.

Yöntemin çözümlenmesinde, cisim temsil eden elemanların her birinin eleman direngenlik matrisini tanımlamak gereklidir. Daha sonra bu matrisler parçalara ayrılmış cismin tamamına ait sistem rijitlik matrisini oluşturmak üzere toplanır. Bu toplamada, cismin sonlu eleman modelindeki bütün düğümlerde kuvvetlerin dengesi ve yer değiştirmelerin sürekliliği sağlanır. Buradan şu matrise ulaşılır.

$$[K]\{\delta\} = \{\bar{P}\} \quad (2.3)$$

$[K]$ , cismin global direngenlik matrisini tanımlar. Global kuvvet vektörü  $\{\bar{P}\}$ , bütün düğümlere uygulanan dış kuvvetleri;  $\{\delta\}$  ise, bütün düğümlerin yer değiştirmelerini göstermektedir.  $\{\delta\}$ 'yi tayin etmek için, belirlenmiş sınır şartıyla denklem 2.3.'ün

çözümü yapılır ve hesaplanan düğüm yer değiştirmeleri  $\{\delta\}$ 'dan elemanların zorlanmaları ve gerilmeleri bulunur. Bağıntı 2.3.'den bağıntı 2.4. yazılabilir.

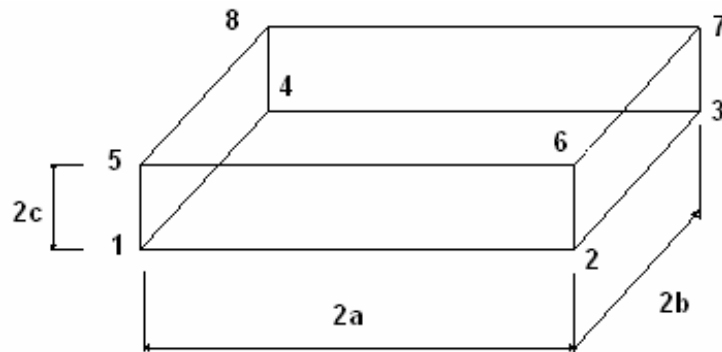
$$\{\bar{P}\} = [K]\{\delta\} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4.'de kullanılan  $\{\delta\}$  ve  $\{P\}$  vektörleri bağıntı .2.5., ve 2.6.'dan elde edilir [12].

$$\{P\} = \begin{Bmatrix} \{P_1\} \\ \{P_2\} \\ \vdots \\ \{P_n\} \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\{P\} = \begin{Bmatrix} \{P_1\} \\ \{P_2\} \\ \vdots \\ \{P_n\} \end{Bmatrix} \quad (2.6)$$

Örnek olarak şekil 2.1.'de ki gibi üç boyutlu dörtgen bir elemanı ele aldığımızda, 8 düğüm noktalı ve her düğüm noktasının 3 serbest dereceli olduğunu görmekteyiz. x, y ve z doğrultuları için u, v ve w yer değiştirme bileşenleri verilmiştir.



şekil 2.2. Üç boyutlu dikdörtgen bir eleman [14].

Şekil fonksiyonu denklem 2.7.'deki gibi gösterilebilir.

$$u = c_1 + c_2x + c_3y + c_4z + c_5xy + c_6yz + c_7xz + c_8xyz \quad (2.7)$$

$j$  düğüm noktası ve diğer 7 düğüm noktasında 0 değerine sahip olması istenen  $N_j$  fonksiyonundaki yer değiştirme fonksiyonları denklem 2.8.'de verilmiştir. Burada verilen  $\xi, \eta, \zeta$  izoparametrik koordinatlarıdır.

$$N_j = \frac{1}{8}(1 + \xi\xi_j)(1 + \eta\eta_j)(1 + \zeta\zeta_j) \quad (2.8)$$

İfade 2.8.'den denklem 2.9., ve 2.10. elde edilir.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = [N]\{u\}_e \quad (2.9)$$

$$u = \sum_{j=1}^8 N_j u_j, \quad v = \sum_{j=1}^8 N_j v_j, \quad w = \sum_{j=1}^8 N_j w_j \quad (2.10)$$

Buradaki  $[N]$  yerdeğiştirme fonksiyonu ve  $\{u\}_e$  düğüm noktalarının yer değiştirmeleri değerleri denklem 2.11. ve 2.12.'den bulunur.

$$\{u\}_e^T = [u_1 \quad v_2 \quad w_1 \quad . \quad . \quad . \quad u_8 \quad v_8 \quad w_8] \quad (2.11)$$

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & . & . & . & N_8 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & . & . & . & 0 & N_8 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & . & . & . & 0 & 0 & N_8 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Kinetik enerji  $T_e$  denklemi 2.13.'de ifade edilmiştir. Buradaki  $[m]_e$  eleman atalet matrisi değeri denklem 2.14.'den elde edilebilir.

$$T_e = \frac{1}{2} \{u\}'_e{}^T [m]_e \{u\}'_e \quad (2.13)$$

$$[m]_e = \int_{V_e} \rho [N]^T [N] dv \quad (2.14)$$

İfade 2.15. tipik bir eleman matrisidir.

$$\rho abc \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} N_i N_j d\xi d\eta d\zeta \quad (2.15)$$

$m_1 = 2m_2$  eşitliği sonucunda  $m_2$  kütle matrisi denklem 2.16.'da verilmiştir.

$$m_2 = \frac{\rho abc}{27} \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ 2 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 2 \\ 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Kullanılan bu sonuçlar denklem 2.17.'deki kütle matrisini verir.

$$[m]_e = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 \\ m_2 & m_1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Şekil değiştirme enerji ifadesi  $U_e$  denklem 2.18.'de görülmektedir. Buradaki rijitlik matrisi  $[k]_e$  ve malzeme süreklilik matrisi  $[D]$  değerleri denklem 2.19. ve 2.20.'de görülmektedir. E, elastiklik modülünü göstermektedir.

$$U_e = \frac{1}{2} \{u\}_e^T [k]_e \{u\}_e \quad (2.18)$$

$$[k]_e = \int_{V_e} [B]^T [D][B] dV \quad (2.19)$$

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2.20)$$

Gerilme-deplasman matrisi  $[B]$  denklem 2.21. ve 2.22.'de verilmiştir. Buradaki  $\partial$  türev operatörüdür.

$$[B] = [B_1 \quad \dots \quad B_8] \quad (2.21)$$

$$B_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Kullanılan denklem 2.8., denklem 2.23.'ü vermektedir.

$$\frac{\partial N_i}{\partial x} = \frac{1}{a} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} = \frac{\xi_i}{8a} (1 + \eta\eta_i)(1 + \zeta\zeta_i)$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial y} = \frac{1}{b} \frac{\partial N_i}{\partial \eta} = \frac{\eta_i}{8b} (1 + \xi\xi_i)(1 + \zeta\zeta_i) \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial z} = \frac{1}{c} \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} = \frac{\zeta_i}{8c} (1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i)$$



2.21. ve 2.23. ifadeler, 2.19. denkleminde kullanılırsa eleman rijitlik matrisi denklem 2.24.'de görüldüğü gibi entegral olarak elde edilir.

$$[k]_e = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} abc[B]^T [D][B] d\xi d\eta d\zeta \quad (2.24)$$

Kiriş kesit alanının ikinci momenti  $I$  denklem 2.25.'de ki gibi tanımlanabilir ve buradan denklem 2.26.'daki gibi değerlendirilebilir. Buradaki  $n, m, p$ ;  $\xi, \eta, \zeta$  doğrultularındaki entegrasyon noktalarının sayılarıdır. Ağırlık katsayısı  $H$  olarak verilmiştir.

$$I = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} g(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta \quad (2.25)$$

$$I = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^p H_i H_j H_l g(\xi_i, \eta_j, \zeta_l) \quad (2.26)$$

Kuvvet yöneticisi  $\delta$  ve uygulanan kuvvet  $f$  tarafından yapılan iş çarpımı  $\delta W$  ifadesi denklem 2.27.'de gösterilmiştir. Denklem 2.28., 2.29., 2.30. ve 2.31. birbirine bağıntılı ifadeler görülmektedir.

$$\delta W_e = \{\delta u\}_e \{f\}_e \quad (2.27)$$

$$\{f\}_e = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} [N]_{\xi=1}^T \begin{bmatrix} \rho_x \\ \rho_y \\ \rho_z \end{bmatrix} bcd\eta d\zeta \quad (2.28)$$

$$\xi = 1$$

$$\left. \begin{array}{l} i = 1,4,5,8 \\ i = 2,3,6,7 \end{array} \right\} \longrightarrow \text{için } N_i = \begin{cases} 0 \\ \frac{1}{4}(1 + \eta_i \eta)(1 + \xi_i \xi) \end{cases} \quad (2.29)$$

$$\{f\}_e = \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_8 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$i = 1,4,5,8 \longrightarrow \text{için } \{f_i\} = 0 \quad (2.31)$$

$$i = 2,3,6,7 \longrightarrow \text{için } \{f_i\} = bc \begin{bmatrix} \rho_x \\ \rho_y \\ \rho_z \end{bmatrix}$$

Denklem 2.32. ve 2.33.'de gerilme ifadesi görülmektedir. Buradaki  $\{\sigma\}$  gerilme bileşeni,  $\{\varepsilon\}$  ise şekil değiştirme bileşenidir.

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (2.32)$$

$$\{\sigma^T\} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_y & \sigma_z & \tau_{xy} & \tau_{xz} & \tau_{yz} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$\{\varepsilon\}$  yerine konursa denklem2.34.'ü verir.

$$\{\sigma\} = [D][B]\{u\}_e \quad (2.34)$$

$\xi = 0, \eta = 0, \zeta = 0$  noktalarındaki gerilme değerleri için en iyi durumdur [14].

### 2.1.2. Ayrık eleman yöntemi

Bu yaklaşımda, yapı ayrı blokların (katı ya da deforme olabilen) birleşimi olarak kabul edilir. Yöntem büyük yer değiştirme (bağlar için) ve küçük şekil değiştirmeler (bloklar için) üzerine kuruludur. Her bir blok geometrik ve malzeme olarak modellendikten, hacim ve yüzey kuvvetleri tanımlandıktan sonra, zamana bağlı hareket denklemleri sayısal olarak çözülür.

### **2.1.3. Sonlu eleman yöntemi – Ayrık eleman yöntemi (FEM-DE)**

Sonlu eleman yöntemi ve ayrık eleman yönteminin birlikte uygulanmasıdır. Katı elemanlar sonlu eleman yöntemi ile modellenirken bağlayıcı harçlar için ayrık eleman yöntemi kullanılmaktadır. Büyük yer değiştirme olduğunda bu yöntemi kullanmak güçleşmektedir.

Bu yöntemdeki en büyük zorluk, uygun malzeme parametrelerini belirlemektir. Tuğla / blok ve harç bağlarının tespit edilmesinde pratikte zorlanılmaktadır. Çünkü örme yapıları elemanlar genellikle alçı, sıva gibi malzemeler ile kapatılmaktadır. Bu nedenle kullanım parametrelerinin belirlenmesi gereklidir [11].

## **2.2. Analiz Yöntemleri**

Deprem etkisi altındaki; bina türünden yapıların taşıyıcı sisteminde, boyutlama esas olacak şekilde kesit etkilerinin bulunması işleminde, zaman tanım alanında hesap yöntemi ve mod birleştirme yöntemi kullanılabilir.

### **2.2.1. Zaman tanım alanında analiz yöntemi**

Boyutlama sırasında gerçek deprem kaydının esas alınması ve gerçek durumla en iyi şekilde uyuşturulması bakımından tercih edilir. Deprem kaydının bulunmaması durumunda, deprem hareketini rasgele bir titreşim kabul ederek yapay deprem kayıtları elde edilebilir. Ancak sistemin davranışı boyutlarına bağlı olduğu için, projelendirmenin ilk aşamasında kullanılabilecek bir yöntem değildir. Bu çözümleme yöntemi, araştırma amacıyla kullanılması yanında, daha basit yöntemlerle yapılan çözümlerde bulunan sonuçların yorumlanmasında da kullanılabilir.

### 2.2.2. Mod birleştirme yöntemi

Bu analiz yöntemi, sistem davranışının, her bir serbest titreşim modunun deprem hareketine katkısının, ayrı ayrı elde edilip birleştirilmesi ile bulunabileceği esasına dayanır. Binalarda kütlelerin katlarda toplandığı kabul edilerek her kat için iki öteleme ve bir dönme hareketi esas alınır. Matematiksel olarak sağlam bir temele dayanmasına rağmen, gerçek taşıyıcı sistemi yansıttığındaki eksiklikler nedeniyle dikkatli kullanılmalıdır. Yönetmeliklerde bu yöntemin önerildiği durumlarda da, elde edilen sonuçların Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ile karşılaştırılması önerilmektedir [1].

## **BÖLÜM 3. TARİHİ YAPILARIN İNCELENMESİ**

### **3.1. Yığma Yapılar için Yöntemler**

Modelleme ve analiz işlemlerinden önce yapı üzerinde birtakım deneysel çalışma ve incelemeler yapılmalıdır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Yapının mimari rölevesinin çıkarılması,
- Yapının taşıyıcı sisteminin çıkartılması,
- Yapıda varsa hasarların belirlenmesi,
- Yapının malzeme özelliklerinin belirlenmesi,
- Yapının oturduğu zemin şartlarının belirlenmesi.

#### **3.1.1. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi**

Yığma yapılarda en çok kullanılan malzemeler doğal taş ve tuğladır. Tarihi yapıların taşıyıcı elemanlarının taşıma gücünün laboratuvar deneyleriyle belirlenmesi oldukça zordur.

Malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, yığma yapıların yük taşıma performansını çok yakından etkiler. Bu özellikler, dayanıklılık, su emme katsayısı, basınç dayanımı, kayma dayanımı, çekme dayanımı ve ısı genleşme özellikleridir. Malzemenin dayanıklılığı, hava kirliliği, rüzgarın ve aşırı ısının neden olduğu aşınma, çatlaklara dolan suyun donması sonucunda oluşan basıncın neden olduğu zararlara karşı, malzemenin basınç dayanımı ve su emme kapasitesi ile ölçülmektedir.

### 3.1.1.1. Harç

İlk kullanılan harç, çamurdur. Çamurun güçlü bir duvar yapısı için elverişli olmadığı açıktır. Toprakta elde edilen kerpiç ve tuğlanın yapı malzemesi olarak kullanılması harcın doğmasına neden olmuştur. Kireç, kum ve su karışımından oluşan bu bağlayıcı, taş ve tuğla duvar yapımında kullanılmaya Roma döneminde başlamıştır.

Kum kireç karışımı içinde pişmiş kilin veya puzolan denilen volkanik tüfün karışması ile su karşısında sertleşen bir bağlayıcı elde edilmiştir. İçindeki kirecin iyi piştiği ve puzolan maddesinin iyi kaliteli bir hidrolik bağlayıcı olduğu görülmüştür. Bağlayıcı ile birlikte, beton gibi, bir kalıp içine dökülerek tonoz, kubbe ve kemerler yapılmıştır [15].

Ayrıca tarihi yapılarda bağlayıcı olarak horosan denilen bir harcın kullanıldığı da görülmektedir. Horosan harcının tam olarak muhtevası bilinmemekle birlikte içerisinde, kil, kireç, taş tozu, taş kırıntıları, mermer tozu, su, keçi kılı ve hatta yumurta akı bulunduğu tarihi kayıtlardan anlaşılmaktadır. Bununla birlikte harcın içeriğinin yöresel uygulamalarda değişiklik gösterebildiği bilinmektedir [16].

### 3.1.1.2. Tuğla

Yapılan araştırmalar sonucu tuğlanın önemli bir yığma elemanı olarak Roma döneminden çok önceleri kullanıldığı görülmüştür. Tarihi yapılarda, pişmiş kilden üretilen tuğlayı oluşturan malzemeler genellikle dere yataklarında yüzeysel olarak biriken kum taşlarının kalıntılarında elde edilirdi. Pişmiş kilden üretilen tuğlalar, görünüşleri ve işlevlerine göre sınıflandırılabilir. Tarihi yapılarda kullanılan tuğlalar saf kaolin ve kil karışımının fırınlarda yüksek ateş altında pişirilmesiyle elde edilir. Fırın teknolojisinin bulunmadığı yerlerde, bazı tarihi yapılarda kullanılan tuğlaların doğrudan güneş ısı altında üretildiğine de rastlanmaktadır [17].

Tuğla, ahşap ve taşın zor elde edildiği bölgelerde, yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. İnsan tarafından üretilen, istenilen biçimin verilebildiği yapı malzemeleri,

kerpiç ve tuğladır. Geleneksel büyük örtü sistemlerinin esas elemanlarını oluşturan kemer, tonoz ve kubbe, kerpiç ve tuğlanın ana malzemesi olduğu bölgelerde ortaya çıkmıştır. Her yerde kolay bulunup üretilmesi ve ucuz olması, yapının ana malzemesi olma niteliğini kazandırmıştır. Tuğlanın taş gibi yalnız basınca dayanıklı bir malzeme olması nedeni ile yapı taşıyıcı sistemi basınç alacak şekilde biçimlendirilmiştir. Böylece kütleli (masif) bir yapı biçimi doğmuştur [15]. Tablo 3.1.'de tuğlaların ortalama fiziksel özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Tuğlaların ortalama fiziksel özellikleri [17].

| Basınç Dayanımı<br>(KPa) | Çekme Dayanımı<br>(KPa) | Kayma Dayanımı<br>(KPa) | Elastisite modülü<br>(KPa) |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 10.000-30.000            | 2.700-5.000             | 10.000-20.000           | 150.000-300.000            |

### 3.1.1.3. Doğal taş

Taş, tarihi yapıların inşasında en çok kullanılan malzemelerden biridir. Bunun nedeni hemen hemen her yerde bulunabilmesidir. Taş bilindiği gibi basınca dayanıklı olup, çekmeye karşı ise zayıf bir malzemedir. Eski yapılarda, işlenebilme kolaylığı bakımından, daha çok metamorfik ve tortul taşlar kullanılmıştır. Tablo 3.2.'de bazı taşların basınç, çekme dayanımları ve elastisite modülleri verilmiştir.

Tablo 3.2 Doğal yapı taşlarının ortalama fiziksel özellikleri [17].

| Taşın cinsi | Basınç Dayanımı<br>( KPa) | Kayma Dayanımı<br>(KPa) | Çekme Dayanımı<br>(KPa) | Elastisite Modülü<br>(KPa)          |
|-------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Granit      | 30.000-70.000             | 14.000-33.000           | 4.000-7.000             | $30 \times 10^6$ - $55 \times 10^6$ |
| Mermer      | 25.000-65.000             | 9.000-45.000            | 1.000-15.000            | $25 \times 10^6$ - $70 \times 10^6$ |
| Kireç Taşı  | 18.000-35.000             | 6.000-20.000            | 2.000-6.000             | $10 \times 10^6$ - $55 \times 10^6$ |
| Kumtaşı     | 5.000-30.000              | 2.000-10.000            | 2.000-4.000             | $13 \times 10^6$ - $50 \times 10^6$ |
| Kuvars      | 10.000-30.000             | 3.000-10.000            | 3.000-4.000             | $15 \times 10^6$ - $55 \times 10^6$ |
| Serpantin   | 7.000-30.000              | 2.000-10.000            | 6.000-11.000            | $23 \times 10^6$ - $45 \times 10^6$ |

Büyük açıklıkların geçilmesinde, kemer, tonoz ve kubbe yapımında, basınç yüklerini taşıyan duvarlar ve ayaklarda kullanılmıştır. Tarihi yapılarda kullanılan taş yığma yapı elemanları büyük dayanım değeri göstermektedir. Taş yığma yapı elemanlarının kayma dayanımı genel olarak basınç dayanımının %25'i kadardır.

#### **3.1.1.4. Ahşap**

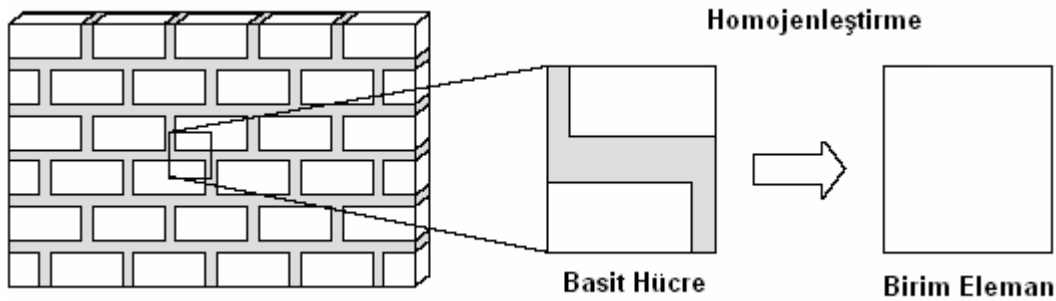
Ahşap, tarihi yapılarda işlenme, elde edilme, kolay taşınabilme gibi özelliklerinden dolayı en çok kullanılan malzemelerden biridir. Taşa oranla ömrü oldukça kısadır. Ancak; ahşap hafifliği, çekme ve eğilmeye karşı dayanımı bakımından taşa göre üstünlük göstermektedir. Bu özelliğinden yararlanılarak, taşla geçilemeyen büyük açıklıklar ahşapla geçilmiştir. Geleneksel yapılarda, tavan, döşeme taşıyıcı sistemi olarak ve duvarlarda hatıl olarak kullanıldığı görülmektedir.

#### **3.1.2. Ortak Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi**

Yığma yapı elemanını oluşturan birim eleman ve bağlayıcı eleman olan harç çoğunlukla birbirinden farklı malzeme özelliklerine sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı yığma yapı elemanı, genellikle birim elemanın boyutları ve birbirine bağlanma şekline göre homojen malzeme olarak kabul edilebilir. Yığma yapı elemanlarında birim elemanların bağlanma şekli yapı elemanın taşıma gücü bakımından da çok önemlidir [17].

Farklı özelliklere sahip iki malzemeyi temsil edecek eşdeğer malzeme parametrelerinin belirlenmesi analizlerde büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu nedenle sonlu eleman analizlerinde ortak malzeme parametrelerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Kullanılan malzeme parametreleri deneylerden ve iki bileşenin (tuğla veya taş vb. ve bağlantı) geometrisinden elde edilir. Probleme iki yönden yaklaşılabilir. Birinci yol, analizde kullanılan deneysel verileri bir araya getirmektir. Diğer bir yol ise, homojenleştirme tekniği olarak adlandırılan temel yaklaşımdır [18].





Şekil 3.1. Ortak malzeme parametresinin belirlenmesi yöntemi [19].

Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi; tuğla duvardan alınan basit bir hücre incelendiğinde, harç ve tuğlanın katılım oranları dikkate alınarak malzeme parametrelerinde kullanılır ve tek bir malzeme olarak kabul edilebilir. Lourenço, 2001 çalışmasında tuğla ve harç için elastisite modülü başta olmak üzere diğer malzeme parametrelerinin hesaplanmasında 3.1.'de verilen bağıntıyı önermektedir. Bu bağıntıda kullanılan  $E_{th}$ ; elde edilen ortak elastisite modülü,  $t_h$ ; harç kalınlığı,  $t_t$ ; tuğla kalınlığı,  $E_h$ ; harcın elastisite modülü,  $E_t$ ; tuğlanın elastisite modülüdür [20].

$$E_{th} = \frac{t_h + t_t}{\frac{t_h}{E_h} + \frac{t_t}{E_t}} \times \rho \quad (3.1)$$

Taş duvarlar için de, bu yöntemle hesap yapılabildiği gibi değişik araştırmacılar farklı yöntemler kullanmışlardır. Bu yöntemler farklı elemanların geometrisi ve malzeme özelliklerini dikkate alan eşdeğer malzeme özelliklerinin belirlenmesine dayanmaktadır. Zuccini, 2002 elastisite modülleri arasında  $E_{taş}/E_{harç}$  oranına bağlı olarak  $E_{eşdeğer}/E_{taş}$  oranına ulaşılabilen etkili bir yöntem sunmuştur. Çalışmasında Poisson oranı ve kayma modülü için de benzer bağıntılar vermiştir [20].

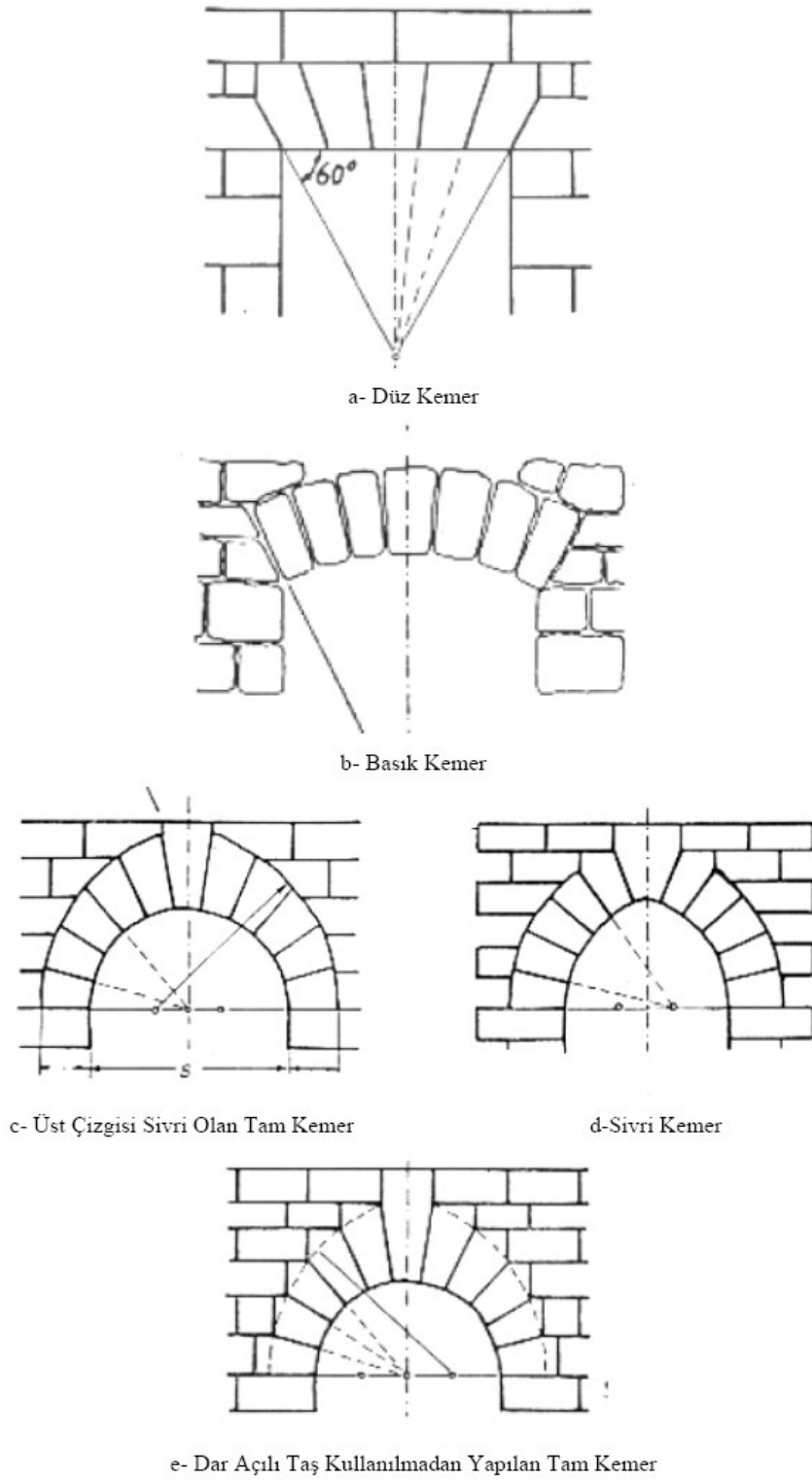
### 3.2. Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistemler

Yapıların taşıyıcı sistemini oluşturan yapısal elemanlarının asıl görevi, üzerine etki eden yükleri zemine aktarmaktır. Taşıyıcı sistem, bir binanın genel olarak formunu belirleyen en önemli unsurlardan birisidir.

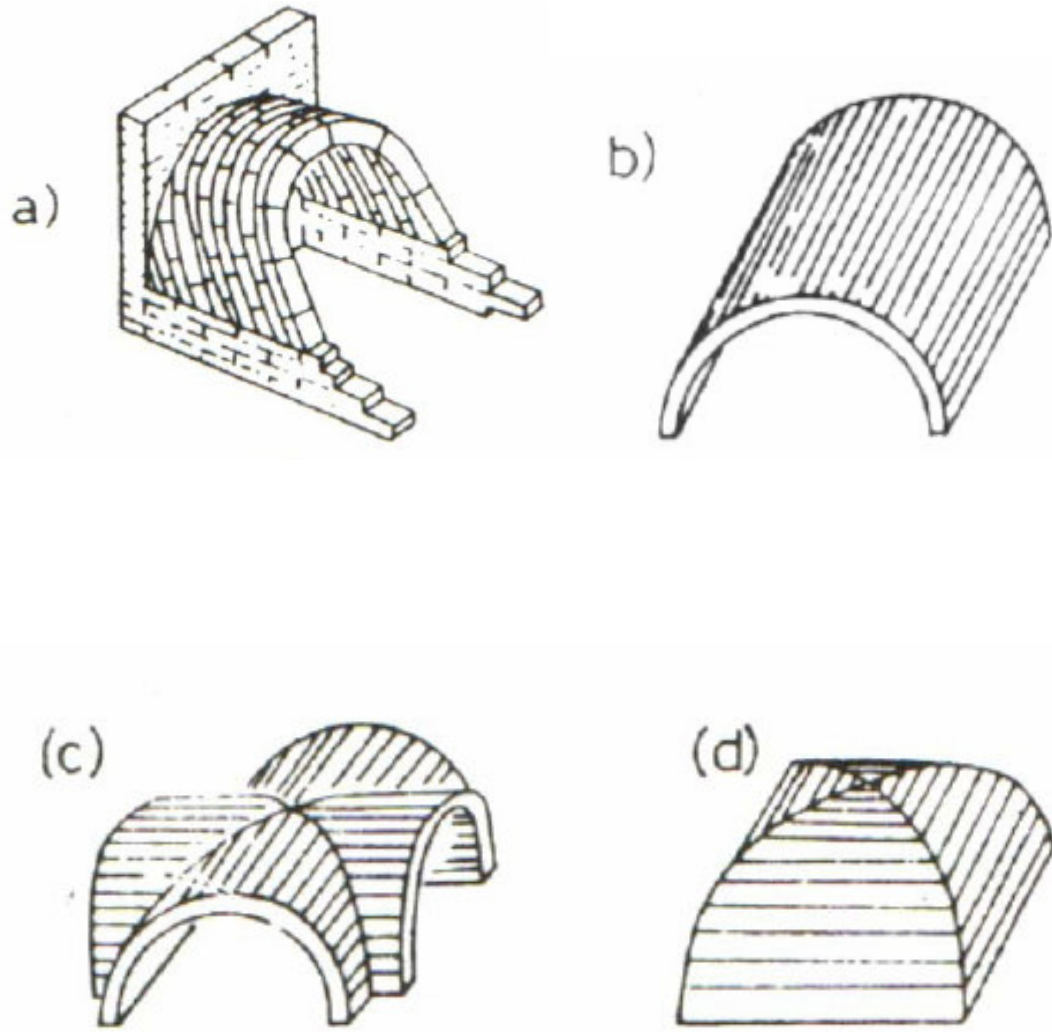
Bir yapının yapısal formu, örttüğü mekanın geometrik şekli olarak tanımlanabilir. Kullanılan malzemelerin farklı oluşu, eleman kesitlerinin değişik bir şekilde detaylandırılması, inşaat tekniği ve yapılış sırasına bağlı olarak benzer dış görünümlerine karşın, aynı türden yükler altındaki davranışları farklı olabilir. Yapısal davranışı en iyi tanımlayan sınıflandırma, kemer, tonoz, kubbe gibi temel yapısal elemanlara göre yapılan sınıflandırmadır.

Kemerler, eğrisel geometrilerinden dolayı herhangi bir köşe ya da birleşim noktasında yoğunlaşmadan düzgün bir şekilde mesnetlere aktarılırlar[13]. Kemerin duvara oturduğu yere “Üzengi Seviyesi” denir ve kemerin en üst noktasında “Kilit Taşı” bulunmaktadır. Üzengi seviyesi ile kilit noktası arasındaki yükseklik kemerin sehimidir. İki üzengi noktası arası kemerin açıklığıdır ve açıklığa göre sehimi fazla olan kemerlerin taşıma gücü çoktur. Şekil 3.2.’de kemer örgü şekilleri gösterilmektedir [21].

Tonoz, yükleri kemerlerin yük taşıma prensibiyle taşıyan, aynı zamanda da kabuk özelliği gösteren tek eğrilikli yapı elemanıdır. Tonozun mesnet noktalarında sürekli bir taşıyıcı düzlem gereklidir. Çapraz ve Haçvari tonoz, iki beşik tonozun dik olarak kesişmesinden meydana gelir. Şekil 3.3.’de tonoz çeşitleri görülmektedir [15].



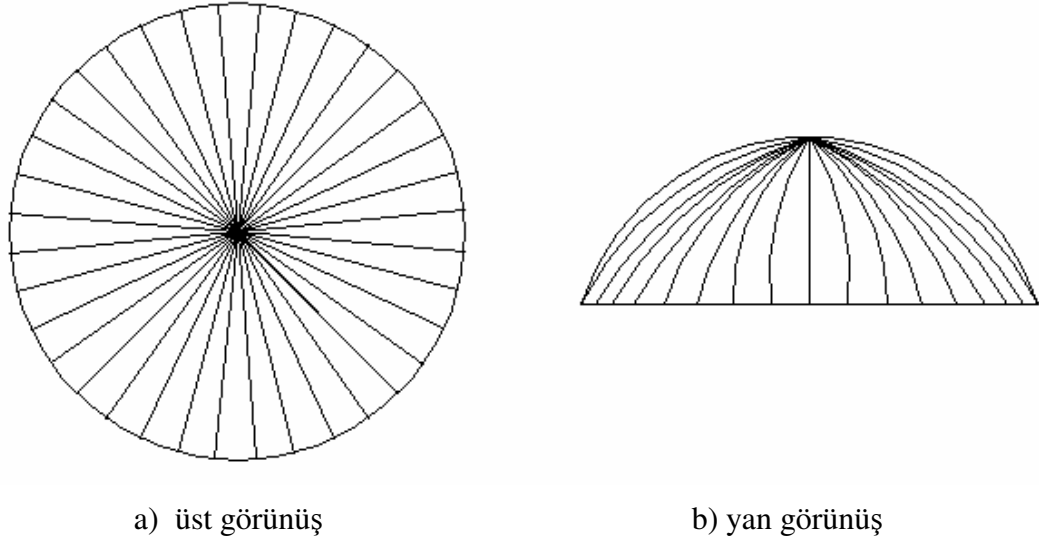
Şekil 3.2. Kemer örgü şekilleri[21].



Şekil 3.3. Tonoz çeşitleri [15].

Üzerine etki eden yükleri birçok yönde tek veya çift eğrilikli bir düzlem içinde taşıyan yapısal sistemlere kabuk denir. Kabuklar, genellikle kalınlığı diğer boyutlarına göre çok küçük olan eğrisel yapı elemanlardır [17].

Kubbe (şekil 3.4.), kuvvetleri pozitif çift eğrilikli yüzeylerde taşıyan kabuklardır. Genel olarak kemerin statik özelliklerine sahiptir. Kubbede, beşik tonoz gibi, mesnetlerinde sürekli bir taşıyıcı yüzey elemana gerek gösterir. Bu nedenle kubbenin dairesel bir mesnede oturması gereklidir [15].



Şekil 3.4. Kubbe üst ve yan görünüş

Özellikle yığma taşıyıcı sisteme sahip tarihi yapılarda, mekanı oluşturan kemer, tonoz ve kubbe gibi yapı formlarını tamamlayan, bu elemanların stabilitesini sağlayan yapısal elemanlar duvarlardır. Duvarlar, genellikle mekanı çevreleyen mimari unsurlar olarak kullanılmasına karşın, yapısal sistemin vazgeçilmez elemanlarıdır. Temel olarak düşey yükleri ve kendi ağırlıklarını taşıyan duvarlar aslında yatay yüklerin karşılanmasında da çok önemli bir rol oynarlar. Aynı şekilde, genel anlamda düşey yükleri taşıyan sütun ve büyük taşıyıcı ayakların da yatay yükler altında etkili olması söz konusudur.

Tarihi yapılarda genellikle kemerler, sütunlar ve diğer narin taşıyıcı elemanlar olarak bilinirken, kubbe, tonoz ve masif duvarlar geometrik özelliklerinden dolayı bunlara göre daha rijittirler.

### 3.3. Depreme Dayanıklı Tasarım için Temel İlkeler

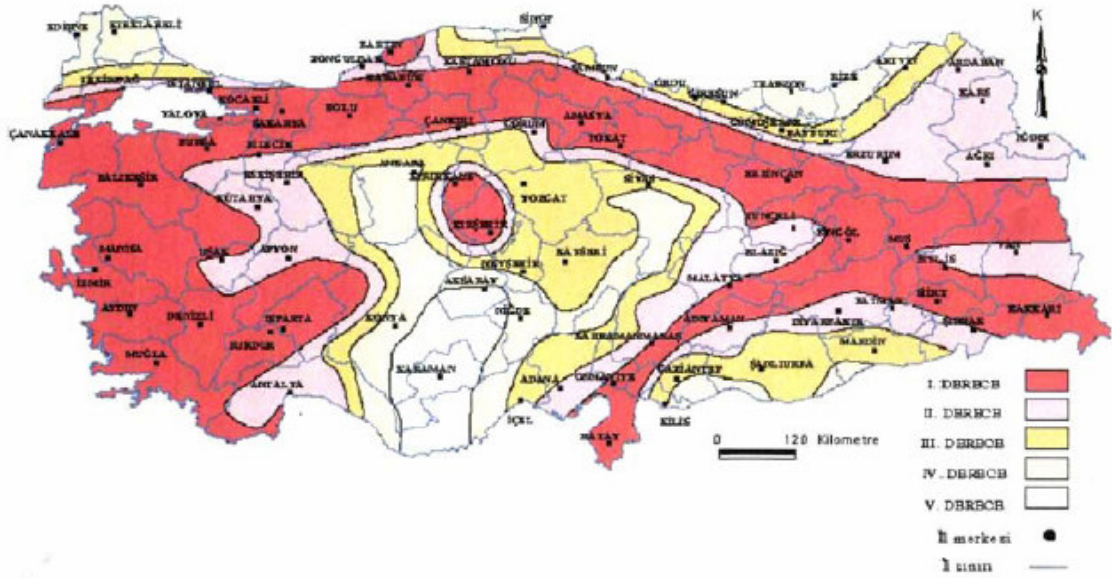
Yeni bir yapıyı depreme dayanıklı bir biçimde tasarlamak için yürürlükteki şartnamelere uygun tasarlamak ve yapıların depreme karşı davranışını anlamak yeterlidir. Ancak, var

olan bir yapıyı depreme karşı korumak çok daha zordur. Öncelikle yapının depreme karşı davranışını çok iyi anlamak ve tanımak gerekmektedir. Bunun içinde depremin ne olduğunu ve depremin yapılara ne şekilde etki ettiğini anlamak gerekmektedir.

Depremler yerküre içinde bir odakta ani enerji boşalmasıyla, bu enerjinin dünya yüzeyine titreşim dalgaları olarak yayılması sonucu meydana gelir. Bu titreşimler sismik dalga olarak adlandırılır. Sismik dalgalar odaktan ortaya çıkıp yayılarak yeryüzüne kadar ulaşırlar. Bu dalgalar yeryüzünde titreşim hareketleri oluştururlar. Bu hareketlerin, ivme, hız ve yer değiştirme kayıtlarını gösteren grafikler depremin temel özelliklerini belirler. Büyük depremler tehlikeli birçok harekete neden olacak potansiyele sahiptir. Bunlardan en önemlisi yer kabuğunun yüzeye teğet olarak ileri-geri ve aşağı-yukarı doğru hareketlerine neden olmasıdır. Yapıları doğrudan etkileyen bu ilk harekettir. Bununla birlikte, depremin neden olduğu ikincil etkiler de yapılara ve çevreye önemli zarar verirler. "Tsunami" olarak da bilinen dev dalgaların oluşması, yer kabuğunda derin yarıkların açılması, büyük toprak kaymalarının meydana gelmesi, zemin sıvılaşması, depremin yapılara yönelik ikincil etkileri olarak bilinir.

Deprem yükleri binanın kendi ağırlığından dolayı ortaya çıkar ve rüzgar yükü, toprak basıncı ve çarpma etkisi gibi diğer yatay yüklerin tersine, yapıya dışarıdan etki eden kuvvetler değildir. Deprem sırasında yer kabuğunda oluşan sismik dalgalar yer yüzeyinde bulunan yapıya ulaştıklarında, yapıda titreşim oluşmasına neden olurlar. Bu titreşimlerin yapıda oluşturduğu tepki dinamik bir davranıştır.

Ülkemiz yaşanmış deprem etkileri ve kayıtları göz önüne alınarak beş bölgeye ayrılmıştır. Deprem etkilerine en çok maruz kalacak bölge birinci bölge olarak gösterilirken, beşinci bölge en az hissedilecek kısımları kapsamaktadır. Şekil 3.4.'de deprem bölgelerine ayrılmış Türkiye haritası görülmektedir.



Şekil 3.5. Türkiye deprem haritası [22].

### 3.4. Tarihi Yapıların Deprem Davranışı

Tarihi yapıların yapısal sistemini bozan unsurlar; zemin problemleri ve depremlerdir. Yüzyıllar boyu var olduklarından dolayı dışardan fiziksel bir etki olmadıkça fazla bir zemin hareketi beklenmez ancak deprem ağır bir kütleyle sahip taş ve tuğladan yapılmış bu tür yapılar için bir tehlike oluşturmaktadır.

Yapının dayanımı ve taşıyıcı elemanlarının özellikle deprem yüklerine karşı yük taşıma kapasiteleri hesaplanmalıdır. Ancak taş, tuğla ve harç gibi malzemelerin çok değişken ve doğrusal olmayan mekanik özelliklerinden dolayı, yapının gerçek taşıma gücünü hesaplamak oldukça güçtür. Taş ve tuğla yapılar depremden kaynaklanan hasarlara daha yatkındırlar. Bunun en önemli nedeni bu tür yapıların boyut ve biçimlerinden dolayı kütlelerinin daha ağır olmasıdır.

Geçmişte, yığma yapılar, yıkılan yapılardan alınan dersler veya hasar görmüş yapıların onarımı sırasında öğrenilen bilgilere göre yapılırdı. Tarihi yapıların inşaatı sırasında kullanılan malzemeler, günümüzün modern inşaat şartnamelerine göre

seçilmediği için, aynı yapının benzer elemanlarında bile değişik malzeme özelliklerine rastlanmaktadır.

Yığma yapı elemanlarının taşıma gücü, farklı malzemeler ve kesit içinde olabilecek boşluklar en ayrıntılı bir biçimde göz önüne alınarak bilgisayar programlarıyla hesaplanabilir. Aynı eleman kesiti içinde farklı malzeme özelliklerinin bulunması, kesit boyutları büyük olan yığma yapı elemanların taşıma gücünü daha fazla etkiler.

Öte yandan, kubbe, tonoz ve pandantif gibi üç boyutlu geometriye sahip elemanlar düşey yükler ve diğer dış etkilerden dolayı oluşan yükler altında yapısal işlev açısından kabuk gibi çalışır. Yığma yapı elemanları çekme kuvvetlerine karşı çok zayıf olduklarından, kabuk davranışı altında oluşan çekme kuvvetlerinin etkisi altında teorik olarak çatlarlar. Ancak yapının genel geometrik formundan dolayı hemen çökmezler. Birçok kubbe ve tonoz, kabuk teorisine göre yıkılmaları gerekirken yüzyıllar boyunca ayakta durmaktadır.

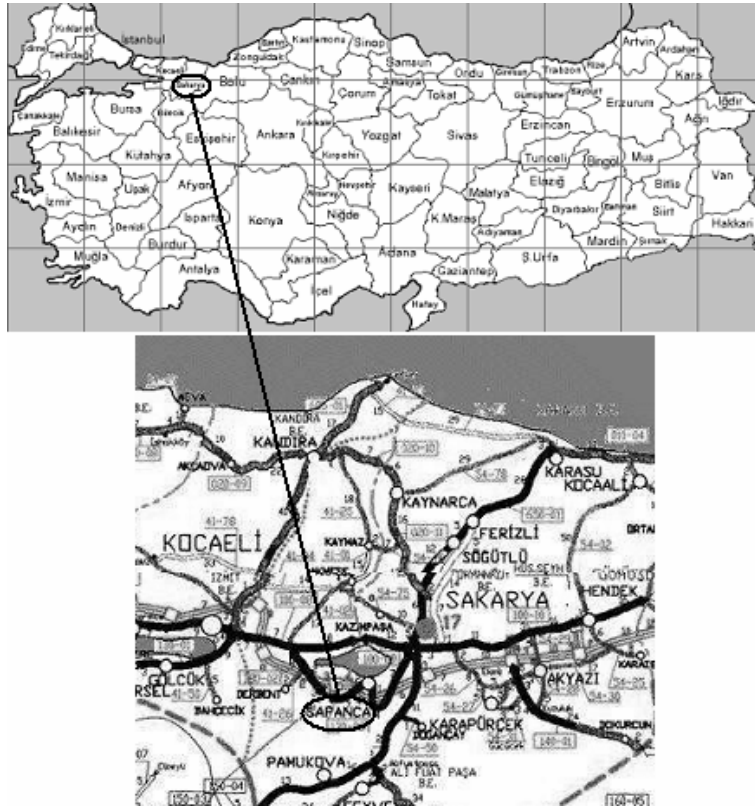
Taşıma gücü belirlenirken, eksenel kuvvet ve eğilme momentine ek olarak, kesme kuvveti ve burulma momentinin de dikkate alınması gerekmektedir. Tarihi yığma yapıların taşıyıcı elemanlarının boyutlarının çok büyük olduğu göz önüne alınarak beklenmedik yük etkileri dışında, kayma gerilmesi ve burulma momentine karşı güvenlik düzeylerinin yeterli olduğu kabul edilebilir [17].



## BÖLÜM 4. TARİHİ RAHİME SULTAN CAMİİ ÖRNEĞİ

### 4.1. Caminin Konumu

Sapanca Marmara bölgesinde Sakarya iline bağlı bir ilçedir. Kuzeyinde Sapanca Gölü, doğusunda Sakarya merkez ilçesi Adapazarı, güneyinde Samanlı Dağları, Geyve ve Pamukova İlçesi, batısında da Kocaeli merkez ilçesi İzmit yer alır. Yüz ölçümü 14 km<sup>2</sup> denizden yüksekliği de 36m'dir. Sakarya'nın yüzölçümü (alanı) en küçük, nüfus yoğunluğu en fazla olan ilçesidir. Rahime sultan camii'nin bulunduğu mevki ise Sapanca'ya 3 km uzaklıktaki Uzunkum köyüdür (Şekil4.1.).

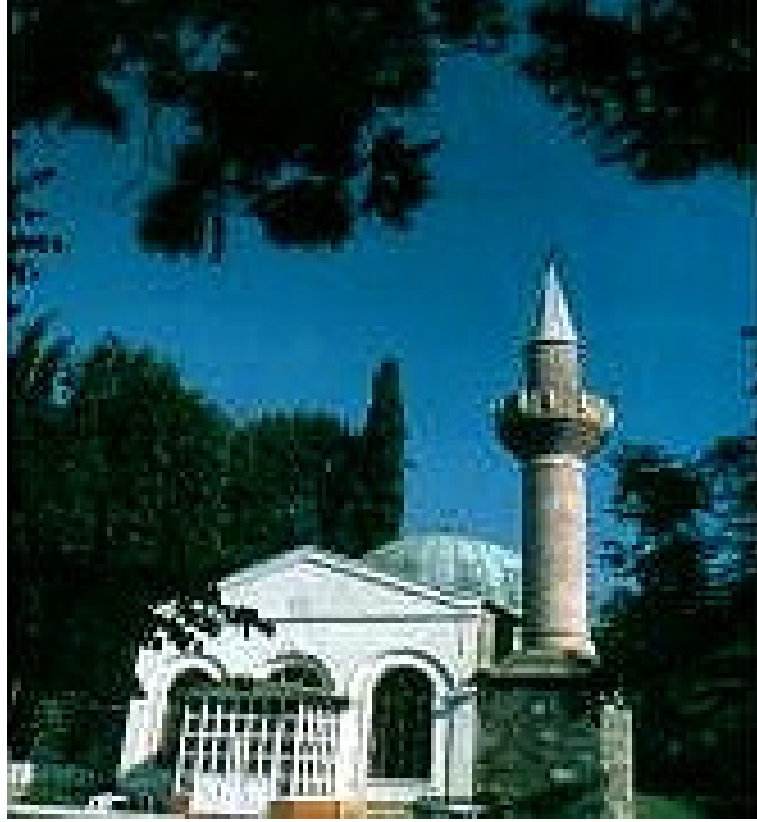


Şekil 4.1. Türkiye haritası, Sakarya ili

## 4.2. Tarihçe

Bilinen yazılı belgelere göre M.Ö. 1200 yılında Frigyalı'ların bölgeye gelmesiyle, bir yerleşim yeri olarak adı geçen Sapanca, gerçek anlamda M.Ö. 378 yılında Btanya Krallığı tarafından kurulmuştur. Doğu Roma İmparatorluğu döneminde Buanes, Sofhan ve Sofhange adıyla anılmıştır. Sapanca ve çevresinde 1075 tarihinde Anadolu Selçuklularının gelmesiyle bölge, Ayan ve Ayanköy adıyla anılmaya başlamıştır. Haçlı seferleri sonrasında bölge yeniden Bizanslılara geçmiştir. Osmanlı hükümdarı Orhan Bey zamanında Akçakoca tarafından bölge fethedilmiştir. İlçenin gelişmesinde en önemli etken, tarihi ipek yolunun üzerinde konaklama yeri olarak bulunmasıdır. XVII. yy. da Sapanca, Kapudan Paşa Eyaletine bağlı Kocaeli Livası içinde bir kaza merkezi idi. Bu durumunu XIX. yy. 'a kadar devam ettirmiştir. 1837 yılında II. Mahmut döneminde Adapazarı kaza merkezi haline getirilmiştir. Sapanca buraya nahiye olarak bağlanmıştır.

Sapanca bölgesi, zengin tarih ve medeniyet izlerine rastlanan diğer bölgelere göre ayrı bir özellik arz eder. Bu bölge, akıp giden tarih devirleri içinde çeşitli kavimlerin geçiş yolu olmuş, bölgede, izleri tarihin derinliklerine dayanan köklü medeniyetler kurulmuştur. Osmanlı sarayındaki Kafkas kökenli hanım sultanlar buralara camiler yaptırmışlar. Sultan Abdülmecit 'in eşi Rahime Sultan tarafından 1892 yılında yaptırılan Rahime Sultan Camii bunlardan biridir (Şekil 4.2.).



Şekil 4.2. Rahime Sultan Camii [23].

### 4.3. Bölgenin Jeolojik Yapısı

İlçe toprakları yer şekilleri bakımından iki bölüme ayrılır, birinci bölümü, Bolu'nun güneyinden uzanan Köroğlu Dağları'nın bölgedeki uzantısı olan Samanlı Dağları'nın kuzey yamaçları ve bu yamaçlarda oluşmuş vadileri içine alır. Bu bölüm oldukça engebelidir. İkinci bölümünü ise, Samanlı Dağları'nın kuzey eteklerinde Sapanca ilçe merkezinin de yer aldığı dağ eteği ovasıdır. Bu ova dağların kuzey yamaçlarından inen derelerin taşıdığı alüvyonlarla oluşmuştur. Bu derelerin en önemlileri İstanbul Deresi, Kurtköy Deresi ve Mahmudiye Deresidir. Ayrıca ilçenin en önemli deresi olan Akçay Deresi de Sakarya Nehri ile birleşir. Kuzey Anadolu deprem kuşağı (fay hattı) Sapanca Gölünden geçmektedir [23].

Ülkemizin jeolojik ve tektonik özelliklerine bağlı olarak, Kuzey Anadolu Fay Zonu başta olmak üzere birçok düşey ve yanal atımlı fay, Marmara ve Ege Bölgelerimizin sahillerindeki alüvyal çöküntü havzalarının oluşumunu ve gelişimini denetlemektedir. Sakarya iline bağlı Sapanca İlçesi, Kuzey Anadolu Fayının kuzey kolu üzerinde bir çek-ayır havza olarak gelişmiş set gölü niteliğindeki Sapanca Gölünün güney sahilinde bulunmaktadır [24].

Sapanca verilerinde; İzmit bölgesinde yaşanmış, yabancı deprem kayıtlarına geçmiş ve depremden etkilenmiş alanlara ait bilgilerde de rastlamak mümkün. Bu verilerde şu bilgiler geçmektedir; 1567 yılında Sapanca merkezli bir deprem İstanbul ve İzmit arasında hasara yol açmıştır. 1719 yılında Marmara Denizi'nin doğu tarafında meydana gelen deprem Yalova, Pazarköy, Karamürsel, Kazıklı, İzmit ve Sapanca' da hasarlara yol açmıştır. 1894 yılında ise İzmit Körfezinde meydana gelen yıkıcı bir deprem İstanbul ve Adapazarı arasında büyük yıkımlara sebep olmuştur. En büyük tahribat Heybeliada, Yalova ve Sapanca' da meydana gelmiştir [23].

Sapanca'yı en çok etkileyen iki büyük depremden biri Abant-Mudurnu (1967) depremi, ikincisi ise Marmara Depremidir (1999).

#### **4.4. Caminin Mevcut Durumu**

Rahime Sultan Camii özgün yapısını koruyarak günümüze ulaşan ender camilerden birisidir. 1967 'de onarım görmüştür. Şekil 4.3. ve 4.4.'de görüldüğü gibi Marmara depreminde (1999) minaresi yıkılmıştır.



Şekil 4.3. Rahime Sultan Camii kuzey-batı perspektif görünüşü



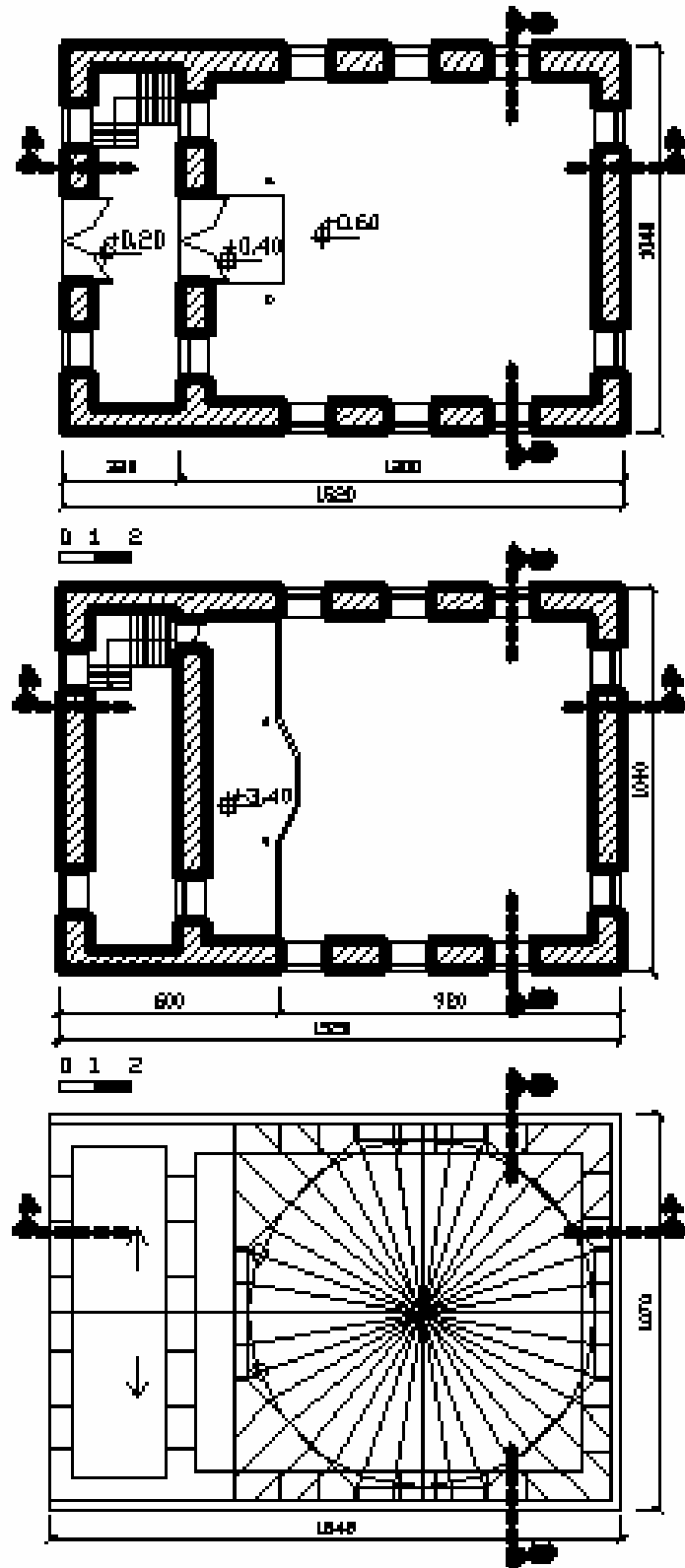
Şekil 4.4. Rahime Sultan Camii minare kaidesinin görünüşü

Caminin yapı taşıyıcı sistemini belirlemek için röleve çalışmaları yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda mevcut halde cami genişliği 10.40 m, derinliği ise 15.20 m'dir (Şekil 4.5.). Rahime Sultan Camii dikdörtgen planlıdır. Caminin kubbesi sekizgen bir çember üzerine oturtulmuştur. Kubbe Yarıçapı ve yüksekliği 4.80 m'dir (Şekil 4.5.). Cami yüksekliği zemin yüzünden 12.30 m'dir (Şekil 4.6., 4.7. ve 4.8.). Duvar kalınlıkları 0.80 m'dir. Kubbeden gelen yükler eğimli olarak duvarlara iletilmektedir (Şekil 4.9.).

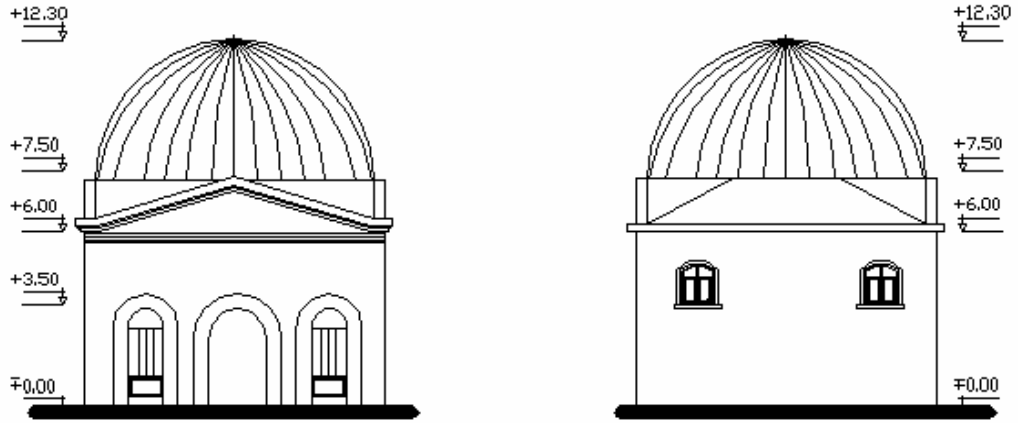
Cami kuzey-güney doğrultusunda simetriktir. Cephelerde üst katlarda bulunan kemerli cam boyutları 1.20/1.50 m, alt katlardakiler ise 1.20/2.00 m olarak belirlenmiştir (Şekil 4.10., 4.11., 4.12., 4.13.).

Giriş kapısı boyutu 2.40/3.50 m ölçülmüştür. Dış duvarlarda gergi çubuklarının kullanıldığı görülmektedir (Şekil 4.14.). Kullanılma nedeni bir duvarın ayrılmasını önlemek ve gerideki sağlam bölüme tutturularak, yerinde korunmaya çalışılmasıdır.

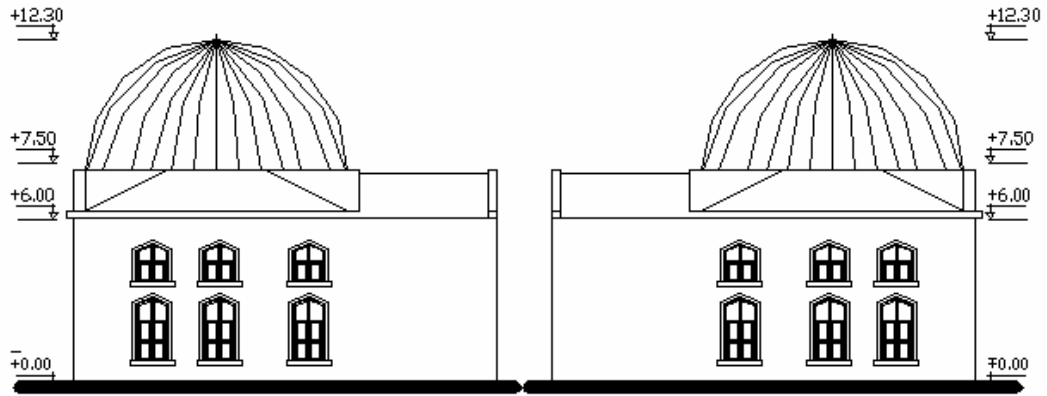
İç kısmında 2.40x8.80 m ebatlarında bir ara giriş bulunmaktadır. Kubbenin oturduğu kısımda bir asma kat bulunmaktadır. Asma kat (Şekil 4.15.) ve kubbe Şekil 4.16. da görülen kolonlar ile desteklenmiştir. Kubbe ağırlığı Şekil 4.17.'de görüldüğü gibi üçgen elemanlarla duvarlara iletilmiştir. Tek kubbeli olan camii içi oymalarla süslüdür. Şekil 4.18.'de caminin giriş cephesinde bulunan padişah tuğrası ve cami kitabesi gösterilmiştir. Asma kat pencere üstlerinde 1999 Marmara depreminden kaynaklanan etkilerden dolayı çatlaklar oluşmuştur (Şekil 4.19.).



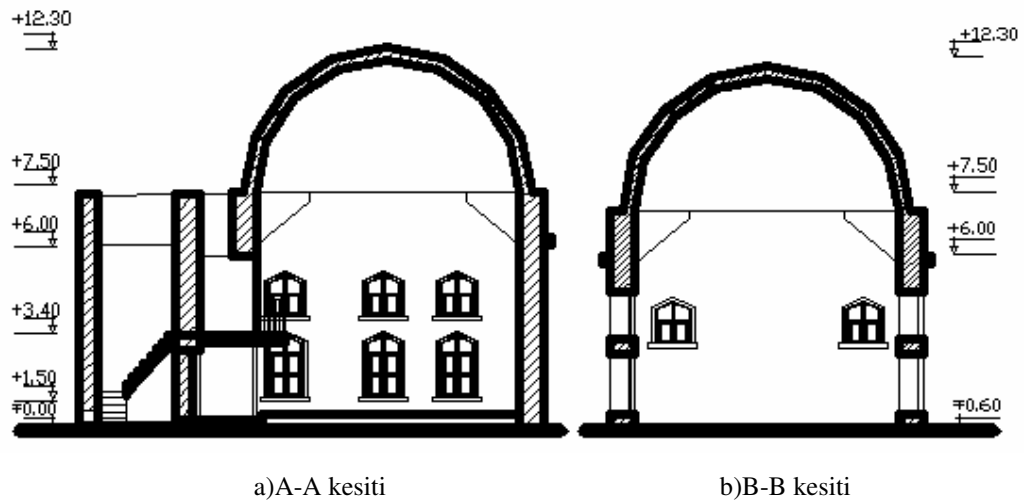
Şekil 4.5.Rahime Sultan Camii normal, asma kat ve çatı planları



Şekil 4.6. Rahime Sultan Camii ön ve arka görünüşleri



Şekil 4.7. Rahime Sultan Camii sağ ve sol görünüşleri



a)A-A kesiti

b)B-B kesiti

Şekil 4.8. A-A ve B-B kesitleri





Şekil 4.9. Rahime Sultan Camii pencere-duvar görünüşü



Şekil 4.10. Rahime Sultan Camii kuzey cephesinden görünüşü



4.11. Rahime Sultan Camii batı cephesinden görünüşü



Şekil 4.12 Rahime Sultan Camii güney cephesinden görünüşü



Şekil 4.13. Rahime Sultan Camii pencere görünüşleri



Şekil 4.14. Duvar gergi çubukları



Şekil 4.15. Cami içinde asma katın görünüşü



Şekil 4.16. Dökme demirden imal edilmiş asma katı taşıyan dairesel kolonlar



a) Cami içinde güney cephe görünüşü



b) Cami içinde güney-batı cephe görünüşü

Şekil 4.17. Kubbe duvar birleşimi



Şekil 4.18. Caminin giriş cephesinde bulunan padişah tuğrası ve cami kitabesi



Şekil 4.19. 1999 Marmara depreminden kaynaklanan asma katta oluşan çatlaklar

#### 4.5. Yapı Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi

Depreme karşı davranışı etkileyen en önemli faktörlerden biri de düşey taşıyıcı elemanların rijitliğidir. Yapının yeterli rijitliğe sahip olup olmadığını, düşey taşıyıcı elemanlarının alanının kat planı alanına oranını bularak anlamak mümkündür. Bu oran büyük açıklıklı tarihi yığma yapılarda oldukça yüksektir [13]. Ayrıca, yapının davranışını belirleyebilmek için taşıyıcı elemanı oluşturan malzemelerin gerçek

davranışlarının belirlenmesi önemli bir faktördür. Yığma yapı tekniğiyle inşa edilen tarihi yapılarda kullanılan malzemeler belli bir şartnameye göre seçilmediği için aynı yapının benzer elemanlarında farklı malzeme özellikleri görülmektedir. Malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, yığma yapıların yük taşıma performansını çok yakından etkiler. Ayrıca yapıların strüktürel onarımında eklenen yardımcı elemanlar bazen yapının özgün malzemeleriyle farklı özellik taşıdığı için özgün malzemede kimyasal bozulmaya neden olurlar.

Bu çalışmada kullanılan malzeme parametreleri, yapıya ait taş ve bağlayıcı numuneler üzerinde schmidt çekici yardımıyla yapılan test sonuçları ile benzer yapılar için verilen değerlerin birlikte yorumlanması sonucunda belirlenmiştir Tablo 4.1.'de Urla Kamanlı, Bursa yeşil türbe ve Ayasofya ile ilgili yapılmış olan çalışmalardan elde edilmiş malzeme parametreleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Urla Kamanlı, Bursa yeşil türbe ve Ayasofya ile ilgili yapılmış olan çalışmalardan yararlanılan malzeme parametreleri

|                      |            | Basınç<br>gerilmesi<br>(KPa) | Çekme<br>gerilmesi<br>(KPa) | Elastisite<br>modülü<br>(KPa) |
|----------------------|------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Urla Kamanlı         | Tuğla      | 11.680                       | 1.867                       | 866.500                       |
|                      | Harç       | 8.750                        | 950                         | 264.380                       |
| Bursa Yeşil<br>Türbe | Tuğla+Harç | 10.000                       | 500                         | -                             |
| Ayasofya             | Tuğla      | -                            | -                           | 3.100.000                     |
|                      | Harç       | -                            | -                           | 660.000                       |
|                      | Tuğla+harç | -                            | -                           | 1.830.000                     |

Sonlu elemanlar analizinde kullanılan doğrusal elastik malzeme parametreleri tuğla örgü ve bağlayıcı harç için Tablo 4.2.'de verilmiştir. Tuğla ve harç için belirlenen ortak malzeme parametresi denklem 3.1.'den elde edilmiştir.

Tablo 4.2. Analizde kullanılan malzeme parametreleri

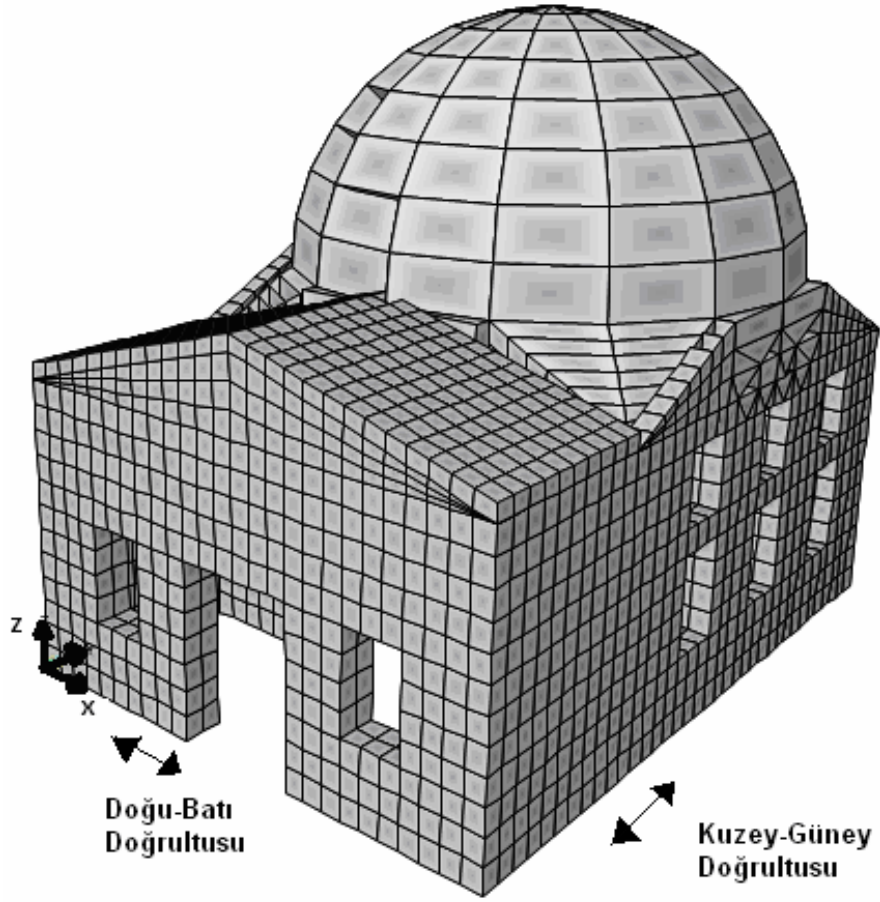
| Malzeme      | Elastisite Modülü (KPa) | Basınç Dayanımı (KPa) | Çekme Dayanımı (KPa) |
|--------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| Tuğla        | $1,5 \times 10^6$       | —                     | —                    |
| Harç         | $0,5 \times 10^6$       | —                     | —                    |
| Tuğla + Harç | $0,7 \times 10^6$       | $5 \times 10^3$       | $5 \times 10^2$      |

#### 4.6. Sayısal Çözümler

Rahime Sultan Cami modellemesi sonlu eleman yöntemiyle yapılmıştır. Bu modellemede Sap2000 Programı kullanılmıştır. Daha öncede bahsedildiği sonlu elemanlar analizinde yapının veya yapı elemanlarının geometrisi sonlu sayıda düğüm noktası ile belirlenmektedir.

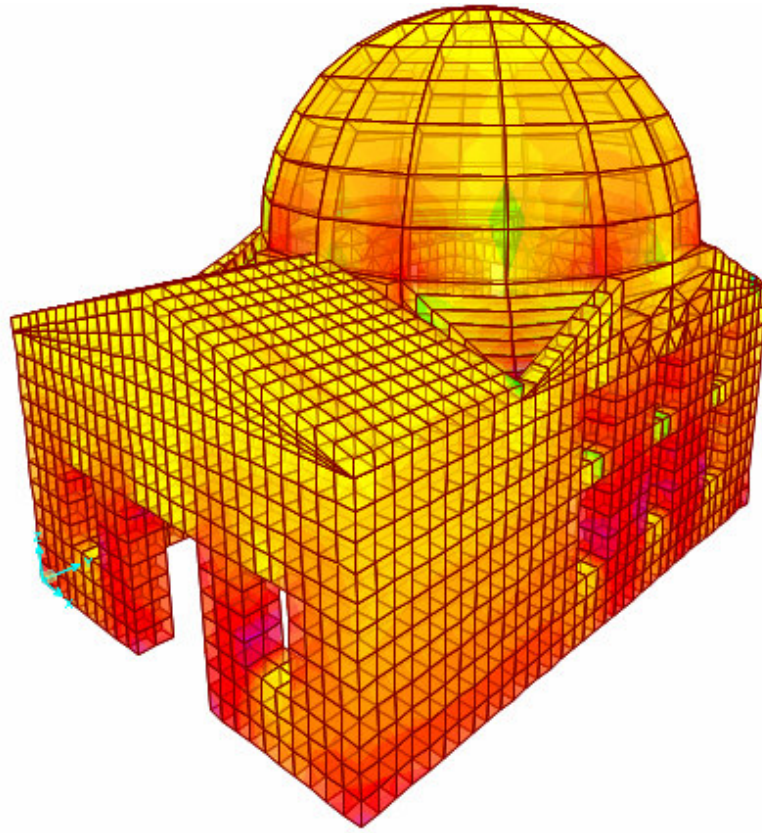
Rahime Sultan Camii'nin sonlu elemanlar analizinde, yapının davranışının sağlıklı bir şekilde belirlenmesi amacıyla, 3692 adet solid eleman ve 6438 adet düğüm noktası kullanılmıştır (Şekil 4.20.).





Şekil 4.20. Rahime Sultan Camii analizinde kullanılan 3 boyutlu sonlu eleman modeli

İlk olarak Rahime Sultan Camiinin statik analizi yapılmıştır. Statik yükleme durumunda yapılan analiz sonucu elde edilen  $\sigma_{33}$  gerilme dağılımı incelendiğinde maksimum basınç gerilmelerinin kapı, pencere kenarlarında ve doğu-batı, kuzey-güney doğrultusunda mesnet bölgelerinde olduğu görülmektedir (Şekil 4.21.). Maksimum basınç gerilmesi 235 KPa olarak bulunmuştur.



-250, -212, -173, -135, -96, -58, -19, 19, 58, 96, 135, 173, 212, 250,

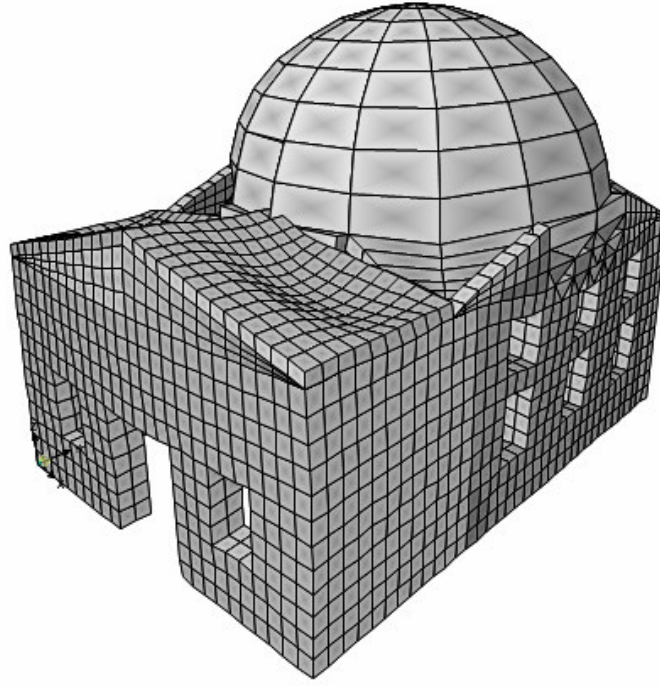
Şekil 4.21. Statik yükleme durumunda elde edilen  $\sigma_{33}$  gerilme dağılımı (KN/m<sup>2</sup>)

Tablo 4.3.'de kapı (7514, 9054 numaralı düğüm noktası), pencere (7741, 7702 numaralı düğüm noktası) boşluklarında, doğu-batı (8532, 8560 numaralı düğüm noktası) ve kuzey-güney (7433, 7550, 7570 ve 8520 numaralı düğüm noktası) doğrultusunda mesnet bölgelerinden seçilmiş bazı elemanların  $\sigma_{33}$  için bulunmuş değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4.3. Statik yükleme durumunda yapı üzerinde seçilen bazı elemanların  $\sigma_{33}$  gerilmeleri açısından incelenmesi (KPa)

| Eleman No                      | 7433 | 7514 | 7550 | 7702 | 7741 | 8520 | 8532 | 8560 | 8570 | 9054 |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\sigma_{33}$ Gerilmeler (KPa) | -192 | -139 | -168 | -104 | -155 | -235 | -154 | -116 | -202 | -180 |

Şekil 4.22.'de ise maksimum deformasyonların caminin giriş kısmını örten çatıda (5364) ve çatı tepe noktasında (10615) olduğu gözlenmiştir. Tablo 4.4.'de 5364, 10615 numaralı elemanların ve kubbe tepe noktası olan 129 numaralı elemanın yer değiştirmeleri görülmektedir.

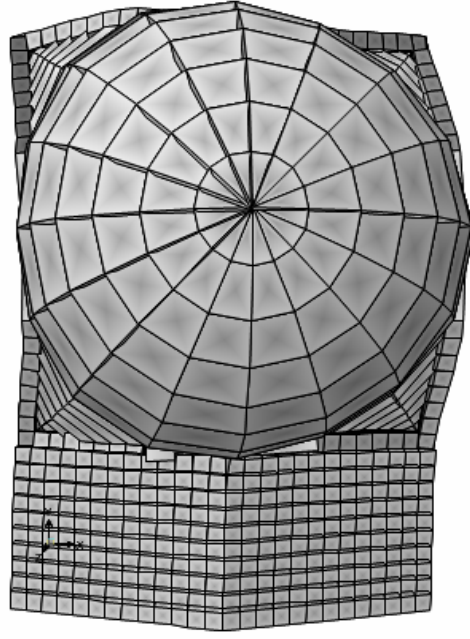
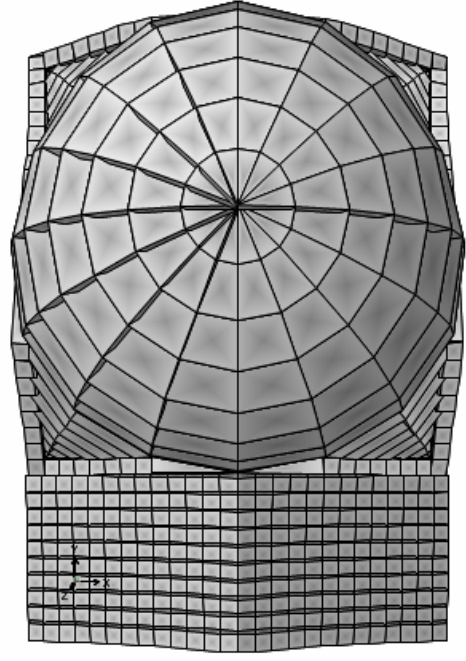
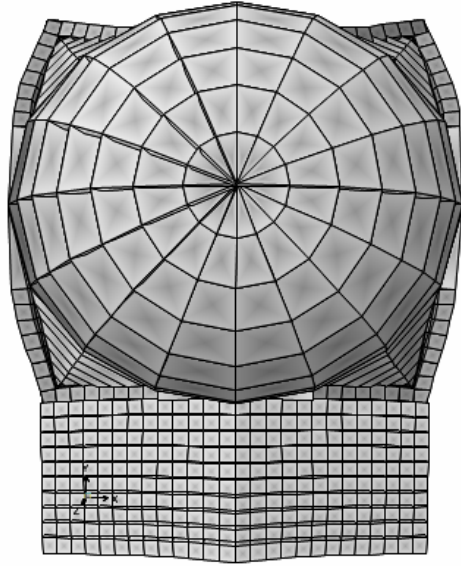
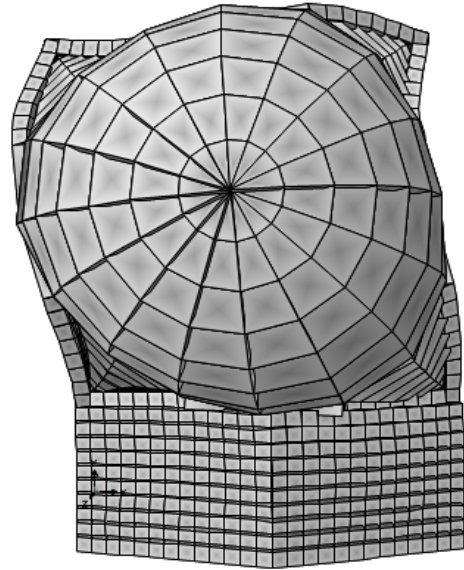


Şekil 4.22. Statik yükleme durumunda elde edilen yer değiştirmeler (mm)

Tablo 4.4. Statik yükleme durumunda yapı üzerinde seçilen bazı elemanların yer değiştirmeleri (mm)

| Düğüm Noktası No | 129<br>(kubbe tepe noktası) | 5364<br>(çatı tepe noktasında) | 10615<br>(giriş kısmını örten çatı) |
|------------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| $U_1$ (mm)       | -0,03                       | 0,012                          | 0,01                                |
| $U_2$ (mm)       | -0,23                       | -0,01                          | -0,25                               |
| $U_3$ (mm)       | -3,23                       | -1,83                          | -2,24                               |

Mod biçimlerini belirlemek için yapının modal analizi yapılmıştır. Birinci mod için  $T_1=0,242$  s, ikinci mod için  $T_2= 0,225$  s, üçüncü mod için  $T_3=0,156$  s ve 4. mod için  $T_4=0,152$  s olarak elde edilmiştir. Serbest mod biçimleri Şekil 4.23.'de verilmiştir.

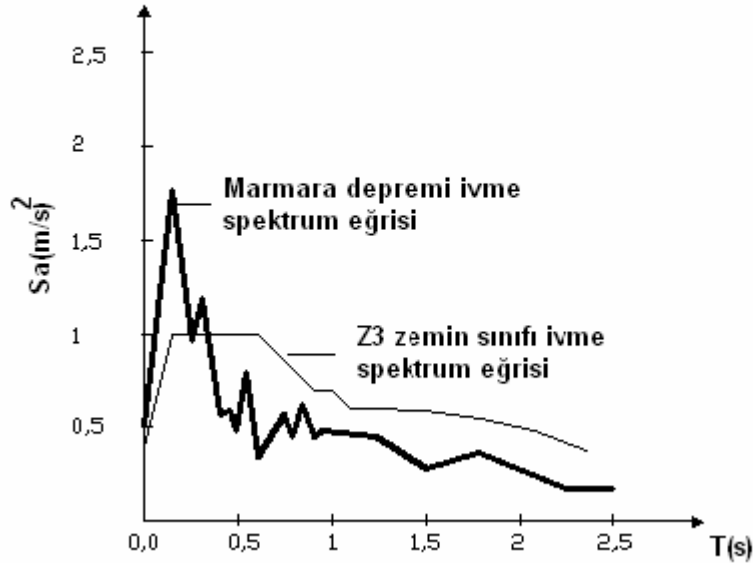
1.mod  $T_1=0,242$ 2.mod  $T_2=0,225$ 3.mod  $T_3=0,156$ 4. mod  $T_4=0,152$ 

Şekil 4.23. İlk dört serbest titreşim mod biçimi

Uygun zemin şartları seçilerek spektral analize geçilmiştir. Rahime Sultan Camii zemini Z3 zemin sınıfı özellikleri göstermektedir. Z3 zemin sınıfı için yapılan analizde kullanılan spektral ivme katsayısı 4.1.'de verilen bağıntı ile elde edilmiştir. Buradaki  $A_0$ , I, ve R değerleri Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik'den alınmıştır. Buna göre  $A(T) = 110S(T)$  olarak belirlenmiştir [25].

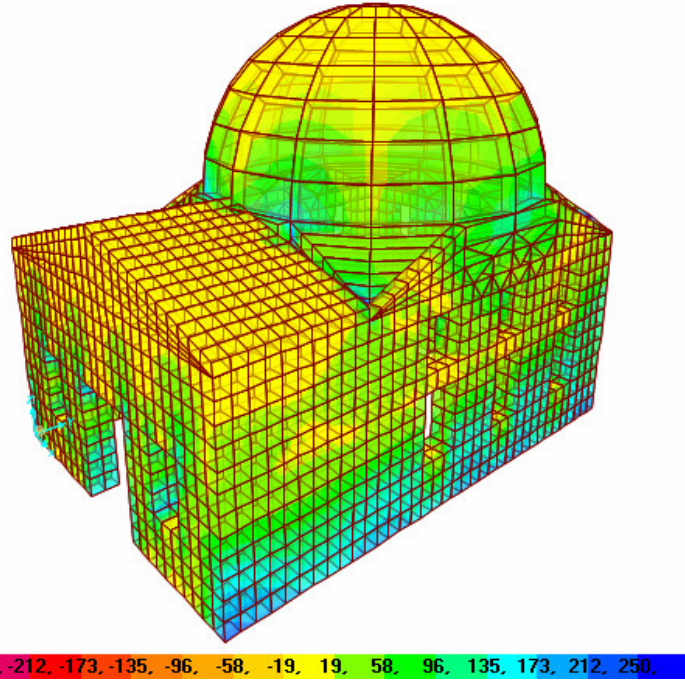
$$A(T) = A_0 I S(T) / R \quad (4.1)$$

Daha sonra Rahime sultan camiinin 1999 Marmara depremine cevabını bulmak için, Sakarya istasyonu doğu-batı kaydı ivme spektrumu kullanılarak spektral analizi yapılmıştır. Marmara depremi için spektral ivme katsayısı  $A(T)=300S(T)$  belirlenmiştir. Şekil 4.24.'de Z3 zemin sınıfı ve Marmara depremi için kullanılan ivme spektrum eğrileri görülmektedir.

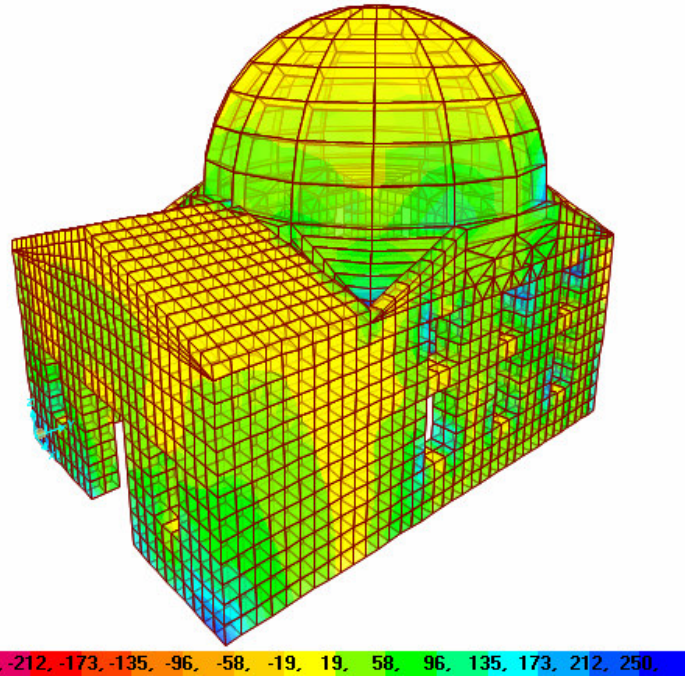


Şekil 4.24. Z3 zemin sınıfı ve Marmara depremi ivme spektrum eğrileri

Şekil 4.25.'de Z3 zemin sınıfı için doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusunda deprem kuvveti uygulandığında elde edilen  $\sigma_{33}$  gerilme dağılımı görülmektedir.



a) doğu-batı doğrultusu



b) kuzey-güney doğrultusu

Şekil 4.25. Z3 zemin sınıfı için doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusunda elde edilen  $\sigma_{33}$  gerilme dağılımı (KN/m<sup>2</sup>)

Şekiller incelendiğine doğu-batı doğrultusunda  $\sigma_{33}$  için maksimum çekme gerilmelerin kuzey-güney doğrultusunda mesnet bölgesinde, kubbe birleşim yerlerinde ve kapı, pencere kenarlarında olduğu gözlenmektedir. Doğru-batı doğrultusunda  $\sigma_{33}$  için maksimum çekme gerilmesi 242 KPa'dır. Kuzey-güney doğrultusundaki  $\sigma_{33}$  gerilmeleri incelendiğinde ise maksimum çekme gerilmelerin doğu-batı doğrultusunda ve yine kubbe birleşim bölgeleri, kapı, pencere kenarlarında olduğu görülmektedir. Kuzey-güney doğrultusunda  $\sigma_{33}$  için maksimum çekme gerilmesi ise 255 KPa olarak elde edilmiştir. Tablo 4.5. ve 4.6.'da doğu-batı ve kuzey-güney doğrultuları için yapı üzerinde seçilen bazı elemanların, Z3 zemin sınıfına göre hesaplanan normal ve kayma gerilmeleri verilmiştir.

Tablo 4.5. Doğru-batı doğrultusunda deprem kuvveti uygulanması sonucu Z3 zemin sınıfı için yapı üzerinde seçilen bazı elemanlarda hesaplanan normal ve kayma gerilmeleri (KPa)

| Zemin Durumu | Eleman No | Normal Gerilmeler (KPa) |               |               | Kayma gerilmeleri (KPa) |             |             |
|--------------|-----------|-------------------------|---------------|---------------|-------------------------|-------------|-------------|
|              |           | $\sigma_{11}$           | $\sigma_{22}$ | $\sigma_{33}$ | $\tau_{12}$             | $\tau_{13}$ | $\tau_{23}$ |
| Z3           | 7433      | 39                      | 48            | 211           | 0                       | 15          | 4           |
|              | 7514      | 32                      | 23            | 73            | 0                       | 10          | 5           |
|              | 7550      | 29                      | 41            | 171           | 0                       | 7           | 4           |
|              | 7702      | 21                      | 9             | 52            | 0                       | 34          | 0           |
|              | 7741      | 7                       | 2             | 147           | 0                       | 4           | 1           |
|              | 8520      | 40                      | 55            | 242           | 2                       | 14          | 14          |
|              | 8532      | 5                       | 6             | 26            | 0                       | 53          | 0           |
|              | 8560      | 3                       | 2             | 9             | 0                       | 61          | 1           |
|              | 8570      | 43                      | 55            | 220           | 2                       | 18          | 13          |
|              | 9054      | 5                       | 30            | 197           | 4                       | 12          | 4           |

Tablo 4.6. Kuzey-güney doğrultusunda deprem kuvveti uygulanması sonucu Z3 zemin sınıfı için yapı üzerinde seçilen bazı elemanlarda hesaplanan normal ve kayma gerilmeleri (MPa)

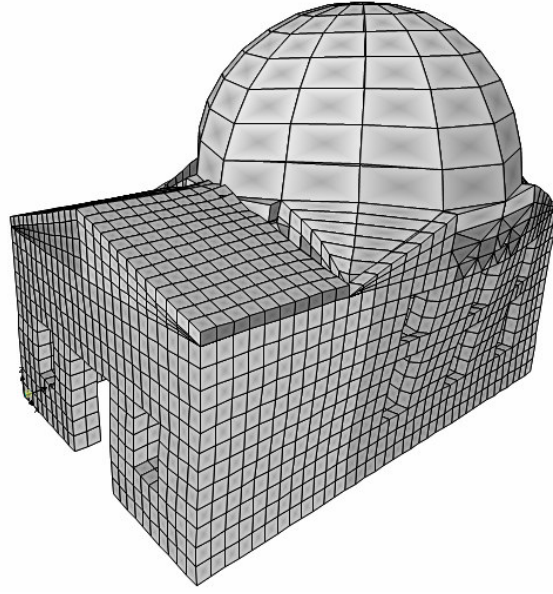
| Zemin Durumu | Eleman No | Normal Gerilmeler (MPa) |               |               | Kayma gerilmeleri (MPa) |             |             |
|--------------|-----------|-------------------------|---------------|---------------|-------------------------|-------------|-------------|
|              |           | $\sigma_{11}$           | $\sigma_{22}$ | $\sigma_{33}$ | $\tau_{12}$             | $\tau_{13}$ | $\tau_{23}$ |
| Z3           | 7433      | 26                      | 25            | 113           | 1                       | 6           | 46          |
|              | 7514      | 16                      | 16            | 58            | 1                       | 3           | 50          |
|              | 7550      | 9                       | 11            | 38            | 1                       | 1           | 52          |
|              | 7702      | 20                      | 2             | 59            | 1                       | 17          | 8           |
|              | 7741      | 0                       | 2             | 34            | 1                       | 1           | 18          |
|              | 8520      | 60                      | 55            | 255           | 1                       | 7           | 34          |
|              | 8532      | 31                      | 20            | 133           | 1                       | 7           | 9           |
|              | 8560      | 32                      | 23            | 142           | 1                       | 13          | 10          |
|              | 8570      | 36                      | 34            | 155           | 1                       | 6           | 44          |
|              | 9054      | 2                       | 17            | 81            | 1                       | 3           | 47          |

Şekil 4.26.'da ise doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusunda deprem kuvveti uygulanması sonucu Z3 zemin sınıfı için elde edilen yer değiştirmeler gösterilmektedir. Tablo 4.7.'de daha önce belirlenmiş elemanların (5364, 10615 numaralı elemanlar ve kubbe tepe noktası olan 129 numaralı eleman), doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusunda deprem kuvveti uygulanması sonucu Z3 zemin sınıfı için elde edilen yer değiştirmeler verilmiştir.

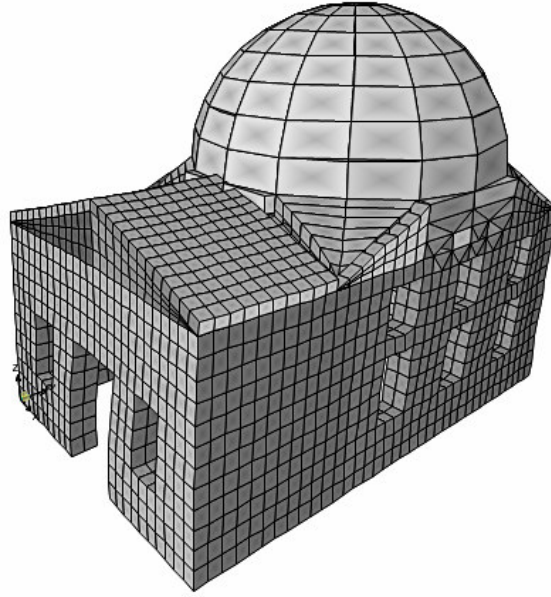
Tablo 4.7. Doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusunda deprem kuvvet uygulanması sonucu Z3 zemin sınıfı için elde edilen yer değiştirmeler (mm)

| Doğrultu                         | Doğu-Batı      |                |                | Kuzey-Güney    |                |                |
|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                  | U <sub>1</sub> | U <sub>2</sub> | U <sub>3</sub> | U <sub>1</sub> | U <sub>2</sub> | U <sub>3</sub> |
| Düğüm Noktası No                 | (mm)           | (mm)           | (mm)           | (mm)           | (mm)           | (mm)           |
| 129 (kubbe tepe noktası)         | 8              | 0              | 0              | 8              | 0              | 0              |
| 5364 (çatı tepe noktasında)      | 3              | -0,02          | 0              | 3              | -0,02          | 0              |
| 10615 (giriş kısmını örten çatı) | 4              | 0              | 0              | 4              | 0              | 0              |



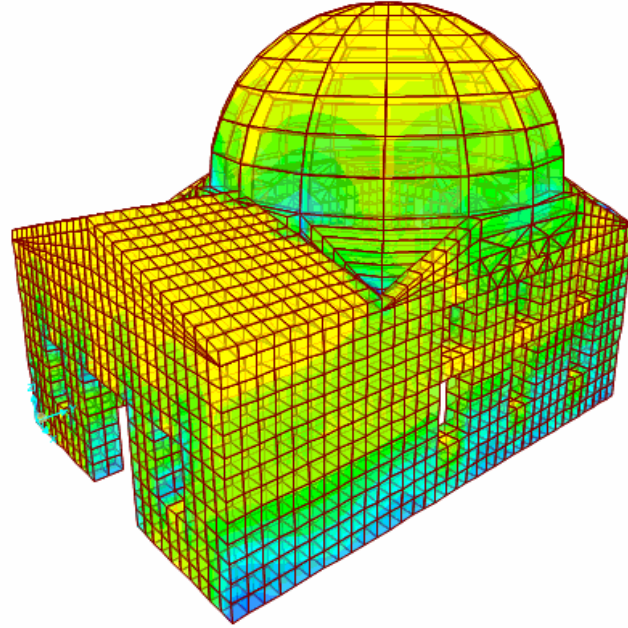


a) doğu-batı doğrultusu

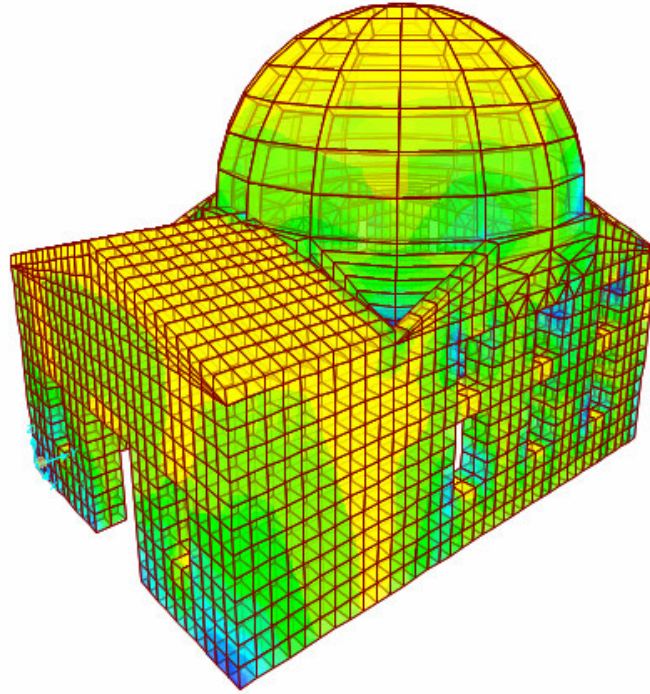


b) kuzey-güney doğrultusu

Şekil 4.26. Doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusunda deprem kuvveti uygulanması sonucu Z3 zemin sınıfı için elde edilen yer değiştirmeler (mm)



a) doğu-batı doğrultusu



b) kuzey-güney doğrultusu

Şekil 4.27. Marmara depremi için doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusunda deprem spektrumu uygulanması sonucu elde edilen  $\sigma_{33}$  gerilme dağılımı ( $\text{KN/m}^2$ )

Şekil 4.27.'de doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusunda deprem spektrumu uygulandığında,  $\sigma_{33}$  gerilme dağılımları görülmektedir. Şekil 4.28.'de yer değiştirmeleri verilmiştir.

Marmara depremi için yapılan analiz sonucunun, Z3 zemin sınıfı için yapılan analizle benzerlik gösterdiği görülmektedir. Doğru-batı doğrultusu için  $\sigma_{33}$  maksimum çekme gerilmelerin kubbe yapı ve çatı birleşim elemanlarında, kapı, pencere kenarlarında ve kuzey-güney doğrultusu boyunca mesnet bölgesinde olduğu gözlenmektedir. Doğru-batı doğrultusunda  $\sigma_{33}$  için maksimum çekme gerilmesi 282 KPa'dır.

Kuzey-güney doğrultusunda ki  $\sigma_{33}$  gerilmeleri incelendiğinde maksimum çekme gerilmelerin yine doğu-batı doğrultusundaki mesnet bölgesi, kubbe birleşim elemanları ve kapı, pencere kenarlarında olduğu görülmektedir. Kuzey-güney doğrultusunda  $\sigma_{33}$  için maksimum çekme gerilmesinin ise 326 KPa olduğu elde edilmiştir. Tablo 4.8.'de 5364, 10615 numaralı elemanların ve kubbe tepe noktası olan 129 numaralı elemanın yer değiştirmeleri görülmektedir.

Tablo 4.8. Yapı üzerinde seçilen bazı elemanlarda Marmara depremi için doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusunda deprem spektrumu uygulanması sonucu elde edilen yer değiştirmeler (mm)

| Doğrultu                 | Doğu-Batı              |                        |                        | Kuzey-Güney            |                        |                        |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                          | U <sub>1</sub><br>(mm) | U <sub>2</sub><br>(mm) | U <sub>3</sub><br>(mm) | U <sub>1</sub><br>(mm) | U <sub>2</sub><br>(mm) | U <sub>3</sub><br>(mm) |
| Düğüm Noktası No         |                        |                        |                        |                        |                        |                        |
| 129 (kubbe tepe noktası) | 7                      | 0                      | 0                      | 0                      | 7                      | 0,2                    |
| 5364                     | 3                      | 0                      | 0                      | 0                      | 3                      | 0,2                    |
| 10615                    | 3                      | 0                      | 0                      | 0                      | 4                      | 0,7                    |

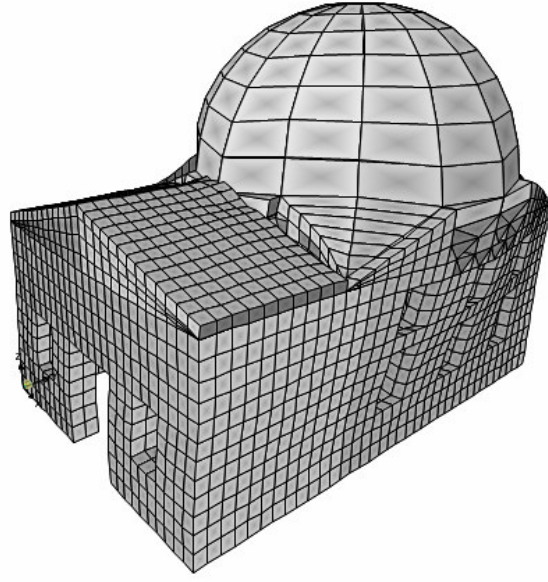
Tablo 4.9. ve 4.10.'da doğu-batı ve kuzey-güney doğrultuları için yapı üzerinde seçilen bazı elemanların, Marmara depremine göre hesaplanan normal ve kayma gerilmeleri verilmiştir.

Tablo 4.9. Yapı üzerinde seçilen bazı elemanlarda Marmara depremi için doğu-batı doğrultusunda deprem spektrumu uygulanması sonucu elde edilen normal ve kayma gerilmeleri (KPa)

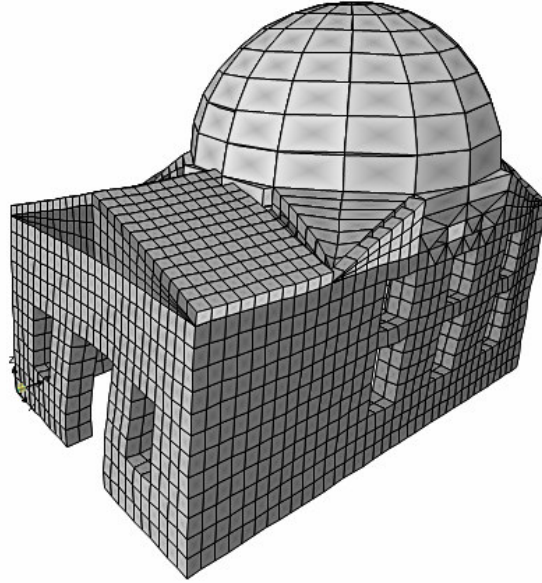
| Eleman No | Normal Gerilmeler (KPa) |               |               | Kayma gerilmeleri (KPa) |             |             |
|-----------|-------------------------|---------------|---------------|-------------------------|-------------|-------------|
|           | $\sigma_{11}$           | $\sigma_{22}$ | $\sigma_{33}$ | $\tau_{12}$             | $\tau_{13}$ | $\tau_{23}$ |
| 7433      | 45                      | 56            | 249           | 0,                      | 18          | 7           |
| 7514      | 38                      | 26            | 84            | 15                      | 12          | 8           |
| 7550      | 33                      | 47            | 202           | 0                       | 8           | 8           |
| 7702      | 25                      | 10            | 63            | 2                       | 40          | 1           |
| 7741      | 8                       | 2             | 180           | 0                       | 5           | 2           |
| 8520      | 55                      | 64            | 282           | 2                       | 16          | 15          |
| 8532      | 6                       | 6             | 29            | 0                       | 65          | 0           |
| 8560      | 3                       | 3             | 16            | 1                       | 75          | 2           |
| 8570      | 50                      | 64            | 259           | 2                       | 21          | 13          |
| 9054      | 45                      | 56            | 249           | 0                       | 18          | 7           |

Tablo 4.10. Yapı üzerinde seçilen bazı elemanlarda Marmara depremi için kuzey-güney doğrultusunda deprem spektrumu uygulanması sonucu elde edilen normal ve kayma gerilmeleri (KPa)

| Eleman No | Normal Gerilmeler (KPa) |               |               | Kayma gerilmeleri (KPa) |             |             |
|-----------|-------------------------|---------------|---------------|-------------------------|-------------|-------------|
|           | $\sigma_{11}$           | $\sigma_{22}$ | $\sigma_{33}$ | $\tau_{12}$             | $\tau_{13}$ | $\tau_{23}$ |
| 7433      | 33                      | 32            | 144           | 0                       | 7           | 58          |
| 7514      | 19                      | 20            | 73            | 0                       | 3           | 63          |
| 7550      | 11                      | 13            | 48            | 0                       | 1           | 66          |
| 7702      | 26                      | 1             | 82            | 1                       | 26          | 10          |
| 7741      | 0                       | 2             | 46            | 0                       | 1           | 26          |
| 8520      | 75                      | 65            | 326           | 1                       | 9           | 44          |
| 8532      | 40                      | 26            | 176           | 1                       | 10          | 11          |
| 8560      | 41                      | 28            | 183           | 0                       | 16          | 12          |
| 8570      | 49                      | 63            | 195           | 1                       | 5           | 43          |
| 9054      | 33                      | 32            | 144           | 0                       | 7           | 58          |



a) doğu-batı doğrultusu



b) kuzey-güney doğrultusu

Şekil 4.28. Marmara depremi için doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusunda deprem spektrumu uygulanması sonucu elde edilen yer değiştirmeler (mm)

Analizler sonucu bulunan çekme ve basınç gerilmeleri, Rahime Sultan Camisinin malzeme basınç ve çekme gerilmelerine göre çok düşük olduğu görölmektedir.

## BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tarihi yapılar, geçmiş ile günümüz arasında bir köprü görevi üstlenmektedirler. Ne kadar doğru yorumlanırsa, yeni tasarımlara da o kadar yol gösterici olacaktır.

Tarih ve kültürel bakımdan zengin olan ülkemiz aktif faylar üzerinde bulunmaktadır. Bu nedenle ülkemizdeki tarihi yapıları tehdit eden en önemli faktör depremlerdir. Ağır yapı olmaları nedeniyle bu yapılara gelen deprem kuvvetleri büyük olacağından bu tür yapılarda depremden etkilenme riski fazladır. Mevcut olan tarihi yapıları depreme karşı korumak büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada; röleveleri çıkarılan Rahime Sultan Camiinin üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulup, yapının kendi ağırlığı altında statik analizi yapılarak en büyük yerdeğiştirmeleri ve gerilmeler, elde edilmiştir. Statik yükleme durumunda  $\sigma_{33}$  için maksimum basınç gerilmesi 235 KPa olarak bulunmuştur. Maksimum yerdeğiştirme kubbe tepe noktasında  $U_3$  yönünde -3,23 mm'dir.

Serbest titreşim analizlerinden serbest titreşim periyotları  $T_1=0,242$  s,  $T_2= 0,225$  s,  $T_3=0,156$  s ve  $T_4=0,152$  s olarak elde edilmiştir. Geleneksel yapıların periyotları genellikle  $T=0,15$  ile  $T=0,45$  arasında değiştiği düşünülürse bulunan sonuçların olumlu olduğu görülmektedir.

Tarihi yapılar için en büyük tehlike zemin oturmaları ya da deprem yüklerinden oluşan çekme gerilmeleridir. Rahime Sultan Caminin zayıf olduğu noktalar hakkında yorum yapabilmek için malzemenin basınç dayanımı 5000 KPa, çekme dayanımı ise 500 KPa olarak belirlenmiştir.

Z3 zemin sınıfı için doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusunda deprem kuvveti uygulandığında doğu-batı doğrultusunda  $\sigma_{33}$  için maksimum çekme gerilmesi 242 KPa, kuzey-güney doğrultusunda  $\sigma_{33}$  için maksimum çekme gerilmesi ise 255 KPa'dır. Maksimum gerilmelerin doğu-batı, kuzey-güney doğrultusunda mesnet bölgelerinde, kubbe birleşim yerlerinde ve kapı, pencere kenarlarında olduğu gözlenmektedir. Doğubatı ve kuzey-güney doğrultusunda deprem kuvvet uygulanması sonucu Z3 zemin sınıfı için elde edilen maksimum yerdeğiştirmeler, kubbe tepe noktasında  $U_1$  yönünde 8 mm'dir.

Rahime sultan camiinin 1999 Marmara depremine cevabını bulmak için, Sakarya istasyonu doğu-batı kaydı ivme spektrumu kullanılmış ve doğu-batı doğrultusu için  $\sigma_{33}$  maksimum çekme gerilmesi 282 KPa, kuzey-güney doğrultusu için  $\sigma_{33}$  maksimum çekme gerilmesi ise 326 KPa olarak bulunmuştur. Yine maksimum çekme gerilmeleri kapı, pencere kenarlarında, kubbe birleşim yerlerinde ve doğu-batı, kuzey-güney doğrultusunda mesnet bölgelerinde görülmektedir. Doğubatı ve kuzey-güney doğrultusunda deprem kuvvet uygulanması sonucu Marmara depremi için elde edilen maksimum yerdeğiştirmeler, kubbe tepe noktasında  $U_1$  yönünde 7 mm'dir.

Bulunan maksimum çekme ve basınç gerilmelerin, Rahime Sultan Camiinde kullanılan malzemenin çekme ve basınç gerilmelerinin altında kaldığından caminin güvenli olduğu söylenebilir. Bu tür yapıları deprem yüklerine karşı daha dayanıklı hale getirebilmek için çekme gerilmelerini mümkün olduğu kadar azaltacak yöntemler kullanılmalıdır. Yapılan sayısal analizlerin doğruluğunu belirleyebilmek için, yapı üzerinde testler uygulanarak sonlu eleman modeli sonuçları ile karşılaştırılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] CELEP, Z., KUMBASAR, N., “Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı”, Beta Dağıtım, İstanbul, 2000.
- [2] ERDİK, M., ve DURUKAL, E., “Ayasofya’nın Deprem Davranışı”, 2. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 1993.
- [3] ÇAKMAK, A. Ş., MOROPOULOU, A., MULLEN, C. L., “Interdisciplinary Study of Dynamic Behavior and Earthquake Response of Hagia Sophia” Department of Civil Engineering and Operations Research, Princeton University, Princeton, NJ 08540, USA National Technical University of Athens, Greece, 1994.
- [4] SELAHİYE, A., AYDINOĞLU, N.M., ERDİK, M., “Süleymaniye Camiinin Dinamik özelliklerinin Deneysel ve Analitik Yöntemlerle Belirlenmesi”, İstanbul, 1994.
- [5] YÜZÜGÜLLÜ, Ö., DURUKAL, E., “The Effects of the Train Traffic on the Küçük Ayasofya Mosque in Istanbul”, International Conference on Studies in Ancient Structures, YTÜ, Faculty of Architecture, İstanbul, 1997
- [6] TİMUR, T., “Edirnekapı Mihrimah Sultan Camii Taşıyıcı Sistem Davranışının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ İnş. Müh. Bölümü, İstanbul, 2001.
- [7] ÖZCAN, Z., “Tarihi Sangarius (Sakarya) Köprüsü Üzerine Bir Çalışma” Sixth International Congress on Advances in Civil Engineering, Bogazici University, 2004.
- [8] TEOMETE, E., AKTAŞ, E., “Structural Assessment of a Historical Masonry Structure: Urla Kamanlı Mosque”, Sixth International Congress on Advances in Civil Engineering, Bogazici University, 2004.
- [9] AKAN, A. E., ÖZEN, Ö., 2005 “Bursa Yeşil Türbe’nin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Deprem Analizi”, Deprem Sempozyumu, Kocaeli, 2005.
- [10] URAL A., 2005 “Tarihî Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Metoduyla Analizi” Deprem Sempozyumu, Kocaeli, 2005.
- [11] GIORDANO, A., MELE, E., LUCA DE, A., “Modelling of Historical Masonry Structures: Comparison of Different Approaches Through a Case Study”, İtalya, 2002.



- [12] NATH, B., “Sonlu Elemanlar Metodunun Temelleri, Çeviren: GÜNAY, D., Sakarya Üniversitesi, 1993.
- [13] REDDY, J., “An Introduction to the Finite Element Method”, McGraw Hill International Editions, 1993.
- [14] PETYT, M., “Introduction to Finite Element Vibration Analysis”, Cambridge University, 1990.
- [15] ÇAMLIBEL, N., “Geleneksel Yapılarda Stabilitenin İyileştirilmesi ve Temellerin Takviyesi”, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2000.
- [16] KANIT R., IŞIK N S., “Horosan Harcı Kullanılarak Yapılan Model Kemerin Performansının Deneysel Ve Sayısal Olarak Belirlenmesi”, Politeknik Dergisi, Cilt 7, Sayı:2, s. 179-183, 2004.
- [17] ÜNAY A. İ., “Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı”, ODTÜ Mimarlık Fakültesi, 2002.
- [18] ANTHOINE A., “Homogenization Of Periodic Masonry: Plane Stress, Generalized Plane Strain Or 3d Modelling?”, International Journal of Solids and Structures, 1997.
- [19] ZUCCHİNİ A., LOURENÇO P.B., “A micro-mechanical model for the homogenisation of masonry”, International Journal of Solids and Structures, 2002.
- [20] LOURENÇO, P.B., VASCONSCELOS, G., RAMOS, L.,” Assessment of the Stability Conditions of a Cistercian Cloister”, 2nd International Congress on Studies in Ancient Structures, Yıldız Technical University, İstanbul, 2001.
- [21] APAY, A., “Yapı Bilgisi”, İTÜ, Müh. Fak., Sakarya, 1992.
- [22] ÖZMEN, B., NURLU, M., GÜLER, H., “Coğrafi Bilgi Sistemi ile Deprem Bölgelerinin İncelenmesi”, Ankara, 1997.
- [23] TC. SAPANCA KAYMAKAMLIĞI., [www.sapanca.gov.tr/culture](http://www.sapanca.gov.tr/culture), 2004.
- [24] ERTÜRK O., ŞAROĞLU F., ERTÜRK K ., ”Sapanca’daki Yapı Ve Yerleşimlerin Depremsellik Işığında İrdelenmesi”, Deprem Sempozyumu, Kocaeli, 2003.
- [25] “Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik”, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 1997.

## ÖZGEÇMİŞ

Pelin YILMAZ 13 Şubat 1977 yılında İstanbul'da doğdu. İlköğrenimini Şükrü Naili Paşa İlkokulu, ortaokulu Beşiktaş Kız Lisesinde tamamladı. Liseye İstanbul Zincirlikuyu İnşaat Anadolu Meslek Lisesinde devam etti. 1995 yılında girdiği Yıldız Teknik Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu İnşaat Bölümünden 1997 yılında mezun oldu. 1998 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi bölümünü ise 2002 yılında bitirdi. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans Öğrenimine başladı. 2003 yılında Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Halen Araştırma Görevliliğine ve Yüksek Lisans öğrenimine devam etmektedir.