Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi
Fen ve Mühendislik Dergisi
Cilt 20, Sayı 58, Ocak, 2018

Dokuz Eylul University-Faculty of Engineering
Journal of Science and Engineering
Volume 20, Issue 58, January, 2018

DOI: 10.21205/deufmd. 2018205804

Tarihi Erzurum Yakutiye Medresesi'nin Yapısal Davranışının İncelenmesi

İrfan KOCAMAN*[1], İlker KAZAZ[2], Dilek OKUYUCU[3]

[1]Erzurum Teknik Üniversitesi, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25050, Erzurum (ORCID: 0000-0002-1774-7114)
[2]Erzurum Teknik Üniversitesi, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25050, Erzurum (ORCID: 0000-0002-3885-1885)
[3]Erzurum Teknik Üniversitesi, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25050, Erzurum (ORCID: 0000-0001-7694-9405)

(Alınış / Received: 22.11.2016, Kabul / Accepted: 16.05.2017,
Online Yayınlanma / Published Online: 20.01.2018)

Anahtar Kelimeler
Yığma medreseler,
Yapısal davranış,
Malzeme özellikleri,
Zaman tanım alanı yöntemi

Özet: Bu çalışma kapsamında taşınmaz kültür varlığı olarak tescillenmiş tarihi Erzurum Yakutiye Medresesi'nin yapısal performansı statik ve dinamik açıdan irdelenmiştir. Yapının malzeme ve taşıyıcı eleman özelliklerini belirlemek için literatürde mevcut yığma mekanik modelleri incelenerek teorik bir yaklaşım ortaya konulmuştur. Dinamik analizlere göre kritik kesitin minarenin duvarlarla birleştiği bölge olduğu ve uygulanan yer hareketleri etkisi altında minarenin duvar seviyesi üstünde kalan kısmının göçtüğü belirlenmiştir. Ana yapıda kılcal çatlaklar dışında herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir. Dinamik analizler neticesinde hesaplanan deprem yükünün yönetmelik bağıntısıyla elde edilen yapı yük kapasitesinin altında olduğu görülmüştür.

Investigation of Structural Behavior of Historical Erzurum Yakutiye Madrasah

Keywords
Masonry madrasah,
Structural behavior,
Material property,
Time history analysis

Abstract: In this study, structural performance of Yakutiye Madrasah, which is an important historical structure located in the city center of Erzurum, is investigated using static and dynamic analyses. For determining the material and load carrying member properties of the structure a theoretical approach was proposed based on the available masonry mechanical models. Dynamic analysis displayed that the most critical part of the structure is the base region of the minaret where it connects with the walls. Under the applied earthquake load intensity the part of the minaret above the madrasah main walls collapsed. No damage but only local minor cracks were observed on the main structure. The earthquake load on the structure due to application of different ground motions was lower than the lateral load capacity of the structure calculated according to code.

*İrfan KOCAMAN, irfan.kocaman@erzurum.edu.tr

1. Giriş

Modern toplumların en önemli sorunlarından biri de tarihi yapıların korunmasıdır. Bu yapılar tarihi önemlerinin yanında, devlet ekonomisinin önemli bir kaynağı olan turizm için de bir cazibeye sahiptirler. 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 güvenilirliklerinin 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 belirlemesiyle ilgili birçok araştırmacı çeşitli yapılar/deney düzenekleri üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Çalık vd. [1] 18. Yüzyılda inşa edilmiş tarihi Dürbinar Camisi'nin mod şekillerini ve malzeme özelliklerini restorasyon öncesi ve sonrası için deneysel olarak belirlemişlerdir. Köseoğlu ve Canbay [2] çalışmalarında tarihi Cenabı Ahmet Paşa camisinin sonlu eleman modelini oluşturarak, yapıda meydana gelmiş hasarların sebeplerini irdelemişlerdir. Kavali vd. [3] çalışmalarında Yakutiye Medresesinin yapısal performansını sonlu elemanlar yöntemiyle çözümlemeye çalışmışlardır. Yapı için kullanılabilecek malzeme dayanım özelliklerini önermişlerdir. Şeker [4] doktora tezinde Mimar Sinan sütrüktürü camilerin sonlu eleman modellerini oluşturmuştur. Yapılarda kullanılabilecek malzeme özellikleri ve yapıların deprem davranışlarını belirlemiştir. Demir ve İlki [5] çalışmalarında tarihi Fatih Cami'ni ele almışlardır. Yapının malzeme özelliklerini deneysel olarak belirlemişler ve tarihi yapıların taşıyıcı duvarlarının malzeme mekanik özelliklerinin belirlenmesi için analitik bağıntılar önermişlerdir. Çakır vd. [6] çalışmalarında tarihi Lalapaşa Cami'nin deprem davranışını tek yönlü yer hareketi etkisi altında belirlemişlerdir. Yapının malzeme özelliklerini deneysel olarak belirlemişler ve sonlu eleman modelini oluşturarak yapıda deprem esnasında gelebilecek hasarları irdelemişlerdir. Gerçekleştirilen birçok çalışmalarda, tarihi yapıların, sonlu eleman modellerinin oluşturulması, malzeme özelliklerinin ve yapısal davranışlarının belirlenmesi gibi farklı karmaşık durumlardan bahsedilmektedir.

Bu çalışmada, tarihi Yakutiye medresesinin bölgede gerçekleşecek olası bir depremde sergileyeceği performans ve davranıştan ziyade yapının yıkılmasına sebep olabilecek bir deprem durumundaki davranışını incelemektir. Yapıya uygun sonlu elaman modeli oluşturulmuş ve 1992 Erzincan Depremi, 1997 Düzce Depremi ve 1983 Horasan Depremi yer hareketi verilerine dayanarak zaman tanım alanı yöntemiyle dinamik analiz gerçekleştirilmiştir.

2. Erzurum Yakutiye Medresesi

Yakutiye Medresesi, 14. yüzyılda, Emir Cemaleddin Yakut tarafından, İlhanlı hükümdarı Olcayto zamanında inşa ettirilmiştir. Anadolu'da mevcudiyetini devam ettiren, kapalı avlulu, eyvanlı ve revaklı medrese tipinin örneklerinden biridir [7] (Şekil 1). Medrese, simetrik yapısı, çeşitli figürler işlenmiş taş kabartmaları ve çini süslemeleriyle Orta Çağ Türk Sanatı adına oldukça önemlidir. Tarihi ve sanat değeri oldukça yüksek olan bu eser, özenle korunması gereken anıtlardan biridir.

Yapı, Osmanlı döneminde uzun bir süre dökümhane olarak kullanılmıştır ancak 19. yüzyılın sonlarından Cumhuriyet dönemine kadar askeri depo olarak kullanıldığı bilinmektedir [8]. Yapı, Cumhuriyet döneminde, Vakıflar Genel

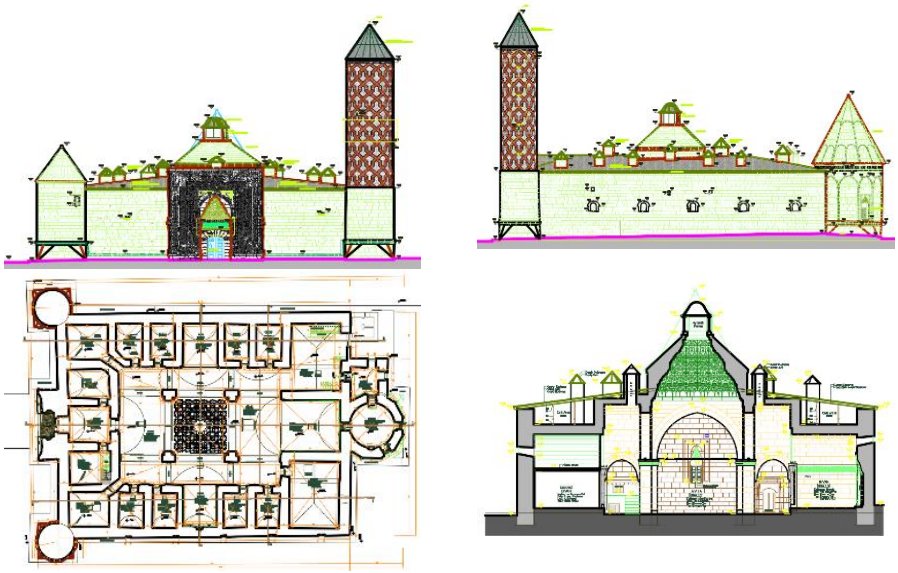
Müdürlüğü tarafından, 1964 ve 1973 yıllarında, Kültür Bakanlığı tarafından ise 1991 yılında olmak üzere üç onarım görmüştür. Onarımlar sırasında yapının asli mimarisinde önemli değişiklikler olmamış sadece küçük çaplı tadilatlar yapılmıştır. Ancak yapının taşıyıcı elemanlarının malzemelerinde önemli yenilemeler yapılmıştır. Yapılan onarım çalışmalarında, malzemeler genel olarak yeniden kullanılmamış, yenileriyle değiştirilmiştir. Bu sebeple özellikle dış cephe kaplamalarında çok sayıda var olan kabartmalar sökülmüş ve yapının özgün özelliği bu alanda kaybolmuştur [8]. Yakutiye Medresesi, günümüzde Erzurum Türk İslam Eserleri ve Etnografya Müzesi olarak hizmet vermektedir.

Yapı dikdörtgen planlı olup, orta avlusunun etrafında sınıflar ve karşılıklı eyvanlar bulunmaktadır. Medrese, ortasında bulunan dört çokgen taş kolona yerleştirilmiş, ortası boş olan ana kubbe ve dört bir yandan yarım kubbelere ek olarak doğu-batı doğrultusunda geniş açıklıklı kemer çatılarla inşa edilmiştir. Ana kubbe, 7.75 m boyutlarında karedir, 12.9 m yüksekliğindedir. Medresenin ana boyutları 33.4 m x 24.4 m'dir. Yapının doğusunda bulunan kümbet ise yaklaşık 12 m x 6 m boyutlarındadır. Yapının ana duvar kalınlığı yaklaşık olarak 130 cm'dir. Dört taraftaki duvarlar 7.6 m seviyesine kadar yükselmiştir. Medresenin kuzey batı köşesinde 21.2 m ve güney batı köşesinde 8.25 m uzunluğunda minareler bulunmaktadır. Şekil 2'de medresenin farklı cephelerden görünüşleri ve kesitleri gösterilmiştir.

Şekil 1. Erzurum Yakutiye Medresesi

(a)

(b)



Şekil 2. a: Cephe görünüşlerine örnekler, b: Kesitlere örnekler

3. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

3.1. Taşın, harcın ve moloz dolgusunun basınç dayanımının belirlenmesi

Tarihi eserlerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi oldukça karmaşık olabilmektedir. Yapının yıllar boyunca farklı çevresel etkilere maruz kalması, malzemenin tabi 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.

Erzurum Yakutiye Medresesi, Erzurum Kültür ve Turizm İl Müdürlüğü'ne ait bir eserdir. Kültür Müdürlüğü'nden alınan bilgiye göre eser üzerinde malzeme özelliklerinin belirlenmesine yönelik herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu sebeple taş ve harç dayanımı, literatür ve yapılabilecek hasarsız deneyler yardımıyla belirlenmiştir.

Yakutiye Medresesi'nin taş dayanımını belirlemek için hasarsız bir deney yöntemi olan Schmidt sertlik çekici kullanılarak ortalama bir değer elde edilmiştir. Sertlik ölçümü sonucunda kesme taş kısmında dayanım 44.7 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değerler Tablo 1'de verilmiştir.

Horasan harçlar üzerinde yapılan deneylerden basınç dayanımının 5.5 MPa, birim hacim ağırlığının 17.6 kN/m^3 olduğu bulunmuştur. Çekme dayanımı ise basınç dayanımının yaklaşık % 5-10'u mertebesinde olduğu kabul edilmiştir [9].

Yapının duvarlarında kullanılan dolgu malzemesinin basınç dayanımı ise literatür çalışmaları yardımıyla belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar ve sonuçlardan yola çıkarak, bu çalışmada, Erzurum Yakutiye Medresesi'nin kesme taş basınç dayanımı (f_b) 44.7 MPa, moloz dolgu basınç dayanımı (f_r) 3.0 MPa, harç dayanımı (f_m) 5.5 MPa olarak kabul edilmiştir.

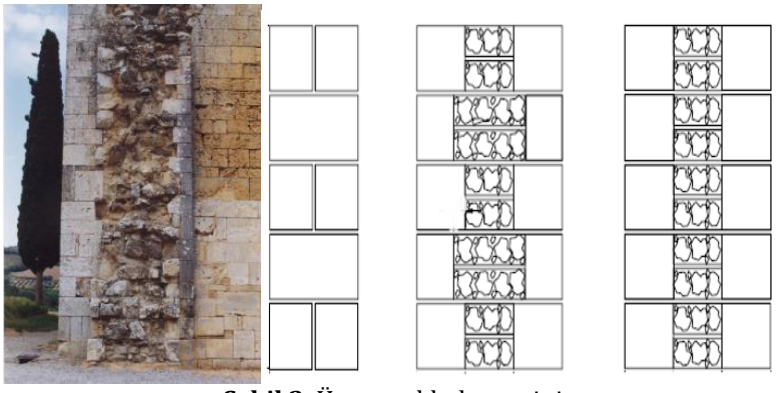
3.2. Duvarların basınç dayanımlarının ve elastisite modüllerinin belirlenmesi

Erzurum Yakutiye Medresesi kubbelerin yükünü taşıyan dış/iç 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.

Tablo 1. Yakutiye Medresesi Schmidt Çekici sertlik ölçümü sonucu

Schmidt Sertlik Deneyi Sonuçları					
Rebound	f_b (N/mm^2)	Rebound	f_b (N/mm^2)	Rebound	f_b (N/mm^2)
40	41	42	44	35	35
41	43	41	43	48	58
41	43	42	44	43	45
43	45	52	65	41	43
43	45	48	59	41	43
36	35	43	45	41	43
36	35	47	53	36	35
43	45	48	58	Ortalama: 44.7	



Şekil 3. Üç yapraklı duvar tipi

3.2.1. Dış duvarların basınç dayanımının belirlenmesi

Duvarların basınç dayanımlarının belirlenmesi farklı parametrelere bağlıdır. Duvarın yapım tekniği, yapımında kullanılan taşın, tuğlanın, harcın vb. malzeme 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 dayanımı için Tsoutrelis ve Exadaktylos [10] Denklem 1'i önermektedir. Tsoutrelis ve Exadaktylos [10] çalışmalarında mermer kaya bloklar arasındaki süreksizlikten kaynaklanan basınç dayanımındaki azalımı deneysel olarak belirlemişler ve analitik yaklaşım sunmuşlardır.

$$f_k = e^{-0.3117Lf} f_b \qquad (1)$$

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

Burada; f_k, duvarın basınç dayanımı, f_b, malzeme basınç dayanımı, *l, h, t,* sırasıyla duvarın genişliği, yüksekliği ve kalınlığı, *f,* çatlak yoğunluk faktörüdür. Çatlak yoğunluğu, duvarı oluşturan taşların bütün boyutlarda sürekliliği bozan yüzeylerinin toplamının duvarın hacmine oranıdır (m^2/m^3).

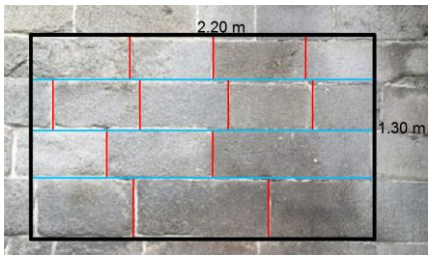
Bu denklem ışığında Yakutiye Medresesi'nden alınan bir duvar görünüşü (Şekil 4) ile yola çıkarak çatlak yoğunluğu;

$$f = \frac{(0.4 \times 1.30 \times 3 + 0.4 \times 2.20 \times 3}{0.40 \times 2.20 \times 1.30} = 3.67$$

$L = \sqrt[3]{2.2 \times 1.30 \times 0.4} = 1.05m$ ise;

$$f_k = e^{-0.3117 \times 1.05 \times 3.67} 44.7 = 13.45 MPa$$

olarak elde edilir.



Şekil 4. Yapıda elastik modülün hesaplanmasında temel alınan duvar elemanı ve çatlak yoğunluğu faktörü hesaplamasında kullanılan yatay ve düşey süreksizlik yüzeyleri

İkinci olarak taşın ve harcın dayanımı bilinen duvarların basınç dayanımının belirlenmesi için Tomazevic [11] Denklem 3'ü önermektedir.

$$f_k = 0.5 f_b^{0.65} f_m^{0.25} \quad (3)$$

Burada f_m, harcın dayanımıdır. Denklem 3'ü kullanarak;

$f_k = 0.5 \times 44.7^{0.65} \times 5.5^{0.25}$ elde edilir.

Ancak Tsoutrelis ve Exadaktylos'un önerdiği bağıntı, harçsız bağlantılı duvarların davranışını belirlemesine daha uygun olduğu için kesme taş duvarın basınç dayanımı 13.45 MPa olarak alınmıştır.

3.2.2. Üç yapraklı duvarların basınç dayanımının belirlenmesi

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. [12] üç yapraklı duvarların basınç dayanımının belirlenmesi için Denklem 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 denklemde $f_e = f_k$ 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, θ_e ve θ_i ise sırasıyla dış ve iç duvarın doğruluk faktörüdür. Doğruluk faktörü iç ve dış duvarın üç yapraklı duvar dayanımına katkı katsayısıdır. Binda vd. [12] bu değerleri deneysel çalışmalara dayanarak $\theta_e = 0.7$ ve $\theta_i = 1.3$ olarak önermiştir.

Basınç dayanımı bilinen yığma duvarların Elastisite modülünün belirlenmesi için Tomazevic'in [11] önerdiği eşitlik (Denklem 5) literatürde çokça kullanılmaktadır. Basınç dayanımından elastisite modülüne geçiş olarak Avrupa Birliği Standartları da [13] Denklem 4'yi önermektedir.

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

Bu bilgiler ışığında üç yapraklı duvarın basınç dayanımı;

$$f_C = \frac{2 \times 0.4}{2 \times 0.4 + 0.5} \times 13.45 \times 0.7 + \frac{0.5}{2 \times 0.4 + 0.5} \times 3 \times 1.3 = 7.29 MPa$$

Duvarın elastisite modülünü elde etmek için Denklem 5'i kullanarak;

$E = 1000 \times 7.29 = 7290 MPa$ olarak elde edilir.

3.2.3. Fil Ayaklarının, Kubbelerin ve Kemerlerin Dayanımlarının Belirlenmesi

Yapıda merkez kubbeyi taşıyan fil ayaklarının ve kemerleri oluşturan taşların basınç dayanımları, duvarları oluşturan taşlarla (44.7 MPa) aynı kabul edilmiştir. Fil ayakları ve kemerlerin dayanımları bölüm 3.2.1'de elde edilen dış duvar dayanımıyla (7.29 MPa) aynı alınmıştır. Literatüre bakıldığında kubbe kısımlarının elastisite modülleri için kullanılan değer ortalama 3000 MPa olarak önerilmektedir.

3.3. Nihai malzeme özellikleri

Tarihi eserlerin malzeme özellikleri, yukarıda belirtilen sebepler nedeniyle oldukça zordur. Malzeme özellikleri farklı varsayımlar, kabuller ve analitik önerilerle belirlenmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar sonucunda Erzurum Yakutiye Medresesi'nin malzeme özellikleri Tablo 2 verildiği gibi hesaplanmış ve analizler bu değerlere göre yapılmıştır. Tabloda taşıyıcı elemanların her birinin basınç dayanımları, elastisite modülleri ve çekme dayanımları verilmektedir. Çalışmada çekme dayanımı bütün malzemeler için 0.3MPa alınarak oldukça güvenli tarafta kalınmıştır.

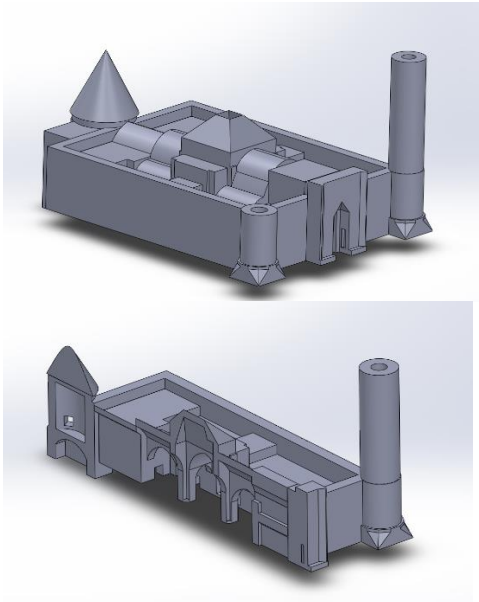
Tablo 2. Erzurum Yakutiye Medresesinin malzeme özellikleri

Medresenin Bölümü	Elastisite Modülü (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Duvarlar	7290	7.29	0.3
Fil Ayakları ve Kemerler	13450	13.45	0.3
Kubbeler	3000	3.00	0.3

4. Sayısal Modelleme Tekniği

Medrese, cami gibi karmaşık yığma yapıların davranışlarının belirlenmesi ve sayısal modellerinin oluşturulması oldukça zordur. Bilgisayar teknolojisinin ve yazılımların gelişmesi, yığma yapıların davranışlarının üç boyutlu modellenerek belirlenmesinde olumlu katkı sağlamıştır. Karmaşık camiler, hamamlar, köprüler ve birçok yığma yapının sayısal modeli kolaylıkla oluşturulabilir hale gelmiştir. Fakat tarihi yığma yapıların taşıyıcı sistemleri, geleneksel yapıların taşıyıcı sistemlerinden oldukça farklıdır. Mimari detaylarından kaynaklanan karmaşıklık, bu tür yapıların modellenmesinde sürekli ortam mekaniği teorisini esas alan katı modelleme yaklaşımı zaruri kılmaktadır. Modelleme tekniği olarak makro modelleme yöntemi kullanılmıştır. Makro modelleme tekniğinin ana kabulü, yığma yapı elemanlarını homojenleştirerek kompozit malzeme olarak düşünülmesidir. Homojenleştirme işlemiyle yığma yapı elemanlarının sonlu elemanlarının oluşturulması daha kolay olmaktadır.

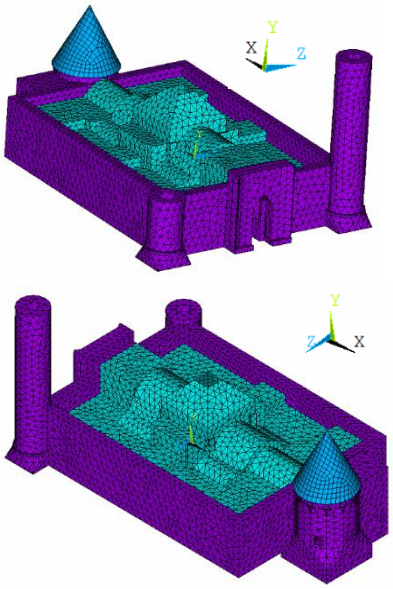
Yakutiye Medresesinin katı modeli SolidWorks [14] yazılımı kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 5). SolidWorks, farklı şekilde, boyutta elemanların üç boyutlu katı çizimlerinin oluşturulmasına izin veren bir yazılımdır. Oluşturulan katı model ANSYS APDL [15] yazılımına aktarılmış ve Şekil 6'da gösterilen 17288 düğüm noktalı ve 61820 elemanlı sonlu eleman modeli elde edilmiştir. ANSYS birçok sistemin farklı yüklemeler altında analizlerinin gerçekleştirmeye imkan sağlayan, akademik çalışmalarda sıklıkla kullanılan bir analiz yazılımıdır. Modelde, tüm yapının geometrisi tek bir katı hacim olarak işlenmiştir. Katı bölümler arasındaki sonlu eleman ağının sürekliliği sağlamak adına tetrahedron elemanlar kullanılmak zorunda kalınmıştır.



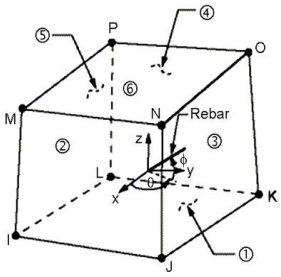
Şekil 5. Yakutiye Medresesinin üç boyutlu çizim modeli

ANSYS modelinde SOLID65 elemanı kullanılmıştır. SOLID65 elemanı, her düğüm noktasında üç öteleme serbestlik derecesine sahip sekiz düğüm noktasından oluşan bir elemandır. Bu 3B blok eleman, çekme gerilmelerinde çatlama, basınç gerilmelerinde ezilme (plastik şekil değiştirme) özelliklerine ve plastik şekil değiştirme yeteneğine de sahiptir. Beton malzemesi başlangıçta izotropik olarak tanımlanır. Farklı üç

yönde donatı tanımlanabilir. Betonarme uygulamalarında bağlar ve etriyeler bu özellik kullanılarak modellenebilir. Tanımlanan donatılar çekme ve basınç kuvvetlerini taşır, kesme kuvvetlerini taşımaz. SOLID65, plastik şekil değiştirme yeteneğine de sahiptir. Geometri, düğüm yerleri ve koordinat sistemi Şekil 7'de verilmiştir.

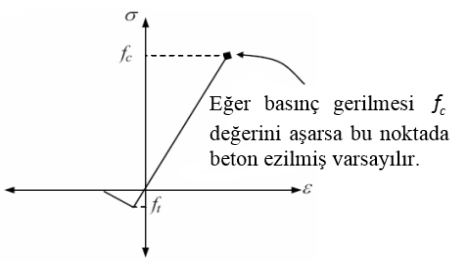


Şekil 6. Yakutiye Medresesinin ANSYS APDL modeli



Şekil 7. SOLID65 elemanı geometrisi [15]

Malzeme modeli olarak beş parametreli (f_t, f_c, f_{cb}, f_1, f_2) Willam-Warnke modeli kullanılmıştır. Burada; f_t, tek eksenli çekme dayanımı, f_c, tek eksenli basınç dayanımı, f_{cb}, iki eksenli basınç dayanımı, f_1, hidrostatik gerilme durumuna eklenecek olan iki eksenli basınç durumu için basınç dayanımı f_2, hidrostatik gerilme durumuna eklenecek olan tek eksenli basınç durumu için basınç dayanımıdır. Bu modelde beton, taş, kaya gibi malzemelerin çekme ve basınç dayanımları kullanılarak malzemenin göçme yüzeyi oluşturulur. Malzemenin davranışı kırılma durumunda doğrusaldır ve kırılma gerilmesi güç kaybından dolayı ilk göçme yüzeyinde gerilmelerin 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 malzeme modeli programda mevcut plastisite modellerinden birisiyle birlikte kullanılarak ezilme davranışı daha gerçekçi modellenebilir. Yığma yapı hesaplamalarında basınç altında ezilmeden ziyade yetersiz çekme dayanımına bağlı olarak yığma birimleri arasında ayrışma problemi ortaya çıkacağından Willam-Warnke modelinin kendi başına kullanımının yeterli olacağı düşünülmüştür. Bir eksenli gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Şekil 8'de gösterilmiştir.

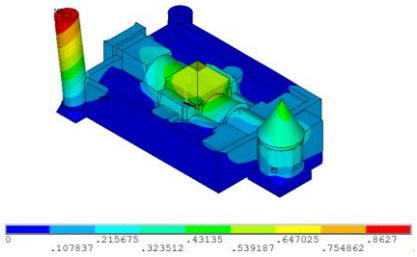


Şekil 8. Willam-Warnke bir eksenli gerilme durumu [16]

5. Yapısal Analiz

5.1. Statik Analiz

Erzurum Yakutiye Medresesi'nin zati ağırlığı altında statik analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz verilerine göre en büyük yer değiştirmelerin düşey yönde, ana kubbenin tepe noktasında, kümbetin tepe noktasında ve minarenin tepe noktasında meydana geldiği belirlenmiştir. Bu yer değiştirmenin, minare tepe noktasında 0.97 mm mertebesinde olduğu görülmektedir (Şekil 9).



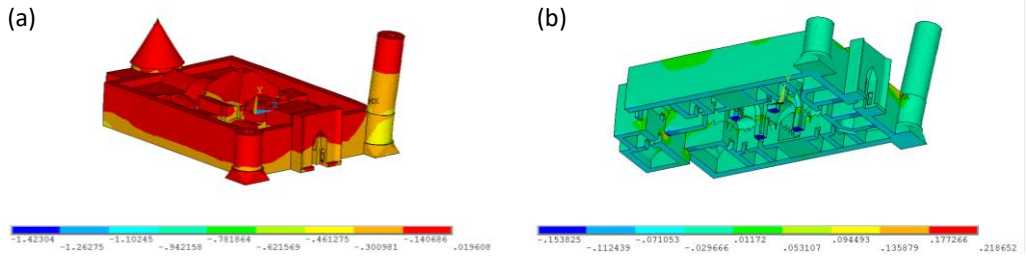
Şekil 9. Düşey yer değiştirmeler (mm)

Medresenin taşıyıcı elemanlarında oluşan basınç ve çekme gerilmeleri incelendiğinde, basınç gerilmelerinin ana kubbeyi taşıyan fil ayakları ile duvarların alt kısımlarında yoğunlaştığı ve basınç gerilmelerinin en çok 1.42 MPa değerinde olduğu görülmektedir (Şekil 10a). Çekme gerilmeleri ise fil ayakları ile duvarların birleşim bölgelerinde bulunan kemerlerde yoğunlaştığı ve en büyük çekme gerilmesinin 0.22 MPa olduğu görülmektedir (Şekil 10b). En büyük gerilme değerleri, malzeme özelliklerinde kabul edilmiş olan 7.29 MPa değerindeki basınç dayanımından ve kabul edilen 0.3 MPa değerindeki çekme dayanımından küçüktür. Buda yapıda statik durumda meydana gelebilecek gerilmeler açısından istenilen sınırların altındadır.

5.2. Modal Analiz

Yakutiye Medresesinin modal analizi gerçekleştirilmiş ve mod şekilleri ve titreşim periyotları elde edilmiştir. Analiz, 20 modda yapılmış ve yapının hakim ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Yapının modları belirlenirken, ilk iki mod minarenin hakim modu çıkmıştır. Bu iki mod şekli, yapının bütününü temsil etmeyen lokal modlardır. Tablo 3'de yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen hakim ilk altı moda ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri, Şekil 11'de tüm modların frekans değerleri ve Şekil 12'te hakim altı modun, mod şekilleri verilmektedir.

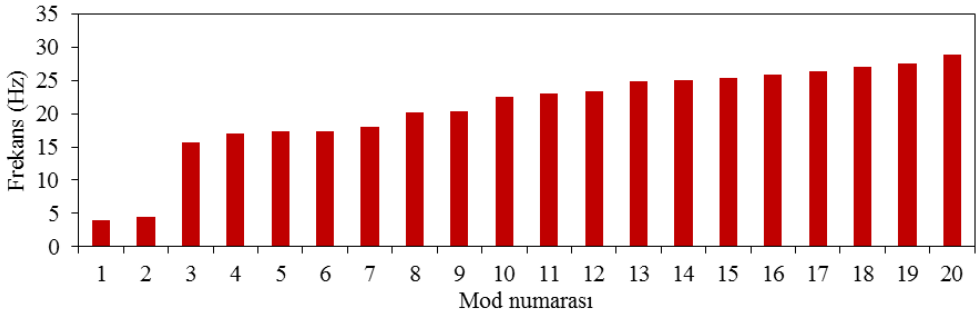
Modelin mod şekillerine bakıldığında üçüncü mod doğu-batı, dördüncü mod kuzey-güney doğrultusunda eninedir. beş, altı ve yedinci modlar düşey doğrultuda, sekizinci mod ise burulma modlarıdır. Modlardaki şekil değiştirmeler gözlemlendiğinde, deprem sırasında ana kubbe ve minarenin zorlanacağı söylenebilir. Ayrıca doğu-batı doğrultusunda duvarlar ve özellikle kümbetin mesnetlendiği doğu cephesindeki duvarda, düzlem dışı hareketlilik sebebiyle şekil değiştirmeler gözlemlenebilir. Yapının toplam kütlesi 8500 ton civarındadır.



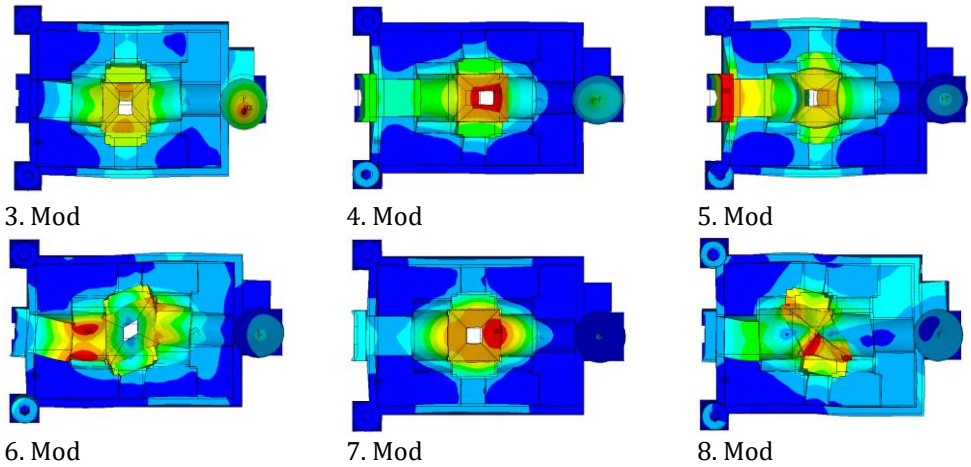
Şekil 10. a: Statik analiz sonucunda oluşan basınç gerilmeleri (MPa); b: Statik analiz sonucunda oluşan çekme gerilmeleri (MPa)

Çizelge 3. Yapının dikkate alınan hakim altı moduna ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri

Mod	Frekans (Hz)	Küt. Kat. Oranı (yatay - x doğ.)	Küt. Kat. Oranı (düşey - y doğ.)	Küt. Kat. Oranı (yatay - z doğ.)
3	15.33	0.1856	0.21E-2	0.42E-3
4	16.60	0.86E-3	0.46E-5	0.3416
5	16.89	0.18E-2	0.18E-6	0.22E-2
6	17.16	0.64E-3	0.87E-5	0.59E-2
7	17.94	0.1673	0.34E-4	0.73E-3
8	19.49	0.27E-2	0.97E-2	0.21E-1



Şekil 11. İlk 20 moda ait frekans değerleri

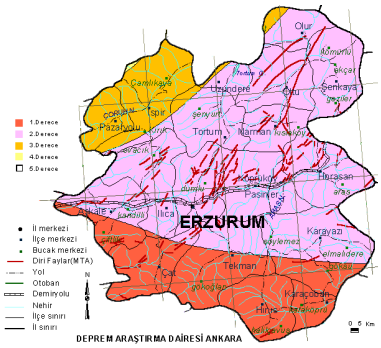


Şekil 12. Yapının hakim ilk altı moduna ait deformasyon şekilleri

5.3. Dinamik Analiz

Doğu Anadolu bölgesi bulunduğu konum sebebiyle tarih boyunca birçok büyük ve küçük depreme maruz kalmıştır. Erzurum, Türkiye Deprem Bölgeleri Haritasına göre 1., 2. ve 3. derece deprem bölgesi olarak belirlenmiştir (Şekil 13). Tarihi kaynaklara bakıldığında 1790, 1843, 1850, 1852, 1859, 1868 yıllarında can ve mal kaybına yol açmış 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 [17].



Şekil 13. Erzurum İli Türkiye Deprem Haritası [19]

Çalışmada, Yakutiye Medresesi'nin dinamik çözümlemesi zaman tanım alanı yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Zaman tanım alanı, yapının dinamik davranışını, zamanla değişen yükler altında inceleyen çözümleme yöntemidir. Hesaplamalar 1983'de meydana gelen 6.0 büyüklüğüne sahip Horasan, 1992'de meydana gelen 6.8 büyüklüğü sahip Erzincan ve 1997'de meydana gelen 7.4 büyüklüğüne sahip Kocaeli depremlerinin doğu-batı ve kuzey-güney ivme bileşenleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 14a). Şekil 14b'da bu kayıtlara ait %5 sönümlü ivme spektrumları verilmiştir. Dinamik analizde sönüm oranı %2 olarak alınmıştır.

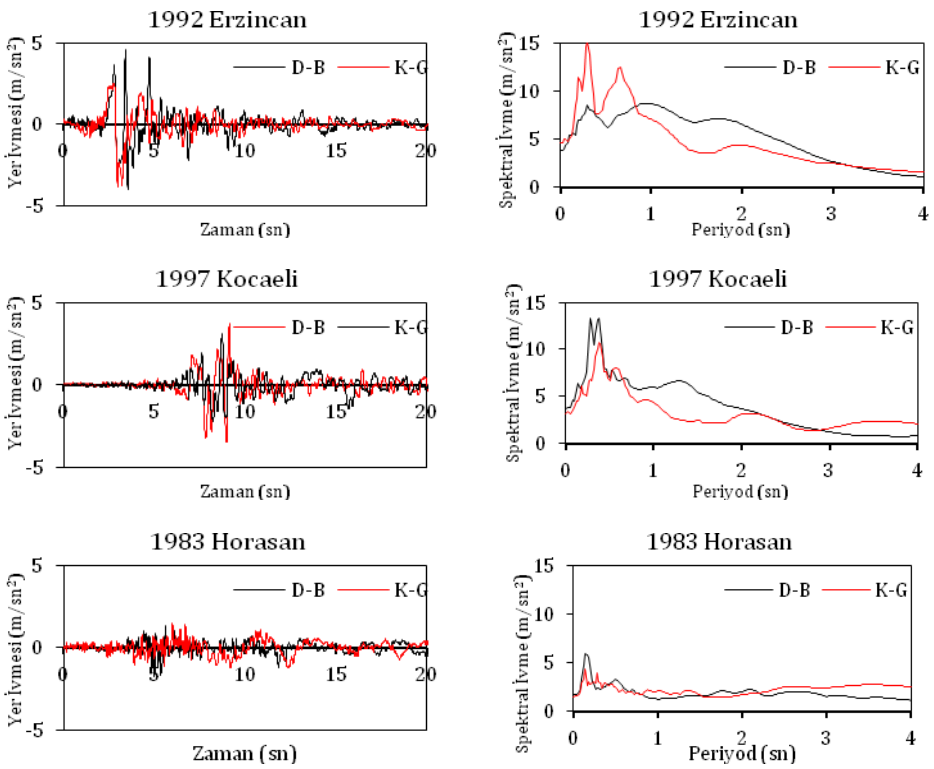
Dinamik analizler efektif deprem yükü konsepti üzerinden gerçekleştirilmiştir [18]. Dinamik davranış, yer ivmesi değerleri yapı üzerinde tüm düğüm noktalarına etkiyen bir ivme alanı oluşturacak şekilde uygulanarak ve malzemenin doğrusal olmayan davranışı dikkate alınarak Denklem 6'nın çözümüyle hesaplanmıştır. Yapıda %3'lük bir sönüm Rayleigh sönüm modeli kullanılarak uygulanmıştır ([C]=α[M]+β[K]). Dinamik analizlerde malzeme için doğrusal olmayan malzeme modelleri kullanıldığında sönüm için yüksek değerlerin kullanılması gerek kalmaz.

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

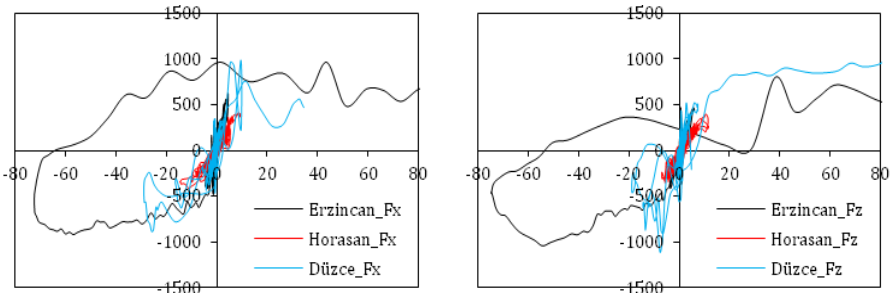
Dinamik analiz sonucu medrese ana kütlesinde yapısal bütünlüğe zarar vermeyen lokal çatlamalar dışında bir hasar gözlemlenmemiştir. Ana kütlenin doğrusal davranış sergilediği belirlenmiştir. Ancak minarenin uygulanan yer hareketi şiddetine karşı yeterli dayanıma sahip olmadığı ve şiddetli bir depremde göçebileceği görülmüştür.

Şekil 15'de üç dinamik analiz için minarenin medrese dış duvarlarının üst seviyesinde alınan kesitindeki kesme kuvveti – yer değiştirme eğrileri x ve z yönünde verilmiştir. Eğrilerde, minare ±5 mm yer değiştirmeler arasında elastik bir davranış gösterirken, uygulanan yer hareketinin şiddetine bağlı olarak elastik davranış özelliğinin kaybettiği göçtüğü görülmektedir. Hem Şekil 14'de verilen ivme spektrumları hem de minarenin zarf eğrileri ışığında yapının en çok hasarı 1992 Erzincan depreminde alacağı öngörülmüştür. Bu sebeple Erzincan depremi kaydının kullanıldığı dinamik analiz verileri detaylandırılarak, yapının bu şiddette bir depremde hasar görebilecek bölgeleri ve hasar mekanizmaları belirlenmiştir.

Çözümlerden elde edilen bulgular ışığında, maksimum yatay yer değiştirmenin 2.93 sn'de, yapının minaresi halen stabil durumdayken, minarenin tepesinde olduğu belirlenmiştir ve bu yer değiştirme miktarının 111 mm değerine ulaştığını görülmektedir (Şekil 16).

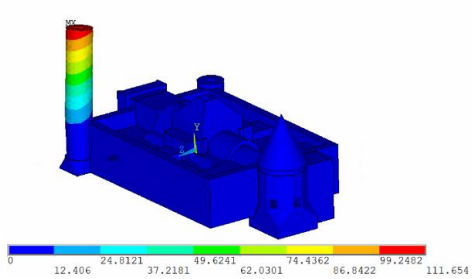


Şekil 14. Dinamik analizlerle kullanılan depremlerin D-B ve K-G bileşenleri ve D-B ve K-G ivme spektrumları

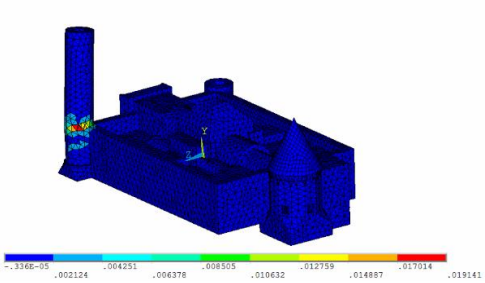


Şekil 15. Dinamik analiz sonucu elde edilen minare zarf eğrileri

Dinamik analizin 2.89'uncu saniyesinde çekme gerilmeleri altında maksimum birim şekil değiştirme 0.019 olarak elde edilmektedir (Şekil 17). Minarenin duvar seviyesinde (mesnedinde) meydana gelen çatlak genişliğinin 30-40 mm arası olduğu hesaplanmıştır. Bu miktar yığma yapılarda "ağır hasar, ciddi onarım ya da yeniden yapım gereklidir" şeklinde yorumlanabilecektir [20]. Şekil 18'de görüldüğü gibi yapının taşıyıcı duvarlarında yer değiştirmeler oldukça düşüktür. Yapının köşesinde duvarların rijit olarak birleştiği noktada hesaplanan yer değiştirme 0.1 mm seviyelerinde olmaktadır. Medrese yapısında avluyu örten boşluklu kubbenin üst noktasında yer değiştirme 0.4 mm seviyesinde hesaplanmıştır.

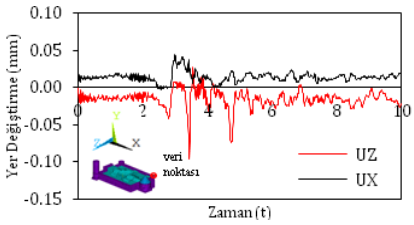


Şekil 16. Dinamik analiz sonucu elde edilen 2.93sn'de yatay yer değiştirmeler (mm).



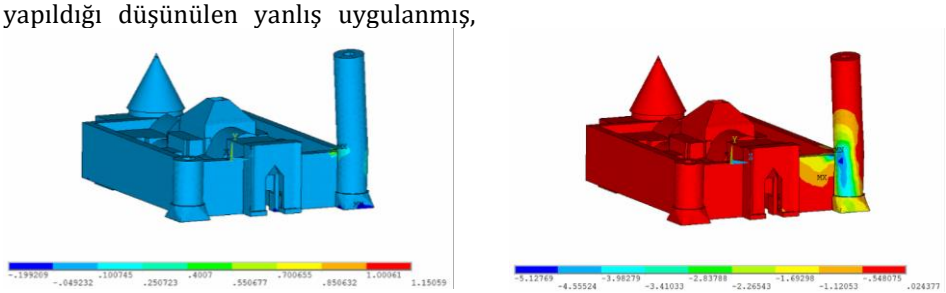
Şekil 17. Dinamik analiz sonucu elde edilen 2.89sn'de çekme gerilmeleri altında birim şekil değiştirme değerleri

Bu yöntemle elde edilen çekme asal gerilmelerine (birinci asal gerilme) bakıldığı zaman çatlamaların minarenin yapıyla birleştiği bölgede, minare ve iki yönlü duvarlarda, restorasyon sonrası yapıldığı düşünülen yanlış uygulanmış, yapının doğu kısmına kalan iki kapı boşluğunda ve yapının avlusunu kapatan yarım kubbelerin duvar birleşimlerinde yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Bu gerilemeler 2.86 sn'de maksimum 1.15 MPa değerine ulaşmaktadır (Şekil 19a).



Şekil 18. Dinamik analiz sonucu duvarın kuzey doğu tepe noktasında elde edilen x ve z doğrultusu yer değiştirmeleri (mm)

Program çıktılarında üçüncü asal gerilmeler ise basınç gerilmesi olarak ortaya çıkmakta ve yapıda en büyük basınç değeri 2.86 sn'de minare gövdesinde 5.12 MPa olarak elde edilmektedir. Basınç gerilmeleri malzeme özelliklerinde kabul edilen değerlerden düşük olduğundan basınç ezilmesi meydana gelmemektedir. Taşıyıcı duvarlarda basınç gerilmeleri kritik değerlerin altında kalmaktadır (Şekil19b).

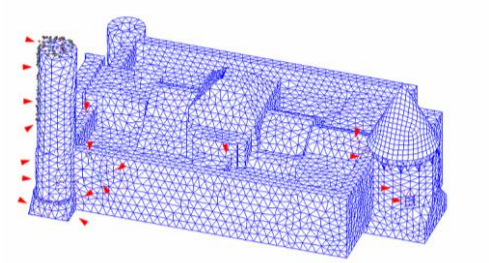


(a) (b)

Şekil 19. a: Dinamik analiz sonucu elde edilen 2.86 sn'de çekme gerilmeleri (MPa); b: Dinamik analiz sonucu elde edilen 2.86 sn'de basınç gerilmeleri (MPa)

Şekil 20'de görüldüğü gibi, yapıda çatlaklar minarenin duvarlarla birleşim yerlerinde, minare tepe kısımlarında, yapının iç kısmında bulunan kemerlerde, duvarların mesnet bölgelerinde kümbetin yapıyla birleştiği batı duvarında, kümbetin pencere açıklıklarında, avluyu kapatan kemer çatı mesnetlerinde yoğunlaşmaktadır. Bu bölgelerde çatlaklar meydan gelmekle birlikte, çatlak genişlikleri (birim şekil değiştirme değerleri) çok küçük olduğu

için yapının yük taşıma kapasitesine ve yanal rijitliğine olumsuz etkileri yok denilecek kadar azdır.



Şekil 20. Dinamik analiz sonucu elde edilen çatlak ve ezilmeler

Şekil 21'de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki x ve z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bu eğrilerde görüldüğü gibi dinamik analizlerde kullanılan bütün yer hareketlerinde yapı ana bloğu (minare hariç) bütün olarak elastik davranış sergilemektedir ve yapıda oluşması öngörülen çatlaklar yapının davranışına etki etmemektedir.

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelikte (DBYBHY) [21], Bölüm 5.4.4.'de verilen taşıyıcı duvarlarda toplam uzunluk sınırı hesaplaması yapıya uygulanmış ve l_d/A değeri x yönünde 0.18, z yönünde 0.17 bulunmuştur. Yönetmelikte yığma yapının depreme dayanıklı olması için bu oranın alt sınırı 0.2 olarak verilmiştir. Hesaplanan oranlar bu değere yakındır. Ancak yönetmelikte bu oran duvar kalınlığı asgari 50 cm alınarak önerilmektedir. Medrese yapısının duvar kalınlıkları ortalama olarak 1.3 m olması, yapının kuvvetli yer hareketi etkisi altında elastik davranması ve yer değiştirme taleplerinin düşük olmasını izah etmektedir. Bu da yapının, yönetmelikte önerilen oranın çok daha emniyetli tarafında kaldığını ve duvar kalınlığının yapı rijitliğine etkisinin oldukça fazla olduğunu göstermektedir. Yapının x ve z yönlerinde duvar alanlarının yapının toplam alanına oranları sırasıyla %23 ve %22'dir. Bu oran yönetmelikte %10 olarak önerilmektedir. Yine bu değerler yapının az hasar görmesini açıklamaktadır.

Yapının toplam alanı (taç kapı, kümbet hariç) yaklaşık olarak 36x25= 900 m^2 olarak hesaplanır. DBYBHY [21] Bölüm 5.3.2'de yığma duvarların kayma emniyet gerilmesini hesaplamak için Denklem 6 önerilmiştir;

$$\tau_{em} = \tau_0 + \mu\sigma \qquad (6)$$

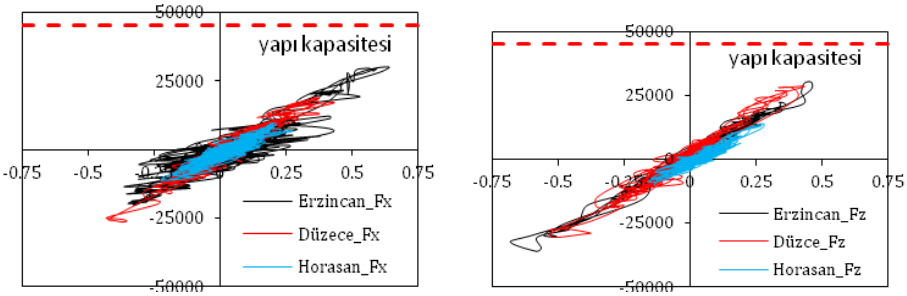
Burada τ_{em} duvar kayma emniyet gerilmesi, τ_0 duvar çatlama emniyet gerilmesi, μ sürtünme katsayısı ve σ hesaplanmış duvar düşey gerilmesidir. τ_0 değeri taş duvarlar için 0.1MPa, μ değeri ise 0.4 olarak önerilmektedir [21]. Yapılan analizler ışığında yapının her iki yön için yanal yük kapasitesi;

$$\tau_{em} = 0.1 + 0.4 \times 0.32 = 0.228 MPa$$

$$V_r = A_{du\,var} \times \tau_{em}$$

$$V_r = (900 \times 0.22) \times 0.228 = 45144 kN$$

olarak elde edilir. Şekil 21'de görüldüğü gibi dinamik analizler neticesinde yapı bu kapasiteye ulaşmadan elastik bölge içinde hareket etmektedir.



Şekil 21. Dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti grafikleri

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerle inşa edilmiş, Erzurum Yakutiye Medresesinin statik ve dinamik analizleri yapılmış ve medresenin yapısal performansı incelenmiştir. Yapının malzeme ve taşıyıcı eleman özelliklerini belirlemek için literatürde mevcut yığma mekanik modelleri incelenerek teorik bir yaklaşım ortaya konulmuştur. Yapılan analizlerin neticesinde, gerilmelerin ve yer değiştirme miktarlarının küçük değerlerde kaldığı, yapının statik yükler altında, elemanlarının az zorlandığı ve statik açıdan yapının gayet iyi durumda olduğu görülmektedir. Dinamik yüklerin etkidiği analizlerin sonucunda ise, yapıda oluşan en büyük yer değiştirmelerin ve gerilmelerin minarenin duvarlarla birleştiği kısmında yoğunlaştığı ve bu bölümün sismik davranış açısından dikkate alınması gereken kısım olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen veriler, minarenin 1992 Erzincan depremine ve/veya 1997 Düzce depremine yakın şiddette bir yer hareketi etkisinde göçeceği yönündedir. Ancak Erzurum ve çevresinin deprem geçmişine bakıldığında yapının bulunduğu lokasyonda bu şiddette depremlerin meydana gelmesi öngörülmemektedir. Yapının iç kesimlerinde, avlu örtüsünü taşıyan kemerlerin mesnet kısımlarının yapının deprem performansı hususunda dikkat edilmesi gereken elemanlar olduğunu belirlenmiştir. Yapının oldukça rijit ve yanal yük kapasitesinin yüksek olması, ana kütlenin dinamik yük etkisinde belirgin bir hasara maruz kalmamasını sağlamaktadır.

Kullanılan sonlu eleman ve malzeme modelinin tarihi yapılarda çatlama ve ezilme davranışının modellenmesinde etkin bir şekilde kullanılabileceği ve bu tür yapılarda oluşabilecek göçme mekanizmalarını ortaya çıkarabilecek yetenekte olduğu belirlenmiştir.

Kaynakça

[1] Çalık, İ., Bayraktar, A., Türker, T. 2016. Betonarme Kubbeli Taş Yığma Duvarlı Camilerin Dinamik Davranışına Etkisinin Çevresel Titreşim Yöntemiyle İncelenmesi, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31:3, 621-630.

[2] Koseoglu, G.C, Canbay, E. 2015. Assessment and rehabilitation of the damaged historic Cenabı Ahmet Pasha Mosque, *Engineering Failure Analysis*, 57, p.389-398.

[3] Kavali, E., Şeker, B.Ş., Çakır, F. ve Uysal, H. 2015. Erzurum Yakutiye Medresesinin yapısal performansının sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmesi, 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, Cilt-I, s. 329-340, Erzurum.

[4] Şeker, B. Ş., 2011. Mimar Sinan Camilerinin statik ve dinamik

yükler etkisindeki davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, 336s Trabzon.

[5] Demir, C. ve Ilki, A. 2014. Characterization of materials used in the multi-leaf masonry walls of monumental structures in İstanbul, Turkey, Construction and Building Materials, 64, 398-413.

[6] Cakir, F., Seker, B.S., Durmus, A., Dogangun, A. and Uysal, H. 2015. Seismis assessment a historical masonry mosque by experimental test and finite element analyses, Structural Engineering, 19(1), 158-164.

[7] Kuran, A. 1969. Anadolu Medreseleri. C I. Ankara.

[8] Çam N. Erzurum'da Yakutiye Medresesi İle İlgili Bazı Mülahazalar, Vakıflar Dergisi, XX, 1988, s.289-310.

[9] Bayülke, N. 1992. Yığma Yapılar, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı- Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.

[10] Tsoutrelis, C.E. and Exadaktylos, G.E. 1993. Effect of rock discontinuities on certain rock strength and fracture energy parameters under uniaxial compression, Geotech Geol Eng, 11(2), p.81-105.

[11] Tomazevic, M. 1999. Earthquake Resistant Design of Masonry Buildings, Singapore: Imperial College Press, p.268.

[12] Binda, L., Pina-Henriques, J., Anzani, A., Fontana, A., Lourenco, P.B. 2006. A contribution for the understanding of load-transfer mechanisms in multi-leaf masonry walls: Testing and modelling, Engineering Structure. 28(8), p.1132-1148.

[13] European Committe for Standardization, 1999.

[14] SolidWorks, Modeling Software, 2013.

[15] ANSYS, Finite Element Analysis Program, 2015.

[16] Willam, K.J., Warnke, E.D. 1975. Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete, International Association for Bridge and Structural Engineering, 19.

[17] Erzurum Çevre Durum Raporu, Erzurum Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2011.

[18] Kazaz, İ., Yakut, A., Gülkan, P. 2006. Numerical simulation of dynamic shear wall tests: A benchmark study, Computers & Structures, 84(8-9), 549-562.

[19] T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı. Sayısal Veriler, [http://kyh.deprem.gov.tr/ftpt.htm], Erişim Tarihi: 30.01.2013.

[20] Bayülke, N. 1999. Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesi, İnşaat Mühendisliği Odası İzmir Şubesi, 15.

[21] T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, 2007.