



## Seismic load capacity evaluation of stone masonry mosques

İlker Kazaz\*, İrfan Kocaman

Department of Civil Engineering, Erzurum Technical University, Erzurum, 25070, Turkey

### Highlights:

- Lateral load capacity of masonry mosques
- Hysteresis behavior under earthquake loading
- Out of plane behavior of masonry walls

### Keywords:

- Historical Mosque,
- earthquake resistance,
- finite element method,
- masonry wall,
- shear strength

### Article Info:

Received: 16.11.2016

Accepted: 27.02.2017

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416365

### Acknowledgement:

### Correspondence:

Author: İlker Kazaz

e-mail:

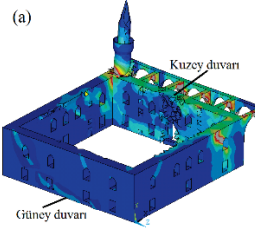
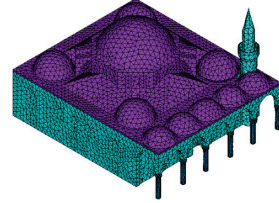
ilkerkazaz@erzurum.edu.tr

phone: +90 442 666 2201

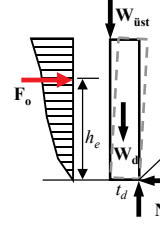
### Graphical/Tabular Abstract

(a) Distribution of principal strains on the main walls at  $t=2.98$  s, the north-wall started to overturn in the outwards direction, (b) north-wall rigid block rocking model, (c) south-wall rigid block rocking model

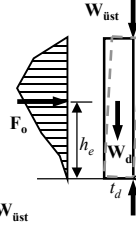
Lala Pasha Mosque's  
Finite Element Model



(b) North Wall



(c) South Wall



Formulas for,

- **Out-of-plane load capacity:**

$$F_o = \frac{t_d}{h_e} \times \left( \frac{W_d}{2} + W_{üst} \right)$$

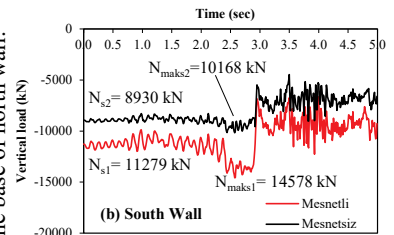
$W_{üst}$  : dynamic vertical load

- **In-plane load capacity:**

$$V_{duvar} = l_d \times t_d \times f_{vk}$$

$$f_{vk} = f_{vko} + 0.4\sigma_d \leq 0.10f_b$$

Variation of axial load at  
the base of north wall.



**Purpose:** This paper presents the details of an analytical method based on rigid block dynamics to determine the seismic lateral load capacity of historical masonry mosques by evaluating the in-plane and out-of-plane load capacities of walls comprising the structure. A theoretical approach is proposed for the calculation of material properties that yield reliable seismic behavior estimation of single and three leaf masonry walls.

**Theory and Methods:** Simplified methods and formulas for the calculation of the lateral load capacity of masonry walls are indispensable to seismic evaluation of masonry structures due to inherent difficulties in modelling and nonlinear seismic analysis. Seismic resistance of Ottoman period historical mosques, which are generally square-planed with a central dome carried by four main pillars, are provided by in-plane and out-of-plane resistance mechanisms of thick outer walls. Seismic behavior of Erzurum Lala Pasha Mosque under 1992 Erzincan Earthquake record as input was determined using nonlinear finite element analysis. The structure was modeled with attention to architectural and geometrical features that have effect on the structural behavior. The adopted continuum finite element modeling technique employs the homogenized characteristics of stone, mortar, rubble infill as material property. A methodology is presented for obtaining the homogenized compressive strength and elastic modulus of the walls. The adequacy of empirical relations available in codes for estimating the lateral load capacity of the masonry walls and entire structure were evaluated using the results of dynamic analysis. Based on the damage pattern of walls observed in the analysis, a rigid block dynamic model was proposed to calculate the out-of-plane load capacity of the masonry walls.

**Results:** It was demonstrated that the proposed model to estimate the out-of-plane load capacity and the existing code formulas for the in-plane load capacity can be used together to calculate the lateral load capacity of masonry mosques.

**Conclusion:** Masonry walls perpendicular to the seismic excitation direction and supported from either below and above or from both sides also contribute to lateral load capacity of masonry structures. This contribution increases with increasing wall thickness. In this study, it was shown that the out-of-plane load-carrying capacity of the walls depends on the rocking direction of the wall, the axial load level in the effective earthquake cycle and the boundary conditions of the wall.



## Taş yığma camilerin sismik yük kapasitelerinin değerlendirilmesi

İlker Kazaz\*<sup>ID</sup>, İrfan Kocaman<sup>ID</sup>

Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, 25070, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Yığma camilerin yatay yük kapasitesi
- Deprem yükleri altında histeresis davranışı
- Yığma duvarların düzlem dışı davranışı

#### Makale Bilgileri

Geliş: 16.11.2016  
Kabul: 27.02.2017

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.416365

#### Anahtar Kelimeler:

Tarihi cami,  
deprem dayanımı,  
sonlu elemanlar yöntemi,  
yığma duvar,  
kesme dayanımı

#### ÖZET

Kültür varlığı olarak öneme sahip tarihi yapılar içerisinde bulunan camilerin, gelecek nesillere güvenle aktarılması için, bu tür yapıların deprem yükleri altındaki davranışlarının iyi bilinmesi, bu davranışa uygun hesap modellerinin geliştirilmesi, dayanımlarının güvenilir bir şekilde belirlenmesi ve yetersiz durumlarda gerekli müdahale yöntemlerinin tarihi dokuyu ve ruhu zedelemekten uygulanması gerekir. Bu çalışmada kültür varlığı olarak tescillenmiş Erzurum Lala Paşa Camisi'nin statik ve dinamik yükler altındaki davranışı sonlu eleman yöntemiyle incelenmiştir. Yapının taşıyıcı eleman ve malzeme özelliklerini belirlemek için literatürde mevcut yığma malzeme modelleri incelenerek teorik bir yaklaşım ortaya konulmuştur. 1992 Erzincan Depremi ivme kayıtları kullanılarak gerçekleştirilen dinamik analizler neticesinde yapının ve taşıyıcı duvarların yanal yük taşıma kapasitesi belirlenerek, deprem yönetmeliğinde ve literatürde önerilen bağıntıların bu kapasitenin kestirilmesinde yeterliliği irdelenmiştir. Mevcut hesap yöntemlerinin tarihi yığma camilerin ve taşıyıcı duvarlarının yanal yük dayanımlarının belirlenmesinde bazı değişikliklerle birlikte kullanılabilmesi gösterilmiştir. Ayrıca, Erzincan Depreminin bu tür yapılar için oldukça yıkıcı bir deprem olduğu belirlenmiştir.

## Seismic load capacity evaluation of stone masonry mosques

### H I G H L I G H T S

- Lateral load capacity of masonry mosques
- Hysteresis behavior under earthquake loading
- Out of plane behavior of masonry walls

#### Article Info

Received: 16.11.2016  
Accepted: 27.02.2017

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.416365

#### Keywords:

Historical Mosque,  
earthquake resistance,  
finite element method,  
masonry wall,  
shear strength

#### ABSTRACT

In order to safely preserve the historical mosques, which have significance as cultural heritage assets, for the future generations, the behavior of these type of structures under seismic loads must be well determined, analytical models that are able to represent the actual behavior must be developed, their earthquake resistance must be determined accurately and in case of insufficient capacity the proper intervention and strengthening methods must be applied without ruining the historic fabric and air. In this study, the earthquake behavior of Erzurum Lala Pasha Mosque, registered as cultural heritage, under static and dynamic loads was investigated using finite element method. A theoretical approach was presented for the determination of structural element and material properties using the available mechanistic material models for masonry in the literature. The adequacy of empirical relations available in code and previous studies for estimating the lateral load capacity of the structure and masonry walls were evaluated using the results of dynamic analysis that employs the 1992 Erzincan Earthquake records as input. It was demonstrated that the existing methods with proposed modifications can be used to calculate the lateral load capacity of masonry mosques. It was also identified that the Erzincan Earthquake is a very damaging seismic event for such type of structures.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ilkerkazaz@erzurum.edu.tr / Tel: +90 442 666 2201

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tarihi yapıların korunması, modern toplumların en önemli sorunlarından biridir. Bu yapılar tarihi önemlerinin yanında, turizme de ciddi katkılar yapabilmektedir. Bundan dolayı tarihi yapıların korunması sadece kültür varlığının devamı için değil, aynı zamanda ekonomik olarak da önem taşımaktadır. Tarihi yapıların özellikle deprem gibi dinamik etkiler altındaki davranışlarının ve performanslarının tespiti gereklidir. Yapıda oluşmuş ve oluşabilecek hasarların belirlenmesi ve gerekli koruyucu ya da onarıcı müdahalelerin yapılması, yapı sağlığının kontrol altında tutulması için önemlidir. Tarihi yapıların yapısal davranışlarının belirlenmesiyle ilgili birçok araştırmacı çeşitli yapılar/deney düzenekleri üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu konuda yapılan çalışmalarda analitik ve deneysel yöntemler kullanılmaktadır. Çalık vd. [1] çalışmalarında tarihi Dürbinar Camisi'nin restorasyon öncesi ve sonrası durumlarda deneysel modal analizini gerçekleştirmişlerdir. 18. yüzyılda inşa edilen caminin mod şekilleri ve malzeme özellikleri deneysel modal analiz yöntemiyle belirlenmiştir. Koseoğlu ve Canbay [2] çalışmalarında tarihi Cenabı Ahmet Paşa Camisi'ni ele almışlardır. Yapının sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve çevresel yükler altında yapının davranışı belirlenmeye çalışılmıştır. Yapıda oluşan çatlakların sebepleri belirlenmiş ve onarım önerileri sunulmuştur. Şeker vd. [3] tarihi Kara Mustafa Paşa Camisi'nin sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. Model üzerinde statik ve dinamik analizler gerçekleştirilerek, yapının deprem davranışını belirlemeye çalışmışlardır. Rovero ve Toniatti [4] çalışmalarında Halep bölgesinde bulunan geleneksel yığma yapıların kubbelerini ele almışlardır. Kubbelerin sonlu eleman modellerini kabuk elemanlarla modellemişler ve elde edilen sonuçların gerçeğe oldukça yakın olduğunu belirlemişlerdir. Mustafaraj ve Yardım [5] çalışmalarında tarihi Naziresha Camisi'ni ele almışlardır. Yapının sonlu eleman modelini oluşturarak deprem analizi gerçekleştirmişlerdir. Yapıda var olan çatlaklar ile deprem analizi sonucunda oluşabilecek hasarı karşılaştırarak, yapıdaki çatlaklara neden olan etkenler irdelenmiştir. Atamturktur vd. [6], Beverley Manastırı'nın sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. Mevcut yapının ve sonlu eleman modelinin dinamik karakteristiklerinden yola çıkarak, yapıda hasar tespiti yapmışlardır. Lourenço ve Ramos [7] çalışmalarında laboratuvar ortamında ürettikleri modeller ve var olan yapılar üzerinde hasarsız yöntemlerle yapıların hasar durumlarını belirlemeye çalışmışlardır. Oluşabilecek tipik hasar çeşitlerini belirleyerek, hasarlar oluşmadan önlemi almayı hedeflemişlerdir. Akan [8] çalışmasında tarihi Ahi Evren Camisi'nin sonlu eleman modelini oluşturmuştur. Malzeme özelliklerini belirleyerek, bağıntılarla elde ettiği gerilme değerlerini nümerik model yardımıyla elde ettiği gerilme değerleriyle karşılaştırmıştır. Yığma duvarların mekanik özelliklerinin ve kapasitelerinin belirlenmesi amacıyla araştırmacılar birçok çalışma yapmışlardır. Bu çalışmaların birçoğu deneysel çalışmalar ile teorik yaklaşımları bir arada barındırmaktadır. Karimi vd. [9] iki tip yığma duvarın yük kapasitelerini deneysel olarak

belirlemişlerdir. Duvarların sonlu eleman modellerini oluşturularak, teorik kapasiteleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Silva vd. [10] üç yapraklı taş yığma duvar modelleri ile deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu duvar tipinin kırılma mekanizmaları, yer değiştirme kapasitesi, kayma modülü, çekme dayanımı gibi birçok mekanik parametreleri elde ederek literatürde var olan teorik yaklaşımlarla karşılaştırmışlardır. Kanıt ve Döndüren [11] çalışmalarında yığma duvar numunesinin davranışını düzlem dışı tekrarlı yük altında deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Deneysel verileri, ANSYS yazılımıyla yapılan analitik çalışmalar ile karşılaştırarak yığma duvarların analitik incelenmesinde ANSYS yazılımının kullanılmasının güvenilir olduğunu belirlemişlerdir. Vasconcelos ve Lourenço [12] taş yığma duvarların kesme ve çekme dayanımlarının belirlenmesi için analitik yaklaşımlar geliştirmişler, deneysel ve analitik çalışmalarını incelemişlerdir. Costa [13], geleneksel yığma duvarların düzlem dışı davranışının çevrimsel (yarı-statik) ve dinamik yükler altında deneysel olarak karakterize edilmesi ve çoklu rijit cisim dinamiğine dayanan modellerle hesaplanması üzerine çalışmalar yapmıştır. Melis [14], yer değiştirme esaslı yöntemlerin dinamik yük etkisi altındaki yığma duvarların davranışını belirlemek üzere, devrilme hareketine bağlı olarak ortaya çıkan rezerv dayanımı da dikkate alarak, uygulanabilirliğini incelemiştir. Önerilen yöntemin, gerçek kapasiteye göre oldukça düşük (aşırı emniyetli) sonuçlar veren mevcut elastik gerilme hesaplarına dayanan yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Yapılan birçok araştırmada, tarihi yığma yapıların dinamik davranışlarının ve yük taşıma kapasitelerinin analitik olarak belirlenmesindeki belirsizliğe ve zorluğa dikkat çekilmiştir. Bu çalışmada tarihi Lala Paşa Camisi'nin yapısal performansı ve deprem davranışı incelenmiştir. Yapıya uygun sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve 1992 Erzincan Depremi yer hareketi kayıtlarına dayanarak deprem analizi gerçekleştirilmiştir. Yapının yük taşıma kapasitesini hesaplamak için mevcut yöntemler incelenmiş ve özellikle düzlem dışı duvar kapasitesini belirlemek üzere modeller önerilmiştir.

## 2. ERZURUM LALA PAŞA CAMİSİ (ERZURUM LALA PASHA MOSQUE)

Lala Paşa Camisi Erzurum şehir merkezinde, Cumhuriyet caddesindedir. Batısında Yakutiye Medresesi, Doğu ve Güneyinde şehrin önemli trafik yollarından ikisi bulunmaktadır (Şekil 1a, 1b). Yapı, Erzurum'da inşa edilmiş ilk Osmanlı eseridir ve günümüzde Vakıflar Genel Müdürlüğü sorumluluğundadır. 16. yüzyılda Erzurum Valisi Lala Mustafa Paşa (Gürcistan ve Kıbrıs fatihi olarak da bilinir) tarafından yaptırılmıştır. Mimar Sinan, caminin mimar-mühendisidir. Cami başlangıçta külliye, saray, hamam, şadırvan ve mektep olarak inşa edilmiştir. Ancak zamanla saray, şadırvan ve mektep yok olmuş sadece Lala Paşa Camisi ve hamamı günümüze ulaşabilmiştir [15]. Lala Paşa Camisi, Mimar Sinan eserlerinden olan İstanbul Şehzade Camisi, Gebze Çoban Mustafa Paşa Camisi, Payas

Sokullu Sarı Selim Camisi gibi kare planlı ve merkez kubbeli camiler grubuna girmektedir. Caminin orta kısmında yer alan dört adet taş kolon (fil ayağı) üzerine yerleştirilmiş asıl kubbe, dört yandan yarım kubbeler ve payandalarla desteklenmiştir. Fil ayakları 2 m yüksekliğe kadar sekizgen kesitindedir. Fil ayakları arasında bağlantılar kemerlerle sağlanmıştır. Fil ayakları 2 m yüksekliği sonrasında bu kemerlere uygun kesitte inşa edilmiştir. Yapı, ana kubbenin yanlarında yer alan küçük kubbelerle simetrik bir şekilde inşa edilmiştir [16]. Ana kubbe kasağını çevreleyen mukarnaslar, köşelerdeki pandantiflerle Osmanlı dönemi özelliğini yansıtmaktadır. Ana kubbe 13 m çapında, 17,45 m yüksekliğinde ve yaklaşık olarak 50 cm kalınlığındadır. Caminin ana boyutları 26m x 26m'dir. Güney cephedeki son cemaat yeri ise 26m x 5m'dir. Son cemaat yeri 6 kolon ve 5 küçük kubbeden meydana gelmektedir. Yapının dört ana duvarının kalınlığı yaklaşık olarak 180 cm'dir. Dört taraftaki duvarlar, çatı seviyesine kadar yükselmiştir. Caminin dört cephesinde iki sıra halinde pencereler bulunmaktadır. Caminin, doğu ve batı yüzeylerinde 3 altta ve 5 üstte pencere boşluğu, güney yüzeyinde altta ve üstte dörder pencere boşluğu, kuzey yüzeyinde ise altta ve üstte 4 pencere boşluğu

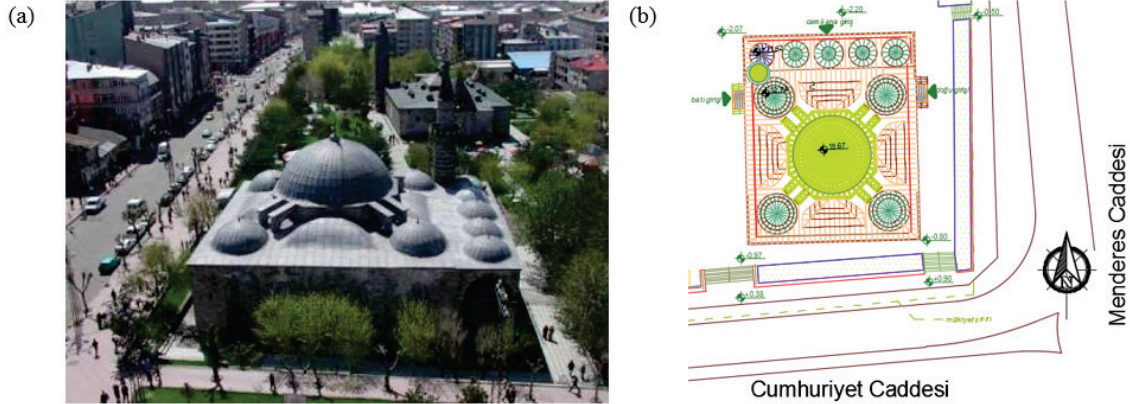
ve altta 1 kapı boşluğu bulunmaktadır. Caminin minaresi ise camiye güneybatı köşesinde duvarlara birleşik şekilde konumlandırılmıştır. Şekil 2'de caminin farklı cephelerden görünüşleri ve kesitleri verilmiştir.

### 3. MALZEME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ (DETERMINATION OF MATERIALS PROPERTIES)

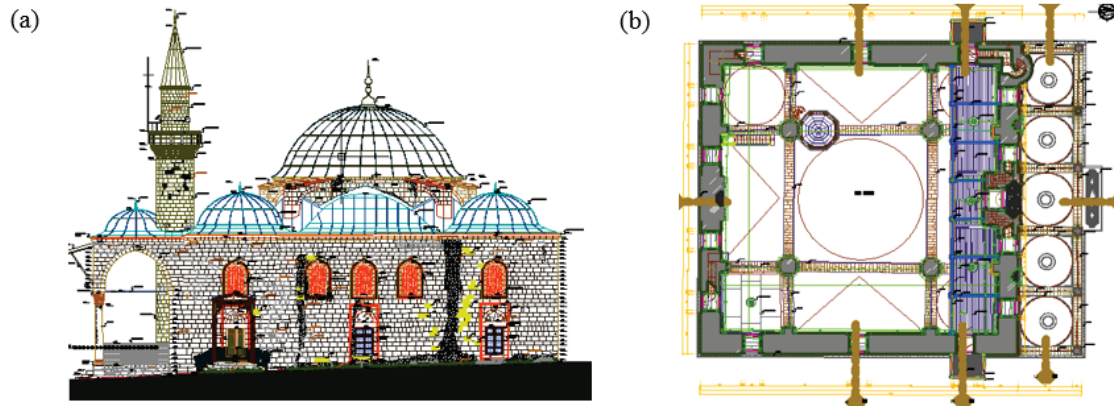
#### 3.1. Taşın, Harcın ve Moloz Dolgunun Basınç Dayanımının Belirlenmesi

(Determination of Compressive Strength of Stone, Mortar and Rubble)

Tarihi eserlerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi oldukça karmaşık olabilmektedir. Yapının yıllar boyunca farklı çevresel etkilere maruz kalması, malzemenin tabii özelliğinin farklı görünmesi, aynı ocaktan çıkmasına rağmen farklı numunelerin farklı dayanımlar göstermesi, rüzgar ya da güneşin hakim olduğu cephede mekanik yüklere maruz kalması, tarihi yığma yapılarda malzeme özelliklerinin belirlenmesinin zorluğuna birkaç örnektir. Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden alınan bilgiye göre eser üzerinde malzeme özelliklerinin belirlenmesine yönelik herhangi bir çalışma



Şekil 1. a) Erzurum Lala Paşa Camisi (Erzurum Lala Pasha Mosque) b) Vaziyet Planı (Location plan).



Şekil 2. a) Batı cephe görünüşü (West elevation view) b) +3,20 m kotunda plan görünüşü (+3,20m plan view) [17]

yapılmamıştır. Bu yapıların öneminden dolayı tahribatlı yöntemlerle malzeme özelliklerinin belirlenmesi çok fazla tercih edilmemektedir. Bu sebeple taş ve harç dayanımı, literatür taraması ve hasarsız yöntemler yardımıyla belirlenmiştir. Mimar Sinan strüktüründe kullanılan taş genellikle traverten veya kumtaşından oluşur. Taş malzeme için birim basınç gerilmesi 35 MPa, birim hacim ağırlığı 26,5 kN/m<sup>3</sup>'tür [18]. Lala Paşa Camisi'nin taş dayanımını belirlemek için hasarsız bir deney yöntemi olan Schmidt sertlik çekici kullanılarak ortalama bir sertlik değeri elde edilmiştir. Bu değerler Tablo 1'de verilmiştir. Sertlik ölçümü sonucunda kesme taş kısmında dayanım 25,6 MPa olarak belirlenmiştir.

Horasan harcı üzerinde önceki çalışmalarda yapılan deneylerden basınç dayanımının 5,5 MPa, birim hacim ağırlığının 17,6 kN/m<sup>3</sup> olduğu kabul edilmiştir [19]. Çekme dayanımı ise basınç dayanımının yaklaşık %5'i mertebesinde (0,3 MPa) belirlenmiştir. Caminin duvarlarında kullanılan dolgu malzemesinin basınç dayanımı ise literatür çalışmaları yardımıyla belirlenmiştir. Osmanlı eserlerinden olan İstanbul Fatih Camisi dolgu malzemesinin basınç dayanımları 3,3, 3,1 ve 2,6 MPa (ortalama 3,0 MPa) olarak bulunmuştur [20]. Belirtilen çalışmalar ve sonuçlardan yola çıkarak, bu çalışmada, Erzurum Lala Paşa Camisi'nin kesme taş dayanımı ( $f_b$ ) 25,6

MPa, moloz dolgu dayanımı ( $f_r$ ) 3,0 MPa, harç dayanımı ( $f_m$ ) 5,5 MPa olarak kabul edilmiştir.

### 3.2. Duvarların Basınç Dayanımlarının ve Elastisite Modüllerinin Belirlenmesi

(Determination of Compressive Strength and Elastic Modulus of Walls)

Osmanlı döneminde Mimar Sinan'ın yapmış olduğu eserlere bakıldığında, eserler arasında birçok benzerlik görülebilmektedir. Bu benzerlik sadece mimari özellikler değil, yapım teknikleri ve malzeme açısından da belirgin durumdadır. Erzurum Lala Paşa Camisi kubbelerin yükünü taşıyan dış duvarları, üç yapraklı olarak adlandırılan iki kesme taş duvarın arasında harç, moloz vb. bağlayıcılar bulunan dolgu duvar ile tamamlanan bir sistemle inşa edilmiştir (Şekil 3). Bu tip duvarların basınç dayanımı ve elastisite modüllerinin belirlenmesi için, önce ayrı ayrı kesme taş duvar dayanımı ve dolgu duvar dayanımının belirlenmesi gerekmektedir.

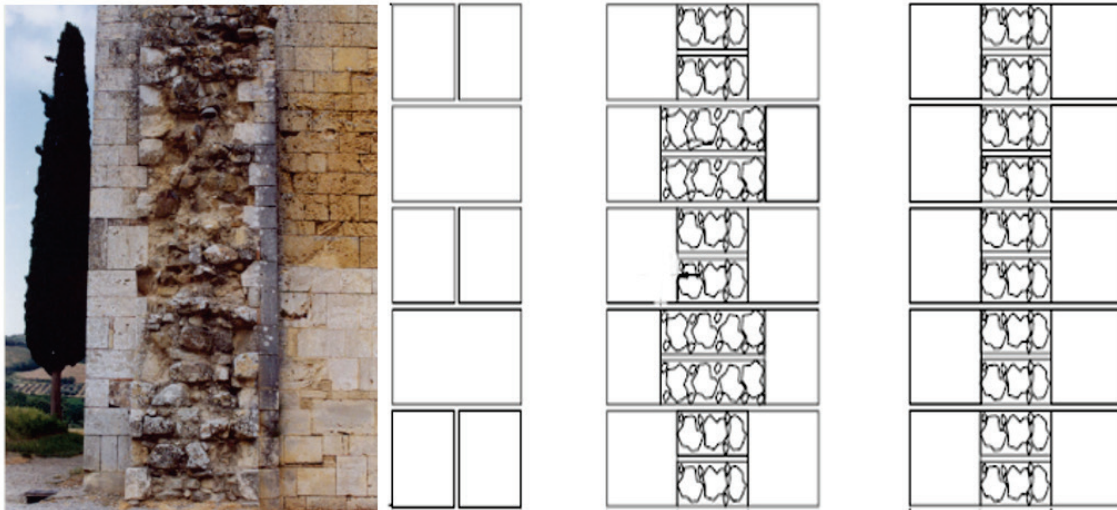
#### 3.2.1. Dış duvar dayanımının belirlenmesi

(Determination of strength of outer wall)

Duvarların basınç dayanımlarının belirlenmesi farklı parametrelere bağlıdır. Duvarın yapım tekniği, yapımında kullanılan taşın, tuğlanın, harcın vb. malzemelerin mekanik

**Tablo 1.** Lala Paşa Camisi Schmidt Çekici sertlik ölçümü sonuçları  
(Lala Pasha Mosque Schmidt Hammer hardness measurement values)

Schmidt Sertlik Deneyi Sonuçları					
Rebound	$f_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	Rebound	$f_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	Rebound	$f_b$ (N/mm <sup>2</sup> )
34	29	26	18	31	26
34	29	29	24	27	18
27	18	29	24	29	24
31	26	33	28	39	41
28	24	26	18	33	28
37	18	42	47	34	29
30	26	31	26	31	26
34	29	26	18	Ortalama: 25,64 ± 7,76	



**Şekil 3.** Üç yapraklı duvar tipi (Three leaf masonry wall)

özellikleri, duvarın boyutları bu parametrelerin birkaçıdır. Yapılan çalışmalarda, malzeme özellikleri bilinen duvarların basınç dayanımlarının belirlenmesi için farklı bağıntılar önerilmiştir. Bu çalışmada iki farklı bağıntı ele alınmıştır. İlk olarak malzeme dayanımı bilinen tek yapraklı duvarların basınç dayanımının belirlenmesi için Tsoutrelis ve Exadaktylos [21] Eş. 1 ve 2'yi önermektedir. Tsoutrelis ve Exadaktylos [21] çalışmalarında yöresel bir mermer çeşidi kullanarak kaya blokları arasındaki süreksizliklerden (derzler) kaynaklanacak basınç dayanımı farklılıklarını deneysel olarak incelemişler ve teorik bir yaklaşım önermişlerdir.

$$f_k = e^{(-0,3117.L.f)} \cdot f_b \quad (1)$$

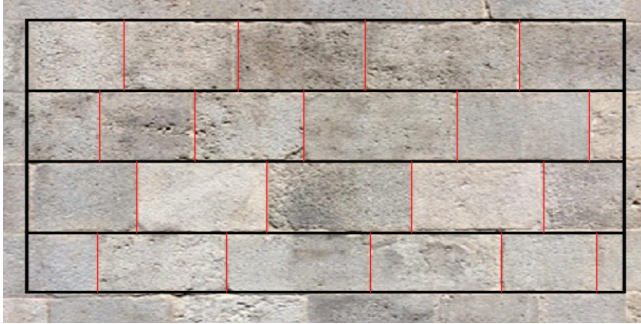
$$L = \sqrt[3]{l.h.t} \quad (2)$$

Bu eşitlikte  $f_k$ , duvar karma basınç dayanımı;  $f_b$  taşın basınç dayanımı;  $l$ ,  $h$ ,  $t$  sırasıyla duvarın genişliği, yüksekliği, kalınlığı ve  $f$  çatlak yoğunluğunu temsil etmektedir. Çatlak yoğunluğu duvarı oluşturan taşların bütün boyutlarda sürekliliği bozan yüzeylerinin toplam alanının duvarın hacmine bölümüdür ( $m^2/m^3$ ). Bu eşitlik ışığında Şekil 4'te gösterilen Lala Paşa Camisi'nden alınan temsili duvar örgüsü ve taş boyutlarına bağlı olarak, çatlak yoğunluğu ve taş duvar basınç dayanımı;

$$f = \frac{0,50 \times 1,30 \times 4,5 + 0,50 \times 2,30 \times 3}{0,50 \times 2,30 \times 1,30} = 4,26$$

$$L = \sqrt[3]{2,30 \times 1,30 \times 0,50} = 1,14 \text{ şeklinde hesaplandığında;}$$

$$f_k = e^{(-0,3117 \times 1,14 \times 4,26)} \times 25,6 = 5,63 \text{ MPa olarak elde edilir.}$$



**Şekil 4.** Yapıda elastik modülün hesaplanmasında temel alınan duvar elemanı ve çatlak yoğunluğu faktörü hesaplamasında kullanılan yatay ve düşey süreksizlik yüzeyleri (Wall element used for the calculation of elastic modulus of the structure and horizontal and vertical interface discontinuities for the calculation of crack intensity factor)

İkinci olarak, taşın ve harcın dayanımı bilinen duvarların basınç dayanımının belirlenmesi için Tomazevic [22] Eş. 3'ü önermektedir.

$$f_k = 0,5 f_b^{0,65} f_m^{0,25} \quad (3)$$

Bu eşitlikte,  $f_k$ , duvarın karma basınç dayanımı,  $f_b$ , taşın basınç dayanımı ve  $f_m$  harcın basınç dayanımıdır. Bu bilgiler ışığında taş duvar dayanımı;

$$f_k = 0,5 \times 25,6^{0,65} \times 5,5^{0,25} = 6,3 \text{ MPa olarak elde edilir.}$$

Ancak Tsoutrelis ve Exadaktylos [21] tarafından önerilen bağıntı, harçsız bağlantılı duvarların davranışını belirlenmesinde daha uygun olduğu için kesme taş duvarın basınç dayanımı 5,63 MPa olarak alınmıştır.

### 3.2.3 Üç Yapraklı Duvar Dayanımının Belirlenmesi (Determination of Strength of Three Leaf Wall)

Yığma duvarların dayanımlarının ve elastisite modüllerinin belirlenmesinde literatürde analitik formüller önerilmektedir. Ancak üç yapraklı duvarların dayanımının analitik olarak belirlenmesi birçok değişkene bağlı olması ampirik önerileri kısıtlamaktadır. Binda vd. [23] üç yapraklı duvarların basınç dayanımının belirlenmesi için Eş. 4'ü önermektedir.

$$f_c = \frac{2t_e}{2t_e + t_i} \times f_e \times \theta_e + \frac{t_i}{2t_e + t_i} \times f_i \times \theta_i \quad (4)$$

Bu eşitlikte  $f_e = f_k$  ve  $f_i = f_r$  olacak şekilde, sırasıyla dış ve iç duvarın basınç dayanımları,  $t_e$  ve  $t_i$  sırasıyla dış ve iç duvarın kalınlıkları ve  $\theta_e$  ve  $\theta_i$  ise sırasıyla dış ve iç duvarın doğruluk faktörüdür. Doğruluk faktörü iç ve dış duvarın üç yapraklı duvar dayanımına katkı katsayısıdır. Binda vd. [23] bu değerleri  $\theta_e = 0,7$  ve  $\theta_i = 1,3$  olarak önermiştir. Basınç dayanımı bilinen yığma duvarların elastisite modülünün belirlenmesi için Tomazevic'in [22] önerdiği Eş. 5'teki bağıntı literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Basınç dayanımından elastisite modülünü elde etmek için Avrupa Birliği Standartları da [24] Eş. 5'i önermektedir.

$$E = 1000 f_k \quad (5)$$

Bu bilgiler ışığında üç yapraklı duvarın basınç dayanımı,

$$f_c = \frac{2 \times 0,5}{2 \times 0,5 + 0,8} \times 5,63 \times 0,7 + \frac{0,8}{2 \times 0,5 + 0,8} \times 3 \times 1,3 = 3,92 \text{ MPa olarak elde edilir.}$$

Duvarın elastisite modülü ise Eş. 5 kullanılarak  $E = 1000 \times 3,92 = 3920 \text{ MPa}$  olarak elde edilir.

### 3.3. Fil Ayaklarının, Kubbelerin ve Kemerlerin Dayanımlarının Belirlenmesi (Determination of the Strength of Pillars, Domes and Arches)

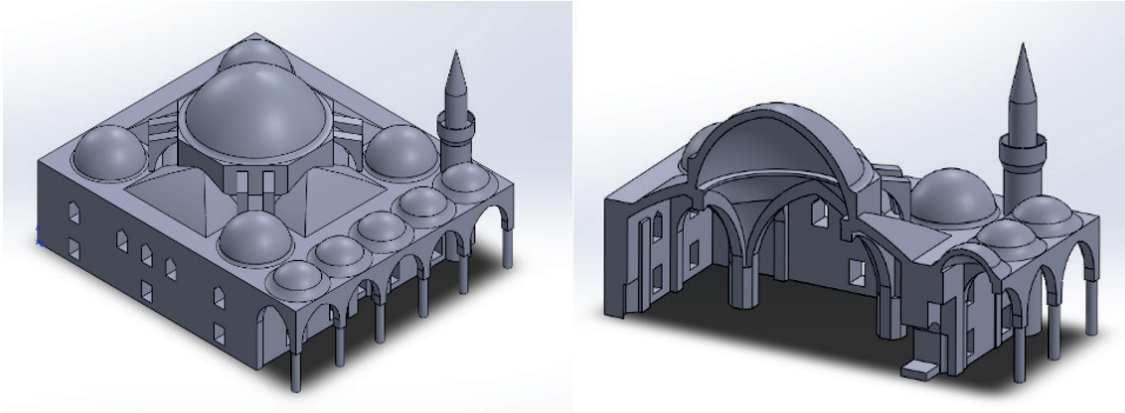
Eserde merkez kubbeyi taşıyan fil ayaklarının ve kemerleri oluşturan taşların basınç dayanımları, duvarları oluşturan taşlarla (25,6 MPa) aynı kabul edilmiştir. Fil ayaklarının ve kemerlerin dayanımları Bölüm 3.2.1'de elde edilen dış duvar

dayanımıyla (5,63 MPa) aynı alınmıştır. Literatüre bakıldığında kubbe kısımlarının elastisite modülleri için kullanılan değer ortalama 3000 MPa olarak önerilmektedir [3, 5]. Bu sebeple hem literatüre bağlı kalmak adına hem de Eş. 1 ve Eş. 5 kullanılmasıyla fil ayakları, kemerler ve kubbelerin dayanımları Tablo 2’de verildiği gibi kabul edilmiştir. Görüldüğü gibi tarihi eserlerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi oldukça zordur. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi için farklı varsayımlar, kabuller ve analitik öneriler dikkate alınarak, yukarıdaki yöntem önerilmiş ve malzeme parametreleri belirlenmiştir. Erzurum Lala Paşa Cami malzeme özellikleri Tablo 2’de verildiği gibi kabul edilmiş ve analizler bu değerlere göre yapılmıştır.

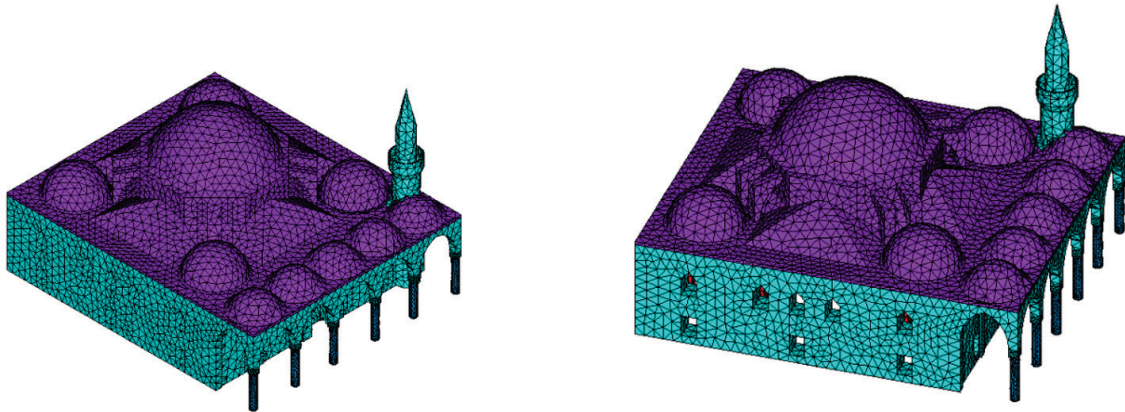
#### 4. SONLU ELEMAN MODELİ (FINITE ELEMENT MODEL)

Tarihi yığma yapıların taşıyıcı sistemleri, geleneksel yapıların taşıyıcı sistemlerinden oldukça farklıdır. Cami gibi

değişik yapısal taşıyıcı formların iç içe kullanıldığı yığma yapıların hesap modellerinin klasik elemanlarla oluşturulması ve davranışlarının belirlenmesi oldukça zordur. Mimari detaylarından kaynaklanan karmaşıklık, bu yapıların modellenmesinde sorunlar çıkarmaktadır. Bilgisayar teknolojisinin ve yazılımların gelişmesi, yığma yapıların davranışlarının üç boyutlu modellenerek belirlenmesine olumlu katkı sağlamıştır. Karmaşık mimarili camiler, hamamlar, köprüler ve birçok yığma yapının modellenmesi imkânlı hale gelmiştir. Bu çalışmada yapısal davranışa etki etmediği düşünülen mimari ince unsurlar modellenmemiş, göz ardı edilmiştir. Şekil 5’de görüldüğü gibi Lala Paşa Camisi, SolidWorks [25] yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Oluşturulan model ANSYS APDL [26] yazılımına aktarılmış ve sonuçta 17860 düğüm noktalı ve 66521 sonlu elemanlı model elde edilmiştir (Şekil 6). Sonlu eleman modelinde SOLID65 elemanı kullanılmıştır. SOLID65 elemanı, her düğüm noktasında üç öteleme serbestlik derecesine sahip sekiz düğüm noktasından oluşan



Şekil 5. Lala Paşa Camisinin SolidWorks modeli (SolidWorks model of Lala Pasha Mosque)

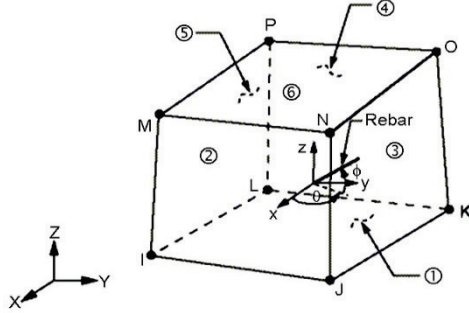


Şekil 6. Lala Paşa Caminin ANSYS modeli (ANSYS model of Lala Pasha Mosque)

Tablo 2. Erzurum Lala Paşa Camisi'nin malzeme özellikleri (Materials properties of Erzurum Lala Pasha Mosque)

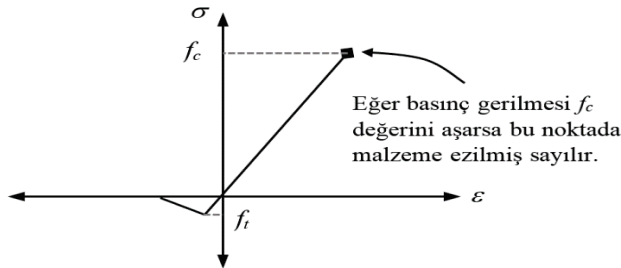
Cami Bölümü	Elastisite Modülü, MPa	Basınç Dayanımı, MPa	Çekme Dayanımı, MPa
Duvarlar	3920	3,92	0,3
Fil Ayakları ve Kemerler	5630	5,63	0,3
Kubbeler	3000	3,00	0,3

bir elemandır. Bu 3D katı eleman, çekme gerilmelerinde çatılma, basınç gerilmelerinde ezilme özelliklerine ve plastik şekil değiştirme yeteneğine sahiptir. Kullanılan malzeme izotropik olarak tanımlanmıştır. Geometri, düğüm yerleri ve koordinat sistemi Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. SOLID65 elemanı geometrisi (Geometry of SOLID65 element) [26]

Malzeme modeli olarak beş parametrelili Willam-Warnke modeli kullanılmıştır [27]. Bu modelde taşın çekme ve basınç dayanımları kullanılarak malzemenin kırılma yüzeyi oluşturulur. Malzemenin davranışı kırılma anına kadar doğrusaldır ve kırılma gerilmesi güç kaybından dolayı ilk göçme yüzeyinde sonuçların sıfır olması ile rijitliğin azalmasına katkıda bulunarak eleman rijitliğini azaltır. Sargısız beton ve taş-toprak yığma gibi malzemelerde bu model yeterli olurken malzemenin en büyük gerilmeye ulaştıktan sonra sergileyeceği dayanımda yumuşama tam olarak modellenemez. Bundan dolayı Willam-Warnke modeli programda mevcut plastisite modellerinden birisiyle birlikte kullanılarak ezilme davranışı daha gerçekçi modellenebilir. Ancak yığma yapı hesaplamalarında basınç altında ezilmeden ziyade malzemenin çekme dayanımının çok düşük olmasından dolayı (ihmal edilebilir) birimler arasında ayrışma problemi ortaya çıkacağından, Willam-Warnke modelinin kendi başına kullanımının yeterli olacağı düşünülmüştür. Bir eksenli gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Şekil 8’de verilmiştir.



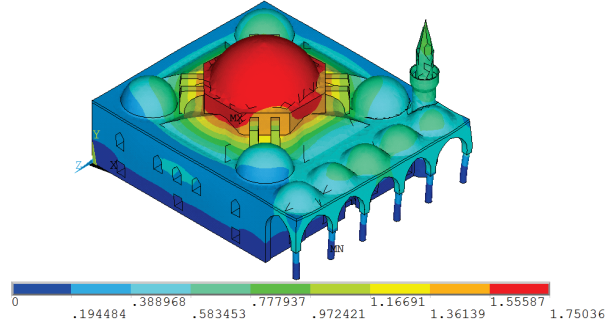
Şekil 8. ANSYS’de Willam-Warnke bir eksenli gerilme durumu (Willam-Warnke uniaxial stress condition in ANSYS) [27]

## 5. YAPISAL ANALİZ (STRUCTURAL ANALYSIS)

### 5.1. Statik Analiz (Static Analysis)

Erzurum Lala Paşa Camisinin kendi ağırlığı altında statik analizi gerçekleştirilmiştir. Yapıda yük aktarımı kubbelerden

kasnaklar yardımıyla kemerlere, kemerlerden ortada bulunan fil ayaklarına ve dört bir yandaki taşıyıcı duvarlara aktarılmaktadır. Yapılan analize göre en büyük yer değiştirmenin düşey yönde ve ana kubbenin tepe noktasında meydana geldiği, maksimum yer değiştirmenin 1,75 mm’ye ulaştığı görülmektedir (Şekil 9).



Şekil 9. Yapının kendi ağırlığı altındaki statik analizinden elde edilen düşey yer değiştirmeler (mm) (Vertical displacements obtained from static analysis under self-weight)

Cami taşıyıcı sisteminde meydana gelen basınç ve çekme gerilme değerleri incelendiğinde, basınç gerilmelerin ana kubbeyi taşıyan fil ayakları ile bu fil ayaklarının bağlantısını sağlayan kemerlerin birleşim yerlerinde yoğunlaştığı ve basınç gerilmesi olarak maksimum 1,78 MPa değerine ulaştığı görülmektedir (Şekil 10a). Çekme gerilmeleri ise yarım kubbeler ile duvarların birleşim bölgelerinde, pencere boşluklarının üst kısımlarında, son cemaat yerindeki kemerlerin kilit taşı bölgelerinde yoğunlaştığı ve maksimum çekme gerilmesinin 0,25 MPa değerine ulaştığı görülmektedir (Şekil 10b). Elde edilen gerilme değerleri, çalışmada seçilmiş olan 5,63 MPa basınç mukavemeti ve kabul edilen çekme mukavemeti değeri olan 0,3 MPa’dan küçüktür. Bu nedenle statik durumda kendi ağırlığından meydana gelen gerilmeler açısından yapı yeterli güvenliğe sahiptir. Bu tür yapıların düşey yükler altındaki hesabında elde edilen gerilmelerin ve yer değiştirmelerin değerlendirilmesinde dikkat edilmesi gereken önemli bir hususta nümerik analizde yükler model üretildikten sonra yapıya uygulandığından, yük etkisiyle alt kotlarda oluşacak şekil değiştirmeler üst kotlarda mesnet kayması veya çökmesine benzer bir etki oluşturarak özellikle çekme gerilmelerinin artmasına neden olurken, gerçekte yapı aşağıdan yukarıya aşamalı olarak inşa edildiğinden üst kotlarda gerilmeler analizden elde edilen değerlerden daha düşük olacaktır. Şekil 10b’de çatı örtüsünün duvar üst noktalarına birleştiği bölgelerde çekme gerilmelerinin yüksek olması bu nedendir. Çatı örtüsünden aktarılan yük, fil ayaklarının daha rijit olan duvarlara göre daha fazla eksenel deformasyon yapmasına sebep olmakta dolayısıyla duvar üstlerinde çekme etkisi artmaktadır.

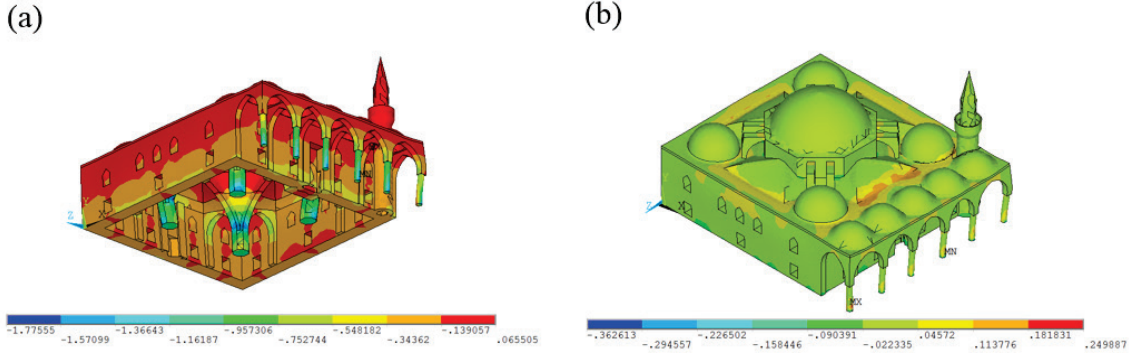
### 5.2. Modal Analiz (Modal Analysis)

Lala Paşa Camisi’nin dinamik yapısal çözümlerinde öncelikle modal analiz sonucunda elde edilen mod şekilleri ve titreşim periyotları hesaplanmıştır. Çözümler 20



modda yapılmış ve ilk iki mod minareye ait modlar çıkmıştır. Bu iki mod şekli yapının bütünü temsil etmeyen lokal modlar olduğu için dikkate alınmamıştır. Yapının modları belirlenirken yapının hakim ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Tablo 3'te minare modlarına (Mod 1-2) ve

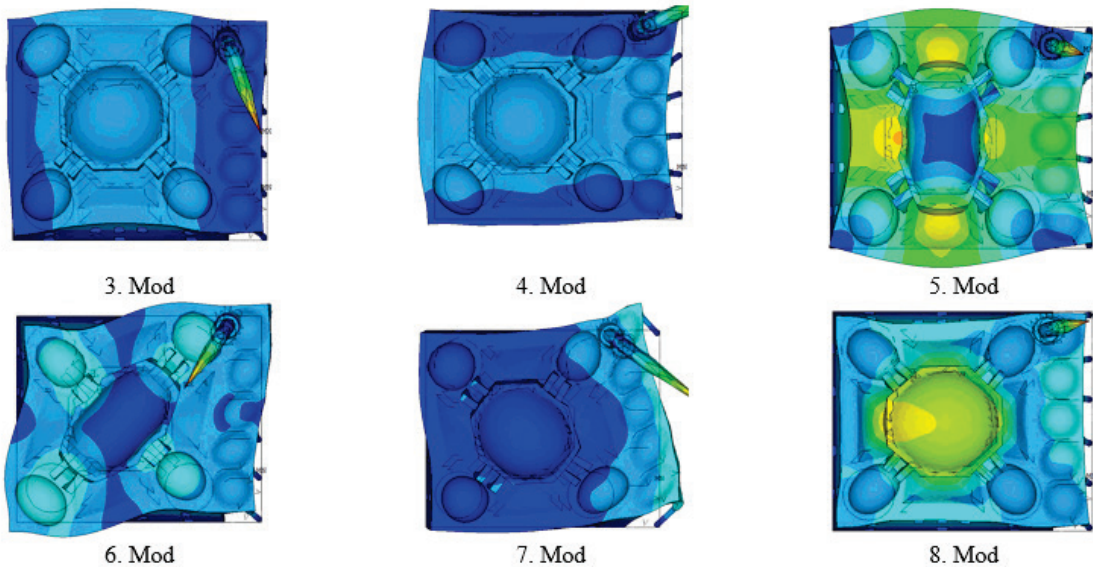
yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen hakim ilk altı moda (Mod 3-8) ait frekans ve kütle katılım oranları verilmiştir. Şekil 11'de hakim altı moda ait şekil değiştirme halleri gösterilmektedir. Yapının toplam kütlesi 5679 ton olarak hesaplanmıştır.



Şekil 10. Statik analiz sonucunda elde edilen a) basınç gerilmeleri (MPa) b) çekme gerilmeleri (MPa)  
(Static analysis results (a) compressive stresses (b) tensile stresses)

Tablo 3. İlk sekiz moda ait frekanslar, periyotlar ve kütle katılım oranları  
(Frequencies, periods and mass participation ratios for the first eight modes)

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Küt. Kat. Oranı (x doğ.-yatay)	Küt. Kat. Oranı (y doğ.-düşey)	Küt. Kat. Oranı (z doğ.-yatay)	Küt. Kat. Oranı (y dönme)
1	7,06	0,142	0,035	0,53E-4	0,026	0,60E-4
2	7,29	0,137	0,026	0,36E-4	0,033	0,096
3	8,44	0,119	0,06	0,48E-5	0,56	0,494
4	8,50	0,118	0,55	0,79E-4	0,06	0,568
5	9,30	0,108	0,57E-3	0,25E-4	0,36E-4	0,569
6	11,74	0,085	0,25E-4	0,30E-3	0,84E-3	0,581
7	12,55	0,080	0,13E-3	0,97E-4	0,14E-1	0,836
8	12,70	0,079	0,44E-4	0,16	0,41E-4	0,845



Şekil 11. İlk altı hakim moda ait şekil değiştirmeler (Deformed shapes of first six dominant modes)

Modal şekillere bakıldığında yapının 3. modu doğu-batı doğrultusunda enine ve burulma, 4. Modu kuzey-güney doğrultusunda enine ve burulma, 5. Mod ve üstü modlar burulma ve 8. Mod düşey ve burulma modudur. Modlardaki şekil değiştirmeler incelendiğinde deprem sırasında son cemaat yeri, ana kubbe ve minarenin zorlanacağı söylenebilir. Ayrıca doğu-batı doğrultusunda duvarlar ve özellikle son cemaat yerinin mesnetlendiği kuzey cephesindeki duvarda, düzlem dışı hareketlilik sebebiyle hasar gözlemlenebilir.

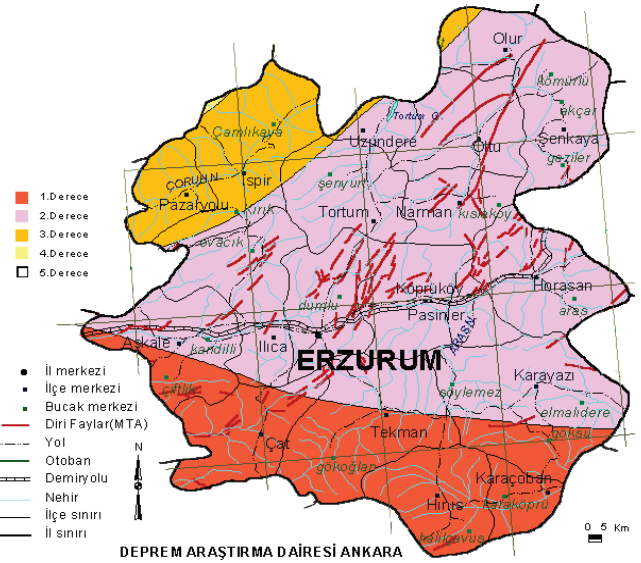
### 5.3. Deprem Analizi (Earthquake Analysis)

Doğu Anadolu Bölgesi bulunduğu konum sebebiyle tarih boyunca birçok büyük ve küçük depreme maruz kalmıştır. Tarihi kaynaklara bakıldığında 1790, 1843, 1850, 1852, 1859, 1868 yıllarında can ve mal kaybına neden olmuş depremler görülmektedir. 1900 yılından günümüze kadar meydana gelen büyük depremler şöyle sıralanabilir; 1924 Horasan M6,8, 1946 Hınıs M5,9, 1952 Hasankale M5,8, 1966 Hınıs-Varto M6,8, 1983 Erzurum-Kars M6,9, 1984 Balkaya-Şenkaya M6,4, 1999 Şenkaya M5,1 ve 2004 Aşkale M5,6 olarak sıralanabilir [28]. Vakıflar Erzurum Bölge Müdürlüğü'nden alınan bilgiye göre, yapı belirtilen bu depremler esnasında herhangi bir ciddi hasar almamıştır. Bu çalışmada Lala Paşa Camisi'nin dinamik çözümlemesi zaman tanım alanı hesap yöntemiyle, 13 Mart 1992 tarihinde Erzincan'da meydana gelen 6,8 büyüklüğündeki depremin doğu-batı ve kuzey-güney ivme bileşenleri ve ivme spektrumu dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 13). 1992 Erzincan depremi büyüklüğünde bir depremin yapının bulunduğu alanda meydana gelmesi ön görülmemektedir. Ancak bu çalışmada yapının olası bir depremde sismik performansından ziyade, yapı kapasitesinin belirlenmesi hedeflendiği için 1992 Erzincan deprem kaydı gibi yapılar üzerinde yüksek süneklilik talebi oluşturacak bir depremin kullanılmasına karar verilmiştir. Dinamik analizler efektif deprem yükü konsepti üzerinden gerçekleştirilmiştir [29]. Dinamik davranış, yer ivmesi değerleri yapı üzerinde tüm düğüm noktalarına etkiyen bir ivme alanı oluşturacak şekilde uygulanarak ve malzemenin doğrusal olmayan davranışı dikkate alınarak Eş. 6'nın çözümüyle hesaplanmıştır. Yapıda %3'lük bir sönüm Rayleigh sönüm modeli kullanılarak uygulanmıştır ( $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$ ). Dinamik analizlerde malzeme için doğrusal olmayan malzeme modelleri kullanıldığında sönüm için yüksek değerlerin kullanılması gerekmez.

$$[M].\{\ddot{u}\} + [C].\{\dot{u}\} + [K].\{u\} = -[M].\{\ddot{u}_g(t)\} \quad (6)$$

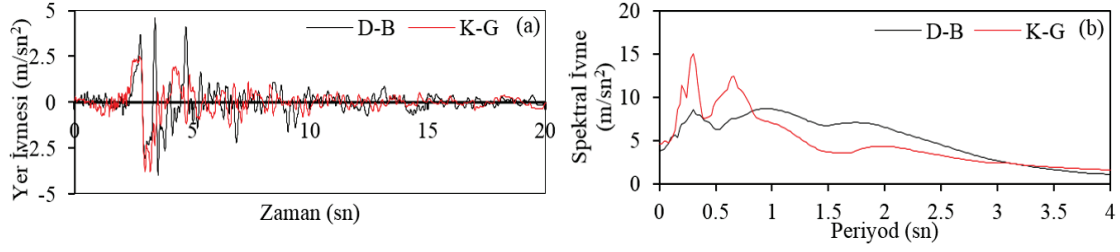
Dinamik analiz sonucunda yapıda oluşan yer değiştirmeler Şekil 14'te gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 2,50'nci saniyeye kadar yer değiştirmeler kabul edilebilir seviyededir. Ancak bu zaman diliminde minare tepesinde meydana gelen yer değiştirme miktarı oldukça fazladır. 2,75'inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. 2,85'inci saniyede, yapının minaresi aşırı yer değiştirmeye maruz kalmış ve ağır hasarlı duruma

gelmiştir. Bu zaman diliminde, yapının merkez kubbesi x-z doğrultusunda 4-7 cm aralığında yer değiştirmeye maruz kalmıştır. 2,95'inci saniyede yapının güney-batı kısmında bulunan küçük kubbe ciddi hasar çatlakları oluşmaya başlamaktadır. Bununla beraber yapının son cemaat yerindeki kemerler ve kubbeler de ciddi yer değiştirmeye maruz kalmaktadır. 3,0'uncü saniyede, yapının son cemaat yerinin de aşırı yer değiştirmeden dolayı göçeceği değerlendirilmektedir. Yapının ana kubbesinde ve yapının doğu kısmında pencere boşluklarına doğru ilerleyen ciddi hasar çatlakları oluşmaktadır. 3,05'inci saniyede, yapının büyük kısmında ciddi hasar çatlakları oluşarak yapıda göçme meydana gelmesi ön görülmektedir.

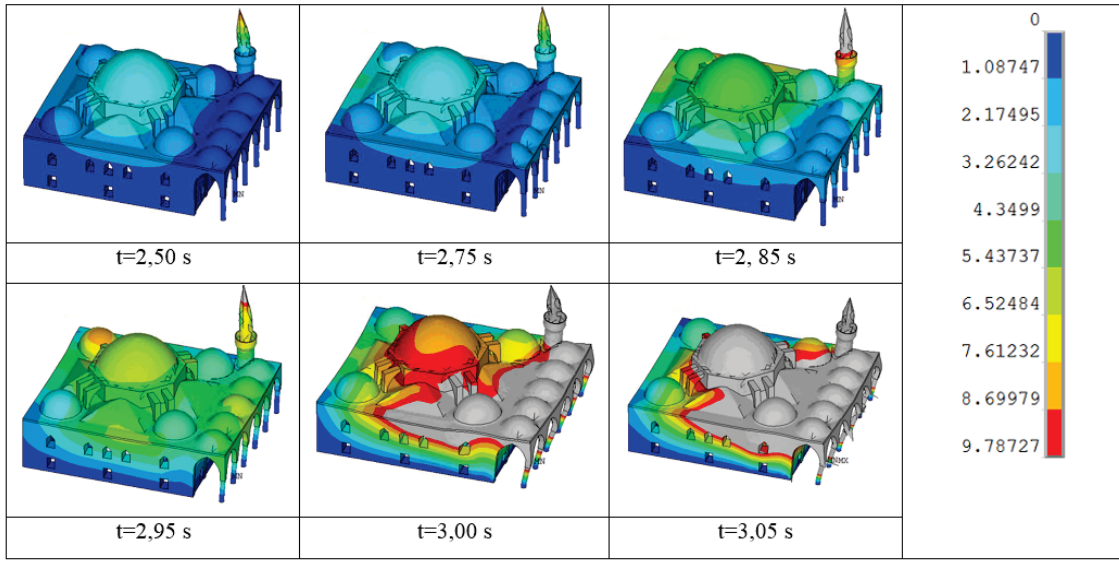


Şekil 12. Erzurum İli Deprem Haritası (Erzurum city earthquake intensity map) [30]

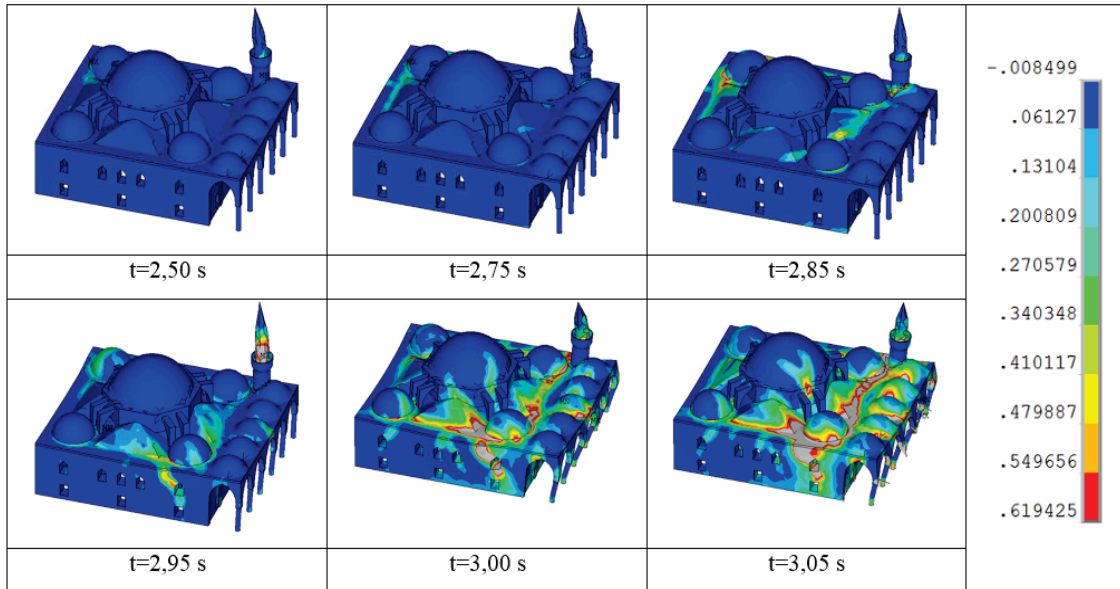
Dinamik analiz sonucunda yapıda oluşan asal birim şekil değiştirmeler Şekil 15'te gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 2,50'nci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir ancak yapının kuzeybatısında bulunan küçük kubbe çevresinde ve minarenin şerefe kısmında şekil değiştirmeler yoğunlaşmıştır. 2,75'inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında yapı mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. 2,85'inci saniyede, yapının minaresi şerefe ve duvar üst noktası seviyesinde aşırı şekil değiştirmeye maruz kaldığı için minarenin göçmesine sebep olacak çatlaklar meydana gelmiş ve minarenin göçme bölgesine geçtiği değerlendirilmiştir. Yine bu zaman diliminde yapı ile son cemaat yerinin mesnetlendiği bölgelerde şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı görülmektedir. 2,95'inci saniyede yapının doğu kısmında bulunan yarım kubbenin mesnet bölgesinden pencere boşluğuna doğru bir hat şeklinde ilerleyen geniş hasar çatlakları meydana gelmiştir. 3,00'uncü saniyede, yapının son cemaat yerinde büyük çatlaklardan dolayı göçme meydana geleceği değerlendirilmektedir. Doğu kısmında pencere boşluğuna doğru oluşan çatlak hattı, doğu taşıyıcı duvarının göçmesine sebep olmuştur. Yine bu zaman diliminde yapının hemen her yerinde ciddi çatlaklar oluşmuştur.



Şekil 13. a) Erzincan depremi D-B ve K-G ivme bileşenleri b) Erzincan depremi D-B ve K-G ivme spektrumları  
 ((a) Erzincan Earthquake E-W and N-S acceleration components (b) Erzincan Earthquake E-W and N-S acceleration response spectra)



Şekil 14. Dinamik analiz sonucu yapıda zamanla meydana gelen yer değiştirmeler  
 (Progress of displacements in structure during the dynamic analysis)



Şekil 15. Dinamik analiz sırasında meydana gelen asal birim şekil değiştirmeler  
 (Principal strains developed during dynamic analysis)

3,05'inci saniyede, yapının ana kubbesinde, küçük kubbelerinde, pencere boşluklarının çevrelerinde çatlaklar oluşmuş ve yapının güneybatı köşesi hariç tamamen göçmesi ön görülmektedir. Şekil 16'da yapının kare planı oluşturan dış duvarların (son cemaat yeri hariç) üst köşelerinde zamana bağlı hesaplanan x ve z yatay yönlerindeki yer değiştirme grafikleri gösterilmiştir. Yapının güneybatı kısmı (2 nolu veri noktası) hariç diğer kısımlarda oluşan yer değiştirmeler, yapının dinamik yük nedeniyle göçtüğünü göstermektedir. 2 nolu veri noktasında göçme meydana gelmemesinin muhtemel sebebinin analizlerde kullanılan deprem bileşenlerinin uygulanış yönüyle alakalı olduğu değerlendirilmektedir. Şekil 14a'da gösterilen iki yer ivmesi bileşenin etkin bileşkesi model üzerinde 2-4 diyagonalı doğrultusunda (yani güneybatı-kuzeydoğu istikametinde) en büyük değerini almaktadır ve yaklaşık olarak 1,1 saniye periyotlu ve  $6,1 \text{ m/s}^2$  genişliğinde sinüzoidal bir atım şeklinde etkimektedir. Bu istikamette bu atım bağlı olarak hesaplanan en büyük yer hızı  $1,95 \text{ m/s}$  olmaktadır. Bu değer, Erzincan Depreminin yıkıcı şiddetini göstermektedir. Bu değer büyük depremlerde yakın sahada gözlemlenen, oldukça yüksek bir yer hızına tekabül etmektedir. Bu atım etkisinde 2 numaralı köşe önce basınç sonra çekmeye maruz kalırken, 4 numaralı köşede önce çekme sonra basınç gerilmeleri meydana gelmektedir. Çekme etkisinde oluşan çatlaklar sonucu 4 nolu köşeye birleşen duvarlarda rijitlik kaybı meydana gelmekte ve izleyen çevrimde basınç ve kesme kuvvetleri etkisiyle bu bölgede ağır hasar ortaya çıkmaktadır (Şekil 16,  $t=2,95\text{-}3,00$  saniyeler).

#### 5.4. Duvarların Yatay Kuvvet Kapasitelerinin Belirlenmesi (Determination of Walls Lateral Load Capacities)

Şekil 17'de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki x ve z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir. Yapı son cemaat yeri ihmal edildiğinde kare plana ve simetrik bir yapıya sahip olduğundan her iki yönde de benzer yük taşıma kapasiteleri elde edilmiştir. İdealize edilmiş yük-yer değiştirme ilişkisi yapının yatay deprem yükü kapasitesinin yaklaşık olarak 20000 kN (maksimum 21570 kN) ve yanal akma yer değiştirme değerinin yaklaşık olarak 3 mm olduğunu göstermektedir. Yapının taban kesme kuvveti katsayısı  $V_y/W=21570/(5679 \times 9,81)=0,39$  olarak ifade edilebilir. Bu değer, Şekil 13b'de yapıya etki eden spektral ivme değeri  $S_{ax}(T_3=0,12s) \approx S_{az}(T_4=0,12s)=0,55g$  ile karşılaştırıldığında yapının gelen deprem yükü altında yeterli elastik dayanıma sahip olmadığı, dolayısıyla hasar görmesinin öngörülebilir bir durum olduğu anlaşılmaktadır.

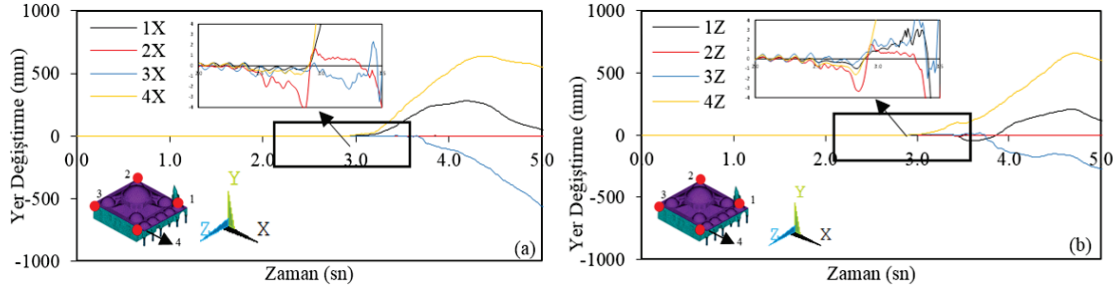
Şekil 18'de dört ana taşıyıcı duvarın tepe yer değiştirmesi – taban kesme kuvveti grafikleri verilmiştir. Grafikler, duvarların birleşim bölgeleri göz önüne alınarak ve hariç tutularak değerlendirilmiştir (Şekil 19). Duvarların birleşim bölgeleri göz önüne alındığında, taşıma kapasitelerinin arttığı tüm grafiklerde görülmektedir. Aynı zamanda, duvarların hepsi belli yer değiştirme değerleri arasında

elastik davranmakta iken, önce doğrusal olmayan davranışın geliştiği sonrasında malzemenin taşıyıcı özelliğini kaybetmesi neticesinde duvarların göçtüğü grafiklerde görülmektedir. Düzlem içi davranışta elastik davranış için duvar üstünde ( $\sim 8,4 \text{ m}$  yükseklikte) yer değiştirme limiti 1 mm civarında olduğu görülürken, düzlem dışı davranışta 3 mm'den sonra doğrusal olmayan davranış gözlemlenmiştir.

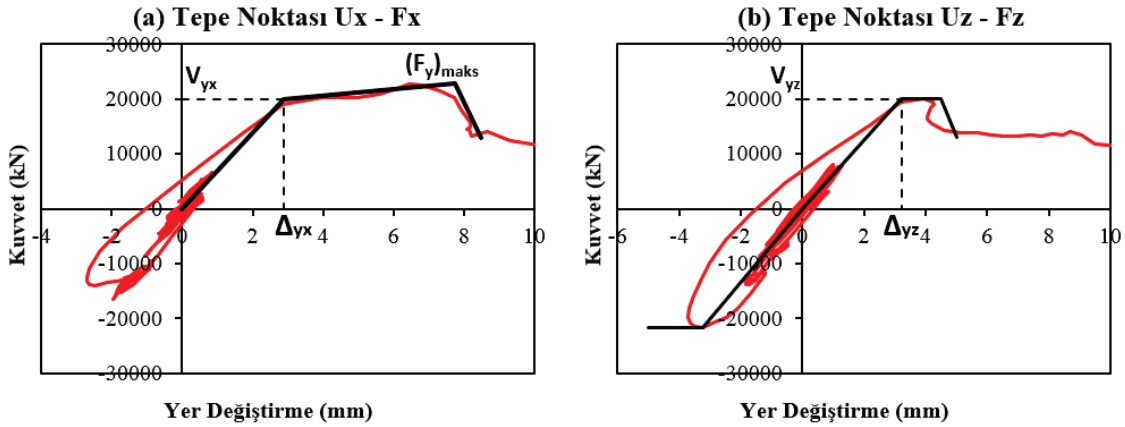
Bu değerlerin küçüklüğüne bakarak yığma yapıların deprem yükleri altında dayanımları aşılanaya kadar rijit davrandıkları, dayanımın aşılmasından sonra çatlakların ve hasarın hızlı bir şekilde geliştiği sonucu çıkarılabilir. Bu noktada, duvar malzemesine tanımlanan elastik modülün, Eş. 5 ile hesaplandığını ve bu eşitlikte 1000 olan katsayının Türk Deprem Yönetmeliği'nde [31] 200, FEMA 356'da [32] 550 olarak önerildiğini hatırlatmak isteriz.  $E=200f_k$  kullanılacak olursa yatay yük değerlerinin fazla değişmediği ancak mevcut yer değiştirme değerlerinin yaklaşık olarak dört-beş katına çıktığı görülmüştür.

Bu çalışmada kullanılan basınç altındaki elastik modül değeri ile daha rijit bir davranış elde edilmektedir. Şekil 18'e bakıldığında dört duvarın düzlem içi yük taşıma kapasitelerinin benzer değerler aldığı anlaşılmaktadır (Şekil 18a-b-g-h). Benzer dört duvarın köşe bölgeleri dahil edilerek hesaplanan ortalama düzlem içi yük taşıma kapasitesi 6407 kN'dur. Düzlem dışı davranışta duvarın devrilme (eğilme) hareketinin binanın içine ve dışına olması duruma bağlı olarak iki farklı davranış ve yük kapasitesi ortaya çıkmaktadır. Şekil 18c ve 18e'de görüldüğü gibi duvar dışarı doğru eğilirken artan basınç gerilmelerine bağlı olarak yük-yer değiştirme ilişkisinde kapasite artmaktadır (deprem yükleri devrilme yönüyle aynıdır ve bu sırada duvardaki basınç kuvveti artmaktadır, Şekil 21a). Duvar köşelerden mesnetlendiği dik duvarlardan birleşim bölgelerini de içine alacak şekilde ayrılmakta ve devrilme hareketi yapmaktadır (Şekil 20a). Şekil 18c ve 18e'de görülen sünek davranış bu devrilme hareketinin neticesinde ortaya çıkmaktadır. Aynı sırada paralel karşı duvarlar içe doğru hareket etmekte (Şekil 18d ve f), dik duvarlar bu eğilme hareketine karşı mesnet etkisi göstermekte ve hareketi kısıtlamaktadır. Şekil 20a'da görüldüğü gibi bu hareketi yapan güney duvarında asal gerilmeler duvarın orta bölgesinden başlayarak açılı bir şekilde mesnetlere doğru ilerlemektedir. Yani bu mekanizma sırasında duvarın tamamı hareket halinde değildir. Bu duvarlarda düşey yüke bağlı basınç kuvveti etkisi azalmaktadır (Şekil 21b).

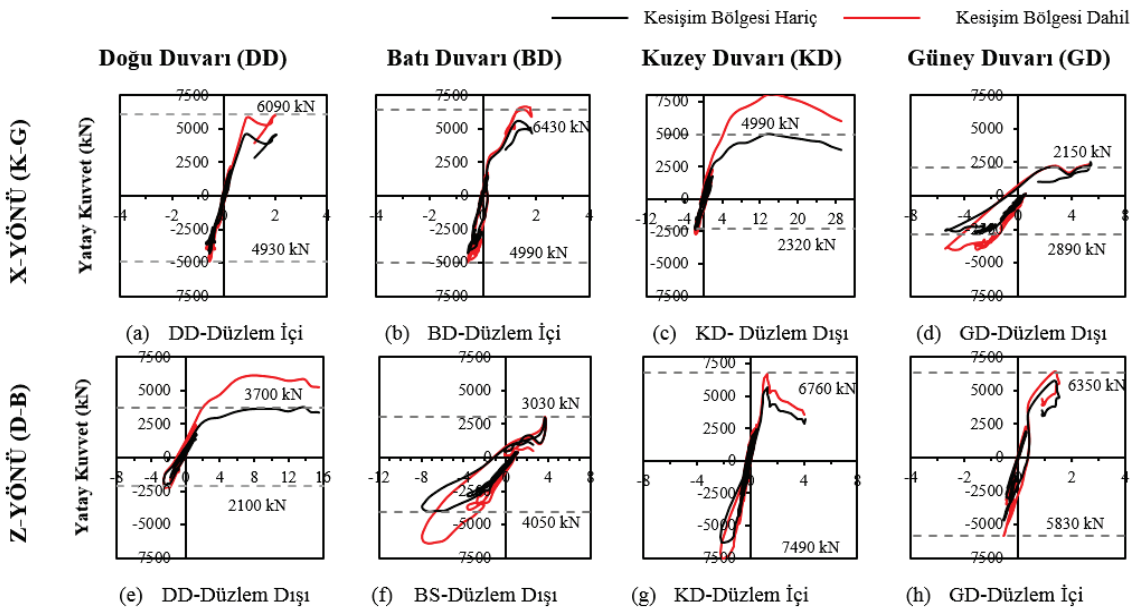
Kesişim bölgeleri hariç tutularak basınç ve çekme tarafındaki duvarların düzlem dışı yük taşıma kapasiteleri sırasıyla ortalama olarak 4345 kN ve 2590 kN şeklinde elde edilebilir. Bu değerler kullanılarak dört duvar için toplam yatay yük kapasitesi 19749 kN olarak hesaplanır. Dolayısıyla kalın yığma duvarlı, yani burada incelenen türdeki yapıların yatay deprem yükü kapasitesinin hesabında sadece deprem uygulama yönüne paralel duvarlar değil, aynı zamanda dik olan duvarların da dikkate alınması gerektiği görülmektedir.



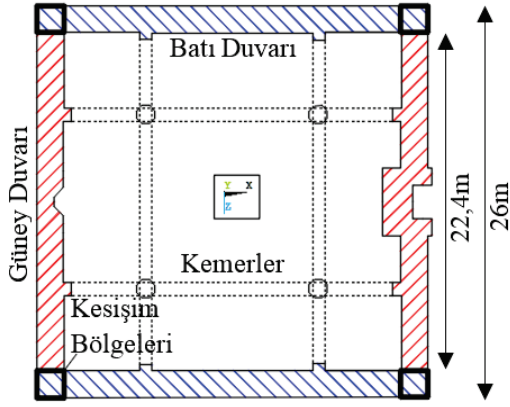
Şekil 16. Dinamik analizde yapının köşelerinde oluşan yer değiştirmeler (mm) a) x doğrultusu b) z doğrultusu (Displacement time-histories at the corners of structure during the dynamic analysis (mm), (a) x direction; (b) z direction)



Şekil 17. Dinamik analiz sonucu elde edilen taban kesme kuvveti – yer değiştirme eğrileri (Global base shear – displacement curves obtained from dynamic analysis)



Şekil 18. Dinamik analiz sonucunda, taşıyıcı duvarların tepe yer değiştirmesi - taban kesme kuvveti eğrileri (Base shear – top displacement curves of lateral load bearing walls obtained from dynamic analysis)



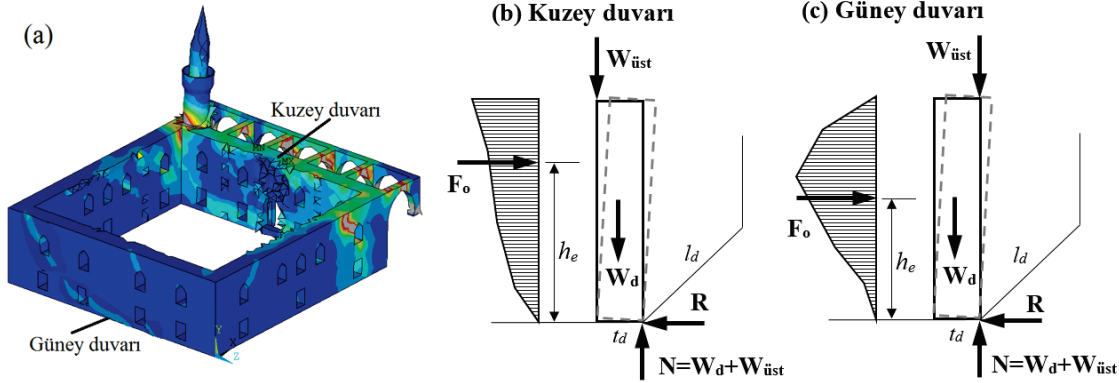
**Şekil 19.** Duvarların kesme dayanımında esas alınan alanlar (Wall areas used in the calculation of wall shear strength)

Yukarıda malzeme karakteristik değerlerinin tayin edilmesi, katı model oluşturulması, sonlu eleman yöntemiyle dinamik hesabın yapılıp sonuçların değerlendirilmesi aşamaları ifade edilen taş yığma cami yapısının sismik değerlendirilme süreci, içerdiği zorluklardan dolayı uygulamada çalışan

mühendisin akademik birikim sahibi olmadan kolaylıkla gerçekleştiremeyeceği bir süreçtir. Dolayısıyla yapının sismik kapasitesi belirlenirken daha basit ancak etkili yöntemlere ihtiyaç vardır ve bu noktada yönetmelikler devreye girer. Yapıyı oluşturan taşıyıcı duvarların kapasitelerinin belirlenmesi, yapının deprem performansının belirlenmesinde önemli bir adımdır. Yığma duvarların yatay yük kapasiteleri analitik olarak Eş. 7'ye göre belirlenebilir. Taşıyıcı duvarlardan boşluklar çıkarılarak hesaplanan net duvar uzunluğu,  $l_d$ , Şekil 19'a göre mesnet kısımları dâhil edilirse 20,05 m, mesnet kısımları hariç tutulursa 16,45 m'dir. Duvar kalınlığı ise,  $t_d$ , 1,8 m'dir. Taslak olarak yayınlanmış Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde [33], duvar karakteristik kayma dayanımı,  $f_{vk}$ , Eş. 8 ile belirlenmiştir. Eşitlikte bulunan 0,4 katsayısı halen yürürlükte olan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelikte 0,5 olarak kabul edilmiştir.

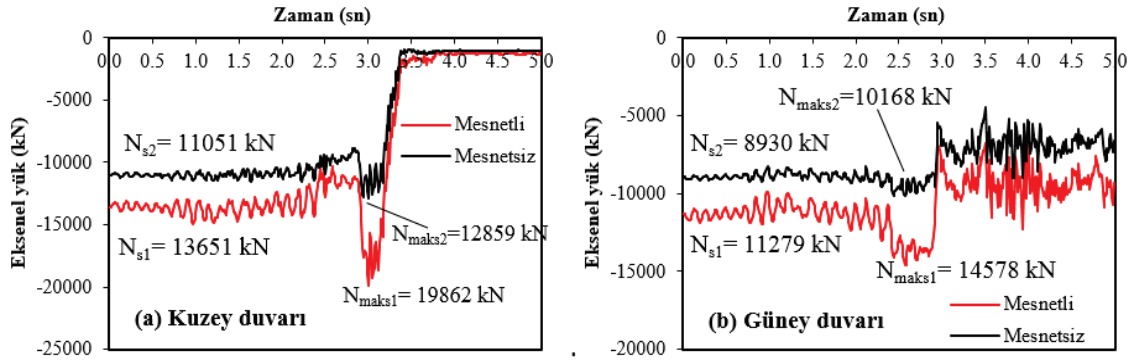
$$V_{du\ var} = l_d \times t_d \times f_{vk} \quad (7)$$

$$f_{vk} = f_{vko} + 0.4\sigma_d \leq 0.10f_b \quad (8)$$



**Şekil 20.** a)  $t=2.98s$ 'de ana duvarlarda asal birim şekil değiştirme dağılımı, kuzey duvarı blok olarak dışa doğru devrilmeye başlamıştır b) kuzey duvarı rijit blok modeli c) güney duvarı rijit blok modeli

(a) Distribution of principal strains on the main walls at  $t=2.98 s$ , the north-wall started to overturn in the outwards direction, (b) north-wall rigid block rocking model, (c) south-wall rigid block rocking model)



**Şekil 21.** Eksenel yükün a) kuzey duvarı altında, b) güney duvarı altında zamana bağlı değişimi (Time dependent variation of axial load (a) at the base of north wall, (b) at the base of south wall )

Burada  $f_{vko}$ , karakteristik başlangıç kayma dayanımı değeri, aynı yönetmelikte bulunan Tablo 11.3'e [31] göre 0,1 MPa alınmıştır. Statik analizden her duvara gelen düşey yük miktarı ortalamada 11280 kN olarak hesaplanmıştır. Bu yük altında duvarın düşey basınç gerilmesi  $\sigma_d$  değeri 0,313 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değerler kullanıldığında duvar karakteristik kayma dayanımı  $f_{vk}=0,225$  MPa olarak elde edilir. Bu değer Eş. 7'ye uygulandığında, her iki yön için tek duvarın düzlem içi yük taşıma kapasitesi  $V_{duvar}$ , mesnet kısımları (köşe birleşim bölgeleri) dâhil edildiğinde 8120 kN, mesnet kısımları hariç tutulduğunda 6662 kN olarak belirlenmektedir. Deprem etkime yönüne bağlı olarak, basınç ve çekme tarafında kalan  $h/t_d$  oranı düşük ( $<4,7$ ) kalın taşıyıcı özellikteki yığma duvarların düzlem dışı yatay yük taşıma kapasitesini belirlemek üzere rijit cisim dinamiği ve statik ilkeleri doğrultusunda Şekil 20'de verilen hesap modelleri kullanılabilir [13, 14]. Her iki model benzer olmakla beraber duvarın devrilme yönüne bağlı olarak üst yapıdan duvara aktarılan düşey yüklerin ( $W_{üst}$ ) duvarın devrilme direncine olan etkisi devreye girmektedir. Bu modelde duvarı devirecek  $F_o$  deprem kuvveti basitçe Eş. 9 ile hesaplanabilir.

$$F_o = \frac{t_d}{h_e} \times \left( \frac{W_d}{2} + W_{üst} \right) \quad (9)$$

Duvarla zemin arasındaki kontak rijit ve noktasal olduğu kabul edilmiştir. Aslında eğilme sırasında duvar altında temas noktasal olmayıp belli bir bölge üzerinde gerçekleşmektedir. Ancak bu temas bölgesinin rijit cisim dinamiğine dayanan benzer modellerle elde edilen uzunluğu oldukça küçük çıktığından ( $<100$ mm) ve sonlu eleman hesapları da bu sonucu desteklediğinden hesaplarda ihmal edilerek modeli basitleştirmek adına temasın noktasal olduğu kabulü yapılmıştır. Ayrıca bazı modellerde pivot-dönme noktasının (veya bölgesinin) malzeme esnekliği de dikkate alınabilmektedir [13]. Bu durum hesaplanacak yer değiştirmeyi etkilemekle beraber yük taşıma kapasitesine etki etmediğinden ihmal edilmiştir. Bu eşitlikte  $h_e$  (dinamik deprem yükü bileşkesinin etkime noktasının zeminden yüksekliği) ve  $W_{üst}$  (üst yapıdan aktarılan dinamik düşey yük) değerlerinin doğru olarak belirlenmesi elde edilecek sonucu doğrudan etkileyecektir.

Kuzey duvarı, yapının yıkılmasına neden olan deprem çevriminde basınç etkisindedir (Şekil 20a). Şekil 21a'da görüldüğü gibi, statik yükler altında kesişim bölgeleri hariç ve dâhil edilerek hesaplanan toplam statik duvar eksenel yükü sırasıyla 11051 kN ve 13651 kN'dur. Duvarın mesnetler dâhil zati ağırlığı 10804 kN'dur. Deprem hesabında basınç etkisiyle en büyük dinamik duvar eksenel yükü mesnet bölgesi hariç ve dâhil olmak üzere sırasıyla 12859 kN ve 19862 kN olmaktadır. Şekil 20a'nın gösterdiği gibi kuzey duvarının devrilme hareketine mesnet bölgeleri ve hatta doğu ve batı duvarlarının bir kısmı pencere bölgelerinden ayrılarak katılmaktadır. Mesnetler hariç bölgeye üst yapıdan gelen yük  $W_{üst}=19862-10804=9058$  kN

olmaktadır. Kuzey ve güney duvarlarına dik doğrultuda uzanan batı ve doğu duvarları, duvarlar bina içine doğru hareket ederken mesnet görevi görürken, duvarların bina dışına doğru devrilme hareketinde mesnet olarak etkinliklerini yitirmektedirler (Şekil 20a). Bu durumda kütlelerin duvar yüksekliğince düzgün yayılı olduğu dikkate alınarak kuzey duvarına etkiyen dinamik kuvvetlerin dağılımı üçgen olarak kabul edilebilir. Bu şekilde  $h_e=0,67h_{duvar}$  alınabilir. Bu değerler kullanılarak kuzey duvarının düzlem dışı yük taşıma kapasitesi  $(F_o)_{KD}=[1,8/(0,67 \times 8,4)].[(10804/2)+9058]=4624$  kN olarak hesaplanabilir. Aslında bu hesapta kullanılan  $t_d$  değerini daha büyük almakta fayda vardır, çünkü Şekil 19'da görülebileceği gibi kemerlerin duvara birleştiği 0,5 m'lik çıkıntılar, giriş kapısının içe doğru 1,2 m'lik kabartı şeklindeki kaidesi düşey yüklerin dönme noktasına olan mesafesini arttırmaktadır. Şekil 20'de gösterilen modeller yapı geometrisine uygun düzenlenerek daha kesin sonuçlar elde edilebilir. Güney duvarında mesnet bölgeleri hariç tutularak hesaplanan toplam statik eksenel yük 8930 kN'dur. Şekil 20c'de gösterilen modele göre  $W_{üst}$  kuvvetinin etki çizgisi dönme noktasından geçtiğinden Eş. 9'da  $W_{üst}$  ihmal edilerek  $F_o$  yükü hesaplanabilir. Burada bir kabul de  $h_e$  için yapmak gerekir. Güney duvarı bina içine doğru eğilme hareketi yaparken dik iki duvar kenarlarında mesnet görevi yapmakta, duvarın kemer formunda eğilmesine yol açmaktadır. Hesap sonuçlarında ivmelerin duvar yüksekliğince dağılımı dikkate alındığında duvara etkiyen deprem yüklerinin bileşkesinin etkin yüksekliğinin yaklaşık olarak  $h_e=0,5h$  olduğu görülmüştür. Bu değerler ile güney duvarının düzlem dışı yük taşıma kapasitesi  $(F_o)_{GD}=[1,8/(0,5 \times 8,4)].[(8930/2)+0]=1913$  kN olarak hesaplanabilir. Yapının düzlem içi ve düzlem dışı çalışan duvarlarının toplam kapasitesi  $6662 \times 2 + 4624 + 1913 = 19861$  kN olarak hesaplanabilir. Bu değer sonlu eleman yöntemiyle hesaplanan kapasite değerini oldukça yakındır. DBYBHY [31] Bölüm 5.4.4.'te, planda birbirine dik doğrultuların her biri boyunca uzanan taşıyıcı duvarların, pencere ve kapı boşlukları sayılmaksızın toplam uzunluğunun brüt kat alanına oranı ( $l_d/A$ )  $0,21$  m/m<sup>2</sup>'den daha az olmayacaktır hükmüne istinaden, yapılan hesaplamalarda  $l_d/A$  oranı x ve z yönlerinde  $0,077$  bulunmuştur. Hesaplanan oranlar  $0,2$  değerinden düşüktür. Yapının x ve z yönlerinde duvar alanlarının yapının toplam alanına oranları her iki yönde de %14'tür. Bu oran yönetmelikte minimum duvar kalınlığı  $0,5$  m olarak varsayılarak %10 olarak önerilmektedir. Görüldüğü gibi, yapının duvar kalınlığının fazla olması yapının dinamik yükler karşısında yeterli dayanıma ulaşması için yeterli olmamıştır.

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerle inşa edilmiş, Erzurum Lala Paşa Camisi'nin statik ve dinamik analizleri yapılmış ve caminin deprem yükleri altında yapısal performansı incelenmiştir. Dinamik yüklerin uygulandığı deprem analizi sonucunda, yapıda öncelikle minarede, son cemaat yerinde, küçük kubbelerde ve

nihayetinde yapının tamamında ciddi hasarlar meydana geldiği belirlenmiştir. Elde edilen veriler, yapının 1992 Erzincan Depremine benzer bir yer hareketi etkisinde göçeceği yönündedir. Literatürde mevcut malzeme karakteristik değerlerini elde etmek için önerilen bağıntılar incelenerek, yığma türü yapılarda duvarların karma basınç dayanımını ve basınç altında elastik modülü belirlemek üzere bir yöntem önerilmiştir. Kullanılan sonlu eleman ve malzeme modelinin tarihi yapılarda çatlama ve ezilme davranışının modellenmesinde etkin bir şekilde kullanılabilmesi ve bu tür yapılarda oluşabilecek göçme mekanizmalarını ortaya çıkarabilecek yetenekte olduğu gösterilmiştir. Yapının yatay yük kapasitesinin hesaplanmasında yönetmelikte önerilen bağıntıların güvenle kullanılabilmesi belirlenmiştir. Cami türü yapıların bir yönde deprem hesabı yapılırken, bu yöne dik olarak yerleştirilmiş ve her iki ucundan (alttan ve üstten) ve yanlardan mesnetlenmiş duvarların da yanal yük taşıma kapasitesine katkı verdiği belirlenmiştir. Bu katkının özellikle duvar kalınlığı ile birlikte artacağı öngörülmektedir. Bu çalışmada duvarların düzlem dışı yük taşıma kapasitesinin duvarın devrilme-eğilme yönüne, ilgili deprem çevriminde eksenel yük durumuna ve duvarın sınır şartlarına bağlı olduğu gösterilmiştir. Kalın yığma duvarların düzlem dışı yük taşıma kapasitesini hesaplamak üzere rijit cisim dinamiğine dayanan bir model önerilmiştir. Bu çalışmada tek bir yığma yapı için elde edilmiş bu sonuçların güvenle uygulanabilmesi için daha çok ve farklı geometrik özellikte yığma yapı kullanılarak benzer çalışmaların sayısı artırılmalıdır.

## 7. SİMGELER (SYMBOLS)

$f_b$	: taşın (numunenin) basınç dayanımı
$f_m$	: harcın basınç dayanımı
$f_k=f_e$	: duvarın basınç dayanımı
$f_r=f_i$	: moloz duvarın basınç dayanımı
$f_c$	: kompozit kesitin basınç dayanımı
$E$	: duvarın elastik modülü
$l_d, h_d, t_d$	: sırasıyla duvarın genişliği, yüksekliği ve kalınlığı
$f$	: çatlak yoğunluk faktörü
$t_e$	: dış duvar kalınlığı
$t_i$	: iç duvar kalınlığı
$\theta_e$	: dış duvar için doğruluk faktörü ( $\theta_e = 0,7$ )
$\theta_i$	: iç duvar için doğruluk faktörü ( $\theta_i = 1,3$ )
[M]	: sistemin kütle matrisi
[C]	: sistemin sönüm matrisi
[K]	: sistemin rijitlik matrisi
$\{\ddot{u}\}$	: sistemin ivme vektörü
$\{\dot{u}\}$	: sistemin hız vektörü
$\{u\}$	: sistemin yer değiştirme vektörü
$\ddot{u}_g(t)$	: sisteme etki eden ivme vektörü
$f_{vk}$	: duvar karakteristik kayma dayanımı
$f_{vko}$	: karakteristik başlangıç kayma dayanımı
$W_{üst}$	: üst yapıdan duvara aktarılan düşey yük
$F_o$	: duvarı devirecek deprem kuvveti
$h_e$	: dinamik deprem yükü bileşkesinin etkime noktasının zeminden yüksekliği

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Çalık İ., Bayraktar A., Türker T., Determination of the effect on the dynamic behaviour of historical masonry mosques reinforced concrete domes by ambient vibration testing, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (3), 621-630, 2016.
2. Koseoglu G.C. ve Canbay E., Assessment and rehabilitation of the damaged historic Cenabı Ahmet Pasha Mosque, Engineering Failure Analysis, 57, 389-398, 2015.
3. Şeker B.Ş., Doğangün A., Çakır F., Merzifonlu Kara Mustafa Paşa Cami Taşıyıcı Sistemi Üzerine İrdeleme, SDU International Technologic Science, 5, 112-120, 2013.
4. Rovero L. ve Tonietti U., Structural behavior of earthen corbelled domes in the Aleppo's region, Materials and Structures, 45, 171-184, 2012.
5. Mustafaraj E. ve Yardım Y., Conditional Assessment of Historical Structures: Earthquake Performance of Naziresha Mosque, International Students Conference of Civil Engineering, Tirana, Albania, 2012.
6. Atamturktur S., Bornn L., Hemez F., Vibration characteristics of vaulted masonry monuments undergoing differential support settlement, Engineering Structures, 33, 2472-2484, 2011.
7. Lourenço P. B., Ramos L., F., Dynamic Identification and Monitoring of Cultural Heritage Buildings, WCCE-ECCE-TCCE Joint Conference 2, Seismic Protection of Cultural Heritage, Keynote Papers, 55-78, 2011.
8. Akan A.E., Tarihi Ahşap Sütunlu Camilerin Sonlu Elemanlar Analizi ile Taşıyıcı Sistem Performansının Belirlenmesi, SDU International Technologic Science, 2 (1), 41-54, 2010.
9. Karimi A.H., Karimi M.S., Kheyroddin A., Shahkarami A.A., Experimental and Numerical Study on Seismic Behavior of An Infilled Masonry Wall Compared to An Arched Masonry Wall, Structures, 8, 144-153, 2016.
10. Silva B., Benetta M. D., Porto F. D., Modena C., Experimental assessment of in-plane behaviour of three-leaf stone masonry walls, Construction and Building Materials, 53, 149-161, 2014.
11. Kani R. ve Döndüren M.S., Investigation of using ansys software in the determination of stress behaviours of masonry walls under out of plane cycling load, International Journal of the Physical Sciences, 5 (2), 097-108, 2010.
12. Vasconcelos G. ve Lourenço P.B., Assesment of the in-plane shear strength of stone masonry walls by simplified models, structural Analysis of Historical Construvtions, New Delhi, 2006.
13. Costa A.A., Seismic assessment of the out-of-plane performance of traditional stone masonry walls, Ph.D. thesis, Faculty of Engineering of the University of Porto, Portugal, 2012.
14. Melis G., Displacement-based seismic analysis for out of plane bending of unreinforced masonry walls, M.S. Dissertation, ROSE School, Istituto Universitario di Studi Superiori, Universitir di Pavia, Italy, 2002.



15. Gündođdu H., Erzurum: History and civilization, Writers Union of Turkey, Erzurum 2011 Series -1, Ankara-Turkey, 2011.
16. Konyalı I. H., History of Erzurum with monuments and inscription, Ercan Matbaası, İstanbul, Turkey, 1960.
17. Bozal M., Erzurum Yakutiye Lala Paşa Cami Rölöve Restorasyon Restitüsyon Projesi, Envar Mimarlık, 2015.
18. Çamlıbel N., Sinan Mimarlığında Yapı Strüktürünün Analitik İncelenmesi, Doktora Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1998.
19. Bayülke N., Yığma Yapılar, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı-Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, 1992.
20. Demir C. ve İlki A., Characterization of materials used in the multi-leaf masonry walls of monumental structures in İstanbul, Turkey, Construction and Building Materials, 64, 398-413, 2014.
21. Tsoutrelis C.E. ve Exadaktylos G.E., Effect of rock discontinuities on certain rock strength and fracture energy parameters under uniaxial compression, Geotech Geol Eng, 11 (2), 81-105, 1993.
22. Tomazevic M., Earthquake Resistant Design of Masonry Buildings, Singapore: Imperial College Press, 268, 1999.
23. Binda L., Pina-Henriques J., Anzani A., Fontana A., Lourenco P.B., A contribution for the understanding of load-transfer mechanisms in multi-leaf masonry walls: Testing and modelling, Engineering Structure. 28 (8), 1132-1148, 2006.
24. Eurocode 6: Design of masonry structures. Part 1.1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures, European Committee for Standardization, ENV 1996-1-1:1995, 1995.
25. SolidWorks, Modeling Software, 2013.
26. ANSYS, Finite Element Analysis Program, 2015.
27. Willam K.J. ve Warnke E.D., Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete, International Association for Bridge and Structural Engineering, 19, 1975.
28. Erzurum Çevre Durum Raporu, Erzurum Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2011.
29. Kazaz İ., Yakut A., Gülkan P., Numerical simulation of dynamic shear wall tests: A benchmark study, Computers & Structures, 84 (8-9), 549-562, 2006.
30. T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı, Sayısal Veriler, <http://kyh.deprem.gov.tr/ftpt.htm> Erişim tarihi Ocak 30, 2013.
31. T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, 2007.
32. NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. FEMA 356. Federal Emergency Management Agency, Washington DC, 2000.
33. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Taslak, 2016.

