



Examination of the damage limits of a historical mosque, Konya Sultan Selim Mosque example

İrfan Kocaman*^{ID}, İlker Kazaz^{ID}

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Erzurum Technical University, 25050, Erzurum, Türkiye

Highlights:

- Seismic performance of historical masonry mosque
- Time-history analyses
- Investigation of damage limits

Keywords:

- Sultan Selim Mosque
- Historical masonry mosque
- Seismic performance
- Finite elements
- Dynamic analyses

Article Info:

Research Article

Received: 12.08.2022

Accepted: 24.12.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1161378

Correspondence:

Author:

e-mail: İrfan Kocaman

@erzurum.edu.tr

phone: +90 444 5 388 /2253

Graphical/Tabular Abstract

The idealized global base shear force-top displacement relationship of the mosque was determined by drawing a backbone curve that bounds the force-displacement point values (F, D) representing critical actions, such as maximum force, maximum displacement, cyclic unloading paths, initiation and end of strength and stiffness reduction on the hysteresis curves from time-history analysis. Two different material parameters were employed in the analyses to account for the variation in material properties. Values from the linear response region were also taken to clarify the initial stiffness. In addition, the selected (F, D) points include almost all the values in the cycle in which the mosque is considered to have collapsed. Failure was decided by evaluating the load-deformation hysteresis curves and strain values (damage) on the finite element model. The backbone curve was idealized in three-linear form and damage limits of historical Sultan Selim mosque were defined on this curve (Figure A).

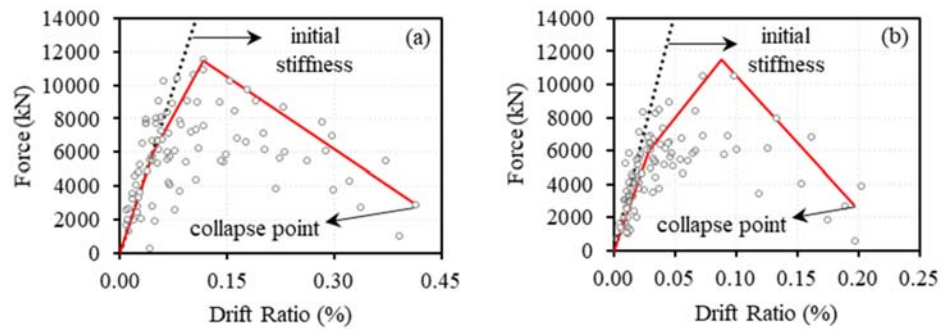


Figure A. Dome level drift ratio-base shear force data of the mosque obtained from dynamic analyses (a) $E=200f_c$; (b) $E=750f_c$

Purpose:

This paper presents the details of the seismic performance evaluation of the historical Konya Karapınar Sultan Selim mosque. The effect of variation in material properties on the seismic performance of historical mosques is examined by employing possible lower and upper bound values of modulus of elasticity (E). It is aimed to determine the reliability of existing damage limits on masonry structures.

Theory and Methods:

A detailed finite element model of the historical Konya Sultan Selim mosque was created. For modulus of elasticity $E=200f_c$ and $E=750f_c$ were assigned to finite element models. Nonlinear time-history analyzes were carried out under five different ground motions. The force-drift ratio curves of the mosque were idealized as defined in Figure A. The damage limits for each performance levels of the mosque were determined.

Results:

The calculated drift ratio limits were found to be lower than the limits recommended in the codes. The results of structural analyses available in the literature also indicate to lower displacement capacity of masonry structures than the collapse limits given in codes. This indicates that existing code limits provides unsafe prediction of seismic performance of masonry mosque.

Conclusion:

The proposed approach in this study should be applied on different historical mosques to determine more generalized damage limits. It is also noted that the seismic behavior and damage limits of historical mosques are different from other masonry structures.



Tarihi bir caminin hasar sınırlarının irdelenmesi, Konya Sultan Selim Cami örneği

İrfan Kocaman*^{ID}, İlker Kazaz^{ID}

Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25050, Yakutiye, Erzurum, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Tarihi yığma camilerin sismik performansı
- Zaman tanım alanında analizler
- Hasar limitlerinin incelenmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 12.08.2022
Kabul: 24.12.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1161378

Anahtar Kelimeler:

Sultan Selim Cami,
tarihi yığma cami,
hasar sınırı,
sonlu elemanlar,
dinamik analiz

ÖZ

Tarihi yığma camiler günümüzde aktif şekilde kullanılan ve geleceğe güvenle aktarılması gereken kültürel bir mirastır. Genellikle yığma duvar taşıyıcı sistemine sahip bu yapılar, farklı depremlerde ciddi hasarlar gördüğü gözlemlenmektedir. Tarihi yığma camilerin deprem davranışlarının belirlenmesi amacıyla birçok çalışma yürütülmektedir. Ancak çeşitli malzeme özellikleri, yıkılma mekanizmaları, belirsiz geometri ve yükleme durumları gibi sebepler bu yapıların deprem davranışının belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada Konya Karapınar Sultan Selim Caminin sonlu eleman modeli farklı iki malzeme özelliği ($E=750f_c$ ve $E=200f_c$) kullanılarak oluşturulmuştur. Sonlu eleman modellerinde 5 farklı yer hareketi kullanılarak zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizler neticesinde, caminin farklı yıkılma mekanizmaları ortaya konulmuştur. Ayrıca caminin yer değiştirmeye dayalı deprem performans limitleri belirlenerek yönetmelik, kılavuz ve literatür önerileri ile karşılaştırılmıştır. Elastisite modülünün, caminin performans limitlerine etkisi irdelenmiştir.

Examination of the damage limits of a historical mosque, Konya Sultan Selim Mosque example

HIGHLIGHTS

- Seismic performance of historical masonry mosque
- Time-history analyses
- Investigation of damage limits

Article Info

Research Article
Received: 12.08.2022
Accepted: 24.12.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1161378

Keywords:

Sultan Selim Mosque,
historical masonry mosque,
damage limits,
finite elements,
dynamic analyses

ABSTRACT

Historical masonry mosques are a cultural heritage that is actively used today and should be transferred to the future in safe. These structures, which generally have a masonry load-bearing system, have been observed to be seriously damaged in different earthquakes. Many studies are carried out to determine the earthquake behavior of historical masonry mosques. However, reasons such as various material properties, failure mechanisms, uncertain geometry and loading conditions make it difficult to determine the seismic behavior of these structures. In this study, the finite element model of Konya Karapınar Sultan Selim Mosque was created using different two material properties ($E=750f_c$ and $E=200f_c$). In the finite element models, time history analyzes were carried out using 5 different ground motions. As a result of dynamic analyses, different collapse mechanisms of the mosque were investigated. In addition, the earthquake performance limits of the mosque based on displacement were determined and compared with the codes, guidelines and literature recommendations. The effect of the elasticity modulus on the performance limits of the mosque has been examined.

1. Giriş (Introduction)

Tarihi camiler, karmaşık geometrik formları, değişken yapım teknikleri ve kullanılan malzeme özellikleri sebebiyle yapısal davranışların belirlenmesi zor yapılardır. Bu yapılarda meydana gelebilecek hasarların belirlenmesi ve planlanması için öncelikle yapının davranışının en doğru şekilde hesaplanması gerekmektedir. Ayrıca tarihi camilerde oluşan deformasyon şekilleri, göçme mekanizmaları ve yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi, yapıların deprem davranışlarının belirlenmesinde de oldukça önemlidir. Ancak, davranış açısından karmaşık yapıya sahip tarihi camilerin analitik hesaplarla değerlendirilmesi oldukça zordur. Bu nedenle, tarihi camilerin sonlu eleman yöntemi kullanılarak modellenmesi ve modellenen yapıların bilgisayar analizleriyle değerlendirilmesi kullanışlı ve yaygın bir yöntemdir.

Gelişen bilgisayar teknolojisiyle birlikte, tarihi camilerin deprem performansının ve meydana gelen hasarların belirlenmesi, ülkemizde ve dünyada önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Özellikle, son yıllarda yıkıcı depremlerden etkilenen tarihi yapıların performans ile ilgili birçok bilimsel çalışma yürütülmüştür. Söylük ve Tuna [1] bir tarihi yığma cami sisteminin sismik izolasyon teknolojisi uygulanarak güçlendirilmesini hedeflemiştir. Bu amaçla Şehzade Mehmet Cami dikkate alınarak, cami sisteminin sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Ankastre mesnet ve yüksek sönümlü kauçuk mesnet ile oluşturulan sonlu eleman modellerinin dinamik davranışları karşılaştırılmıştır. Çalışmada, sismik taban izolatörü uygulamasının tarihi yığma caminin dinamik davranışını önemli ölçüde iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Kazaz ve Kocaman [2] Erzurum Lala Paşa Camisi'nin statik ve dinamik yükler altındaki davranışını sonlu eleman yöntemiyle incelenmiştir. Sonlu eleman modelinde dinamik analizler gerçekleştirilerek caminin yatay yük kapasitesi belirlenmiştir. Ayrıca literatürde önerilen kuvvet kapasitesini belirlemeye yönelik bağıntıların yeterliliği irdelenmiştir. Aslay ve Okuyucu [3] Erzincan ilinde bulunan tarihi Değirmenli köy kilisesini ele alarak deneysel modal analiz gerçekleştirmişlerdir. Yapının sonlu eleman modeli oluşturularak, deneysel modal analiz sonuçları ışığında malzeme özellikleri kalibre edilmiştir. Çalışmada 1992 Erzincan Deprem kaydı kullanılarak yapının sismik performansını incelenmiştir. Çalık vd. [4] yığma taş duvarlı camilerin dinamik davranışlarının belirlenmesi adına çalışmalar yürütmüşlerdir. Tarihi Dürbinar camisinin restorasyon öncesi ve sonrası doğal frekanslarını deneysel modal analiz yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Restorasyon sonrasında caminin ilk modunda belirgin bir değişikliğe vurgu yapmışlardır. Usta vd. [5] tarihi Afyon Sandıklı Ulu Cami ele alarak statik ve dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Analizler neticesinde yapının deprem etkisi altında davranış ve sismik hassasiyeti ortaya konulmuştur. Çakır [6] tarihi yapıların deprem performansını belirlemek amacıyla deplasmana dayalı basitleştirilmiş bir yöntem önermektedir. Önerilen yöntem Kaya Çelebi Cami örneği ile detaylandırılmıştır. Maraş vd. [7] çalışmalarında 2020 Elâzığ depremi sonrasında bölgede bulunan tarihi Sütçü camisinde meydana gelen hasarları sonlu eleman modeli yardımıyla belirlemişlerdir. Sonlu eleman modelinde elde edilen hasar ve çatlak mekanizmaları ile yapıda deprem sırasında oluşan hasarların oldukça uyumlu şekilde örtüştüğünü belirlenmiştir. Bayraktar vd. [8] tarihi Fatih Camisinin restorasyonu sırasında belirlenen 12 pencere açıklığının yapı davranışına etkisini incelemiştir. Restorasyon öncesi ve sonrasında yapının deneysel doğal frekansı belirlenerek sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan sonlu eleman analizleri lineer dinamik analizlere tabi tutularak, pencere açıklıklarının yapının davranışına etkisi irdelenmiştir. Uray vd. [9] İznik Yeşil Camisinin malzeme özelliklerini tahribatsız yöntemlerle belirlemişlerdir. Zemin özellikleri zemin etüt çalışmaları ile incelenmiştir. Yapının sonlu eleman modeli oluşturularak statik analizler altında yapısal gerilmeler incelenmiştir. Portioli vd. [10]

Üsküp Mustafa Paşa Cami'nin sismik davranışını belirlemek ve CFRP tabanlı bir güçlendirme tekniğinin etkinliğini değerlendirmek amacıyla çalışma gerçekleştirmişlerdir. Caminin büyük ölçekli bir modeli sarsma tablası testlerine tabi tutularak sonlu eleman modeli kalibre edilmiştir. Kalibre edilen sonlu eleman modelinde statik ve dinamik analizler gerçekleştirilerek, güçlendirme yönteminin etkinliği ve caminin sismik davranışını ortaya konulmuştur. Kocaman vd. [11] tarihi Erzurum Lala Paşa caminin sonlu eleman modelini oluşturularak, deprem davranışını dinamik analizler ile belirlemişlerdir. Tarihi camilerin kuvvet kapasitesinin belirlenmesi için kinematik bir yaklaşım önerilmiştir. Tarihi Erzurum Narmanlı cami ele alınarak önerilen kinematik yaklaşımın yeterliliği kontrol edilmiştir. Aşıkoğlu vd. [12] tarihi Kurşunlu caminin sonlu eleman modelini oluşturularak bir dizi itme analizi gerçekleştirmişlerdir. Yapının uygulan restorasyon öncesi ve sonrası kuvvet-yer değiştirme eğrileri karşılaştırılmıştır. Altunışık vd. [13] deprem esnasında ağır hasar gören Hüsrev Paşa ve Kaya Çelebi camilerini ele almıştır. Camilerin sonlu eleman modelleri oluşturularak yakın ve uzak fay yer hareketlerinin cami modelleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Köseoğlu ve Canbay [14] tarihi Ankara Cenabi Ahmet Paşa Cami'de meydana gelen çatlak hasarlarının sebeplerini irdelenmişlerdir. Yapının sonlu eleman modeli ile çatlak eşleştirilmesi yapılmıştır. Analizler neticesinde yapının temeli ve ana kubbesi etrafına güçlendirme önerilerinde bulunmuşlardır. Aşıkoğlu vd. [15] güçlendirme müdahalesinde bulunan tarihi bir caminin dinamik analizleri ışığında, güçlendirmenin sismik davranışa etkisini irdelenmişlerdir. Analizler neticesinde camiye uygulanan güçlendirmenin, yer değiştirme kapasitesine olumlu katkılar sağladığı raporlanmıştır. Bilgin ve Ramadani [16] Kosova'da bulunan Bayraklı Cami'de yerinde incelemelerle çatlak hatlarını belirlemişlerdir. Yapının sonlu eleman modeli oluşturularak, statik ve dinamik analizlerle çatlak sebepleri tartışılmıştır. Dinani vd. [17] tarihi Esfahan Şah Cami'de bir dizi tahribatsız deneyler yaparak, caminin malzeme özelliklerini belirlemişlerdir. Caminin sonlu eleman modeli oluşturularak itme analizleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan analizler neticesinde caminin performans limitleri önerilmiştir. Karantoni ve Dimakopoulou [18] Kos adasında meydana gelen deprem sonrası tarihi Gazi Hasan Paşa camisinde meydana gelen hasarları incelemişlerdir. Yapının sonlu eleman analizleri gerçekleştirilerek, meydana gelen hasarların sınırlı hasar düzeyinde olduğunu belirtmişlerdir. Milani ve Valenta [19] 2012 Emilia-Romagna depremi esnasında hasar gören tarihi kiliselerin incelemişlerdir. Kiliselerde meydana gelen hasar durumuna göre, yapıların hasar limitleri hakkında çalışmalar yürütmüşlerdir. Toplamda 7 tarihi kilise incelenerek farklı hasar düzeyleri için sınır değerler önermişlerdir. Valenta [20] doğrusal olmayan dinamik analizlerle köşelerinde kule olan tarihi yığma sarayların sismik davranışını incelemiştir. Analizler neticesinde duvarlar ile birleşen kulelerin oldukça hassas olduğu belirlenmiştir. Ayrıca tonozlarda ve duvarlarda beklenen çatlak desenleri tanımlanmıştır.

Bu çalışmada, sonlu elemanlar analizi yardımı ile tarihi camilerin sismik performanslarının belirlenmesinde yaşanan belirsizlikler değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında Konya ili Karapınar ilçesinde bulunan Sultan Selim Cami ele alınarak, yapının 5 farklı deprem kaydı altında dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizler neticesinde tarihi camilerde performans düzeylerinin tanımı ve ötelenme oranı sınırları irdelenmiştir. Çalışmada ayrıca, tarihi camilerde malzeme özelliklerinin, yapının deprem performansına etkisi irdelenmiştir. Bu amaçla ele alınan camide dinamik analizler farklı malzeme özellikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde elde edilen performans limitleri kodlar, kılavuzlar ve literatürde bulunan çalışmalarda elde edilen limitler ile karşılaştırılmıştır. Tarihi camilerde performans limitlerinin belirlenmesinde karşılaşılan zorluklara ve belirsizliklere değinilmiştir.

2. Konya Karapınar Sultan Selim Cami (Konya Karapınar Sultan Selim Mosque)

2.1. Tarihçesi ve Mimari Özellikleri (History and Architectural Properties)

Şekil 1'de gösterilen Konya ili Karapınar ilçesi Selimiye Mahallesi'nde yer alan Sultan Selim Cami, 1563 yılında Sultan II. Selim tarafından yaptırılmıştır. Külliye halinde kurulan yapı, cami, imaret, bedesten, han ve hamamdan oluşmaktadır. Caminin çevresindeki külliye yapılıma amacı İstanbul-Bağdat posta ve ticaret yolunun güvenliğini sağlamaktır. Yapılan bu külliye çok sistematik bir şekilde imar edilmiştir. Hamam günümüzde müze olarak kullanılırken, bedesten çarşı olarak han da kafeterya olarak kullanılmaktadır. Caminin kapısından çeşme çok rahat görülmektedir. Hanın kuzeyden güneye uzunca bir avlusu ve dört tarafa açılan bir kapısı vardır. Kapılar ve hanlar kesme taşlarla yapılmıştır. Hanların içine aş evi, ambar, imarethane, at ahır, dinlenme odaları gibi binalar yapılmıştır [21].

Sultan Selim Cami, Mimar Sinan eseri olarak bilinmektedir. Caminin merkez kubbesi simetrik bulunan ana taşıyıcı dört duvar tarafından taşınmaktadır. Kubbe duvarlara 4 kemer ile oturmaktadır. Duvarların kesişim yerleri büyük tromplar ile kapatılmıştır. Ana kubbe 14 m çapında, 20,40 m yüksekliğinde ve yaklaşık olarak 50 cm kalınlığındadır. Caminin ana boyutları yaklaşık olarak 16,75m x 16,75m'dir. Beden duvar kalınlığı yaklaşık olarak 130 cm'dir. Dört taraftaki duvarlar, kubbeyi taşıyan sekizgen kasnağa kadar yükselmiştir. Caminin, doğu ve batı cephelerinde iki aşağıda ve iki yukarıda pencere boşluğu, güney cephesinde aşağıda ve yukarıda ikişer pencere boşluğu, kuzey cephesinde ise aşağıda iki pencere ve bir kapı boşluğu bulunmaktadır. Bu duvarlar ana kubbeyi ve diğer trompları taşımaktadır. Caminin iki minaresi ise camiye birleşik şekilde güney-batı/doğu kısmına konumlandırılmıştır. Şekil 1'de caminin farklı cephelerden görünüşlerini ve kesitleri sunulmaktadır.

2.2. Malzeme Özellikleri (Material Properties)

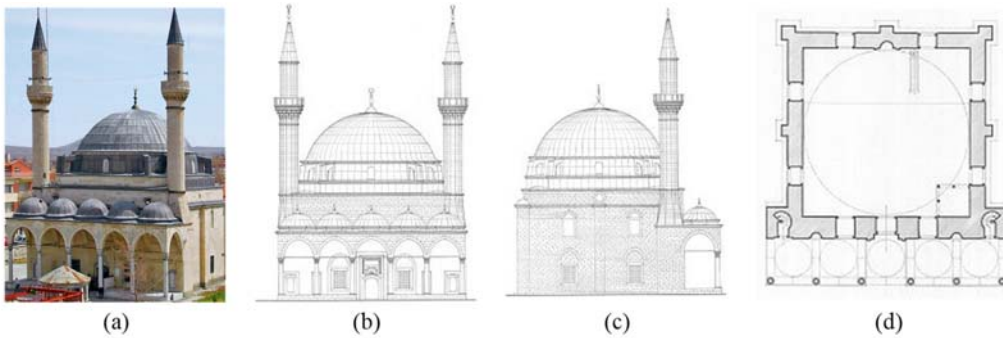
Sonlu eleman modelinde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri için benzer yapılar üzerinde yapılan incelemeler ve araştırmalar göz önünde bulundurularak Tablo 1'de verilen değerler kullanılmıştır. Literatürde üç cidarlı duvarların basınç dayanımının belirlenmesine

yönelik deneysel çalışmalar bulunmaktadır. [23-25]. Dikkate alınan çalışmalarda basınç dayanımı ortalama 3 MPa olarak elde edilmiştir. Bu sebeple çalışmada duvar basınç dayanımları 3 MPa olarak kabul edilmiştir. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelikte [26] yığma elemanlar için önerilen basınç dayanımı elastisite modülü ilişkisi $E=200f_c$ değeri ile hesaplanmaktadır. Öte yandan, duvar malzemesine tanımlanan elastik modül, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde [27] $750f_c$, FEMA 356'da [28] $550f_c$, Eurocode 6'da [29] $1000f_c$ olarak önerilmektedir. $E=200f_c$ kullanılacak olursa yatay yük kapasitesinin fazla değişmediği ancak mevcut yer değiştirme talebinin $1000f_c$ değerine göre yaklaşık olarak dört-beş katına çıktığı görülmüştür [11]. Bu çalışmada, basınç altındaki elastik modül değeri $200f_c$ ve $750f_c$ olarak kabul edilmiştir. Her iki yaklaşımla gerçekleştirilen analizlerle cami türü yapılar için literatürde önerilen rijitlik değerlerine göre alt ve üst sınır olarak kabul edilebilecek rijitlikte davranışlar elde edilmektedir. Tablo 1'de $E=200f_c$ olan modelde kubbe elastisite modülü 500 MPa, $E=750f_c$ modelinde ise 1000 MPa olarak kabul edilmiştir. Caminin taşıyıcı duvarlarına göre daha esnek özellikte olan kubbelerin [13, 30] elastisite modüllerinin cami duvarlarına göre daha düşük alınması literatürde oldukça yaygın bir kabuldür [11, 13, 31].

2.3. Sonlu Eleman Modeli (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 detaylardan kaynaklanan karmaşıklık, bu yapıların modellenmesinde sorunlar çıkarmaktadır. Bu çalışmada yapısal davranışa etki etmediği düşünülen mimari ince süsleme unsurları modellenmemiş, göz ardı edilmiştir. Bununla birlikte, Şekil 2'de görüldüğü gibi Sultan Selim Camisinin, SolidWorks yazılımı kullanılarak oldukça detaylı bir model üretilmiştir. Oluşturulan model ANSYS APDL yazılımına aktarılmış ve sonuçta 32084 düğüm noktalı ve 145717 sonlu elemanlı hesap modeli elde edilmiştir.

Sonlu eleman modelinde SOLID65 elemanı kullanılmıştır. SOLID65 elemanı, her düğüm noktasında üç ötelenme serbestlik derecesine sahip sekiz düğüm noktasından oluşan bir elemandır. Bu 3D katı eleman, çekme gerilmelerinde çatlama, basınç gerilmelerinde ezilme özelliklerine ve plastik şekil değiştirme yeteneğine sahiptir. Malzeme



Şekil 1. Sultan Selim Cami (a) genel görünüm; (b) giriş cephesi görünüm; (c) doğu cephesi görünüm; (d) plan [22]
(Sultan Selim Mosque (a) general view; (b) entrance facade view; (c) east facade view; (d) plan)

Tablo 1. Sultan Selim Camisinin malzeme özellikleri (Material properties of Sultan Selim mosque)

	Çekme dayanımı	Basınç dayanımı	Birim hacim ağırlığı	Poisson Oranı	Elastisite modülü (200f _c)	Elastisite modülü (750f _c)
	f _t (MPa)	f _c (MPa)	γ (kN/m ³)		E (MPa)	E (MPa)
Duvarlar	0,3	3,00	25	0,18	600	2250
Kubbe	0,3	3,00	25	0,18	500	1000

modeli olarak beş parametrelili Willam-Warnke [32] modeli kullanılmıştır. Bu modelde yığılma biriminin çekme ve basınç dayanımları kullanılarak malzemenin kırılma gerilmesi yüzeyi oluşturulur. Malzemenin davranışı kırılma yüzeyine kadar doğrusaldır. İlk göçme yüzeyinde kırılma gerilmesi dayanım kaybından dolayı gerilmelerin sıfır olması ile eleman rijitliği azalır ve sistem rijitliğinin azalmasına katkıda bulunur. William-Wranke modeli, kapalı çatlaklar (β_c) ve açık çatlaklar (β_t) için kesme gerilmesi iletim katsayılarını, basınç dayanımı (f_c) ve çekme dayanımı (f_t) parametrelerini içermektedir. Analizlerde β_c değeri 0,8, β_t değeri ise 0,05 olarak tanımlanmıştır [33]. Betonarme ve yığılma yapıların ANSYS [34] ortamında oluşturulan sonlu eleman modellerinde SOLID65 ve Willam-Warnke malzeme modelinin kullanılmasına yönelik birçok numerik uygulama Kazaz vd.'de [35] detaylı olarak verilmiştir.

Bu çalışmada ele alınan caminin minaresi ve son cemaat yeri modellenmemiştir. Minareler genelde cami ana kütesine köşede rijit bir kaide üzerinde bağlantılı halde bulunur. Camilerin boyutlarına göre bu bağlantı ancak lokal davranışa etki etmekte, sistem davranışını etkilememektedir. Ayrıca deprem esnasında, minarelerin ana yapıdan bağımsız hasar mekanizmasına sahip olduğu Doğangün ve Sezen [36] tarafından raporlanmıştır. Benzer şekilde son cemaat yeri, cami dışında kalan cemaati kapsamak veya hızlı bir şekilde ibadet etmek amacıyla, ince yekpare mermer sütunlar üzerine inşa edilen kemerler tarafından taşınan bir üst örtünün camiye bir duvar tarafında bağlanmasıyla oluşturulur. Minareye göre sistem davranışına daha fazla etkisi olmakla birlikte hasarın en yoğun olduğu bölgelerden biridir. Şekil 3'de Tarihi Hüsrev Paşa Cami'nin 2011 Van depremi sonrasında son cemaat yerinde meydana gelen göçme hasarı verilmektedir. Caminin ana kütesinde kılcal çatlaklar gözlemlenmiştir. Ana kütleyle göre daha esnek olan son cemaat yerinde meydana gelen hasar Tapan vd. [30] tarafından raporlanmıştır. Ayrıca, bu kısmın dinamik özelliklere katkısının da ihmal edilebileceği varsayılmıştır. Konya Karapınar Sultan Selim Caminin (750 f_c) son cemaat yeri modellendiğinde yapının 1., 2. ve 3. mod frekansları sırasıyla 4,17 Hz, 4,39 Hz ve 5,58 Hz olarak belirlenmiştir. Aynı caminin son cemaat yeri olmadan gerçekleştirilen modal analizinde 1., 2. ve 3. mod frekansları sırasıyla 4,14 Hz, 4,37

Hz, 5,56 Hz olarak belirlenmiştir. Son cemaat yerinin yapı davranışına ilk üç mod değeri ışığında etkisinin düşük olduğu söylenebilir.

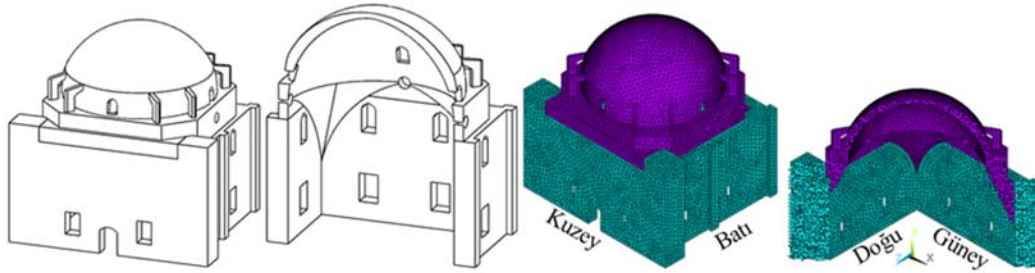
Son cemaat yerinin dinamik analizler sonucunda yapıya etkisi caminin 750 f_c malzeme kullanılan sonlu eleman modelinde irdelenmiştir. İlk olarak son cemaat yeri bulunan sonlu eleman modelinin Tablo 3'de detayı verilen 1992 Erzincan depremi yer hareketi altında zaman tanım alanında analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonra, sonlu eleman modelinden son cemaat yeri çıkartılarak aynı yer hareketi altında dinamik analiz yeniden gerçekleştirilmiştir. Her iki dinamik analizden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 4'de verilmektedir. Yer değiştirme değerleri kubbe tepesinden alınmıştır. Eğrilerde, yapının rijitliği, maksimum kuvvet kapasitesi ve elastik olmayan kısımdaki yer değiştirme davranışının benzer olduğu ve yapının ötelenme oranlarının da değişmediği görülmektedir.

Şekil 5'de her iki dinamik analizden elde edilen birinci asal gerilmeler aynı kontur diyagramı ile verilmektedir. Caminin, yer hareketinin 2.72'inci saniyesinde kuzey-doğu köşesinden göçtüğü görülmektedir. Bu göçme mekanizmasına son cemaat yerinin herhangi bir etkide bulunmadığı oldukça açıktır. Analizde sonucunda son cemaate yerinde oldukça düşük birim şekil değiştirmeler gözlemlenmiştir. Sultan Selim caminin 1992 Erzincan yer hareketi altında yapılan dinamik analizinde son cemaat yerinin yıkılmadığı ancak yapının genel davranışına da herhangi bir etkide bulunmadığı gözlemlenmiştir.

Caminin minaresi ve son cemaat yerinin, cami kütesinin temel davranışını ve dinamik özelliklerini değiştirmemekle birlikte, mevcudiyetleri durumunda bu bölümlerde oluşacak ileri boyuttaki lokal hasar ön plana çıkarak sayısal çözümü güçleştirdiği için sonlu eleman modellerinde bu iki unsur modellenmemiştir. Bu durum hem yapılacak analizlerin daha sağlıklı ilerlemesine hem de çalışmanın camilerin ana yapısına odaklanmasına olanak sağlamıştır.

2.4. Statik Analiz (Static Analysis)

Konya Karapınar Sultan Selim Camisinin kendi ağırlığı altında statik düşey yük analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler hem 200 f_c hem de



Şekil 2. Sultan Selim Cami (a) SolidWorks modeli; (b) ANSYS modeli (Sultan Selim Mosque (a) SolidWorks model; (b) ANSYS model)



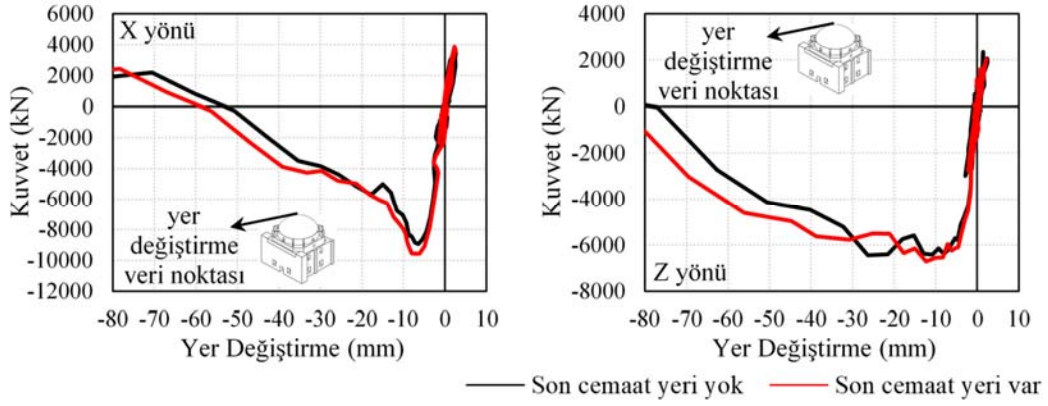
Şekil 3. Van Hüsrev Paşa Cami'nin 2011 Van depremi öncesi ve sonrası görüntüleri [30]
(Images of Van Hüsrev Pasha Mosque before and after the 2011 Van earthquake)

750 f_c malzeme değerleriyle gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarında elde edilen gerilme değerleri ve dağılımları birebir aynı olması sebebiyle sadece 200 f_c statik analiz sonuçları sunulmaktadır. Yapıda düşey yük ana kubbeden dört bir yandaki taşıyıcı duvarlara aktarılmaktadır. Cami taşıyıcı sisteminde meydana gelen basınç ve çekme gerilme değerleri incelendiğinde, basınç gerilmelerin duvarların mesnet bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Duvarların mesnet bölgelerinde basınç gerilmesinin en büyük 0,95 MPa ve ortalama olarak 0,42 MPa mertebesinde değerlere ulaştığı görülmektedir (Şekil 6a). Çekme gerilmeleri ise kubbe duvar birleşim bölgelerinde, pencere boşluklarının üst kısımlarında yoğunlaştığı ve maksimum çekme gerilmesinin 0,18 MPa değerine ulaştığı görülmektedir (Şekil 6b). Elde edilen gerilme değerleri, çalışmada kullanılan 3,00 MPa basınç dayanımı ve kabul edilen çekme dayanımı

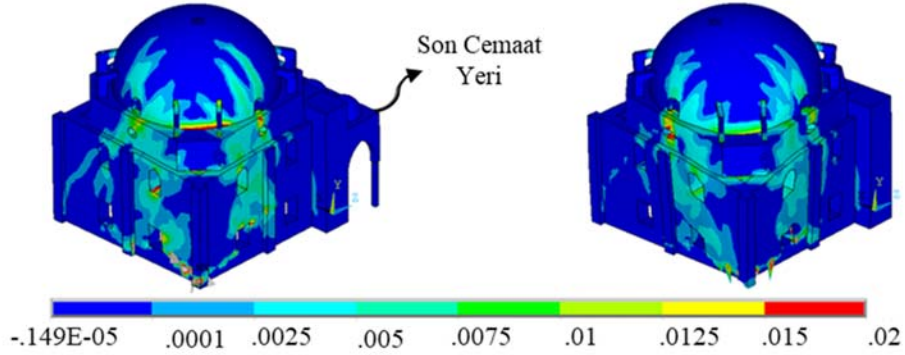
değeri olan 0,3 MPa'dan küçüktür. Bu nedenle statik durumda kendi ağırlığından kaynaklanan gerilmeler altında yapı yeterli güvenliğe sahiptir.

2.5. Modal Analiz (Modal Analysis)

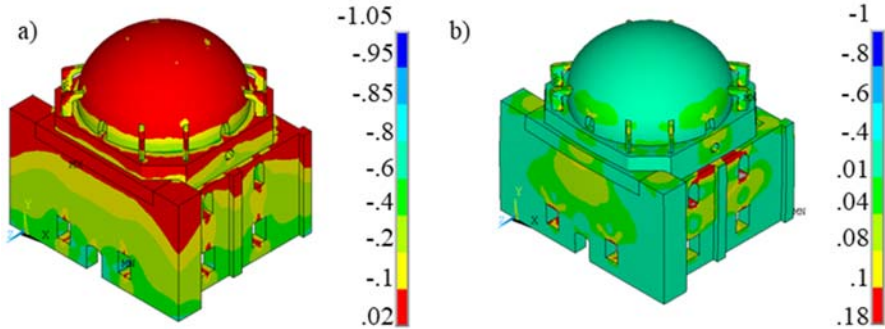
Sultan Selim Cami'nin modal analizi her iki elastisite modülüyle gerçekleştirilerek titreşim frekansları ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. Analiz 20 modda yapılmış ve ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Tablo 2'de yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen ilk altı moda ait frekans değerleri ve kütle katılım oranları verilmektedir. 200 f_c ve 750 f_c modellerinin modal frekans değerleri arasında beklenileceği gibi farklılıklar mevcuttur. Bu durum elastisite modülünün yapının dinamik davranışını direkt etkileyeceği şeklinde



Şekil 4. Son cemaat yerinin kuvvet-yer değiştirme eğrilerine etkisi (The effect of narthex on the force-displacement curves)



Şekil 5. Son cemaat yerinin hasar mekanizmasına etkisi (The effect of narthex on the damage mechanism)



Şekil 6. Statik analiz sonucunda elde edilen (MPa) (a) basınç gerilmeleri; (b) çekme gerilmeleri
(a) Compressive stresses; (b) Tensile stresses from static analyses)

yorumlanabilir. Ayrıca her bir modun farklı doğrultularda kütle katılım oranları verilmektedir. Kütle katılım oranları her iki modelde aynı modların aynı doğrultuda olduğunu göstermektedir. Ancak bu değerlerin bire bir uyuşmadığı, elastisite modülünün kütle katılım oranlarını etkilediği görülmektedir. Mod şekillerine bakıldığında her iki modelde de 1. mod kuzey-güney (Z doğrultusu), 2. mod doğu-batı (X doğrultusu) doğrultusunda ötelenmektedir. 3., 4. 5. ve 6. modlar ise burulma (Y dönme) modlarıdır. Şekil 7’de yapının mod şekilleri verilmektedir. Yapının toplam kütlesi 3518 tondur.

3. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizler (Nonlinear Time-History Analyses)

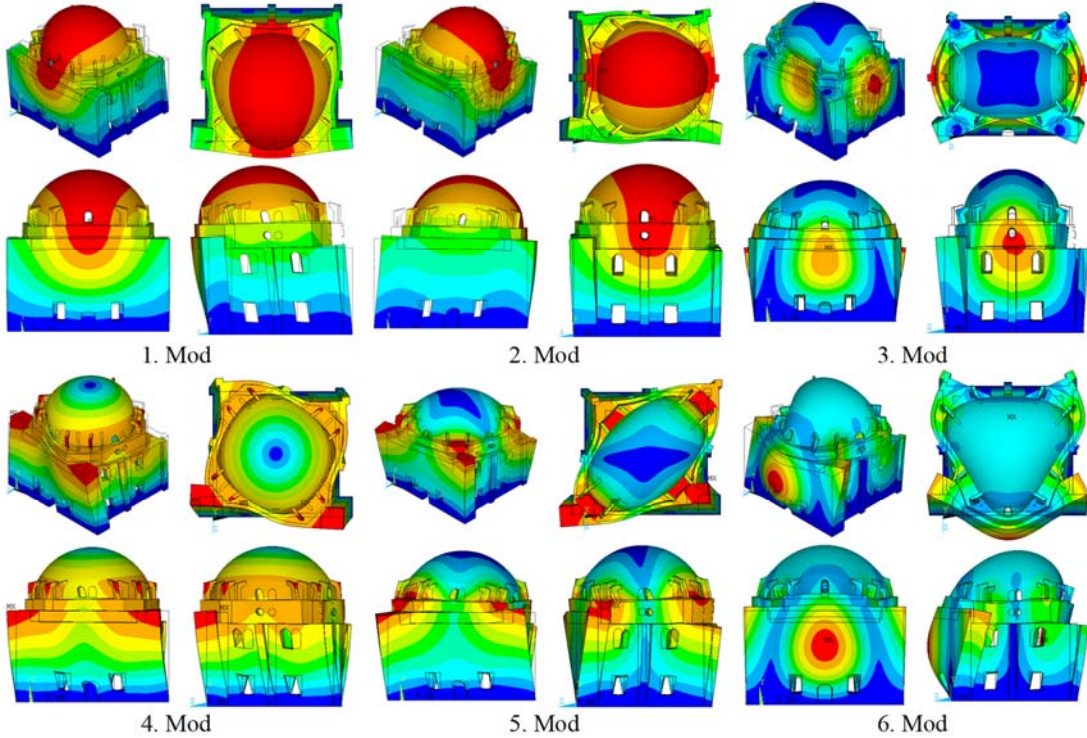
Anadolu bulunduğu konum sebebiyle tarih boyunca birçok büyük ve küçük depreme maruz kalmıştır. Deprem tehlikesi açısından Deprem Bölgeleri Haritasına [37] göre Konya ilinin %8’i, I. derece, %8’i II. derece, %17’si, III. derece, %40’ı IV derece ve %27’si ise V. derece (tehlikesiz) zon içinde yer almaktadır. Geçtiğimiz son yüzyıl içinde hasar verici ve can kaybına yol açan tek deprem 1946 tarihinde Argıthanı ve Iğın çevresinde olmuştur. M_w 5,5 büyüklüğündeki bu deprem yörede 509 binada ağır hasar oluşturmuş ve iki kişinin ölümüne yol açmıştır [38]. Literatürde yapının deprem performansının incelendiği bir çalışmaya ve geçmiş depremlerde maruz kaldığı herhangi bir hasar kaydına ulaşılammıştır. Bu çalışmada Sultan Selim Camisinin dinamik çözümü iki farklı

malzeme değerleri kullanılarak Tablo 3’de verilen beş farklı yer hareketi altında gerçekleştirilmiştir. Model plan düzlemi XZ düzlemi, yer çekimi (düşey) yönü Y eksenini olarak alınmıştır. Analizler deprem yer hareketi kayıtlarının yatay bileşenlerinin X ve Z eksenleri doğrultusunda uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Seçilen yer hareketlerinin, caminin dayanım ve yer değiştirme kapasitesini (yapıyı yıkmaya) ortaya çıkaracak kadar yüksek şiddette olduğu doğrusal olmayan tek serbestlik dereceli sistem (TSDS) analizleri ile teyit edilmiştir. Caminin itme eğrileri, doğrusal olmayan TSDS sistem gösterimini elde etmek için modal kapasite eğrilerine dönüştürülmüştür. Daha sonra seçilen yer hareketleri altında maksimum yer değiştirme talebi TSDS’lerin zaman tanım alanı analizi ile değerlendirilmiştir.

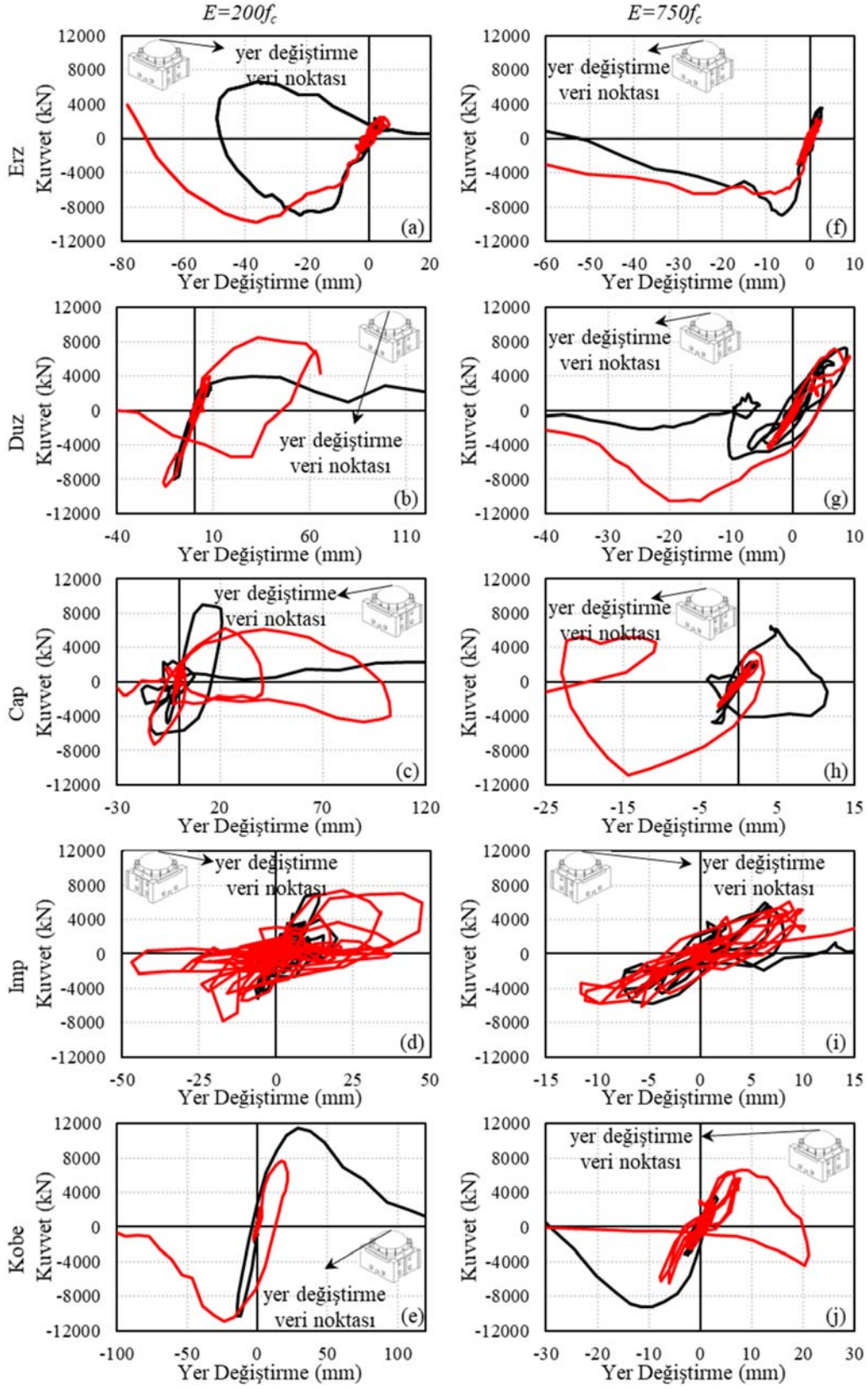
Şekil 8’de yapının her dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti grafikleri verilmektedir. Yer değiştirme değerleri caminin kubbe tepesinden alınmıştır. Kuvvet değerleri ise caminin mesnetlerinde elde edilmiştir. Grafiklerde hem X yönünde hem de Z yönünde değerler bulunmaktadır. Cami, uygulanan yer hareketinin özelliğine bağlı olarak farklı yer değiştirme mekanizması göstermektedir. $E=750f_c$ modeli için elastik davranış yer değiştirme limitinin 6 mm civarı olduğu görülürken bu değer $E=200f_c$ modelinde 10 mm mertebesine kadar çıktığı görülmektedir. Her iki modelde yük kapasitesinin oldukça yakın ve 11500 kN mertebelerinde olduğu görülmektedir.

Tablo 2. İlk altı moduna ait frekans ve kütle katılım oranı (KKO) değerleri (Frequencies and mass participation ratios for the first six modes)

Mod	Frekans (Hz)		KKO (X doğ. yatay)		KKO (Z doğ. yatay)		KKO (Y dönme)	
	$200f_c$	$750f_c$	$200f_c$	$750f_c$	$200f_c$	$750f_c$	$200f_c$	$750f_c$
1	2,33	4,14	0,11E-5	1,19E-6	0,70	0,65	0,28	0,28
2	2,48	4,37	0,71	0,65	0,11E-5	1,01E-6	0,56	0,57
3	3,31	5,56	0,18E-7	3,07E-7	0,79E-4	3,12E-5	0,56	0,57
4	3,83	7,03	0,48E-2	4,00E-4	0,31E-7	4,08E-7	0,83	0,74
5	4,14	7,15	0,24E-2	6,18E-3	0,15E-6	3,69E-7	0,83	0,83
6	4,67	8,18	0,45E-10	3,61E-7	0,79E-2	2,59E-3	0,83	0,83



Şekil 7. İlk altı moda ait mod şekilleri (Modal shapes of first six modes)



Şekil 8. Dinamik analizler sonucunda caminin kubbe yer değiştirme-taban kesme kuvveti eğrileri
(The dome displacement-base shear force curves of the mosque obtained from the dynamic analyses)

Tablo 3. Dinamik analizde kullanılan yer ivmesi kayıtları (Ground motion records used in dynamic analyses)

Deprem	Kodu	Yıl	M _w	İstasyon	PGA (cm/sn ²)		PGV (cm/sn)	
					X yönü	Z yönü	X yönü	Z yönü
Erzincan	Erz	13.03.1992	6,8	Merkez	381,6	460,5	101,4	94,7
İzmit (Kocaeli)	Duz	17.08.1999	7,4	Düzce, Merkez Meteoroloji İstasyon Müdürlüğü	373,8	314,9	52,6	59,5
Cape Mendocino	Cap	25.04.1992	7,1	İstasyon No: 89324 (40.503N, 124.100W)	378,3	538,5	45,6	44,0
Imperial Valley	Imp	15.01.1979	6,6	USGS 5115 (32 54 58N, 115 21 58W)	365,2	309,4	32,7	33,7
Kobe	Kobe	16.01.1995	6,9	Japonya Meteoroloji Ajansı	805,7	587,1	81,4	74,3

Yapılan dinamik analizler neticesinde, yapının her bir yer hareketi altında yıkılma mekanizması belirlenmiştir. Her iki modelde toplam 10 adet dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda yer hareketine bağlı olarak camide meydana gelen yıkılma mekanizmasındaki değişiklikler irdelenmektedir. $E=200f_c$ ve $E=750f_c$ modellerine ait birinci asal birim şekil değiştirmeler ışığında yıkılma mekanizmaları Şekil 9'da verilmektedir. $E=200f_c$ modelinde Erz yer hareketinde yapı güney-doğu köşesinden, Duz yer hareketinde kuzey-batı, Cap yer hareketi kullanılan analizler neticesinde ise kuzey-doğu köşesinden geçmektedir. Aynı modelde Imp ve Kobe yer hareketleri kullanılarak yapılan analizler neticesinde ise yapı güney-batı köşesinden geçmektedir. $E=750f_c$ modelinde ise Erz ve Duz yer hareketinde yapı güney-doğu köşesinden, Cap ve Imp yer hareketi kullanılan analizler neticesinde ise güney-batı köşesinden geçmektedir. Aynı modelde Kobe yer hareketi kullanılarak yapılan analizler neticesinde ise yapı kuzey-doğu köşesinden geçmektedir. $E=200f_c$ ve $E=750f_c$ modellerinde yer hareketleri altında farklı bölgelerde hasarın gerçekleşmesi yer hareketinin karakteristiği olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak aynı yer hareketi altında bu iki model arasındaki yıkılma mekanizmasının değişmesi, elastisite modülü etkisiyle dinamik davranışın değişmesi ile açıklanabilir.

EMS-98'de [39] yığma yapılarda hasar dereceleri ile performans seviyeleri ilişkilendirilmiştir. EMS-98'de hasarlı yığma binaların görsel taslakları ve bunlara karşılık gelen performans limitleri sunulurken, her bir hasar derecesi nitel olarak açıklanmıştır. EMS-98 yığma yapıda meydana gelen hasarlar hafif, orta ve ağır olarak üç grupta incelenmektedir. Az hasarlı olarak nitelendirilen yapılar, herhangi bir onarım görmeden devamlılığını ve kalitesi hizmetini sürdürebilen yapılardır. Orta hasarlı olarak nitelendirilen yapılar, küçük ve/veya büyük ölçekli onarımlar sonrasında hizmet vermeye devam edebilen yapılardır. Ağır hasarlı olarak nitelendirilen yapılar ise onarım görmesine rağmen hizmet vermesi oldukça zor olan yapılar olarak sınıflandırılır. Oluşan çatlağın biçimi, yeri ve boyutu yapıyı etkileyecek nitelikte ya da önemsiz olabilmektedir. Çatlak oluşumunda; oluşum şekli, yeri ve miktarına göre yapıya gerekli müdahale yöntemi belirlenmektedir. Bosiljkov [40] yığma tuğla duvarların performans seviyeleri ile çatlak genişliği ve hasar seviyesini ilişkilendirmiştir. Ancak oluşan çatlakların genişliği ile ilgili hiçbir nicel değer vermemiştir. FEMA 306'da [41] önerilen hasar seviyeleri için nicel değerler vermekten kaçınılmış, yapıda oluşan bölgesel veya bütünsel hasarların tanımlanması amaçlanmıştır. Literatürde, hasar tanımlaması yapılırken sayısal verilerin sunulmasından kaçınarak niteliksel açıklamalar yaygındır. Bu durum Rezaie vd. [42] tarafından çatlak genişliği gibi deneysel verilerden elde edilen değerler, duvarlar yüklendiğinde mi yoksa yük boşaltıldıktan sonraki elde edildiğinin net olmayışı olarak açıklanır. Deneysel çalışmalarda herhangi bir sayısal çatlak genişliğinin verilmemesinin temel sebebinin bu belirsizlik olduğu ifade edilmiştir. Ancak son yıllarda deneysel testler sırasında optik ölçümlerin kullanılması ve yükleme esnasında hasarın detaylı kaydedilmesi hasar sınırlarında çatlak genişliğinin sayısal olarak verilmesine yardımcı olacaktır [42]. Analizlerde genel davranış olarak belirli bir zamana kadar birim şekil değiştirmeler kabul edilir seviyededir ancak yapıda belirli hatlar boyunca çatlaklar oluşmaya başlamaktadır. Bu çatlaklar

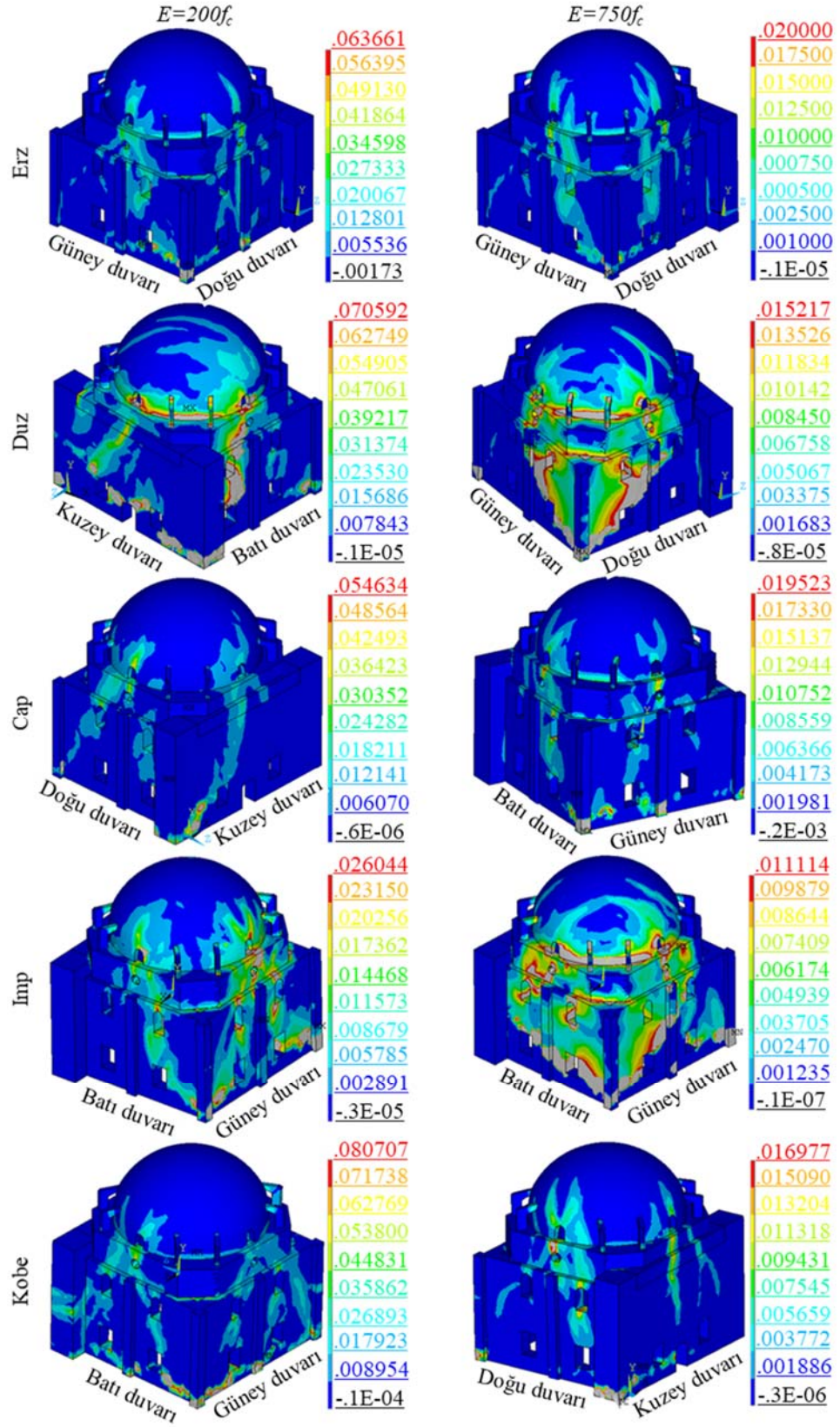
genellikle 5,0-5,5 mm genişliğindedir. Bu çatlak durumlarında yapı genellikle elastik sınırlar içinde davrandığı gözlemlenmektedir. Yapının farklı kısımlarında oluşan çatlak hatları yer hareketine bağlı olarak büyüyüp ilerleyerek daha belirgin çatlak hasarlarının oluşmasına sebep olmaktadır. Yapıda, maksimum kuvvet mertebesinde 10-15 mm çatlak genişliklerinin meydana geldiği görülmektedir. Son olarak Şekil 11'de tanımlanan geçme noktasında camide 30-35 mm bir çatlak genişliği gözlemlenmiştir. Bu çatlak genişliklerini aşan değerlerde bütün analizlerde yapının göçtüğü görülmektedir.

4. Deprem Performans Düzeylerinin Tanımı ve Ötelenme Limitleri (Definition of Earthquake Performance Levels and Drift Limits)

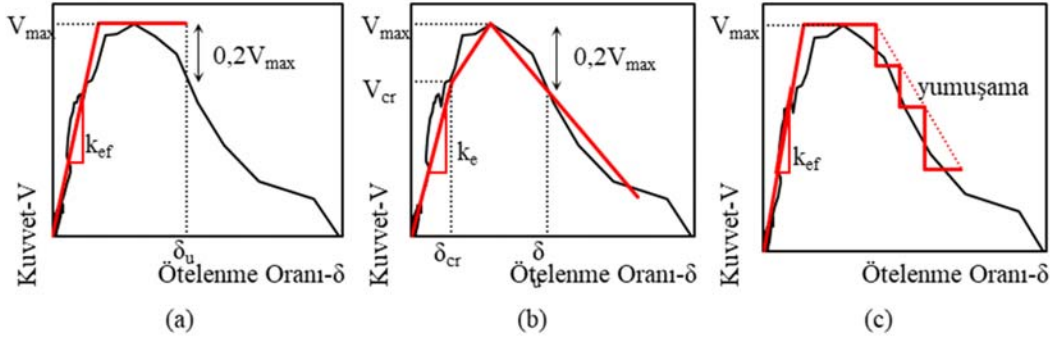
Yapıların performansa dayalı tasarımı ve değerlendirilmesi yapı mühendisliği açısından yeni bir kavram değildir. Mevcut bir yığma duvarın veya yapının değerlendirilmesi sırasında doğrusal olmayan değerlendirme kullanıldığında, farklı yönetmeliklerde yer alan performans seviyeleri ve bu performans seviyelerine karşılık gelen sınır değerler kullanılabilir. Bu sınır değerler, performansa dayalı değerlendirme aşamasında kullanılarak, yapıların performans seviyeleri belirlenmektedir.

Literatürde çeşitli modelleme teknikleri kullanılarak yığma duvar/yapılarda kuvvet-ötenme oranı eğrileri için farklı idealleştirmeler önerilmektedir. Bu eğriler genellikle çift doğrulu veya çok doğrulu şekilde karşımıza çıkarmaktadır. Çift doğrulu idealleştirmeler eşit enerji dağıtma kapasitesi dikkate alınarak gerçekleştirilir. Bu yaklaşım için nihai yer değiştirme δ_i genellikle dayanımda %20'lik bir düşüşün ardından belirlenir. Aynı zamanda efektif rijitlik k_{ef} çeşitli kriterler kullanılarak belirlenmektedir [43]. Başlangıç rijitliğinin dikkate alındığı yaklaşımlarda duvar/yapı maksimum kapasiteye ulaşmadan önce eğilme veya kesme çatlaklarına bağlı davranışın ilk kısmında rijitlik azalması modellenilebilmektedir. Duvarın veya yapının maksimum kuvvet kapasitesi ve maksimum kuvvet sonrası davranış bölgesi dikkate alınarak maksimum kuvvet ve nihai ötenme oranı belirlenebilmektedir. Şekil 10'da literatürde önerilen bazı kuvvet-ötenme oranı idealleştirmeleri verilmektedir.

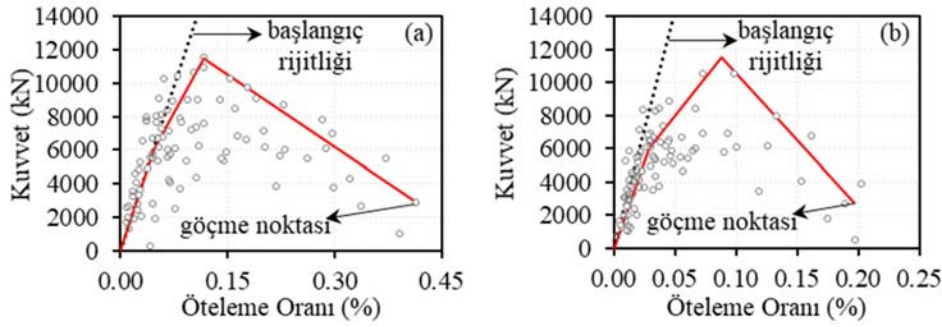
Saloustros vd. [44] herhangi bir tarihi yapının bütünü temsil eden bir kuvvet-yer ötenme oranı eğrisinin idealleştirilmesinde üç doğrulu idealleştirme önermektedir. Çalışmada tarihi Poblet kilisesinin sonlu eleman modelini oluşturarak yapının sismik davranışını belirlemeye yönelik 200 itme analizi gerçekleştirmişlerdir. Bu analizlerde malzeme ve yanal itme kapasitesi değişkenlik göstermektedir. Analizler sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri üç doğrulu olarak tanımlanmıştır. Her bir nokta, yapının farklı bölgelerinde çatlakların başlaması ve yayılmasının neden olduğu bir sınır durumunu temsil etmektedir. Birinci sınır durumu (LS1) yanal rijitlikte %15'lik bir düşüşe karşılık gelmektedir. İkinci sınır durumu (LS2) maksimum kuvvet kapasitesine ve tepe sonrası davranış çizgisinin başlangıcıdır. Son sınır durumu (LS3) ise yanal kapasitesinin %20'lik bir düşüşün meydana geldiği yer değiştirme seviyesini tanımlamaktadır.



Şekil 9. Dinamik analizlerden elde edilen yıkılma mekanizmaları (Collapse mechanism obtained from dynamic analyses)



Şekil 10. Yığma yapıların düzlem içi davranışlarında önerilen yaklaşımlar (a) iki doğulu idealize, (b) üç doğulu idealize, (c) çok doğulu idealize
(Suggested approaches for in-plane behavior of masonry structures (a) bilinear idealization, (b) three linear idealization, (c) multi linear idealization)



Şekil 11. Dinamik analizlerden elde edilen caminin kubbe ötelenme oranı-taban kesme kuvveti verileri (a) 200f_c; (b) 750f_c
(Dome drift ratio-base shear force data of the mosque obtained from dynamic analyses (a) 200f_c; (b) 750f_c)

Bu çalışmada tarihi camilerin deprem performans düzeyleri için üç sınır koşulu dikkate alınmıştır. İlk performans düzeyi Sınırlı Hasar (SH) durumudur. Bu performans düzeyi cami taşıyıcı sisteminde yapısal hasarın meydana gelmediği veya hasarın ihmal edilebilir ölçüde kaldığı hasar düzeyine karşı gelmektedir. Pencerelerin kemer kısımlarında, kubbede ve tromplarda gözle görülmesi zor çatlaklar beklenmektedir. Caminin kuvvet-öteleme eğrisinde başlangıç rijitliğinin değiştiği noktaya tekabül ettiği kabul edilmektedir. İkinci performans noktası Kontrollü Hasar (KH) performans düzeyidir. Bu nokta, can güvenliğini sağlamak üzere caminin duvarlarında çok ağır olmayan ve çoğunlukla onarılması mümkün olan hasar düzeyidir. Gözle görülebilen çatlaklar, duvarların birleşim yerlerinde taş oynamaları ve kubbede çatlak hatları beklenmektedir. Bu nokta caminin kuvvet-öteleme eğrisinde maksimum kuvvetin (kapasitenin) ulaştığı nokta olarak tarif edilebilir. Son olarak Göçmenin Önlenmesi (GÖ) performans düzeyi caminin duvarlarında ileri düzeyde ağır hasarın meydana geldiği göçme öncesi durumdur. Uygulanan yük etkisiyle oluşan çatlak hatları ilerleyerek derinleşir. Camiye ve yer hareketine bağlı olarak duvarlarda lokal yıkılma mekanizmaları gözlemlenir. Bu performans düzeyinin tepe sonrası dayanımın %80'ine tekabül eden kuvvet seviyesinde meydana geldiği kabul edilmektedir.

Şekil 11'de hem 200f_c hem de 750f_c modellerinin tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi her bir dinamik analizden elde edilen histerezis eğrilerini tanımlayan maksimum kuvvet-maksimum yer değiştirme noktasal değerlerinin aynı grafik üzerine işlenmesiyle çizilmiştir. Başlangıç rijitliğinin belirgin olması için lineer davranış bölgelerinden değerler de alınmıştır. Ayrıca Şekil 8'de verilen histerezis eğrilerinde, caminin elastik davranışının sona erip maksimum kuvvetin gözlemlendiği çevrimdeki hemen bütün değerler şekillerde bulunmaktadır. Bu veriler ışığında data noktalarını

saracak 3 doğulu idealize zarf eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler üzerinden tarihi yığma camilerin hasar sınırları tanımlanabilir.

Şekil 11'e bakıldığında aynı yapının aynı yer hareketleri altında sadece farklı elastisite modülü tanımlanmış sonlu eleman modellerinden elde edilen kuvvet-öteleme oranı verileri görülmektedir. Elde edilen grafikler ışığında 200f_c modelinde SH, KH ve GÖ sınır durumlarının sırasıyla %0,05, 0,12 ve 0,42 ötelenme oranı değerlerini aldığı görülmektedir. 750f_c modelinde ise bu değerler sırasıyla %0,03, 0,09 ve 0,20 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler literatürde önerilen elastisite modülü yaklaşımlarının en alt ve en üst sınırı olarak kabul edilebilir. Elastisite modülündeki bu değişiklik yapının yer değiştirme kapasitesine yani performans düzeylerine etki edeceği beklenen bir durumdur. Ancak bu değerlerdeki farklılık cami yapılarındaki performans düzeylerinin belirsizliğini ortaya koymaktadır. Şekil 11'de verilen performans limitleri caminin kubbesinden elde edilen yer değiştirmeler kullanılarak sunulmuştur. Tablo 4'de her iki model için caminin dört duvarından ve kubbesinden elde edilen performans limitleri verilmektedir.

Tablo 4. Her iki modelin performans seviyelerini tanımlayan ötelenme oranları
(Drift ratios defining the performance levels of both models)

	SH (%)		KH (%)		GÖ (%)	
	200f _c	750f _c	200f _c	750f _c	200f _c	750f _c
Kubbe	0,05	0,03	0,12	0,09	0,42	0,20
Güney Duvarı	0,03	0,02	0,10	0,05	0,16	0,10
Kuzey Duvarı	0,03	0,01	0,11	0,03	0,17	0,04
Doğu Duvarı	0,04	0,03	0,12	0,08	0,18	0,15
Batı Duvarı	0,02	0,02	0,05	0,08	0,09	0,12

Tarihi camilerde performans limitlerinin belirlenmesinde kullanılacak olan yer değiştirmelerin caminin hangi bölgesinden alınması gerektiği bir bilinmez olarak karşımıza çıkmaktadır. Literatürde cami kubbesinden, minaresinden ve duvarlardan elde edilen yer değiştirmelerin kullanımı yaygındır. Tarihi camilerde minareler ayrı bir davranış mekanizmasına sahiptir. Daha narin olan bu yapı türleri, tarihi camilerin değerlendirilmesine ek olarak ayrı şekilde irdelenmektedir. Bu sebeple minarenin herhangi bir noktasından alınarak elde edilecek performans limitleri o caminin değil minarenin limitleri olarak kabul etmek doğru olacaktır. Çalışmada ele alınan caminin kubbesinden ve dört bir duvarının orta en üst noktasından yer değiştirme değerleri alınarak performans limitlerine ulaşılmıştır. Elde edilen performans limitleri iki şekilde değerlendirmek doğru olacaktır. İlk olarak her bir modeli kendi içinde toplam 5 farklı noktadan elde edilen değerler ile incelemek gerekir. Sonrasında çalışmanın da amacına hizmet ederek elastisite modülünün bu limitler üzerindeki etkisinin irdelenmek adına iki modelden elde edilen sonuçları karşılaştırmak gerekmektedir.

200f_c kullanılan modelde kubbeden elde edilen SH, KH ve GÖ değerleri sırasıyla %0,05, 0,12 ve 0,42 şeklindedir. Aynı modelde duvarlardan elde edilen SH, KH ve GÖ değerleri en yüksek olarak sırasıyla %0,04, 0,12 ve 0,18'dir. Duvarlardan ve kubbeden elde edilen limit değerler arasında SH düzeyinde %20, GÖ düzeyinde ise %57'lik bir fark görülmektedir. KH düzeyinde aynı limitler elde edilmiştir. 750f_c modelinde ise kubbeden elde edilen SH, KH ve GÖ değerleri sırasıyla %0,03, 0,09 ve 0,20'dir. Aynı modelde duvarlardan elde edilen SH, KH ve GÖ değerleri en yüksek olarak sırasıyla %0,03, 0,08 ve 0,15'dir. 750f_c modeli için duvarlardan ve kubbeden elde edilen limit değerler arasında KH düzeyinde %11'lik bir fark görülmektedir. SH düzeyinde aynı limitler elde edilmiştir. Bu veriler ışığında SH ve KH düzeylerinin duvarlardan ve kubbeden hemen hemen aynı seviyelerde elde edilebileceği görülmektedir. Ancak GÖ düzeyinde 750f_c ve 200f_c modeli için sırasıyla %25 ve %57'lik göreceli olarak fazla diyebileceğimiz farklar görülmektedir. Bu farklılığın temel sebebinin tekil duvarlar ile yapının global davranışının birbirinden farklı olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Her iki modelin kubbesinden elde edilen limitlere bakıldığında aralarındaki farkın SH, KH ve GÖ değerleri için sırasıyla %40, %25 ve %65 olarak görülmektedir. Literatürde farklı elastisite modülleri kullanılarak farklı ötelenme oranı elde edileceğine dikkat çekilmektedir. Bu çalışmada yığma yapılar için kullanılabilir maksimum ve minimum elastisite modülü katsayıları ile bu farklar elde edilmektedir. Farklı araştırmacılar ve farklı yönetmelikler birbirinden değişik yaklaşımlar önermektedir. Bu da yığma yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesinin zorlu ve önemli bir iş olduğunu göstermektedir. Bu sebeple ele alınan caminin performans limitleri tek bir malzeme yaklaşımına bağlı kalınmaması gerekmektedir. Caminin kubbesi referans alınarak her iki modelden elde edilen performans limitleri SH, KH ve GÖ değerleri sırasıyla %0,03-0,05 arası, %0,09-0,12 arası ve %0,20-0,42 arasında olduğu

söylenebilir. Yığma duvarların performans seviyelerinin farklı yönetmeliklere göre değerlendirmesi Tablo 5'te özetlenmiştir. Literatürde tarihi camiler için performans limiti önerisi Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından 2017 yılında yayımlanan Tarihi Yapılar için Deprem Risklerinin Yönetim Kılavuzu'nda (VGM) bulunmaktadır [45]. Kılavuzun göre SH, KH ve GÖ sınır durumlarında ötelenme oranları sırasıyla %0,3, 0,7 ve 1,0 olduğu görülmektedir.

200f_c modelde maksimum duvar ötelenmeleri farklı sınır durumlarında farklı duvarlarda gözlemlenmiştir. Elde edilen maksimum duvar ötelenme oranları SH, KH ve GÖ sınır durumları için sırasıyla %0,04, 0,12 ve 0,18'dir. Elde edilen bu ötelenme oranları Tablo 5'te verilen yönetmelik sınırları ile karşılaştırıldığında oldukça düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca yine 200f_c modelinin kubbe yer değiştirmesinden elde edilen ötelenme oranları SH, KH ve GÖ sınır durumları için sırasıyla %0,05, 0,12 ve 0,42'dir. Bu oranlar duvarlardan elde edilen oranlara göre daha yüksek olmasına karşın Tablo 5'te verilen yönetmelik sınırlarının çok altında kalmaktadır. 750f_c modelinden elde edilen ötelenme oranları da yine yönetmeliklerde önerilen sınır durumlarının çok altındadır.

VGM [45] tarafından önerilen limitler herhangi bir hasar mekanizmasına bağlı değişkenlik göstermemektedir. Ayrıca bu limitler tekil duvarın değil sistem ötelenme limiti olarak önerilmektedir. Ancak ASCE41-13, FEMA 356, EC8-3 yönetmeliklerinde duvarın hasar mekanizmasına bağlı olarak limitlerinde değiştiği görülmektedir. Caminin dinamik analizlerinden elde edilen hasar mekanizmalarına bakıldığında, hasarın kesin bir şekilde eğilme ve/veya kesme gibi sınıflandırmayacağı açıktır. Bu sebeple hasar türüne bağlı limitlerin önerilmesi tarihi camiler için doğru olmayacaktır.

Elde edilen ötelenme oranlarının yönetmeliklere göre düşük çıkması literatürde oldukça yaygın olarak karşılaşılan bir durumdur. Cattarini vd. [49] 2007 Gisborne depreminde hasar gören Lancaster House isimli iki katlı yığma bir binayı ele almışlardır. Araştırmacılar yapının sonlu eleman modelini oluşturarak itme analizleri gerçekleştirmişlerdir. İtme analizi sonucu yapıda oluşabilecek nispeten küçük hasarların 0,02% gibi bir ötelenme oranında meydana geleceğini göstermiştir. Marino vd. [50] 2011 yılında Christchurch depreminde hasara uğramış Royal Otel (RH) ve Avonmore Evi (AH) yığma yapılarını ele almışlardır. Araştırmacılar her iki yapının sonlu eleman modellerini oluşturarak dinamik analizler gerçekleştirilmişlerdir. Yapılan analizler neticesinde RH yapısının ötelenme iki dik deprem doğrultusunda maksimum ötelenme oranlarının %0,66 ve %0,51 olduğunu belirlemişlerdir. AH yapısında ise bu oran %0,44 olarak belirlenmiştir. Her iki yapı deprem esnasında yıkıldığı raporlanmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar ASCE yönetmeliği tarafından önerilen değerler ile karşılaştırılmış ve yönetmeliğe göre oldukça küçük değerler olduğuna dikkat çekmişlerdir. Literatürde tarihi camilerin incelendiği bazı çalışmalarda hasar limiti önerileri bulunmaktadır. Portioli vd. [10] tarihi caminin küçük ölçekte bir modelini deneysel testlere tabi

Tablo 5. Bazı yönetmeliklerde yığma duvarlar için ötelenme limitleri (Drift limits for masonry wall in different norms)

	Sınırlı Hasar SH (%)	Kontrollü Hasar KH (%)		Göçmenin Önlenmesi GÖ (%)	
		Eğilme	Kesme	Eğilme	Kesme
ASCE41-13 [46]	0,10	$0, h_{eff} < 2,25$	0,75	$100\Delta_{ic,r}/h_{eff} < 2,5$	1,00
FEMA 356 [28]	0,10	$0,3h_{eff}/L$	0,30	$0,40h_{eff}/L$	0,40
EC8-3 [47]	V_{ult}	$0,8H_0/D$	0,40	$1,07H_0/D$	0,53
NTC18 [48]	0,20	-	-	1,00	0,50
VGM [45]	0,30	0,70		1,00	

H_0 : Eğilme kapasitesinin elde edildiği bölüm ile dönüm noktası arasındaki mesafe; h_{eff} : Yanal (sismik) kuvvetin bileşke yüksekliği;

D : Duvarın düzlem içi yatay boyutu (derinlik); L : Duvarın uzunluğu (D ile aynı); V_{ult} : Duvarın kesme kapasitesi;

$\Delta_{ic,r}$: Köşe kırılmasının (toe crush) başladığı yanal yer değiştirme

tutmuşlardır. Caminin KH ötelenme oranını %0,14 olarak elde etmişlerdir. Kocaman vd. [11] iki caminin sonlu eleman modelini oluşturarak dinamik analizler neticesinde kuvvet-yer değiştirme kapasitesini elde etmişlerdir. SH, KH ve GÖ limitleri için sırasıyla birinci camide %0,05, 0,11, 0,15, ikinci camide ise %0,09, 0,15 ve 0,34 olarak belirlemişlerdir. Aşıkoğlu vd. [12] tarihi Kurşunlu Camide bir dizi itme analizi gerçekleştirmişlerdir. Kuvvet-yer değiştirme eğrilerinden SH, KH ve GÖ sınır değerleri sırasıyla %0,03, %0,11 ve %0,18 olarak elde edilmiştir. Altunışık [13] iki tarihi yığma camiyi ele almıştır. Yapıların sonlu eleman modellerinde dinamik analizler gerçekleştirilerek maksimum ötelenme oranlarını %0,07 ve %0,10 olarak elde etmişlerdir. Bu çalışmalarda cami duvarlarının elastisite modülü 430-1500 MPa arasında değişmektedir. Bu elastisite modülü değerleri tarihi camilerin duvarları için alt sınır sayılabilecek değerlerdir. Literatürde birçok çalışmada daha yüksek elastisite modülü değerleri kullanılmıştır. Doğal olarak, yüksek elastisite modülü ile yapılan analizler daha da düşük limitler verecektir. Çalışmada elde edilen sınır durumu değerleri yönetmeliklerde önerilen değerlerde düşük olmasına rağmen; literatürde elde edilen değerleri destekleyen birçok çalışma olduğu görülmektedir.

5. Sonuçlar (Conclusions)

Tarihi camiler geçmişten devraldığımız ve gelecek kuşaklara güvenle devretmemiz gereken kültürel miraslarımızdır. Bu nedenle bu yapıları en uygun şekilde korumak ve uygun formlarda kullanımlarını sağlayarak yok olmalarını önlemek en önemli görevlerimizden biridir. Tarihi yığma camiler inşa tarihleri, yapı teknikleri ve kullanılan malzemelerin davranışı dikkate alındığında sismik açıdan hassas yapılardır. Bu çalışma kapsamında tarihi camilerin deprem performansını belirlemek amacıyla bir dizi araştırma, analiz ve tanımlamalar sunulmuştur. Camilerin sonlu eleman modellerinde son cemaat yeri ve minareler modellenmemiştir. Yapılan dinamik analizler neticesinde son cemaat yerinin yapının global kuvvet-yer değiştirme eğrilerine etki etmediği ve yapının göçme mekanizmasını değiştirmediği görülmüştür.

Çalışmada tarihi camilerde kullanılan malzemelerin elastisite modülündeki belirsizlere dikkat çekilerek, bu değerlerin farklılaşması durumunda hasar limitlerinin nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Bu amaçla elastisite modülü için $200f_c$ ve $750f_c$ değerleri kullanılarak iki model üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar ışığında, tarihi camilerin hasar limitlerinin belirlenmesinde tek bir elastisite modülü kullanmak yerine olabilecek bir alt ve üst sınır belirlemek ve hasar limitlerini de bu sınırlar içinde önermek doğru olacaktır.

Tarihi camilerin kuvvet-ötelenme oranı eğrileri için bir idealleştirme mekanizması önerilmiştir. Tarihi camilerde Sınırlı Hasar (SH) performans düzeyi caminin kuvvet-ötelenme eğrisinde başlangıç rijitliğinin değiştiği nokta olarak tanımlanmıştır. Kontrollü Hasar (KH) performans düzeyi maksimum yanal kuvvete (kapasiteye) karşı gelen nokta olarak tanımlanmıştır. Göçmenin Önlenmesi (GÖ) performans düzeyi ise kuvvet kapasitesinde %20'lik düşüğe tekabül eden nokta olarak tarif edilmiştir. Önerilen idealleştirme kullanılarak elde alınan caminin kuvvet-ötelenme oranı değerleri belirlenmiştir. $E=200f_c$ modelinde SH, KH ve GÖ limitleri sırasıyla %0,05, %0,12 ve %0,42, $E=750f_c$ modelinde ise SH, KH ve GÖ limitleri sırasıyla %0,03, %0,09 ve %0,20 olarak elde edilmiştir. Elde edilen hasar limit değerleri ile bazı yönetmeliklerde önerilen limitler karşılaştırılmıştır. Belirlenen değerlerin yönetmeliklerde önerilen limitlerden düşük çıktığı görülmektedir. Ancak literatürde yapılan çalışmalarda elde edilen hasar limitler, bu çalışmada elde edilen hasar limitlerini desteklediği görülmektedir. Bu sebeple bahsedilen yönetmeliklerde önerilen hasar limitlerinin tarihi camiler için kullanılmasının riskli olacağı değerlendirilmiştir.

6. Simgeler (Symbols)

D	: Duvarın düzlem içi yatay boyutu (derinlik)
D_{Vmax}	: Maksimum yanal kuvvet noktasında yer değiştirme değeri
E	: Elastisite modülü
f_c	: Basınç dayanımı
f_t	: Çekme dayanımı
H_0	: Eğilme kapasitesinin elde edildiği bölüm ile dönüm noktası arasındaki mesafe
h_{eff}	: Yanal (sismik) kuvvetin bileşke yüksekliği
k_{ef}	: Efektif rijitlik
L	: Duvarın uzunluğu (D ile aynı)
V_{max}	: Maksimum yanal kuvvet
V_{ult}	: Duvarın kesme kapasitesi
$\Delta_{tc,r}$: Köşe kırılmasının (toe crush) başladığı yanal yer değiştirme
γ	: Birim hacim ağırlık
β_c	: William-Wranke kapalı çatlak parametresi
β_t	: William-Wranke açık çatlak parametresi
V	: Yanal kuvvet
δ	: Ötelenme oranı

Kaynaklar (References)

1. Soyluk A., Tuna M. E., Dynamic Analysis of Historical Sehzade Mehmet Mosque for Base Isolation Application, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 26 (3), 667-675, 2011.
2. Kazaz İ., Kocaman İ., Seismic load capacity evaluation of stone masonry mosques, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (2), 557-573, 2018.
3. Aslay S. E., Okuyucu D., Technical evaluation of abscissa damage of Erzincan Değirmenliköy church, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (1), 387-402, 2020.
4. Çalık İ., Bayraktar A., Türker T., Determination of the effect on the dynamic behavior 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.
5. Usta P., Bozdağ Ö., Çarhoğlu A. I., Appraisal of Structural Behavior of Afyon Sandıklı Ulu Mosque, El-Cezeri, 7 (2), 871-881, 2020.
6. Çakır F., A simplified method for determining the seismic performance of historical structures: a case of Kaya Çelebi Mosque, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36 (3), 1643-1656, 2021.
7. Maraş M. M., Özmen A., Sayın E., Ayaz Y., Seismic Assessment of the Historical Sütlü Minaret Mosque, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 66 (2), 445-459, 2022.
8. Bayraktar A., Hökelekli E., Türker T., Çalık İ., Ashour A., Mosallam A., Window opening effects on structural behavior of historical masonry Fatih Mosque, Int. J. Archit. Heritage, 13 (4), 585-599, 2019.
9. Uray A., Şengel H. S., Çarbaş S., Analysis of historical structures by using finite element method in Iznik Yeşil Mosque, Challenge, 5 (4), 121-129, 2019.
10. Portioli F., Mammana O., Landolfo R., Mazzolani F. M., Krstevska L., Tashkov L., Gramatikov K., Seismic Retrofitting of Mustafa Pasha Mosque in Skopje: Finite Element Analysis, J. Earthquake Eng., 15 (4), 620-639, 2011.
11. Kocaman İ., Kazaz İ., Kazaz E., Seismic Load Capacity of Historical Masonry Mosques by Rigid Body Kinetics, Int. J. Archit. Heritage, 14 (6), 849-869, 2020.
12. Aşıkoğlu A., Avşar Ö., Lourenço P. B., Silva, L. C., Effectiveness of seismic retrofitting of a historical masonry structure: Kütahya Kurşunlu Mosque, Turkey, Bull. Earthquake Eng., 17 (6), 3365-3395, 2019.
13. Altunışık A. C., Sunca F., Genç A. F., Tavşan C., Post Earthquake Damage Assessments of Historic Mosques and Effects of Near-Fault and Far-Fault Ground Motions on Seismic Responses, Int. J. Archit. Heritage, 1-36, 2021.
14. Koseoglu G.C., Canbay E., Assessment and rehabilitation of the damaged historic Cenabı Ahmet Pasha Mosque, Eng. Fail. Anal., 57, 389-398, 2015.

15. Aşıkoğlu A., Silva L. C., Avşar Ö., Lourenço P. B., Assessment of the Seismic Retrofitting of a Historical Masonry Mosque by Means of Nonlinear Dynamic Analysis, 12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC), November, 2021.
16. Bilgin H., Ramadani F., Numerical study to assess the structural behavior of the Bajrakli Mosque (Western Kosovo), *Adv. Civ. Eng.*, 2021.
17. Dinani A. T., Destro Bisol G., Ortega J., Lourenço P. B., Structural Performance of the Esfahan Shah Mosque, *J. Struct. Eng.*, 147 (10), 05021006, 2021.
18. Karantoni F. V., Dimakopoulou D., Displacement-based assessment of the Gazi Hasan Pasha mosque in Kos island (GR) under the 2017 M6. 6 earthquake and Eurocode 8, with proposals for upgrading, *Bull. Earthquake Eng.*, 19 (2), 1213-1230, 2021.
19. Milani G., Valente M., Comparative pushover and limit analyses on seven masonry churches damaged by the 2012 Emilia-Romagna (Italy) seismic events: Possibilities of non-linear finite elements compared with pre-assigned failure mechanisms, *Eng. Fail. Anal.*, 47, 129-161, 2015.
20. Valente M., Seismic behavior and damage assessment of two historical fortified masonry palaces with corner towers, *Eng. Fail. Anal.*, 134, 106003, 2022.
21. Karapınar Sultan Selim Cami. https://konyakultur.gov.tr/index.php?route=modules/towns&town_id=32 Erişim tarihi Aralık 08, 2020.
22. Karapınar Cami Çizimleri http://www.mimarsinaneserleri.com/mimari_cizimler/index.html Erişim tarihi Aralık 08, 2020.
23. Demir C., Seismic Behaviour of Historical Stone Masonry Multi-Leaf Walls, PhD thesis, İstanbul Technical University, İstanbul, 2012.
24. Binda L., Pina-Henriques J., Anzani A., Fontana A., Lourenço P.B., A contribution for the understanding of load-transfer mechanisms in multi-leaf masonry walls: Testing and modelling, *Engineering Structures*, 28 (8), 1132-1148, 2006.
25. Silva B.L., Diagnosis and Strengthening of Historical Masonry Structures: Numerical And Experimental Analyses, PhD thesis, University of Brescia, Italy, 2012.
26. DBYBHY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 2007.
27. TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2019.
28. FEMA 356: Prestandard And Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, 2000.
29. Standard, British, Eurocode 6: Design of masonry structures, British Standard Institution, London, 2005.
30. Tapan M., Comert M., Demir C., Sayan Y., Orakcal K., Ilki A., Failures of structures during the October 23, 2011 Tabanlı (Van) and November 9, 2011 Edremit (Van) earthquakes in Turkey, *Eng. Fail. Anal.*, 34, 606-628, 2013.
31. Şeker B. Ş., Mimar Sinan Camilerinin Statik ve Dinamik Yükler etkisinde Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
32. Willam K. J., Warnke E. D. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete, International Association for Bridge and Structural Engineering, 19 (3), 1-30, 1975.
33. Özdemir A., Betonarme Kolonların Şekil Değiştirme Kapasitelerinin Değerlendirilmesi, Doktora tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Erzurum, 2019.
34. ANSYS, Finite Element Analysis Program, ANSYS, Inc., Southpointe, 2600 Ansys Drive, Canonsburg, PA 15317, USA, 2020.
35. Kazaz İ., Yakut A., Gülkan P., Numerical simulation of dynamic shear wall tests: A benchmark study, *Computers & structures*, 84 (8-9), 549-562, 2006.
36. Dogangun A., Sezen H., Seismic vulnerability and preservation of historical masonry monumental structures, *Earthquake and Structures*, 3 (1), 83-95, 2012.
37. Özmen B., Güler H., Nurlu M., Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Deprem Bölgelerinin İncelenmesi, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü, 1997.
38. Yaşar E., Konya Bölgesi Depremselliği, Haymana-Tuzgözü-Ulukuşla Basenleri Uygulamalı Çalışma, 09-11 Ekim. Türkiye Petrol Jeologları Derneği, 2000.
39. Gottfried Grünthal, European Macroseismic Scale, European Seismological Commission (ESC-98), 1998.
40. Bosiljkov V., Page S., Bokan-Bosiljkov V., Zarnic R., Evaluation of the seismic performance of brick masonry walls, *Structural Control and Health Monitoring*, 170 (1), 100-118, 2010.
41. FEMA 306, Federal Emergency Management Agency, Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Buildings, 1998.
42. Rezaie A., Godio M., Achanta R., Beyer, K. Machine-learning for damage assessment of rubble stone masonry piers based on crack patterns, *Automation in Construction*, 140, 104313, 2022.
43. Petry S., Beyer K., Cyclic Test Data of Six Unreinforced Masonry Walls with Different Boundary Conditions, *Earthquake Spectra*, 31 (4), 2459-2484, 2015.
44. Saloustros S., Pelà L., Fabregat P. R., Nonlinear numerical modelling of complex masonry heritage structures considering history-related phenomena in staged construction analysis and material uncertainty in seismic assessment, *J. Perform. Constr. Facil.*, 34 (5), 2020.
45. Tarihi Yapılar için Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, Vakıflar Genel Müdürlüğü, T.C. Başbakanlığı, Ankara, 2017.
46. ASCE 41-13: Seismic Rehabilitation Standards Committee. Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers, Reston, 2014.
47. EC8-3 Design of structures for earthquake resistance-part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
48. NTC2018, Norme Tecniche per le Costruzioni. Gazz Uff della Repubblica Italia, 2018.
49. Cattari S., Lagomarsino S., Bazzurro A., Porta F., Critical review of analytical models for the in-plane and out-of-plane assessment of URM buildings, 2015 NZSEE Conference, Rotorua, 2015.
50. Marino S., Cattari S., Lagomarsino S., Ingham J., Dizhur D., Modelling of two damaged unreinforced masonry buildings following the Canterbury earthquakes, 2016 NZSEE Conference, Christchurch, New Zealand, 1-3 April, 2016.