

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TÜRKİYE’DEKİ MEVCUT TARİHİ BİR YIĞMA
YAPI ÖRNEĞİNİ OLUŞTURAN DUVARLARIN
DÜZLEMDİŞİ DEPREM ETKİLERİ İÇİN HASAR
LİMİTLERİNİN İRDELENMESİ**

Ismael BACHABI YOUSOUF

Ağustos, 2018
İZMİR

**TÜRKİYE’DEKİ MEVCUT TARİHİ BİR YIĞMA
YAPI ÖRNEĞİNİ OLUŞTURAN DUVARLARIN
DÜZLEMDİŞİ DEPREM ETKİLERİ İÇİN HASAR
LİMİTLERİNİN İRDELENMESİ**

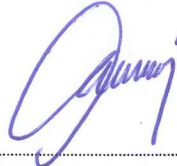
**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı**

Ismael BACHABI YOUSOUF

**Ağustos, 2018
İZMİR**

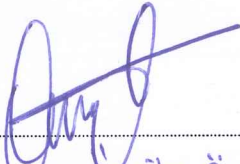
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ISMAEL BACHABİ YOUSSEF, tarafından DOÇ. DR. İBRAHİM SERKAN MISIR yönetiminde hazırlanan “TÜRKİYE’DEKİ MEVCUT TARİHİ BİR YIĞMA YAPI ÖRNEĞİNİ OLUŞTURAN DUVARLARIN DÜZLEMDİŞİ DEPREM ETKİLERİ İÇİN HASAR LİMİTLERİNİN İRDELENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



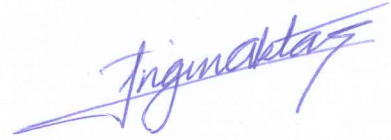
Doç. Dr. İbrahim Serkan MISIR

Yönetici



Doç. Dr. Özgür Özgelik

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Engin AKTAŞ

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Latif SALUM

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Sunulan tez kapsamındaki çalışmalar, AFAD - UDAP-Ç-16-05 kodlu araştırma projesinin mali desteği, T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü ve T.C. Başbakanlık İzmir Vakıflar Şube Müdürlüğü'nün teknik desteği ve Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Çalışma Grubu'nun katkıları ile gerçekleştirilmiştir. Desteklerinden ötürü saha çalışmalarında bulunan grup üyelerine şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmalarım boyunca verdikleri değerli tavsiyeler ve bana karşı olan güvenlerinden dolayı tez danışmanım Doç.Dr. İbrahim Serkan MISIR, Prof.Dr.Serap KAHRAMAN ve Doç.Dr.Özgür ÖZÇELİK hocalarıma ve ayrıca araştırma projesindeki çalışma arkadaşım İnş.Müh.Gökhan Yücel, çalışma grubu üyeleri İnş.Yük.Müh.Umut Yücel, İnş.Yük.Müh.Erkan Durmazgezer'e teşekkürlerimi sunarım.

Tüm bunlar sevgili ailemin hayat boyu desteği ile mümkün olabilmektedir.

Ismael BACHABİ YOUSSEUF

TÜRKİYE’DEKİ MEVCUT TARİHİ BİR YIĞMA YAPI ÖRNEĞİNİ OLUŞTURAN DUVARLARIN DÜZLEMDIŞI DEPREM ETKİLERİ İÇİN HASAR LİMİTLERİNİN İRDELENMESİ

ÖZ

Tarihi yığma yapıların birçoğunda rijit diyafram etkisi oluşturacak yapısal elemanlar bulunmamakta, duvar yükseklikleri ve düzlemine dik yönde desteklenmemiş duvar uzunlukları büyük olabilmektedir. Bu nedenle bu tür yapılarda deprem yükleri altında göçme biçimi çoğunlukla düzlemiçi dayanıma ulaşmadan, duvarların düzlemdışı devrilmesi şeklinde gelişmektedir. Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü ve Vakıflar Genel Müdürlüğü (VGM) işbirliğinde yürütülmekte olan AFAD-UDAP-Ç-16-05 nolu araştırma projesinde, bu duvarlarının düzlemdışı stabilite kaybına öncülük eden hasar limitlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Proje kapsamında, İzmir’in Selçuk ilçesinde 1375 yılında inşa edilen tarihi İsabey Camii'nin birbirine dik konumdaki iki avlu duvarı üzerinden dinamik veriler alınmış, elde edilen veriler Operasyonel Modal Analiz teknikleri ile değerlendirilmiş ve yapının dinamik karakteri tahmin edilmiştir. Bu tez kapsamında ise elde edilen parametreler, kurulan ABAQUS sonlu elemanlar modelinin iyileştirilmesinde kullanılmıştır. İyileştirilmiş sonlu elemanlar modelleri üzerinde doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilerek duvarın hasar limitleri belirlenmiştir. Ayrıca, kinematik yaklaşım kullanılarak duvarın düzlemdışı göçme eğilimi incelenmiş ve sayısal analiz sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Anahtar kelimeler: Deprem güvenliği, tarihi yığma binalar, yığma yapıların sayısal modellemesi, sayısal model iyileştirmesi

INVESTIGATION OF DAMAGE LIMITS UNDER OUT-OF-PLANE EARTHQUAKE EFFECTS OF WALLS IN EXISTING HISTORICAL MASONRY STRUCTURE IN TURKEY

ABSTRACT

Most of the historical masonry structures do not have structural elements that are forming a rigid diaphragm effect under earthquake actions, walls are high and unsupported lengths perpendicular to the planes are relatively large. Therefore, in URM buildings with aforementioned defects, walls partially or in some cases completely collapse, and the failure mode is dominated by the out-of-plane damage before any in-plane resistance occurs. In AFAD-UDAP-Ç-16-05 research project, which is being carried out in cooperation with Dokuz Eylül University Civil Engineering Department, and the Directorate General of Foundations; the primary goal was defined as to determine the damage limits leading to the loss of out-of-plane stability of those building walls. For this purpose, dynamic data were taken from the two perpendicularly intersected surrounding walls of historical İsabey Mosque which was built in İzmir / Selçuk in 1375 and the obtained data were evaluated by Operational Modal Analysis techniques and the dynamic character was estimated. In the scope of this thesis study, the obtained parameters were used to calibrate the ABAQUS finite element model. Nonlinear time-history analyses were conducted on the calibrated finite element models to determine damage limits of the wall. Moreover, the tendency of out-of-plane collapse of the wall using the kinematic approach is investigated and compared with the numerical analyses results.

Keywords: Earthquake safety, historical unreinforced masonry buildings, numerical modeling of masonry buildings, calibration of numerical model

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x

BÖLÜM BİR - GİRİŞ..... 1

1.1 Giriş	1
1.1.1 Mevcut tarihi yapılarda gözlenen deprem davranışı: hasar tipleri ve göçme mekanizmaları	2
1.1.2 Göçme mekanizmaları	6
1.1.3 Problem İfadesi.....	10
1.1.4 Araştırmanın Amacı.....	10
1.1.5 Tez Düzeni	11
1.2 Literatür incelemesi	11
1.2.1 Depremler altında tarihi bir duvar yapısının incelenmesi: duvarların analizinde farklı yaklaşımlar.....	12

BÖLÜM İKİ – SAHA ÇALIŞMALARI 19

2.1 Tarihi yığma yapılar üzerinde saha testleri	19
2.2 Tarihi yığma yapıların değerlendirilmesi için araştırma tekniği	19
2.3 İsabey Camii'nin Tarihi ve Yapısal Özellikleri.....	21
2.4 Az Tahribatlı Malzeme Testleri - Flat-Jack Testi.....	21
2.5 Ortamsal Titreşim Testleri ve Operasyonel Modal Analiz.....	27

BÖLÜM ÜÇ – SAYISAL MODELLEME..... 30

3.1 ABAQUS sonlu elemanlar yazılımının tanıtımı.....	30
3.2 Tarihi yığma yapının sayısal modellemesi	31
3.3 İsabey Camii makro modeli ve model kalibrasyonu	32
3.4 İsabey Camii’nin mezo modellemesi ile hasar limitlerinin belirlenmesi	36
3.5 Duvar şeridinin ‘kinematik yaklaşım’ kullanılarak limit analizi ve Sayısal analiz sonuçları ile kıyaslanması.....	41
3.5.1 Basit konsol devrilme modeli	42
3.5.2 Düşey duvar burkulması modeli	43

BÖLÜM DÖRT – SONUÇ VE ÖNERİLER..... 45

KAYNAKLAR 47

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Canterbury depreminde kemerlenme davranışı gösteren duvar.....	2
Şekil 1.2 Canterbury depreminde düzlemdışı hasar oluşan iki yapraklı duvar.....	2
Şekil 1.3 Christchurch depreminde düzlemdışı göçen yığma duvarlar	3
Şekil 1.4 Christchurch depreminde düzlemdışı göçen tuğla yığma duvar.....	3
Şekil 1.5 Christchurch depreminde düzlemdışı göçen üç tabaklı taş yığma duvar.....	4
Şekil 1.6 Darfield depremi sonrası gözlenen düzlemdışı göçme modları ve ölçekli bir numunenin sarsma tablası testi sonucu gözlenen hasar	4
Şekil 1.7 L'Aquila depreminde gözlenen tarihi yığma yapı hasarları	5
Şekil 1.8 Yığma bina üzerinde oluşan düzlemdışı hasar, Accumoli/İtalya	6
Şekil 1.9 Hasar mekanizmaları: Düzlemdışı hasarlar; Düzlemiçi hasarlar	6
Şekil 1.10 Düzlemiçi hasar tipleri: Eğilme, Kayma-kesme, Kesme	7
Şekil 1.11 Cephe dökülme: Dönme mekanizması; Çatı ve ortogonal duvarların ayrılması; Oluk duvarlarında 'V' şeklinde çatlaklar	8
Şekil 1.12 Çok yapraklı duvar duvarlarının hasar görmesi: sökme katmanları ve şerit açma; hasar mekanizması; Çok yapraklı hasar örneği; Çift tabaklı duvarda oluşan hasar tipleri	9
Şekil 1.13 Mikro modelleme; Mezo modelleme; Makro modelleme yaklaşımları ..	12
Şekil 1.14 St. Mark's Basilica modelin Venice'de,	16
Şekil 1.15 Elastik olmayan modelleme prosedürü	17
Şekil 2.1 Genel olarak tarih yapıları üzerine gereken araştırmaları	20
Şekil 2.2 İsabey Camii'nin perspektif görünüşü ve araştırılan duvarlar	21
Şekil 2.3 İsabey Camii'nin avlu duvarlarında Flat Jack testleri	22
Şekil 2.4 e1 nolu deplasman ölçer verisi kullanılarak ikinci testin birinci çevrimine ait yük-deformasyon eğrisi ve elastisite modülü hesabı, $E1 = 6945 \text{ Mpa}$..	23
Şekil 2.5 e2 nolu deplasman ölçer verisi kullanılarak ikinci testin birinci çevrimine ait yük-deformasyon eğrisi, $E2 = 3490 \text{ MPa}$	24
Şekil 2.6 e3 nolu deplasman ölçer verisi kullanılarak ikinci testin birinci çevrimine ait yük-deformasyon eğrisi, $E1 = 4239 \text{ Mpa}$	24
Şekil 2.7 İkinci testin birinci çevrimi ortalaması ve ortalama elastisite modülü hesabı (Ölçümlerin ortalamasına göre elastisite modülü $E_{ort} = 4535 \text{ Mpa}$)	25

Şekil 2.8 İkinci testin ikinci çevrimine ait yük-deformasyon eğrisi ve ortalama elastisite modülü hesabı	26
Şekil 2.9 Batı avlu duvarlarının iç yüzü üzerindeki ivmeölçerlerin yerleşim şeması	27
Şekil 2.10 Kuzey avlu duvarının iç yüzü üzerindeki ivmeölçerlerin yerleşim şeması	28
Şekil 2.11 EFDD yöntemine göre elde edilen ilk üç mod şekli tahmini sonuçları	29
Şekil 3.1 <i>Traction-separation</i> davranışı ve Arayüz modelinin sürtünme davranışı .	31
Şekil 3.2 Ön sayısal modele ait 1. ve 2. mod şekilleri	33
Şekil 3.3 Ön sayısal modele ait 3' ve 4' mod şekilleri	33
Şekil 3.4 Solidworks programında oluşturulan güncel katı model	34
Şekil 3.5 Revize edilen analitik modelden elde edilen mod şekilleri	35
Şekil 3.6 Duvarın analiz edilen şerit bölümü	38
Şekil 3.7 Hasar evrimi ve modelin hasar limit modu	39
Şekil 3.8 Rampa ivme fonksiyonu	40
Şekil 3.9 Hasar gelişimi ve modelin ötelenme oranı cinsinden hasar limitleri	41
Şekil 3.10 Çeşitli mekanizma durumları: Duvarın güç tükenmesi mekanizmaları (eğilme ve kayma), Zemin katta yumuşak kat güç tükenmesi mekanizması, Cephe duvarının güç tükenmesi mekanizmaları	42
Şekil 3.11 Basit konsol devrilme mekanizma durumu	43
Şekil 3.12 Düşey duvar burkulması mekanizma durumu	44

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1 Ön sayısal modelde ilk dört modal frekans değeri ve karşılık gelen mod şekilleri.....	33
Tablo 3.2 İyileştirilmiş modelde ilk on moda karşılık gelen modal frekans değerler	34
Tablo 3.3 Kalibrasyon sonucu deneysel ve sayısal yöntem arasındaki benzerlik tablosu	36
Tablo 3.4 Taş birimler ve moloz dolgu için belirlenen malzeme özellikleri	37
Tablo 3.5 Harç ve duvar yapıları arasında tanımlanan arayüz elemanına ait özellikler.....	37
Tablo 3.6 Yer ivmesi karakteristikleri	38

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Giriş

Yığma yapı, bilinen en eski yapı türleri arasında olmasına rağmen yapısal davranışları büyük oranda belirsiz ve dinamik karakteri de oldukça değişken olabilmektedir. Bu yapıların hasarları genellikle çatlaklar, temel oturmaları, malzeme bozulması ve yer değiştirmeler ile ilişkilidir. Yapı duvarlarında ve taşıyıcı elemanlarında yerel düzeyde oluşan çatlaklar, yapıyı makro bloklara böler ve genel davranış üzerinde etkiler meydana getirir. Deprem yükünün doğrultusuna bağlı olarak, bir yığma yapı duvarı sismik ivmeler altında düzlemiçi veya düzlemdışı hasar görebilir. Yığma yapı duvarlarının düzlemdışı doğrultuda göçmesi yönetmeliklerde genellikle göz önüne alınmadığından tasarım hesaplarında da ihmal edilmektedir (Griffith, Magenes, Melis ve Picchi, 2003). Yığma yapının global yapısal bütünlüğünü duvarın düzlemiçi karakteri belirlese de düzlemdışı doğrultuda göçme özellikle komşu yapılarda ciddi miktarda hasara yol açmaktadır. Daha da önemlisi, yığma duvarların düzlemdışı göçmeleri, tasarım depremi sırasında yakınlardaki yayalar için büyük bir tehlike oluşturmaktadır (Lin, Lawley, Wotherspoon ve Ingham, 2016). Hasarların belirlenmesinde dinamik tabanlı değerlendirme yöntemleri ilgi çekicidir ve hasar ile rijitlik azalması arasında kabul edilen ilişki de bu tür yapılar için makul görünmektedir. Hasarın yerinin belirlenmesinde mod şekillerindeki değişim güvenilir bir ölçü olduğundan hasar tespiti için doğal titreşim tahmini de güvenilir bir yaklaşım olarak görünmektedir (Ramos, Lourenço, De Roeck ve Campos-Costa, 2008). Yığma yapılar, kesme ve eğilmeye değil, basınca karşı koyan malzemeler ve sistemle inşa edilir. Bu sebeple, tabakalar arası yapışma mukavemeti düşük olan çok tabakalı taş duvarlarda düzlemiçi ve düzlemdışı deprem yükleri sıklıkla ayrılma ve parçalanmaya ve ardından da yapının göçmesine sebep olduğu için, çok tabakalı tarihi yığma yapı duvarları daha büyük riskler taşımaktadır (Tomažević, 2011).

1.1.1 Mevcut tarihi yapılarda gözlenen deprem davranışı, hasar tipleri ve göçme mekanizmaları

Yığma duvarların sismik davranışını iyileştirmeye yönelik yöntemler geliştirmek amacıyla Yeni Zelanda Canterbury depremi sırasında hasar görmüş 125 yığma duvar üzerinde 2010-2011 yılları arasında detaylı hasar incelemesi yapılmış (Şekil 1.1 ve 1.2) ve oluşan hasrın yaklaşık %75’lik kısmının düzlemsel dışı hasar olduğu belirlenmiştir (Dizhur ve Ingham, 2015).



Şekil 1.1 Canterbury depreminde kemerlenme davranışı gösteren duvar (Dizhur ve Ingham, 2015)



Şekil 1.2 Canterbury depreminde düzlemsel dışı hasar oluşan iki yapraklı duvar (Dizhur ve Ingham, 2015)

22 Şubat 2011 tarihinde Yeni Zelanda’da gerçekleşen Christchurch depreminin ardından yapılan detaylı inceleme sonucunda cephenin tamamının hasar aldığı konsol tipi mekanizma, tek yönlü eğilme ve çift yönlü eğilme şeklinde gelişen düzlemsel dışı hasar tiplerinin, görülme sıklığı en yüksek olan hasar türü olduğu belirlenmiştir (Şekil 1.3, 1.4 ve 1.5). Rijit diyafram davranışı göstermeyen döşemelere sahip ve cephe açıklığı büyük taş yığma yapılarda ise beklenildiği üzere, cephenin tamamının veya bir kısmının devrilmesi şeklinde hasarlar gözlenmiştir (Dizhur, Ingham, Moon, Griffith, Schultz, Senaldi ve Ventura, 2011). Şekil 1.5’de görülen üç tabakalı taş duvarın düzlemsel dışı göçmesi düşük malzeme kalitesi ile ilişkilendirilmiştir.



Şekil 1.3 Christchurch depreminde düzlemsel dışı göçen yığma duvarlar (Dizhur ve diğer., 2011)



Şekil 1.4 Christchurch depreminde düzlemsel dışı göçen tuğla yığma duvar ((Dizhur ve diğer., 2011)



Şekil 1.5 Christchurch depreminde düzlemdışı göçen üç tabaklı taş yığma (Dizhur ve diğer., 2011)



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 1.6 (a-d) Darfield depremi sonrası gözlenen düzlemdışı göçme modları, (e) ölçekli bir numunenin sarsma tablası testi sonucu gözlenen hasar (Ismail, Griffith ve Ingham, 2011)

Yeni Zelanda’da, 4 Eylül 2010 tarihinde gerçekleşen Darfield depreminin ardından yapılan incelemelerde sayısız binada düzlemsel hasar tespit edilmiştir (Şekil 1.6a-d). Gözlenen hasar türünün, döşemelerin duvarlara yük aktarmadığı durumlarda geliştiği vurgulanmış, gözlenen hasar türü, eksenel yük taşımayan düşük ölçekli bir numunenin sarsma tablası test sonucu ile doğrulanmıştır (Ismail, Griffith ve Ingham, 2011).

İtalya’da 2009 yılı başlarında L’Aquila’nın tarihi merkezinde meydana gelen depremlerde çok sayıda yığma binada; çok tabakalı duvarlarda kanatların ayrışması (Şekil 1.7a), bir duvarın mesnetleri boyunca çatlayarak ayrılması (Şekil 1.7b ve 1.7c) şeklinde düzlemsel mekanizmalar gözlenmiştir (Augenti ve Parisi, 2010). 2016 yılında İtalya’da meydana gelen son depremlerde de benzer hasarlar (Şekil 1.8a-b) gözlenmiştir (Didier, Andrei, Dominique, Celine, Sandrine, Jean-Sylvain, Nicola, Leopoldo, Paola, Christophe, Anne, Robin, 2016).



(a)



(b)



(c)

Şekil 1.7 L’Aquila depreminde gözlenen tarihi yığma yapı hasarları (Augenti ve Parisi, 2010)



(a)

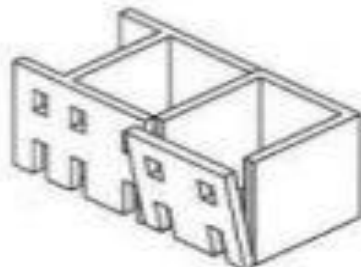


(b)

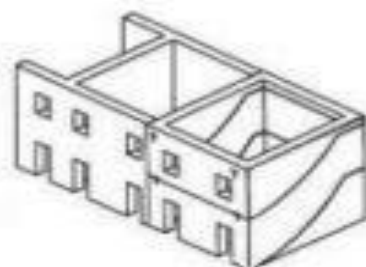
Şekil 1.8 (a) Yığma bina üzerinde oluşan düzlemdışı hasar, (b) Duvarların ayrılma çizgileri, Accumoli/İtalya (Didier ve diğer., 2016)

1.1.2 Göçme mekanizmaları

Tarihi yığma binaların bol bulunduğu çok sayıda deprem bölgesinde deprem sonrası saha incelemeleri yürütülmüştür (Doglioni, Moretti, Petrini, ve Angeletti, 1994; Lagomarsino, Brencich, Bussolino, Moretti, Pagnini and Podestà, 1997). Bu incelemeler sonucunda, bu yapıların hasar görülebilirliği, yapılarda görülen iki temel mekanizmaya (Şekil 1.9) bağlı lokal göçme modları ile ilişkilendirmiştir. Giuffrè ve Carocci (1993), en sık görülen mekanizmanın duvarın düzlemine dik bir deprem istemi (düzlemdışı) ile karşılaştığında oluştuğunu göstermiştir. İkinci mod ise, düzlemiçi bir deprem istemi oluştuğunda ortaya çıkmaktadır. D'Ayala ve Speranza (2003) bu mekanizma durumlarını tipik tarihi yığma yapılar üzerinde açıklamıştır.



a)



b)

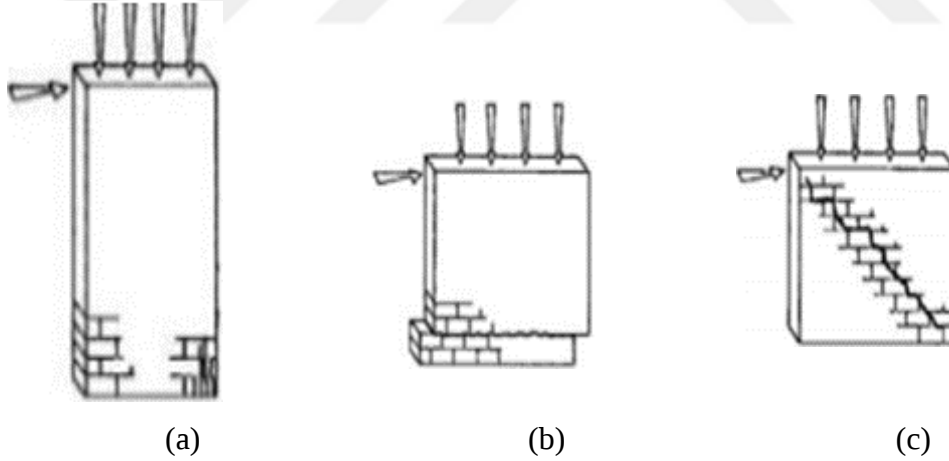
Şekil 1.9 Hasar mekanizmaları (Giuffrè ve Carocci, 1993) a) düzlemdışı hasarlar b) düzlemiçi hasarlar

1997'de İtalya'da L'Ombrie-Marche'in Preouse komününün başkentinde, 1200'den fazla kilise hasar görmüş, bu da tarihi yığma yapıların depremlere olan zafiyetini ortaya koymuştur. Bu yapılarda, çarpraz duvarlar, narin elemanlar, uzun tonozlar, kemerler ve kubbeler genellikle düzlemdışı doğrultuda desteklenmemiş geniş açıklıklara sahipti ve neredeyse tamamında yatay bağlantı elemanları bulunmamaktaydı. Lagomarsino ve Podesta (1999), düşük şiddetteki depremlerin bile önemli hasara neden olabileceğini göstermiştir. Depremler sonrası saha gözlemleri sırasında en sık gözlenen hasar türleri hakkında daha detaylı bilgi verilecektir.

1.1.2.1 Düzlemiçi mekanizmaya bağlı hasarlar

Düzlemiçi hasar mekanizmaları genellikle duvarın düzlemdışı mekanizmalara karşı direnimi sonucu oluşur ve yıkıcı değildir. İki tip düzlemiçi mekanizma durumu bulunur:

Eğilme davranışı: Düşey yükleme, duvarın çekme dayanımına göre küçükse, duvar sert bir blok gibi davranır ve yatay kuvvetin altında eğilir. Düşey yükleme daha büyük ise, duvar paneli ezilir (Şekil 1.10a).



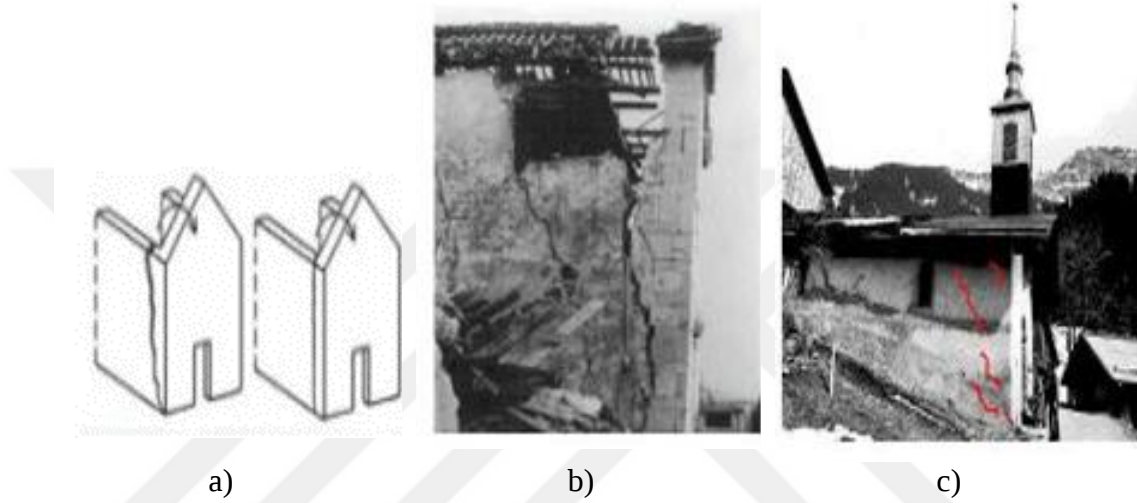
Şekil 1.10 Düzlemiçi hasar tipleri, a) Eğilme b) Kayma-kesme. c) Kesme (Tomazevič, 1999)

Kayma davranışı: Eğilme davranışından kaynaklanan çatlaklar, duvarın güçlü bölümünü zayıflattığında, 1.10b'de görüldüğü gibi, genellikle duvarın bir ucunda kesme-kayma durumu oluşabilir. En çok gözlenen yıkım modu, çekme ve basınç

çevrimlerinden kaynaklanır. Daha sonra, “X” şeklindeki çatlaklar duvarın ortasından veya bir açıklığın köşelerinden başlar ve duvarın köşelerine doğru ilerler (Şekil 1.10c).

1.1.2.2 Düzlemdışı mekanizmaya bağlı hasarlar

Düzlemdışı mekanizma ile duvarın tamamı veya bir kısmı devrilmektedir. Ortogonal duvarlar ve katlar arasındaki bağlantıların olmaması veya monte edilen bağlantı çubuklarının zayıflığı düzlemdışı hasarları kolaylaştırmaktadır.

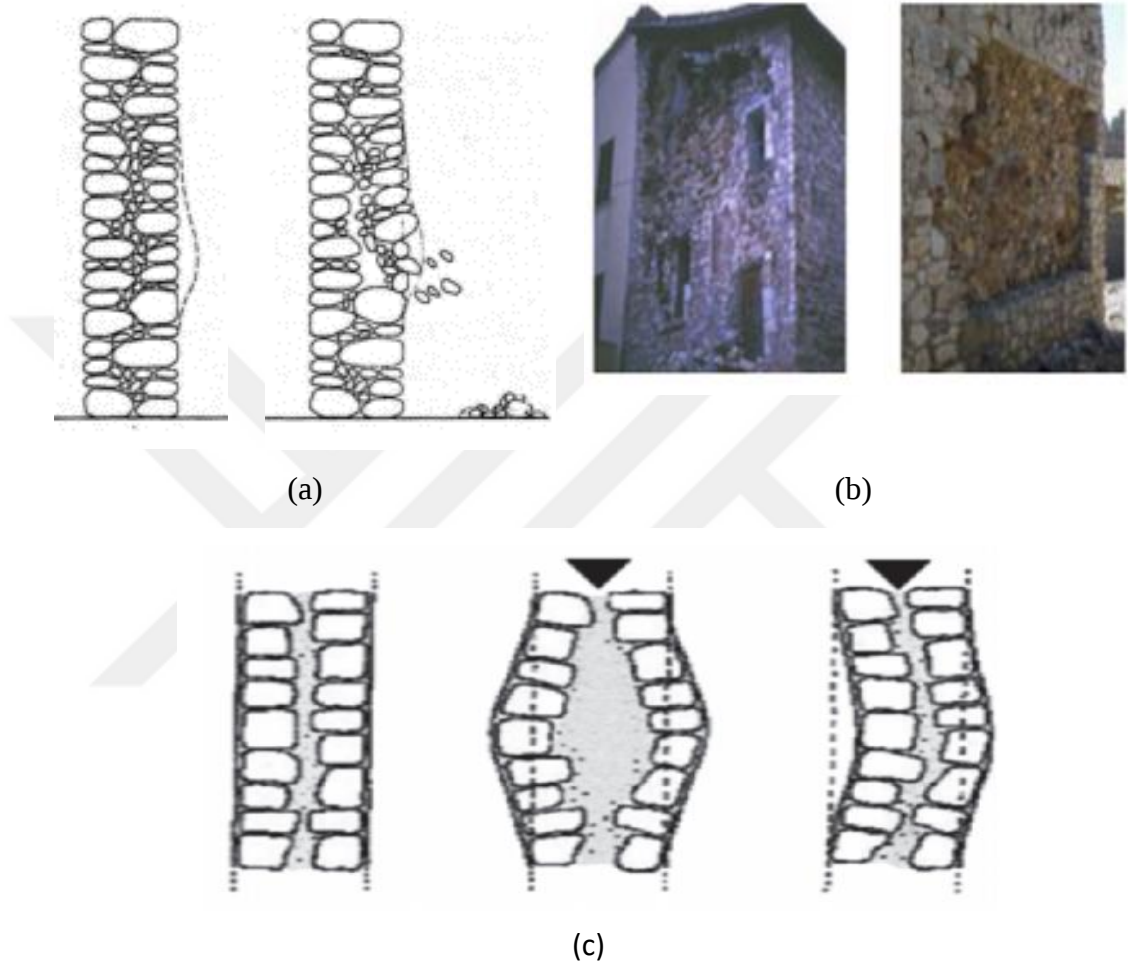


Şekil 1.11 Cephenin ayrılması a) dönme mekanizması b) çatı ve ortogonal duvarın ayrılması c) köşe duvarda 'V' şeklinde çatlaklar (Limoge, 2016)

1.1.2.3 Çok tabakalı yığma duvarlarda gözlenen düzlemdışı hasar tipleri

Yığma duvarların temel eksikliği, düzlemdışı doğrultuda monolitik davranış sergilememesidir. Bu davranış sebebiyle duvar, yatay veya düşey yönlerde yüklemelere maruz kaldığında savunmasız hale gelir. Şekil 1.12'de gösterildiği üzere başlıca yıkım modları, tabakaların ayrılması veya sıyırma, duvarın global veya lokal devrilmesi ve malzemenin dışarı doğru dökülmesidir. İç tabaka, tek bir tabaka halinde kullanılmasına kıyasla daha iyi bir basınç dayanımı elde edilmesine olanak sağlayan dış tabakalar ile sınırlandırılmıştır. Ancak Vintzileou ve Tassios (1995), dış tabakaların, varsayımsal nihai dayanımına ulaşmadan önce hasar gördüklerini, çünkü iç tabakanın genişlemesine bağlı olarak yatay kuvvetlere maruz kaldıklarını göstermiştir. Ek olarak, iç tabaka hasar gördüğünde, taşıdığı yük, daha dirençli olan dış tabakalara otomatik olarak aktarılmaktadır. İç ve dış tabakalar arasındaki bağlantı

az bile olsa, bu yükler temas yüzeyindeki gerilme kuvveti ile rahat bir şekilde aktarılır. Ayrıca, dış katmanlar daha incedir ve bu nedenle düşey ve yatay kuvvetlerin kombinasyonu tarafından oluşturulan düzlemsel bir mekanizma ile daha çabuk göçebilmektedir.



Şekil 1.12 Çok tabakalı duvarlarda gözlenen hasar a) hasar mekanizması (Binda, Cardani, Saisi ve Valluzzi, 2006) b) hasar örneği (Modena, Valluzzi, da Porto ve Casarin, 2011) ve c) gözlenen diğer hasar türleri (Giuffrè ve Carocci, 1993)

Vintzileou ve Tassios (1995) ve Vintzileou ve Miltiadou-Fezans (2008) üç tabakalı duvarların basınç altındaki yüksek hasar görebilirliğini ve dış tabakaların ayrılmasının duvarın erken bozulmasına neden olabileceğini vurgulamışlardır. Toumbakari ve Van Gemert (1997) ve Toumbakari (2002), bu duvarların düzlemsel deformasyonlarını sınırlamak için çapraz bağlantıların gerekli olduğunu çok tabakalı duvar serisinde gösterilmiştir.

1.1.3 Problem İfadesi

Son yıllarda Türkiye’de birçok deprem felaketi yaşanmış ve ülke topraklarının sismik açıdan aktif bir bölge olduğunu hatırlatan küçük sarsıntılar her zaman devam etmiştir. Bir önceki alt bölümde, depremlerin tarihi yığma yapılar üzerindeki etkileri ve düzlemdışı hasar biçimleri vurgulanmıştı. Türkiye’de de deprem tehdidi altında bulunan birçok tarihi bölge vardır. Bu yapılarda oluşabilecek hasarı önlemek veya azaltmak için acilen yapısal tedbirler alınması gerekmektedir. İlgili yapıların deprem davranışının iyileştirilmesi amacıyla yürütülecek çalışmaların planlanabilmesi için, ilk olarak yapının mevcut malzeme durumu, sınır koşulları ve dinamik karakteri belirlenmelidir. İkinci aşamada yapının makro veya mezo düzeyde sonlu elemanlar modeli kurulmalı, model iyileştirmesi yapılmalı ve son olarak düzlemdışı doğrultudaki deprem etkileri için sayısal çözümlemesi yapılarak yapısal güvenilirliği tespit edilmelidir.

1.1.4 Araştırmanın Amacı

Sunulan tezde, tarihi yığma bina duvarlarının düzlemdışı yapısal güvenilirliğinin belirlenmesine yönelik ileri düzey modelleme araçlarının kullanım potansiyeli araştırılmış ve sonraki yapısal analizlerde de kullanılabilecek çeşitli hasar limitlerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Araştırma sırasında tarihi İsabey Camii’nin avlu duvarları örnek vaka olarak alınmış, kullanılan prosedürün etkinliği bu yapı üzerinde incelenmiş ve bu amaçla aşağıda sıralanan altı temel adım takip edilmiştir:

- Tarihi yapının geometrik boyutlarının ve sınır koşullarının rölemler ve saha gözlemleri ile belirlenmesi,
- Yapının düzlemdışı doğrusal davranışının belirlenmesi için basitleştirilmiş sayısal modelinin geliştirilmesi.
- Yapının tahribatsız ve az tahribatlı muayene yöntemleriyle mevcut malzeme durumunun belirlenmesi,
- Ortamsal titreşim testleri ile elde edilen veri kullanılarak yapının dinamik parametrelerinin (mod şekli, frekans ve sönüm oranı) tahmin edilmesi

- İncelenen yapının kalibre edilmiş mezo düzeydeki üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman modeliyle yapının göçme modlarının tahmin edilmesi,
- Aynı modelin zaman tanım alanında analizi ile yapının düzlemsel doğrultuda göçme güvenliğinin değerlendirilmesi.

1.1.5 Tez Düzeni

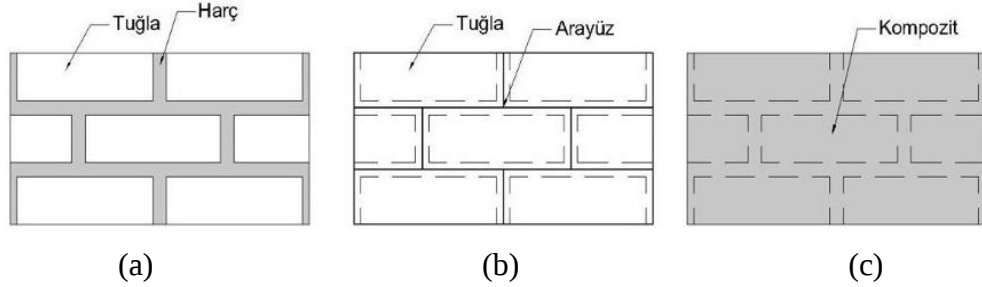
Sunulan tez, belirtilen amaç doğrultusunda bir araştırma projesine ait çalışmaları da içeren dört bölüme ayrılmıştır. İlk bölümde amaçlar, problem ve hedefler açıkça ifade edilmiş, yığma binaların sayısal modellemesi konusunda bir literatür taraması sunulmuş ve çoğunlukla tercih edilen modelleme yaklaşımları tanıtılmıştır. İkinci bölümde, gerçek bir tarihi yapı üzerinde yürütülen saha çalışmalarını ele alınmıştır. Tamamlanan saha testleri ile problem ve araştırma amaçları arasındaki ilişki yine bu bölümde açıkça ifade edilmiştir. Üçüncü bölümde, vaka örneği olarak incelenen tarihi İsabey Camii'nin sonlu eleman modelleri farklı modelleme yaklaşımları ile oluşturularak sayısal çözümler yapılmış ve bulgular detaylı bir şekilde incelenmiştir. Dördüncü bölümde ise sayısal analizlere ilişkin sonuçlara ve kısa değerlendirmelere yer verilmiştir.

1.2 Literatür incelemesi

1.2.1 Tarihi yığma yapı duvarlarının sayısal analizi: duvarların analizinde farklı yaklaşımlar

Yığma duvarların temel özelliği, taş veya tuğla gibi ayrık birimlerin, derzler boyunca harçlı dolgu malzemeleriyle birleştirilmesiyle oluşturulan kompozit yapısıdır. Yığma yapılar ve özellikle de tarihi yığma yapılar malzeme özellikleri ve yapısal elemanların birleşim detaylarındaki değişkenlik nedeniyle farklı doğrultularda farklı davranışlar sergilemektedir. Belirli kabuller altında yapının global davranışını temsil edebilen sayısal modellerin yanı sıra karmaşık davranışını ve hasar mekanizmalarını detaylı şekilde canlandırabilen modeller de geliştirilebilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal modellemede genellikle detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş-

mikro (mezo) modelleme ve makro modelleme (Şekil 1.13) olmak üzere üç farklı modelleme yaklaşımı tercih edilmektedir (Lourenço, 1996).



Şekil 1.13 (a) Mikro; (b) Mezo ve (c) Makro modellemeler yaklaşımları (Lourenço, 1996)

Lourenço ve Rots (1997), modern plastisite yaklaşımları içerisinde, yığmanın tüm göçme mekanizmalarını yakalayabilen yeni bir arayüz elemanı geliştirmiş ve modeli doğrulamak için düzlemsiz yüklenen laboratuvar deney sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Hasarların birimlerden ziyade birleşim arayüzlerinde gelişmesi beklendiğinden mikro modelleme alanında yapılan çalışmaların çoğunda arayüz elemanı üzerinde yoğunlaşmıştır. Hasarın uygun bir şekilde tespit edilebilmesi için, davranışı doğru şekilde temsil edecek malzeme modellerinin seçimi oldukça önemlidir. Brocks, Cornec ve Scheider (2003) sünek ve kırılgan malzemelerde çatlak yayılımını analiz edebilmek için uyarlanmış kohezif bölge modellerinde, malzeme modellerinin uyum sağlayacağı fiziksel ilişkiler vermiştir.

Milani, Lourenço, ve Tralli (2006) düzlemsiz yüklenmiş yığma yapı duvarının limit analizi için anizotropik ve homojenize edilmiş bir yaklaşım önermiştir. Önerilen bu sayısal modelde, yığma duvarın tipik eğilme davranışı altında malzeme eksenlerine göre farklı davranışlar sergileme yeteneği ön plana çıkarılmıştır. Aynı çalışmada, yapılan sayısal hesaplar ile yığma duvarlar için literatürde bulunan düzlemsiz test sonuçları karşılaştırılmış ve benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

Mallardo, Malvezzi, Milani ve Milani (2008) Palazzo Renata di Francia tarihi yapısının sismik davranışını analiz etmek için üç boyutlu eşdeğer çerçeve modeli, elastoplastik hasar ilişkilerini içeren ikinci bir sonlu elemanlar modeli ve homojenize

edilmiş arayüz elemanı sayesinde kinematik göçme ilişkilerini içeren üçüncü bir model oluşturmuştur. İki boyutlu düzlem gerilme elemanlarının analiz sonuçları uygun düzlemini mukavemetler verirken, üç boyutlu modelin analizinde çok düşük yatay yükler altında dahi düzlemdışı hasarlara bağlı kısmi göçmeler hesaplanmıştır.

Senthivel ve Lourenço (2009) kesme taş ve moloz örgülü üç farklı tarihi yığma duvarın düzlemini performansını sayısal ve deneysel olarak değerlendirmiştir. Deney sonucunda, duvarların hasar türünün ve yük-deplasman eğrilerinin malzeme özelliklerinden ve eksenel ön basınç yükünden oldukça etkilendiği bulgulanmıştır. Her üç duvar için de dayanım değeri farklı bulunmasına karşın, yüksek eksenel basınç kuvveti altında davranışları benzer olmuştur. Sayısal yöntemle elde edilen hasar modlarının, deneysel hasar modları ile uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Milani ve Lourenço (2010) değişken boyutlara sahip birimlerin rastgele montajı ile oluşturulmuş, düzlemini yüklenen duvarların limit analizi için basit bir rijit-plastik homojenize edilmiş model önermiştir. Modelde, derzler sınırlı çekme ve basınç dayanımına sahip sürtünme davranışı gösteren arayüz elemanlarına indirgenmiştir. Modelin birkaç malzeme parametresi ile tanımlanabildiği ve sayısal olarak oldukça kararlı çalıştığı bildirilmiştir.

Dolatshahi ve Aref (2011), yığma duvarın düzlemini ve düzlemdışı davranışını simüle eden üç boyutlu bir malzeme modeli önermiş ve literatürdeki deneysel çalışma sonuçları ile önerilen malzeme modelini doğrulamıştır. İlgili çalışmada, ABAQUS (Système, D., 2007) sonlu elemanlar yazılımında, tuğla elemanlar için üç boyutlu katı elemanlar (C3D8R), arayüz bölgeleri için de kohesif düzlem elemanlar (COH3D8) tanımlayarak farklı yükleme doğrultuları için analizler gerçekleştirmiştir. Düzlemini yüklemelere ait hasar modu diyagonal çatlaklar ile sınırlı kalırken düzlemdışı yüklemeye ait hasar modu duvarın düzlemi dışına devrilmesi şeklinde gelişmiştir. Birleşik yükler altında gözlenen göçme modu ise diyagonal çatlaklar ve devrilmeyi içeren karışık bir moddur.

Aref ve Dolatshahi (2013), yığma yapı duvarlarının büyük deplasmanlar altındaki davranışını modellemek için açık (explicit) analiz prosedüründe kullanılabilecek üç boyutlu mezo ölçekli bir malzeme modeli önermiştir. Model, bir altprogramda hazırlanmış ve ABAQUS (VUMAT) ile derlenmiştir. Tuğla elemanlar için üç boyutlu katı elemanlar (C3D8R), arayüz bölgeleri için ise kohesif özellikte düzlem elemanlar (COH3D8) tanımlanmıştır. Önceki araştırmalardan elde edilen ve yazarlar tarafından sağlanan deneysel veriler ile sayısal analiz sonuçları, önerilen malzeme modelinin yeterliliğini değerlendirilmek üzere karşılaştırılmıştır. Eklenen yatay yük-deplasman grafiklerinde deneysel ve sayısal analiz bulgularının benzeşimleri ortaya konulmuştur.

Casolo ve Milani (2013) üç tabakalı yığma duvarın düzlemdışı doğrusal olmayan analizi için artan eğilme ve burulma etkileri altında homojenize bir sonlu elemanlar modeli oluşturmuştur. İncelenen yapılar için global moment-eğrilik diyagramları uygun şekilde tahmin edilebilmiştir. Milani ve Valente (2015) yaptıkları çalışmada 2012 Emilia-Romagna (İtalya) depremi sırasında hasar gören yedi kilisenin üç boyutlu doğrusal olmayan dinamik analizlerini ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanarak makro modelleme ile gerçekleştirmiştir. Analiz sonuçları, İtalyan Deprem Yönetmeliği tarafından önerilen farklı analiz prosedürlerini karşılaştırmak için kullanılmıştır. Standart serbest titreşim analizleriyle sismik bir olay sırasında göçmeye neden olabilecek muhtemel makro blok hasarlarını kabaca tanımlamak mümkünken böyle bir analizin, yapının elastik sınır ötesindeki davranışında güvenilmez olacağı vurgulanmıştır. Aynı yazarlar bir başka çalışmada (Valente ve Milani, 2016) İtalya'nın Kuzeydoğu bölgesinde bulunan sekiz adet tarihi yığma kulenin doğrusal olmayan dinamik ve statik analizlerini yine ABAQUS sonlu elemanlar yazılımını kullanarak gerçekleştirmiştir. Burada, doğrusal olmayan statik prosedüre ait sonuçlar ile daha fazla zaman alan ve kararsızlığa eğilimli dinamik prosedüre ait sonuçların benzeştiği ortaya konmuştur.

Noor-E-Khuda, Dhanasekar ve Thambiratnam (2016) düzlemdışı yükler altındaki yığma duvarların davranışını kabuk elemanlar kullanarak analiz etmiştir. Literatürde var olan deneysel veriler kullanılarak yönler göre farklı mekanik özelliklere sahip homojenize ABAQUS modelleri üzerinde analizler gerçekleştirmiştir. Sınır koşulların,

duvar görünüm oranının, ön basıncın ve duvar açıklığının mukavemet ve sünekliğe etkisi incelenmiştir. Ön basıncın belirli değerlere kadar (0,5 MPa) deplasman sünekliğini arttırdığı fakat bu değer duvar basınç dayanımının % 20'sini aştığı durumlarda düzlemsel nihai kapasiteyi ciddi oranda azalttığı gözlenmiştir.

a) Mikro Modelleme

Mikro modellemede, tuğlalar ve harçlar sürekli ortam elemanları ile oluşturulurken, her birimdeki harç arayüzü ayırık elemanlarla temsil edilmektedir (Şekil 1.13a). Uygun malzeme modeli seçimi ve uygun mesh boyutunun sağlanması ile gerçek yapının davranışına oldukça yaklaşılmaktadır. Fakat böylesi detaylı bir model oluşturmak ve analizlerini gerçekleştirmek görece zordur. Bu nedenle pratikte mezo ve makro modeller daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Aref ve Dolatshahi, 2013).

b) Mezo Modelleme

Mezo modellemede, elastik sürekli ortam elemanları olarak tanımlanan tuğlalar, harç kalınlığının ortasına kadar genişletilmekte, tuğlalar arası çekme, kesme ve basınç hasarları ise arayüz elemanları ile tanımlanmaktadır (Şekil 1.13b). Başka bir deyişle modelin tüm doğrusal ötesi davranışı arayüz elemanları ile tanımlanmakta ve modeldeki diğer unsurların elastik olduğu kabul edilmektedir (Aref ve Dolatshahi, 2013; Dolatshahi, Aref ve Yekrangnia, 2014). Bu modellemede duvara ait çatlak dağılımı elde edilebilmekte fakat tuğla-harç arası hasarın tespiti yapılamamaktadır.

c) Makro Modelleme

Makro modelleme ise pratik mühendislik analizlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Lorenzoni ve diğer., 2013; Milani ve Valente, 2015). Tuğla ve harç birimleri arasındaki etkileşimler ve hasar türünün detaylı olarak elde edilmesinin gerekmediği durumlarda yapının global tepkisini elde etmek için uygun bir yaklaşımdır (Roca, Cervera ve Gariup, 2010). Bu modellemede tüm duvar sürekli ortam elemanlarıyla tanımlanmaktadır (Şekil 1.13c).

Makro modelleme örnekleri:

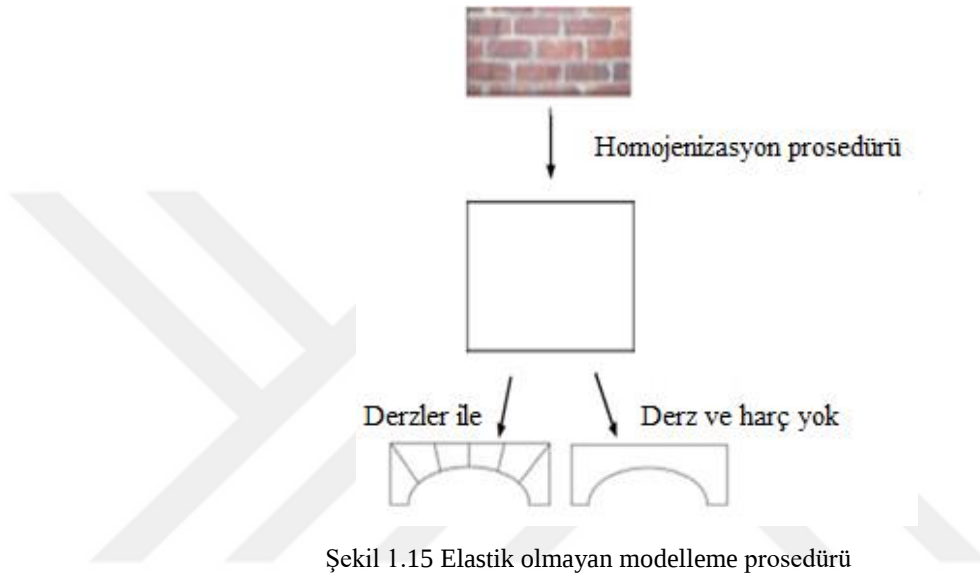
- *Tam plastik yaklaşım ile modelleme:* Teorisi kinematik analiz ile aynı olan bu modelleme türünde minimum miktarda malzeme parametresine ihtiyaç duyulmaktadır. Sayısal modelde, taş yığma birimlerin mekanik özellikleri kinematik parametrelerle tanımlanmaktadır. Yığma malzeme sınırsız basınç dayanımı, sıfır çekme dayanımı, küçük deplasmanlar için kayma yönünde göçmeyen malzeme kabulü yapılmaktadır (Limoge, 2016). Fakat bu yöntemde hasarın ilerlemesi ve çatlak oluşumu tespit edilememektedir.
- *Doğrusal elastik yaklaşım ile modelleme:* Sonlu elemanlar doğrusal elastik yaklaşım, Şekil 1.14'de verilen Venedik'teki St. Mark Bazilikası gibi anıtsal binaları modellemek için kullanılır (Mola ve Vitaliani, 1997). Bu tür hesaplama, "hassas bölgelerin", yani çekme isteminde bulunacak alanların tespit edilmesini mümkün kılmaktadır. Geometrinin, yapının davranışı üzerindeki etkisi mükemmel bir şekilde görülebilmektedir. Bu şekilde binanın yapısal özellikleri daha iyi anlaşılmaktadır.



Şekil 1.14 Venedik'teki St. Mark Bazilikası'nın sayısal modeli, (Mola and Vitaliani, 1997)

- *Doğrusal olmayan yaklaşım:* Çatlak oluşumunun yayılı olduğu kabul edilmektedir. Yapının veya elemanın geometrisi olduğu gibi korunmakta, hasar oluşumu malzeme için tanımlanan bünye denklemleri ile tanımlanmakta

ve bu analiz türü malzemenin deformasyon ve rijitliğini her integrasyon noktasında değiştirmeye izin vermektedir. Gerilmeler tanımlanan bir kriteri aştığında bir hat boyunca çatlaklar gelişir (Limoge, 2016). Çekme dayanımı bir kere aşıldığında o bölgedeki kohezyon tümüyle kaybedilir. Bu yaklaşım genellikle her hasarın ayrı ayrı değerlendirilmesinin mümkün olmadığı büyük yapılar için tercih edilmektedir.



Şekil 1.15 Elastik olmayan modelleme prosedürü

Bu yaklaşım genellikle her çatlağın ayrı ayrı onarılmasının imkânsız olduğu büyük yapılar için tercih edilmektedir. Bu teknik, duvarın çekme dayanımı aşıldığında, en büyük gerilmelerin olduğu bölgede tam bir birleşme kaybı olacağı kabulüne dayanmaktadır. Lourenço ve Rots (1997), beton üzerinde yapılan çalışmalara dayanarak, çekmenin yanı sıra, basınç altındaki malzemenin elastik olmayan davranışını simüle edebilen bir plastisite modeli önermektedir. Çatlama, ayrık modelleme yöntemi ile sağlanabilir. Bloklar yapının "homojen" kısımlarını tanımlar; arayüzler ile birleştirilen elemanların arasının açılması, seçilen yapının bir alanında çatlakların gelişimini simüle eder. Çatlaklar önceden tanımlanmış "doğal olmayan" bir yolu takip eder. Bu teknik, bir Roma köprüsü üzerinde çalışma yürüten Frunzio, Monaco ve Gesualdo (2001) tarafından kullanılmıştır.

Bu modelleme yaklaşımının dezavantajlarından biri, tüm yığma malzemenin çeşitli elastik parametrelerini karakterize etmenin zorluğudur. Ayrıca, yığma birimlere

sadece doğrusal malzeme özellikleri tanımlandığı için, yapının göçme modunu ve göçme anındaki konumunu belirlemek genellikle zordur. Yapı üzerinde çatlakların oluşumu sırasında kuvvetlerin yeniden dağılımı sağlanamaz. Ancak, bu modeller ön değerlendirme için oldukça faydalı sonuçlar vermektedir.



BÖLÜM İKİ

SAHA ÇALIŞMALARI

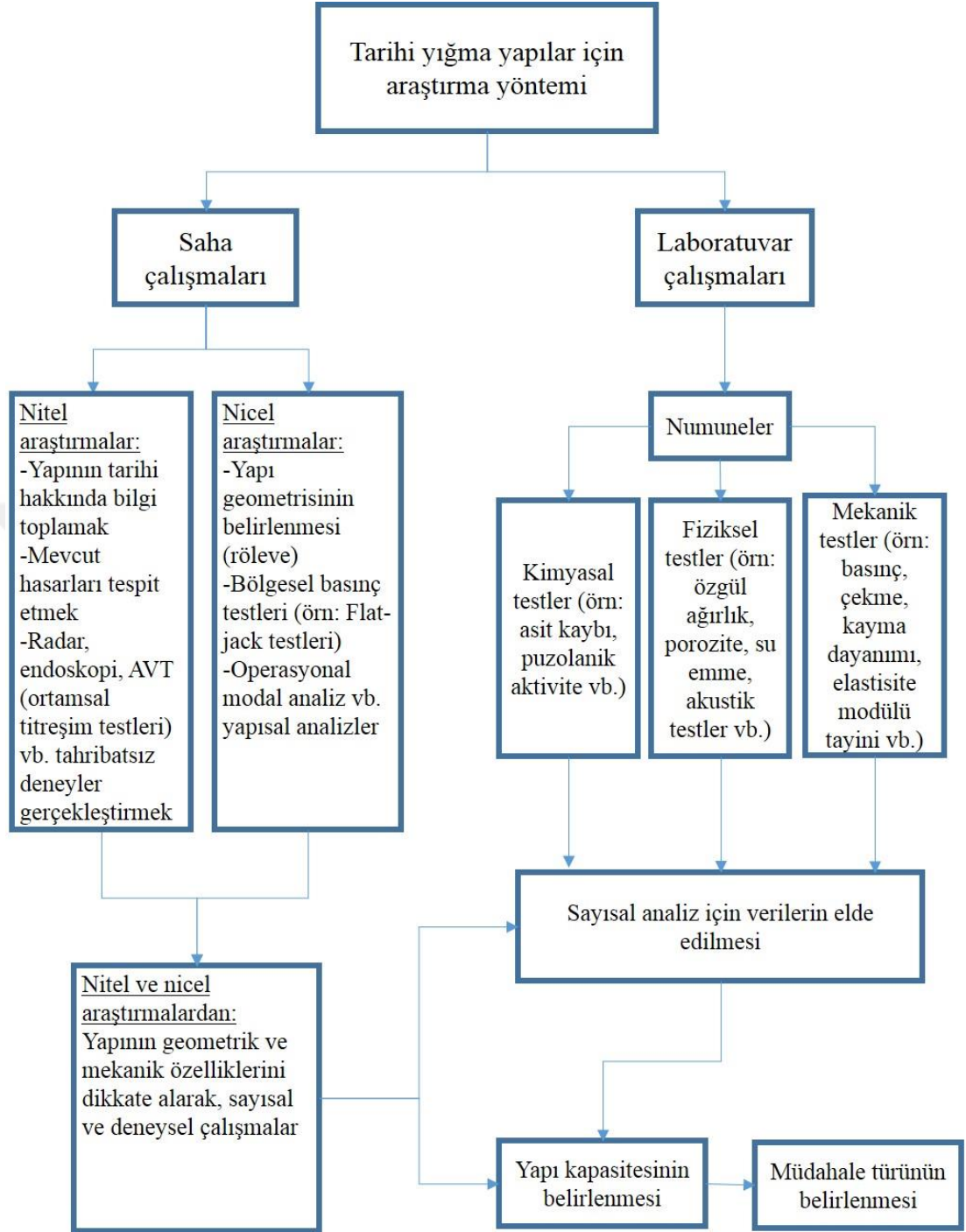
2.1 Tarihi yığma yapılar üzerinde saha testleri

Tarihi yığma yapıları tüm detayları ile modellemek genellikle mümkün olmamaktadır. Saha çalışmalarında amaçlanan, yapı hakkında daha fazla bilgi ve veri seti elde ederek oluşturulan bilgisayar modelini gerçek yapıya mümkün olduğunca yaklaştırmaktır. Tarihi yığma binaların modellenmesinde, yapının geometrik özelliklerinin, iç kompozisyonlarının, yapıyı oluşturan bileşenlerin sınır koşulları ve malzeme özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Tüm bu veriler saha deneyleri ve laboratuvar çalışmaları ile elde edilebilmektedir. Bu bölümde, tarihi yığma yapılar üzerinde gerçekleştirilen saha testleri ve laboratuvar çalışmaları verilmiştir.

2.2 Tarihi yığma yapıların değerlendirilmesi için araştırma tekniği

Tarihi yığma yapı birimlerinin malzeme özellikleri karmaşıktır ve eski malzeme olduğundan üzerinde çalışılması oldukça zordur. Çoğunlukla kırılgandır ve ayrıca deprem sonucu oluşan bazı yapısal kusurlara sahiptir. Bu nedenle, tez çalışmaları kapsamında incelenen İsabey Camii avlu duvarlarının sayısal modeli oluşturulmadan önce, yapı hakkında detaylı bilgi edinme amaçlı saha çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın, Şekil 2.1’de tanımlanan bir plan kapsamında iki ana başlıkta yürütülmesi, tarihi yapının sismik riskinin belirlemesi ve olası müdahale şemasının oluşturulması çalışmalarına bir sistematik kazandıracaktır.

İsabey Camii düzeyindeki tarihi bir eserin, karşılaştığı depremler sonucunda aldığı çeşitli hasarları onarmak ve gelecek sismik tehlikelere karşı direncini artırmak için girişimlerde bulunmak gerekmektedir. Şekil 2.1’de verilen şema kullanılarak, saha testlerinden ve gerçekleştirilecek laboratuvar çalışmalarından elde edilecek bilgiler doğrultusunda yapının mevcut durumu değerlendirilebilir ve onarımı ve güçlendirilmesine yönelik kararlar alınabilir. Burada, tüm tarihi yığma binaların aynı teşhis kronolojisine sahip olmadığını belirtmek gerekmektedir.



Şekil 2.1 Tarihi yığma yapılar için araştırma yöntemi

2.3 İsabey Camii'nin Tarihi ve Yapısal Özellikleri

İzmir'in Selçuk ilçesinde bulunan tarihi İsabey Camii, 1375 yılında Aydınoğlu İsa Bey tarafından Mimar Şamlı Ali'nin eseri olarak yaptırılmıştır. Anadolu Beylikleri'nin en eski ve en ihtişamlı başyapıtlarından biridir. Yapımı sırasında, yakındaki eski uygarlıkların kalıntılarından taş ve sütunlar da kullanılmıştır. Yapının kuzey ve batı avlu duvarlarında düzlemdışı doğrultudaki davranışı engelleyecek bir yapısal eleman bulunmamaktadır. Duvarların ortalama kalınlığı 180 cm, serbest yüksekliği 12 m ve toplam uzunluğu 55 m'dir. Avlunun dışındaki zemin seviyesi yaklaşık 3 metre aşağıdadır. Duvarların, iki yüzü kesme taş ve ortası moloz dolgu çok tabakalı bir yapıda olduğu düşünülmektedir. Avlu duvarları ve yapının gövde duvarları benzer formda olup düzlem dışı davranışı engelleyen yapısal elemanların bulunmaması açısından da benzer koşullara sahiptir (Şekil 2.2).



(a)



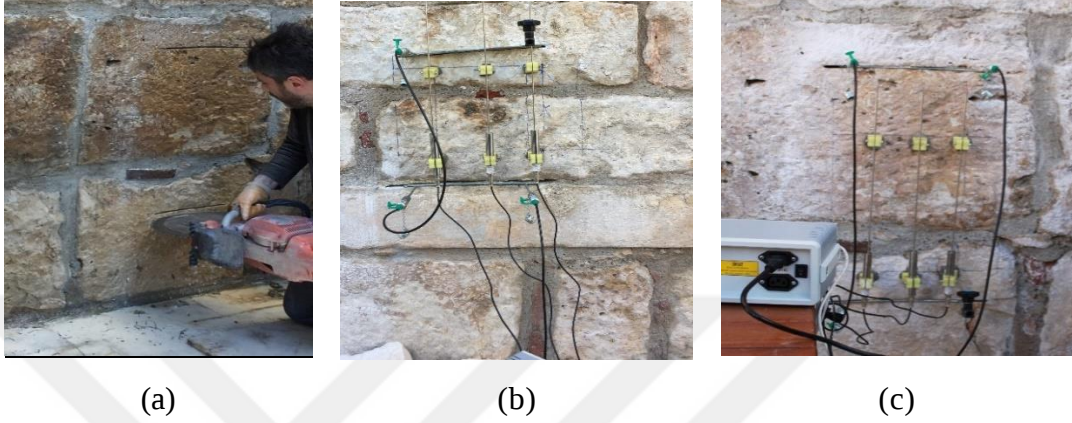
(b)

Şekil 2.2 (a) İsabey Camii'nin perspektif görünüşü ve (b) araştırılan duvarlar (Kişisel arşiv, 2017)

2.4 Az Tahribatlı Malzeme Testleri - Flat-Jack Testi

Vakıflar Genel Müdürlüğü'nün teknik desteği ile İsabey Camii avlu duvarları üzerinde üç farklı lokasyonda Flat-Jack testleri gerçekleştirilmiştir. Flat-Jack testi, kendi sahasında bulunan bir kaya kütlesi veya bir yığma duvar üzerinde gerilme ve deformasyon ölçümlerinin yerinde yapılabilirdiği bir test türüdür. Proje kapsamında gerçekleştirilen Flat-Jack testleri için kullanılan test prosedürü ASTM C1197-14a (2014) ve RILEM MDT. D.4 (2004) ile uyumludur. Test yapılacak her duvarın

üzerinde, öncelikle ara mesafesi yaklaşık 40 cm olan iki yatay kesim yapılmıştır (Şekil 2.2a). Plaka şeklindeki hidrolik krikolar kesiklerin içerisine yerleştirildikten sonra, üç adet LVDT, krikolar arasına belirli mesafelerle düşey olarak yerleştirilmiştir (Şekil 2.3b-c).



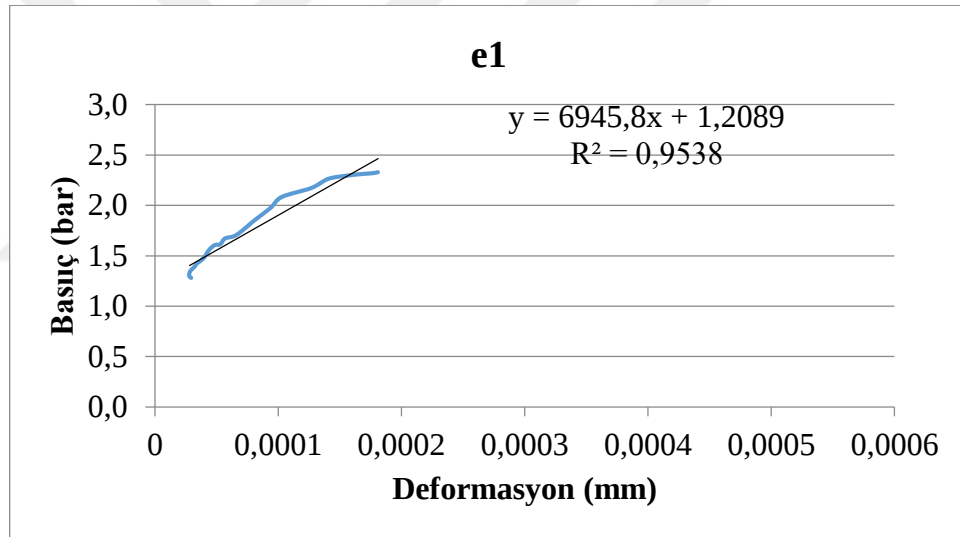
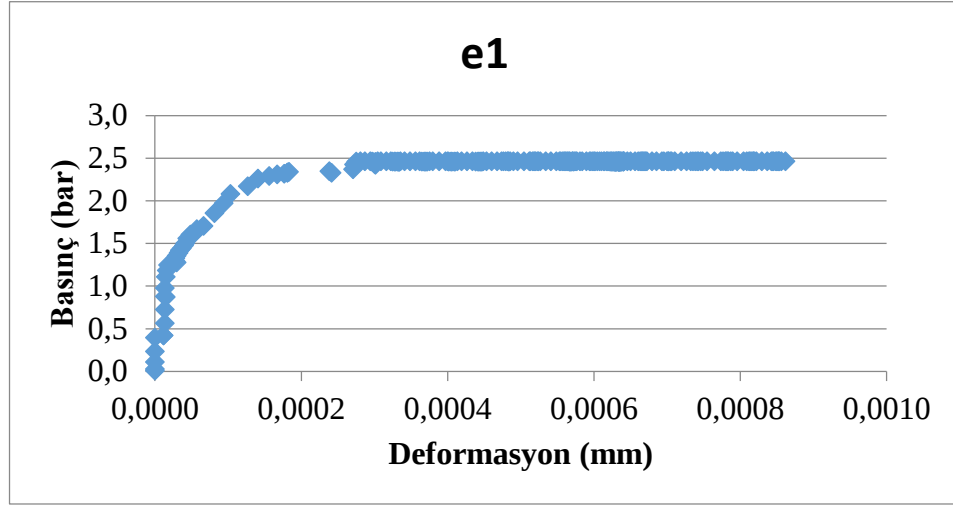
Şekil 2.3 İsa Bey Camii'nin avlu duvarlarında Flat Jack testleri (a) duvarda yatay kesimler, (b) krikolar ve transdüserlerin montajı, (c) test kurulumunun genel görünümü (Kişisel arşiv, 2018)

İlk test batı cephesi duvarı üzerindeki bir bölgede gerçekleştirilmiş ve basınç dayanımı 2,43 MPa olarak elde edilmiştir. Fakat muhtemelen teknik bir problem nedeniyle deplasmanlar sıfıra çok yakın kaydedilmiş ve anlamlı bir elastisite modülü değerine ulaşamamıştır.

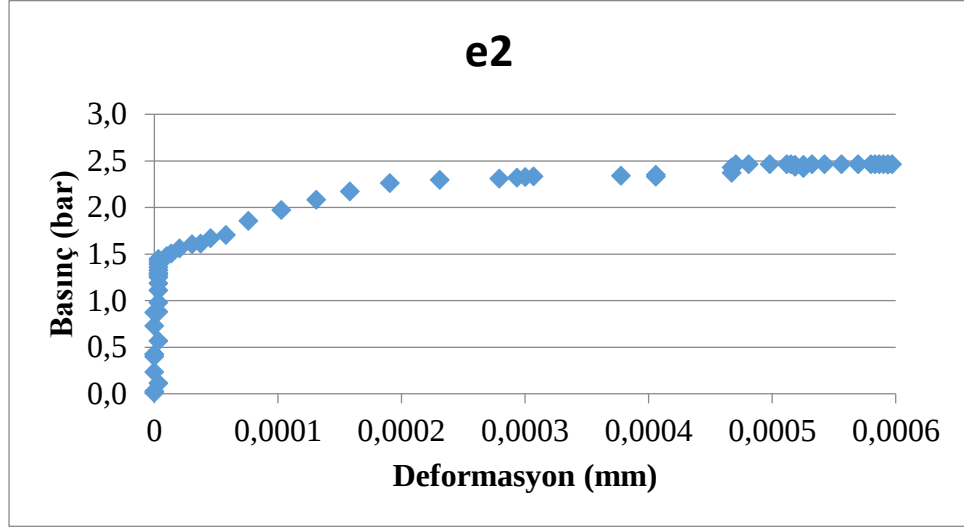
İkinci testte, doğu cephesi duvarında bulunan bir bölgeye ait basınç dayanımı 2,47 MPa, ortalama elastisite modülü değeri ise 4535 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 2.4 - 2.8).

Üçüncü testte, duvarın basınç dayanımı 2,04 MPa olarak hesaplanırken ortalama elastisite modülü yine ilk deneyde olduğu gibi anlamlı bir değer olarak elde edilememiştir.

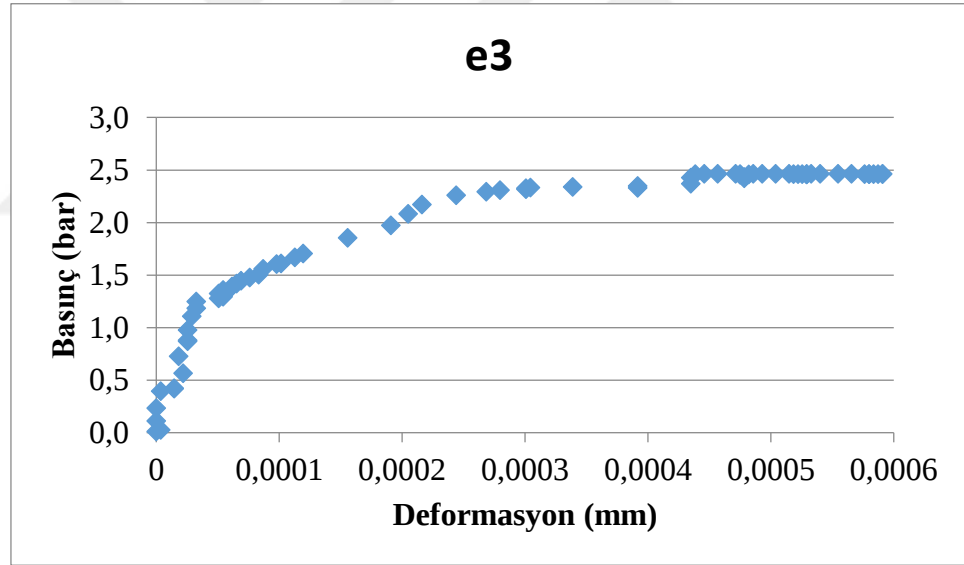
İkinci Test Birinci Çevrim Sonucu:



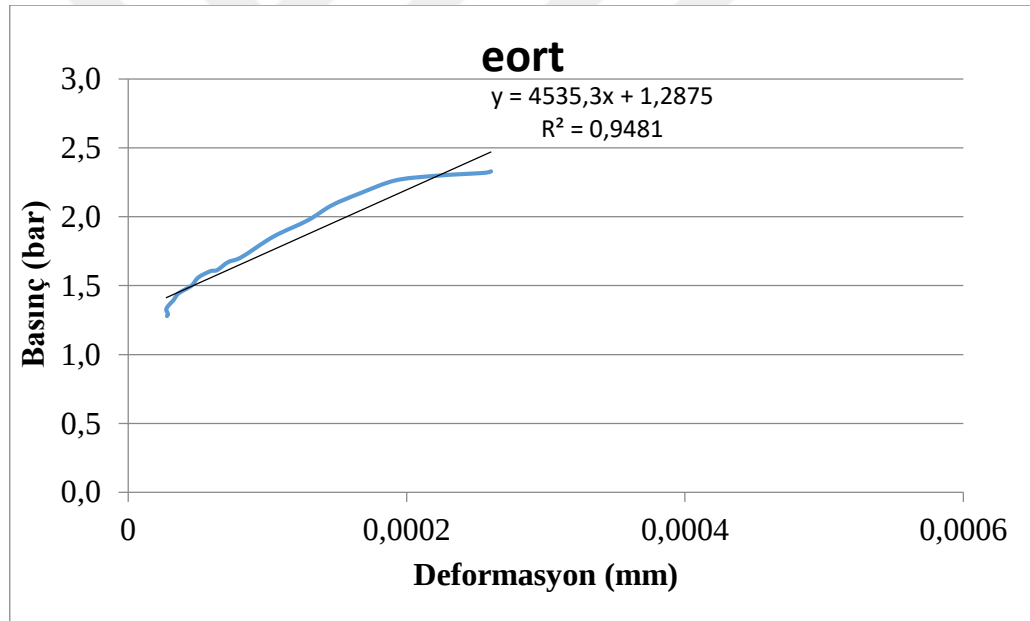
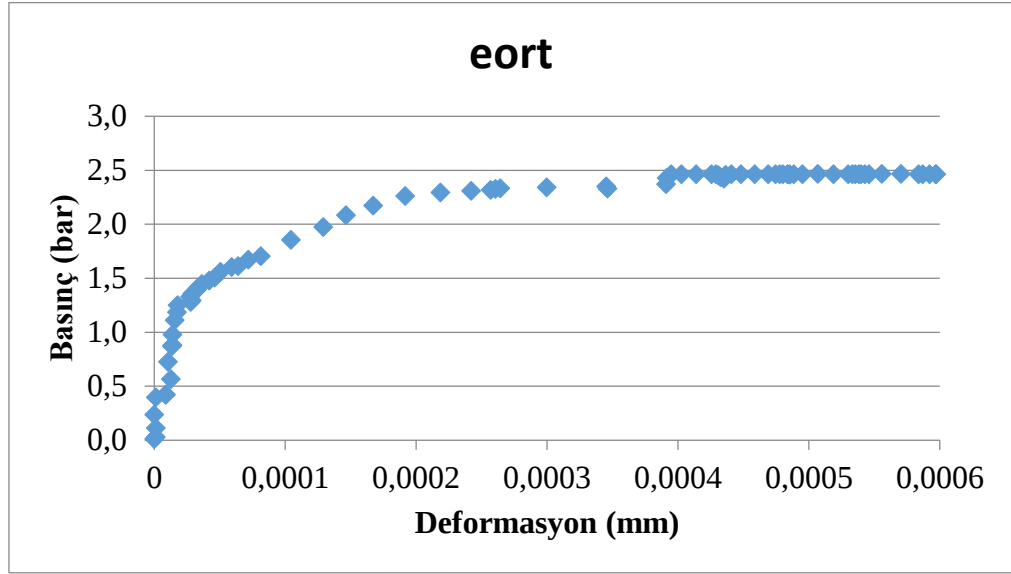
Şekil 2.4 e1 nolu deplasman ölçer verisi kullanılarak ikinci testin birinci çevrimine ait yük deformasyon eğrisi ve elastisite modülü hesabı, $E1 = 6945 \text{ MPa}$



Şekil 2.5 e2 nolu deplasman ölçer verisi kullanılarak ikinci testin birinci çevrimine ait yük-deformasyon eğrisi, $E2= 3490$ MPa



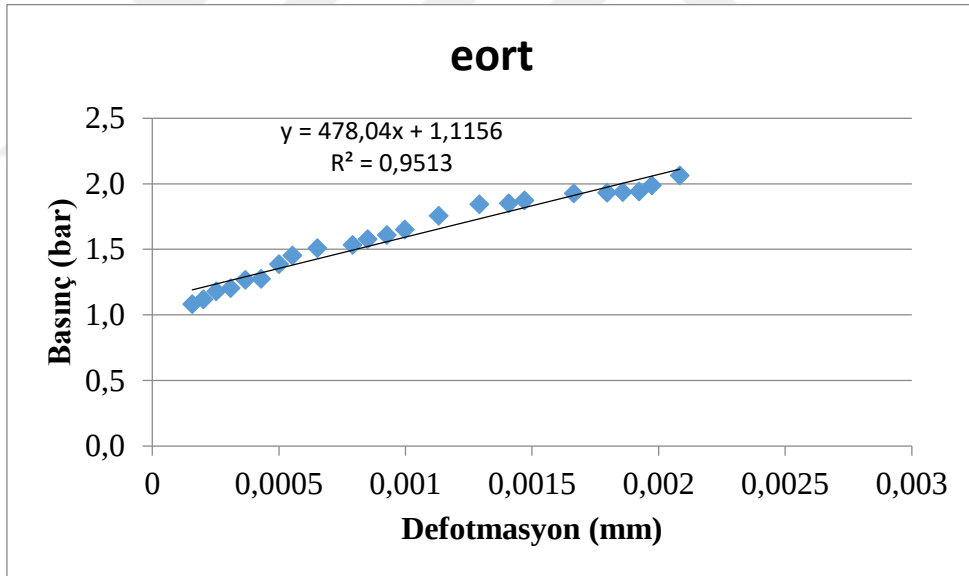
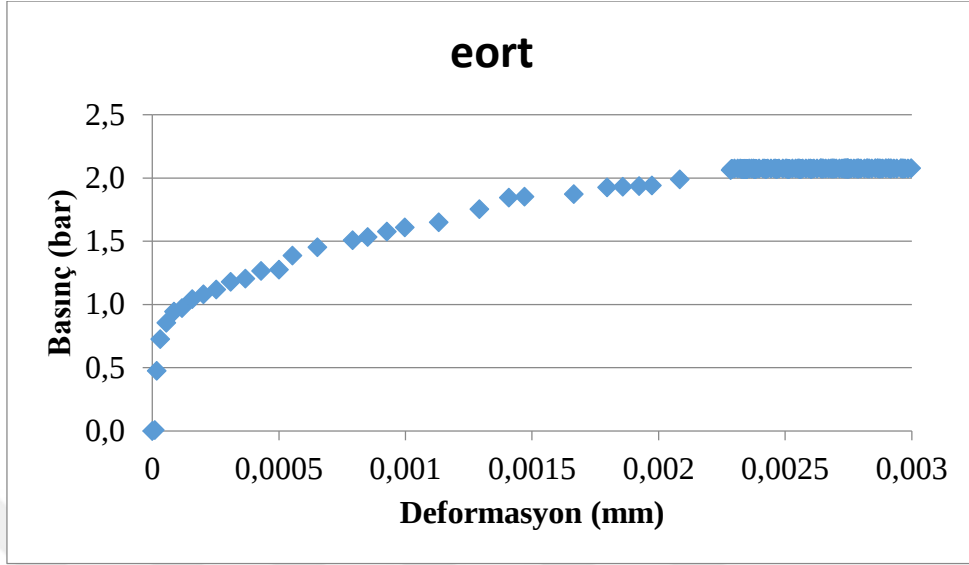
Şekil 2.6 e3 nolu deplasman ölçer verisi kullanılarak ikinci testin birinci çevrimine ait yük-deformasyon eğrisi, $E1= 4239$ MPa



Şekil 2.7 İkinci testin birinci çevrimi ortalaması ve ortalama elastisite modülü hesabı (Ölçümlerin ortalamasına göre elastisite modülü $E_{ort} = 4535 \text{ Mpa}$)

Avlu duvarının farklı bölgelerinde yapılan testlerin sonucunda, elastisite modülü ve tek eksenli basınç dayanımları ortalaması sırasıyla 4530 MPa ve 2,30 MPa olarak belirlenmiştir.

İkinci Test İkinci Çevrim Sonucu:

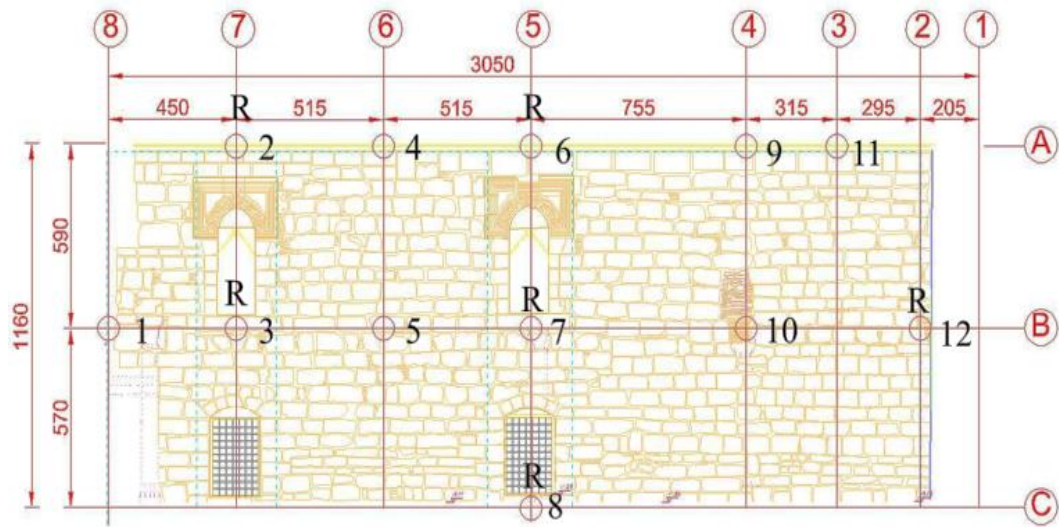


Şekil 2.8 İkinci testin ikinci çevrimine ait yük-deformasyon eğrisi ve ortalama elastisite modülü hesabı

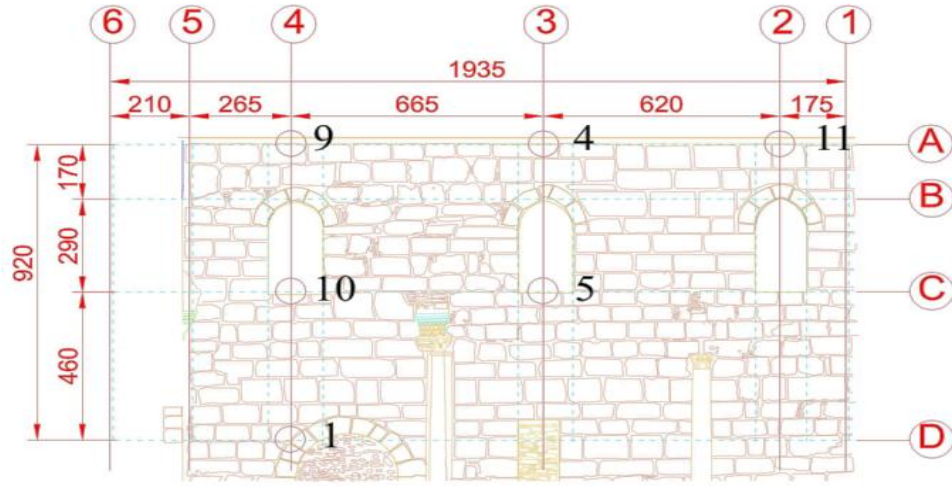
2.5 Ortamsal Titreşim Testleri ve Operasyonel Modal Analiz (OMA)

Tarihi yığma yapı duvarlarının sismik davranışını temsil eden güvenilir bir sonlu eleman modelini oluşturmak, düzensiz geometriye, karmaşık malzeme davranışına ve yapısal unsurlar arasındaki sınır koşulların belirsizliğine bağlı olarak güçleşmektedir. Bu anlamda kurulacak modele ait tanımlamaların gerçek yapı üzerinde yürütülecek çeşitli deneysel ve gözlemsel yöntemlerle kalibre edilmesi gerekmektedir (D'Ambrisi, Mariani ve Mezzi, 2012; Gentile, Saisi ve Cabboi, 2015; Nohutcu, Demir, Ercan, Hokelekli, Altintas, 2015). Bu yöntemler, gözlemsel yöntemlerle korelasyon, ölçekli laboratuvar testleri üzerinde dinamik testler (Experimental Modal Analysis) ve mevcut yapılar üzerinde dinamik testler (Operational Modal Analysis, Thermomechanical Analysis vb.) olarak sınıflandırılabilir (Atamturktur ve Laman, 2012). Bunlar arasında dinamik titreşim testleri, deprem yükleri altında genel yapısal davranış hakkında bilgi vermekte hatta bazı durumlarda güvenlik koşullarının değerlendirilmesinde yardımcı da olabilmektedir (Ceravolo, Pistone, Fragonara, Massetto ve Abbiati, 2016).

Saha çalışmalarında, 16 kanallı ve 16-bit hassasiyetli portatif veri toplama cihazı ve bu tip yapıların dinamik tepkisinin izlenmesi için uygun 12 adet kuvvet dengeli ivmeölçer kullanılmıştır. İsabey Camii avlu duvarı üzerinden alınan dinamik ölçümler, iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, esas incelenmesi planlanan batı avlu duvarı üzerine düzlemsel doğrultuda 12 adet tek eksenli



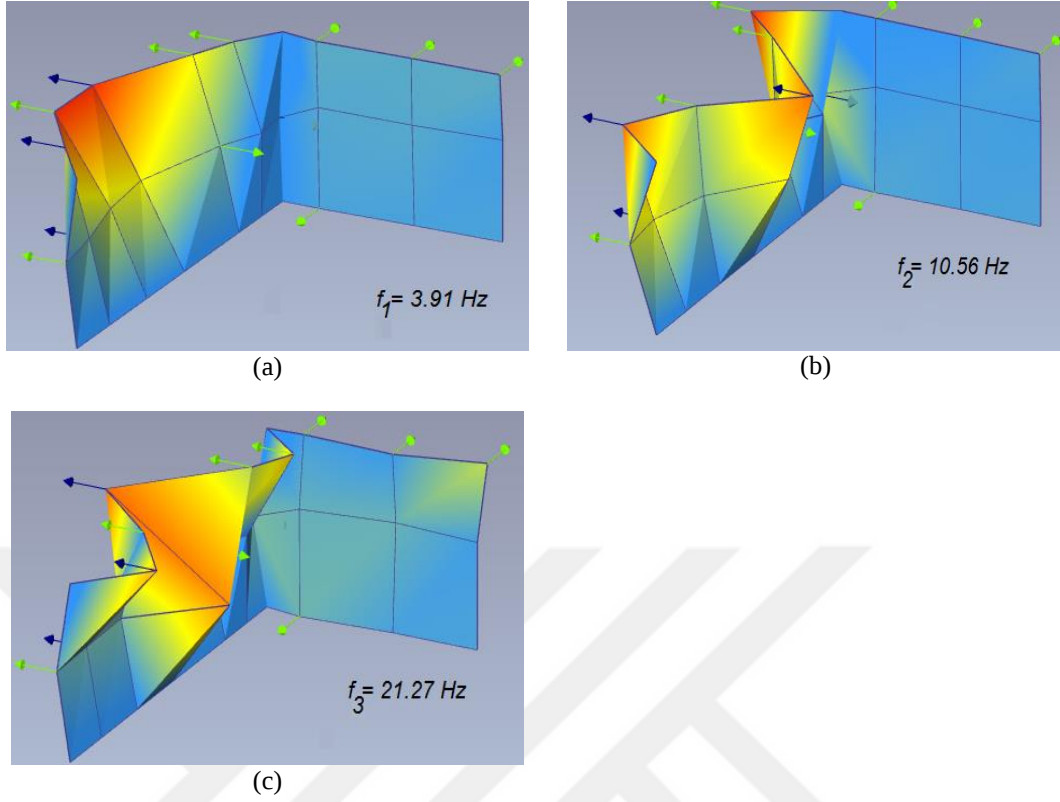
Şekil 2.9 Batı avlu duvarlarının iç yüzü üzerindeki ivmeölçerlerin yerleşim şeması (birimler cm'dir)



Şekil 2.10 Kuzey avlu duvarının iç yüzü üzerindeki ivmeölçerlerin yerleşim şeması (birimler cm'dir)

ivmeölçer yerleştirilerek veri alınmıştır (Şekil 2.9). İkinci aşamada ise bu duvar üzerindeki 6 adet ivmeölçer, kuzey avlu duvarı üzerine kaydırılarak (Şekil 2.10) her iki cephedeki duvar üzerinden veri toplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

İkinci ölçüm aşamasında, batı cephesi üzerinde korunan referans sensörleri Şekil 2.8 üzerinde “R” sembolü ile gösterilmiştir. Mümkün olduğu kadar çok sayıda mod şeklinin yakalanabilmesi için gerekli olan en uygun sensör yerleşimi, ABAQUS sonlu eleman yazılımında modellenen duvarın mod şekilleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Her iki test aşamasında da 14 dakika ölçüm alınmış olup örnekleme frekansı 250 Hz olarak seçilmiştir. Alınan veri, Doç.Dr.Özgür Özçelik yürütücülüğünde proje ekibinin diğer üyeleri tarafından operasyonel modal analiz yazılımı olan ARTEMIS (SVS, 2012) kullanılarak “EFDD” *Enhanced Frequency Domain Decomposition* (Brincker Zhang ve Andersen, 2001) ve “SSI” *Stochastic Subspace Identification* (Van Overschee ve Moor, 1996) yöntemleri ile işlenmiş ve yapısal dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Detaylı bilgi için ilgili yayına ulaşılabilir (Misir, Ozcelik, Durmazgezer, Yucel, Amaddeo, Kuran, Tuna, Yucel ve Youssouf, 2017).



Şekil 2.11 EFDD yöntemiyle elde edilen ilk üç mod şekli tahmini sonuçları (Misir ve diğer., 2017)

Bulunan frekans değerlerine karşılık gelen mod şekilleri Şekil 2.11’da sunulmuştur. Duvarın düzlemdışı doğrultudaki davranışı incelendiğinden, ivmeölçerlerin bu doğrultuda yerleştirilmesi sonucu ilgili doğrultudaki üç adet mod başarıyla elde edilmiştir.

Sistem tanımlama amacıyla kullanılan diğer bir yöntem olan SSI (Van Overschee ve Moor, 1996) yöntemine göre ise modal frekans değerleri sırasıyla 3,9 Hz, 9,0 Hz, 21,21 Hz olarak elde edilmiştir. Bu yöntemle göre elde edilen mod şekilleri EFDD yöntemindekilere benzerlik gösterdiğinden ayrıca sunulmamıştır.

BÖLÜM ÜÇ

SAYISAL MODELLEME

Sayısal model üzerinde gerçekleştirilecek analizin seçimi, yapı ve malzeme temsil edildikten sonra, belirlenen hedeflere bağlıdır. Daha önce de belirtildiği gibi, uygulanmasının karmaşıklığı, sonuçların zenginliği ve hassasiyetleri olmak üzere, sismik yükleme altında birkaç analiz ailesi vardır. Bu çalışmada kullanılan makro ve mezo modelleme sonlu elemanlar yöntemine dayanmaktadır. Bu bölümde, seçilen bu iki modelleme yöntemi hakkında daha fazla ayrıntı verilmesi amaçlanmıştır. İnceleme altındaki İsabey Camii Camii duvarları için ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır.

3.1 ABAQUS Sonlu Elemanlar Yazılımının Tanıtımı

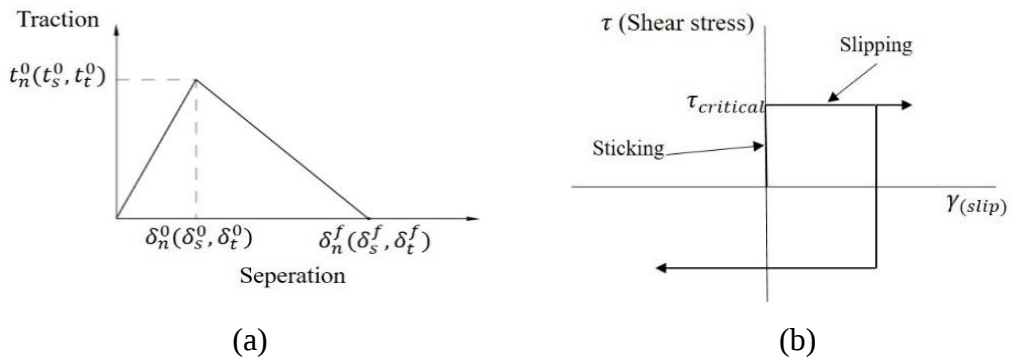
ABAQUS, SIMULIA ürünlerinin bir parçası olarak Dasaault Systèmes (Système D., 2007) tarafından sunulan sonlu elemanlar yöntemlerine dayalı güçlü bir mühendislik simülasyon programıdır. ABAQUS, tüm mühendislik alanları için eksiksiz modelleme ve görselleştirme ortamı sağlar. ABAQUS yazılımının öne çıkan özellikleri şunlardır:

- ABAQUS hemen hemen her türlü geometrik yapıyı modelleyebilen geniş bir eleman kütüphanesine sahiptir.
- Günümüzde yaygın olarak kullanılan CAD yazılımlarından (örn: SolidWorks, 2014) katı model transferi opsiyonu içermektedir.
- ABAQUS'ün farklı malzeme modelleri ile kullanılması, metaller, kauçuk, taş, polimerler, kompozitler, beton, kırılabilir malzemeler ve geoteknik malzemeler gibi çoğu tipik mühendislik malzemesinin davranışını simüle etmeyi sağlar.
- Genel katı model simülasyon araçları olarak tasarlanan ABAQUS, sadece yapısal (gerilme, yer değiştirmeler...) problemlerinden daha fazlasını incelemek için kullanılabilir. Isı transferi, kütle yayılımı, zemin mekaniği gibi çeşitli alanlarda modelleme yapma imkanı sunar.

3.2 Tarihi Yığma Yapının Sayısal Modellemesi

Bu tez kapsamında, yığma duvarların sonlu elemanlar modelini geliştirmek için ABAQUS/CAE (2017) kullanılmıştır. İncelenen yapı örneğinin dinamik karakteri ve malzeme özelliklerini belirlemek amacıyla ön sayısal modellemeler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra sahada uygulanan dinamik titreşim testlerine ait sonuçlar ve gözlemsel yöntemlerle model iyileştirmesi yapılmıştır. Elde edilen bu modelin özellikleri kullanılarak ve kuvvetli yer hareketleri altında yapıda muhtemel göçme riskinin yüksek olduğu değerlendirilen bir duvar bölgesi şerit çıkarılarak nispeten daha karmaşık bir sonlu elemanlar mezo modeli oluşturulmuştur.

Çok yapraklı olan bu mezo model, taş birimler için elastik sürekli katı elemanlar (C3D8R), harç ve duvar yaprakları arasındaki bağlar için yüzey bazlı arayüz (kohesif) elemanlar ve moloz dolgu için doğrusal olmayan katı elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Harç (arayüz) kalınlığı oldukça az olduğundan (yaklaşık 0,8-15 mm), harç bölümü için *traction-seperation* davranışı atanmıştır. Yazılımdaki mevcut *traction-seperation* modeli, başlangıçta doğrusal elastik davranışı ve ardından arayüzdeki hasarın başlangıcını ve ilerlemesini canlandırabilmektedir (Şekil 3.1a). Arayüz elemanlar için elastik davranış, normal rijitlik (K_n) ve teğetsel rijitlik bileşenleri (K_t , K_s) cinsinden tanımlanmış ve Şekil 3.1b’de verilen sürtünme davranışı eklenmiştir. Arayüz özelliği tanımlanmış komşu iki yüzeyin nihai hasar modunu simüle etmek için hasar parametreleri tanımlanmıştır (*hasar başlangıcı* ve *hasar ilerlemesi*). Sınır koşulları tanımlanan model düzlemdışı doğrultuda sismik yükler kullanılarak ABAQUS/Explicit çözümleyicisi ile analiz edilmiştir.



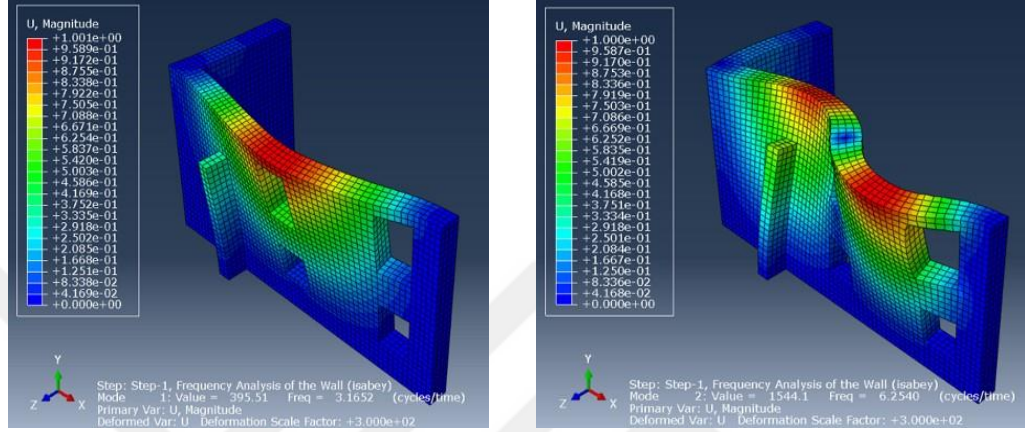
Şekil 3.1 (a) *Traction-seperation* davranışı ve (b) Arayüz modelinin sürtünme davranışı

3.3 İsabey Camii Makro Modeli ve Model Kalibrasyonu

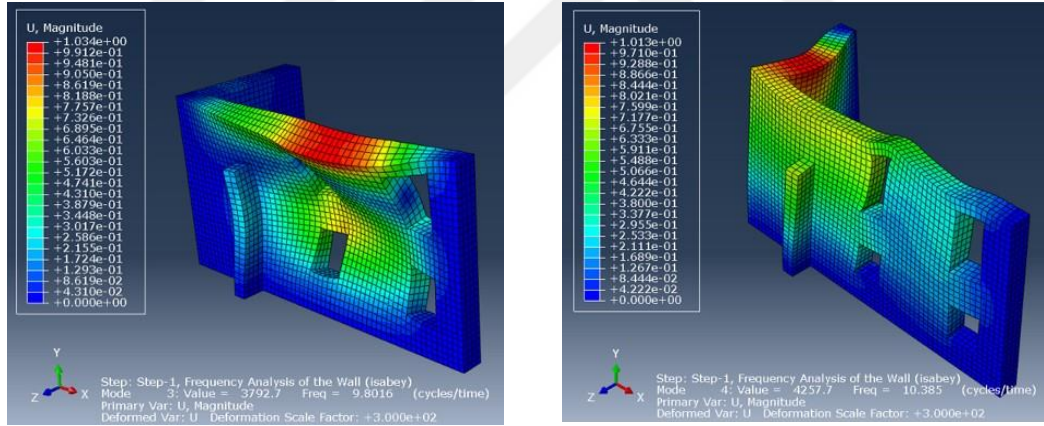
Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü ve Vakıflar Genel Müdürlüğü işbirliği ile yürütülmekte olan AFAD-UDAP projesi kapsamında incelenmek üzere seçilen yapıya ait modal parametrelerini tahmin etmek için proje ekibince tez çalışmalarına paralel olarak ortamsal titreşim testleri gerçekleştirilmiş ve kurulan sonlu elemanlar modelinin kalibrasyon işlemi tamamlanmıştır. Ortamsal titreşim testleri sırasında kullanılabilecek mevcut on iki adet ivmeölçer bulunduğundan, uygulanacak sensör yerleşiminin akılcı seçimi, mümkün olduğunca fazla mod şeklinin yakalanması açısından önemli olmuştur. Bu amaçla batı ve kuzey cephe duvarlarının ön sayısal modeli ABAQUS sonlu elemanlar programında (ABAQUS, 2017) makro modelleme tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiş ve frekans analizi ile yapının mod şekilleri sayısal olarak tahmin edilmiştir. Öncelikle gerçek ölçüler kullanılarak yapının SolidWorks yazılımında (SolidWorks, 2014) üç boyutlu geometrisi oluşturulmuş, bu geometriye ABAQUS modelleme arayüzü ile malzeme özellikleri atanmış ve sınır koşullar tanımlanmıştır. Makro modelleme ile oluşturulan ön modele atanan malzeme özellikleri, literatürdeki benzer yapılar için kullanılan değerlerle uyumludur (Ramos ve diğer., 2005; Bayraktar, Sevim, Altunışık ve Türker, 2007; Mouyiannou, Rota, Penna ve Magenes, 2014; Ceravolo ve diğer., 2016). Birim hacim ağırlığı (ρ) $2,2 \text{ t/m}^3$ olarak seçilmiştir. Vakıflar Genel Müdürlüğü teknik ekibinin değerlendirdiği önceki yapılar göz önünde bulundurularak bu modele atanabilecek Elastisite modülünün, $E=700xf_m$ formülüyle belirlenmesinin ve f_m duvar basınç dayanımının 4 MPa alınmasının uygun olacağı belirtilmiş ve sayısal modele Elastisite modülü (E) ve Poisson oranı için sırasıyla 3000 MPa ve 0,25 değerleri atanmıştır. Modelleme sırasında üç boyutlu 8 düğüm noktalı hexahedral sürekli ortam elemanları (C3D8R) kullanılmış, model ABAQUS yazılımında standart modül ile analiz edilmiş ve yapının ilk dört serbest titreşim frekansı ve karşılık gelen mod şekilleri tahmin edilmiştir (Şekil 3.2; 3.3). Ön analiz sonucunda bulunan mod şekilleri göz önüne alınarak da saha testleri öncesi ivmeölçer yerleşimleri planlanmıştır.

Tablo 3.1 Ön sayısal modelde ilk dört modal frekans değeri ve karşılık gelen mod şekilleri

Mod	Frekans (Hz)	Mod	Frekans (Hz)
1	3,17	3	9,80
2	6,25	4	10,39



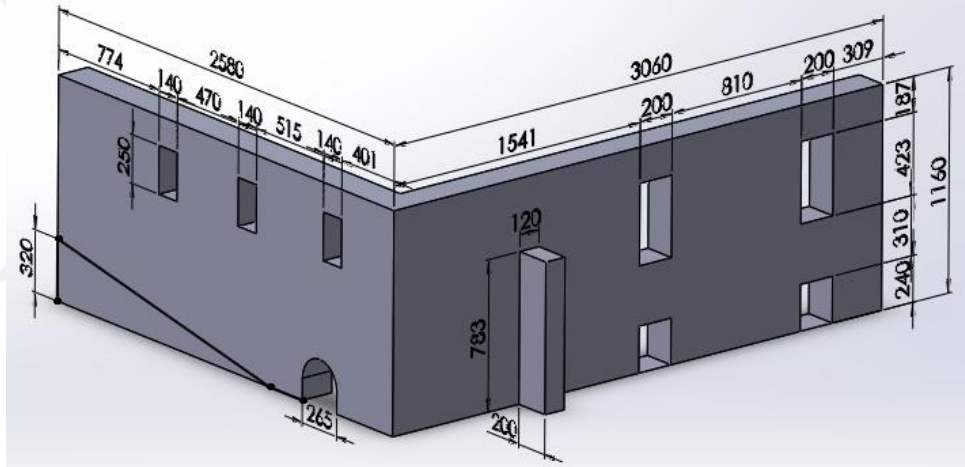
Şekil 3.2 Ön sayısal modele ait 1. ve 2. mod şekilleri



Şekil 3.3 Ön sayısal modele ait 3. ve 4. mod şekilleri

İsabey Camii cephe duvarları üzerinden alınan titreşim verisi ve operasyonel modal analiz (OMA) teknikleri kullanılarak elde edilen mod şekilleri ve karşılık gelen frekanslar, daha önce hazırlanmış olan ABAQUS sayısal modelinin iyileştirilmesinde kullanılmıştır. Fakat bu aşamada herhangi bir optimizasyon yazılımı kullanılmayıp duvar üzerinde bulunan boşluklar (Şekil 3.4), serbest duvar yüksekliği, kuzey duvarı arkasındaki merdivenden kaynaklı sınır koşul ve malzemenin birim hacim ağırlığı daha gerçekçi olarak tanımlanmış, bu sayede sayısal modelin dinamik karakteri OMA

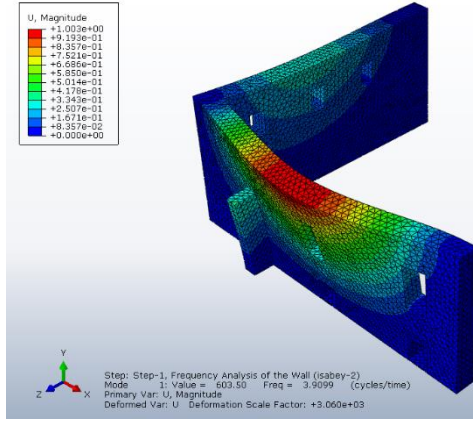
sonucunda elde edilen değerlere yaklaşmıştır. Sahada yapılan titreşim testi sonucunda gözlenen davranışı yansıtacak şekilde (iç avludaki zemin kotu da dikkate alınarak) duvar yükseklikleri azaltılmış, birim hacim ağırlığı $2,0 \text{ t/m}^3$ olarak kabul edilmiş ve model ABAQUS yazılımında standart modül ile analiz edilmiştir. Hazırlanan makro modelde bu kez 3 boyutlu 10 düğüm noktalı kuadratik C3D10 türü sonlu elamanlar kullanılmıştır. Analitik modelde ayrıklaştırılan serbest titreşim frekansları ve karşılık gelen mod şekilleri Şekil 3.5’de verilmiştir. İsabey Camii avlu duvarının modal karakteristikleri ile serbest titreşim ölçüm verilerinin operasyonel modal analiz teknikleri kullanılarak işlenmesi sonucunda elde edilen modal karakteristikler arasındaki benzerlik MAC (Modal Assurance Criterion) (Allemang, 2003) ile kontrol edilmiş ve sonuçlar Tablo 3.3’de verilmiştir.



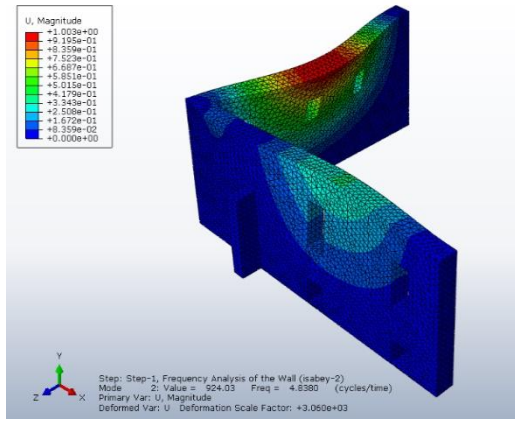
Şekil 3.4 Solidworks programında oluşturulan güncel katı model

Tablo 3.2 İyileştirilmiş modelde ilk on moda karşılık gelen modal frekans değerleri

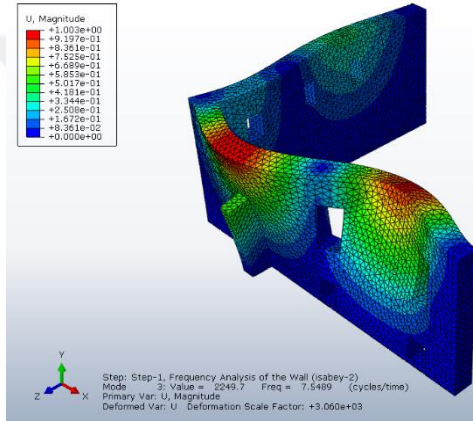
Mod	Frekans (Hz)	Mod	Frekans (Hz)
1	3,91	6	13,95
2	4,84	7	14,46
3	7,55	8	15,37
4	9,95	9	16,65
5	12,40	10	17,68



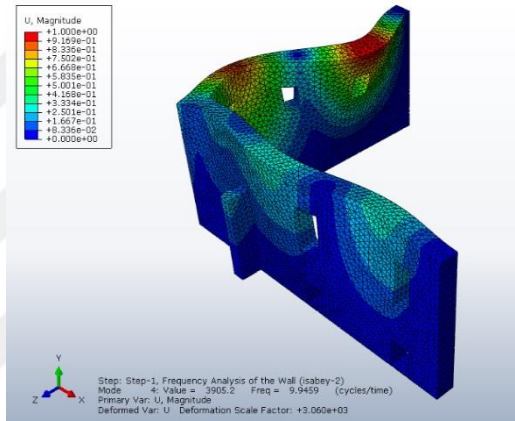
(a) 1. mod şekli



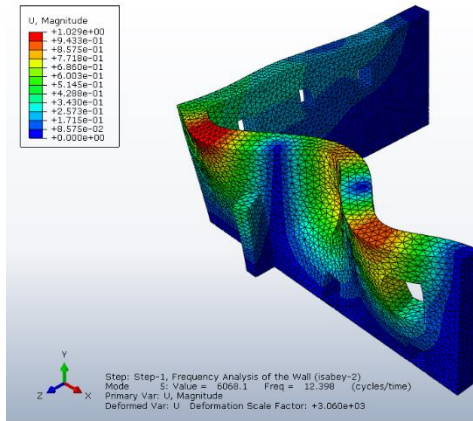
(b) 2. mod şekli



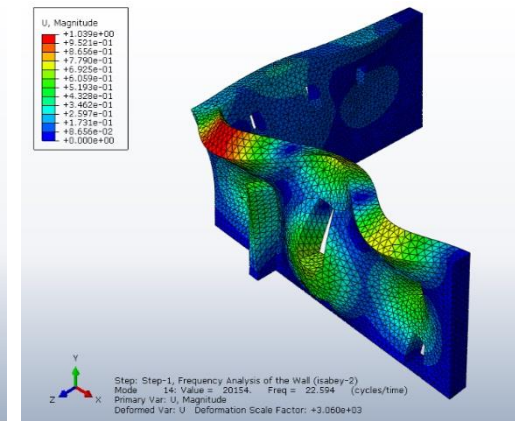
(c) 3. mod şekli



(d) 4. mod şekli



(e) 5. mod şekli



(f) 14. mod şekli

Şekil 3.5 (a-f) Revize edilen analitik modelden elde edilen mod şekilleri

Tablo 3.3 Kalibrasyon sonucu deneysel ve sayısal yöntem arasındaki benzerlik tablosu

Deneysel metod (EFDD)	Sayısal metod	MAC (%)
1. mod (3,91 Hz)	1. mod (3,91 Hz)	94,5
2. mod (10,56 Hz)	5. mod (12,4 Hz)	86,8
3. mod (21,27 Hz)	14. mod (22,59 Hz)	81,1

Saha testlerinde çevresel etkiler altında yapıya etkiyen rastgele titreşimlerin uyardığı ve dolayısıyla ayırtılabilen modların sırası ile analitik olarak bulunan modların sırasının farklı olması OMA analizlerinde çoğunlukla karşılaşılan bir durumdur. Fakat her iki yöntemle bulunan serbest titreşim modları arasında, benzerliğin yüksek olduğu mod şekillerinin bulunması, ölçümlerde karşılaşılan titreşim düzeylerinde, revize edilen analitik modelin gerçek yapıyı uygun şekilde temsil edebileceğinin bir göstergesidir (Misir ve diğer., 2017). Bu aşamada model kalibrasyonunda restorasyon projesi verileri ve görsel tespitlerden faydalanılmıştır. Böylece yapının doğrusal olmayan davranışının tahmin edileceği ve yapısal güçlendirme analizinde kullanılabilecek faydalı bir model elde etme yolunda önemli bir aşama başarılmış olacaktır.

3.4 İsabey Camii'nin Mezo Modellemesi ve Hasar Limitlerinin Belirlenmesi

Modeldeki katı ve arayüz elemanları için seçilen malzeme parametreleri Tablo 3.4 ve 3.5'te verilmiştir. Uygulanan modele ait özellikler Bölüm 3.2'de açıklanmıştır. Oluşturulan şerit mezo model ile OMA analizleri ile iyileştirilen makro modelin dinamik özellikleri benzerdir. Ara yüzeyin çekme dayanımı, Flat-jack testi ile elde edilen duvar basınç dayanımının onda biri olduğu varsayılmaktadır. Bu değer, Eurocode 6'da verilen 0,1 ila 0,4 N/mm² karakteristik değer aralığındadır (CEN, 2005). Taş ile harç arasındaki ara yüzeyin kayma mukavemetinin, basınç dayanımının 0.67 katı olduğu varsayılmaktadır. Modeldeki birim hacim ağırlık, OMA analizleri sonucu elde edilen değer ile aynı alınmıştır. Moloz dolgusunun basınç dayanımı Vintzileou ve Miltiadou-Fezans, (2008) ve Oliveira, Silva, Garbin, ve Lourenço, (2012) tarafından önerilen değerler göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Moloz dolgusunun çekme dayanımının, basınç dayanımının onda biri olduğu varsayılmaktadır. Duvar yapıları

arasında ve birbirine komşu iki taş birim arasındaki penetrasyonu engellemek amacıyla *Hard-contact* tanımlaması yapılmıştır. Arayüz boyunca sürtünme davranışını simüle etmek amacıyla Şekil 3.1b’de verilen davranış tanımlanmıştır (ABAQUS, 2017). Arayüz elemanlara tanımlanan normal rijitlik (K_n) ve teğetsel rijitlik (K_t , K_s) değerleri Dolatshahi, Aref ve Yekrangnia, (2014) ve Dolatshahi ve Aref, (2016)’da verilen değerler aralığında belirlenmiştir. Nihai hasar modunun olduğu ve tam kopmanın gözlemlendiği *Plastic displacement* parametresi 2 mm olarak belirlenmiştir (Bolhassani, Hamid, Lau ve Moon (2015).

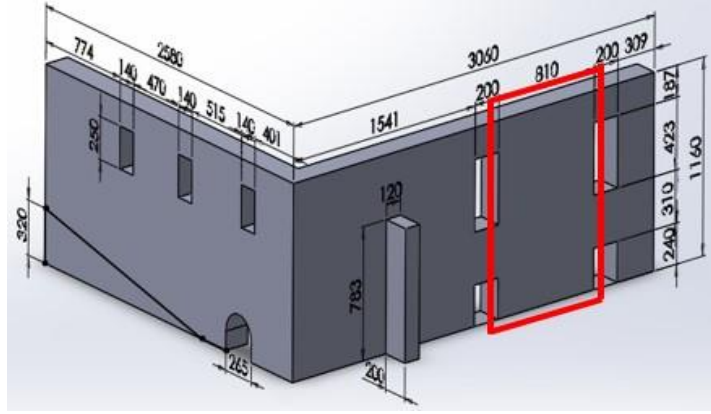
Tablo 3.4 Taş birimler ve moloz dolgu için belirlenen malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite modülü E [MPa]	Poisson oranı, ν	Birim hacim ağırlık ρ [ton/mm ³]	Basınç dayanımı f_c [MPa]	Çekme dayanımı f_t [MPa]
Taş	20.000	0,25	$2,2 \cdot 10^{-9}$	-	-
Moloz dolgu	5000	0,25	$2,2 \cdot 10^{-9}$	0,3	0,03

Tablo 3.5 Harç ve duvar yapıları arasında tanımlanan arayüz elemanına ait özellikler

Kontakt								
Teğetsel davranış	Normal davranış	Kohesif davranış						
		Traction-separation Davranışı			Hasar			
		Rijitlik katsayıları [N/mm ³]			Başlangıcı [MPa]		İlerlemesi [mm]	
		K_{nn}	K_{ss}	K_{tt}	Normal	Kayma-1	Kayma-2	Plastik Ötelenme
Sürtünme katsayısı	Hard Contact							
0,75		70	40	40	0,23	0,15	0,15	2

Modellemede, Şekil 3.6’da verilen avlu duvarındaki dört pencere arasında bulunan duvar şeridi değerlendirilmiş ve analiz edilmiştir. Bu bölümün, mevcut sınır koşullarından ötürü, duvarın en zayıf bölümü olduğu düşünülmüştür. Değerlendirilmek üzere modellenen şerit 15 m yüksekliğinde ve 8 m genişliğindedir. Duvarın en boy oranının birden az olması, ele alınan şerit bölümün stabilite problemine eğilimli olması ve ağırlık yüklerinin varlığından dolayı duvarın şerit bölümü ele alınmıştır (Abrams, AlShawa, Lourenço ve Sorrentino, 2017).



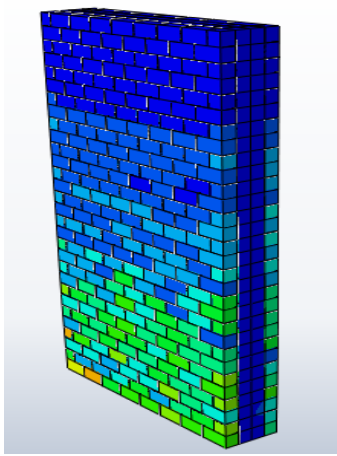
Şekil 3.6 Duvarın analiz edilen şerit bölümü

İlk olarak ABAQUS/CAE (2007)'de duvarın temsili bir doğrusal modeli oluşturulmuş ve ilgili doğrusal dinamik özelliklerin bir kısmını elde etmek için bir özdeğer analizi yapılmıştır. Düzlemsiz doğrultuda duvarın en öne çıkan modal özellikleri, avlu duvarı ile aynı değer olan $f_{\text{temel}} = 3,9$ Hz temel titreşim frekansına sahiptir. Modeldeki elastik özellikler bu frekansı elde etmek üzere atanmıştır. Stabilité kaybına yol açan hasarı belirleme amaçlı bir dizi zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla üç farklı ölçeklenmemiş yer ivmesi kullanılmıştır (Misir, Youssouf ve Yucel, 2018). Tablo 3.6'da, seçilen bu üç yer ivmesinin temel özellikleri verilmiştir.

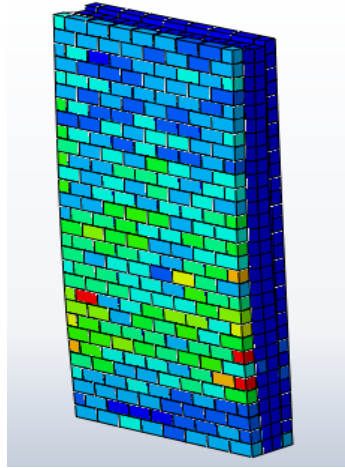
Tablo 3.6 Yer ivmesi karakteristikleri

Kayıt ismi	Deprem	Doğrultu
NGA_28	Parkfield 06/28/66	Uni-direction (50°)
NGA_450	Morgan Hill 04/24/84	Uni-direction (310°)
NGA_1620	Düzce 11/12/99	Uni-direction (90°)

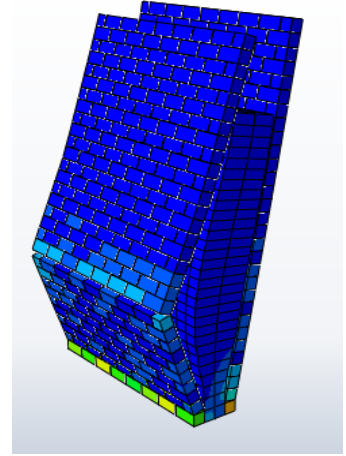
Şerit modelin kenar bölümleri düzlemlerine normal doğrultuda, taban bölümü ise her üç doğrultuda hareket edemeyecek şekilde mesnetlenmiştir. Yerçekimi ivmesi modele uygulanmış ve her analizde sadece bir deprem kaydı verilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen hasar tipi ve gerilme dağılımı Şekil 3.7'de verilmiştir. Bu hasar modu literatürde tanımlanmış olup detayları Bölüm 1.1.2.3'de verilen çok tabakalı duvarlar için deprem sonrası saha gözlemleri ile de uyumludur (Şekil 1.12).



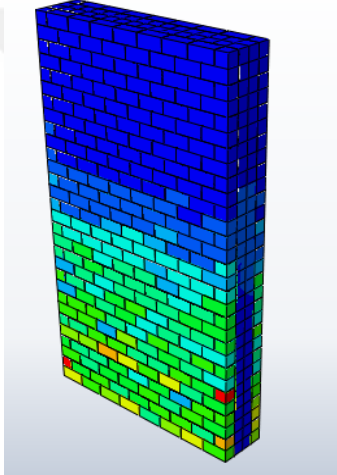
(a) Hasarın başlangıcı



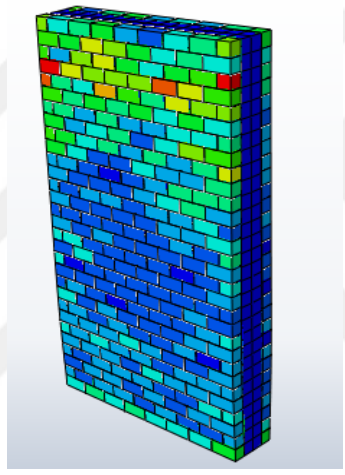
(b) Göçmenin başlangıcı
(%0,73 ötelenme oranı)



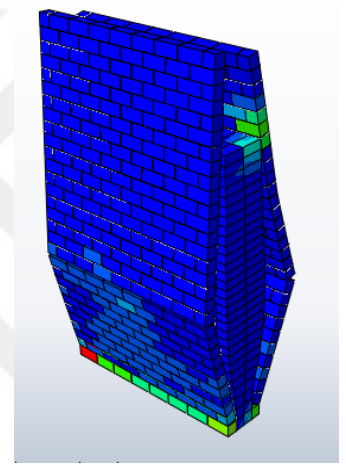
(c) NGA_28 deprem kaydı
altında duvarın göçme modu



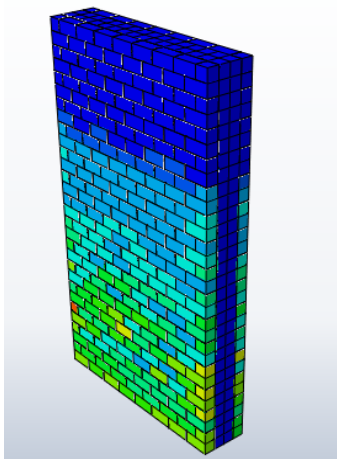
(d) Hasarın başlangıcı



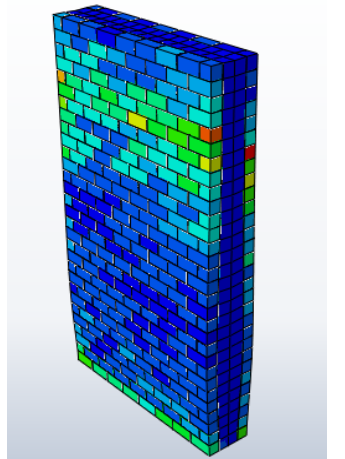
(e) Göçmenin başlangıcı
(%1,0 ötelenme oranı)



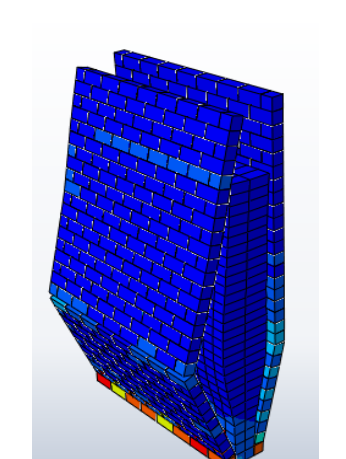
(f) NGA_450 deprem kaydı
altında duvarın göçme modu



(g) Hasarın başlangıcı



(h) Göçmenin başlangıcı
(%0,83 ötelenme oranı)



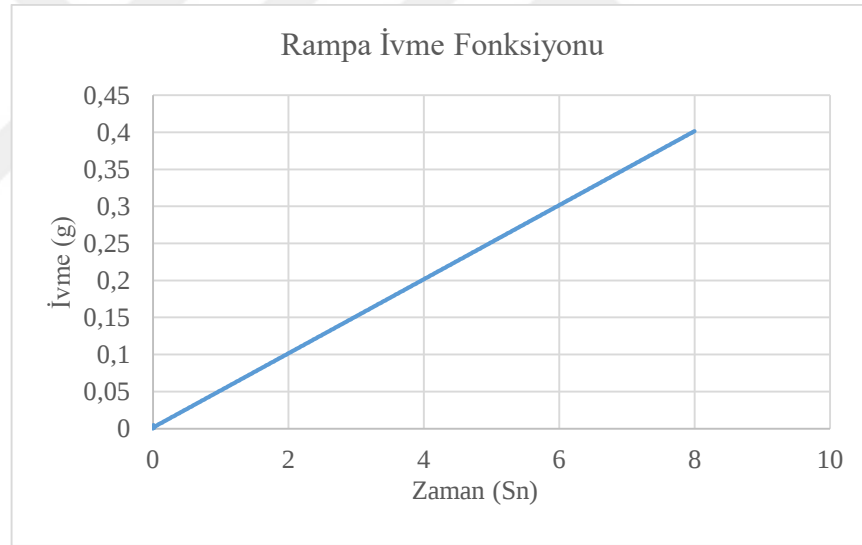
(i) NGA_1620 deprem kaydı
altında duvarın göçme modu

Şekil 3.7 Hasarın gelişimi ve modelin ötelenme oranı cinsinden hasar limitleri

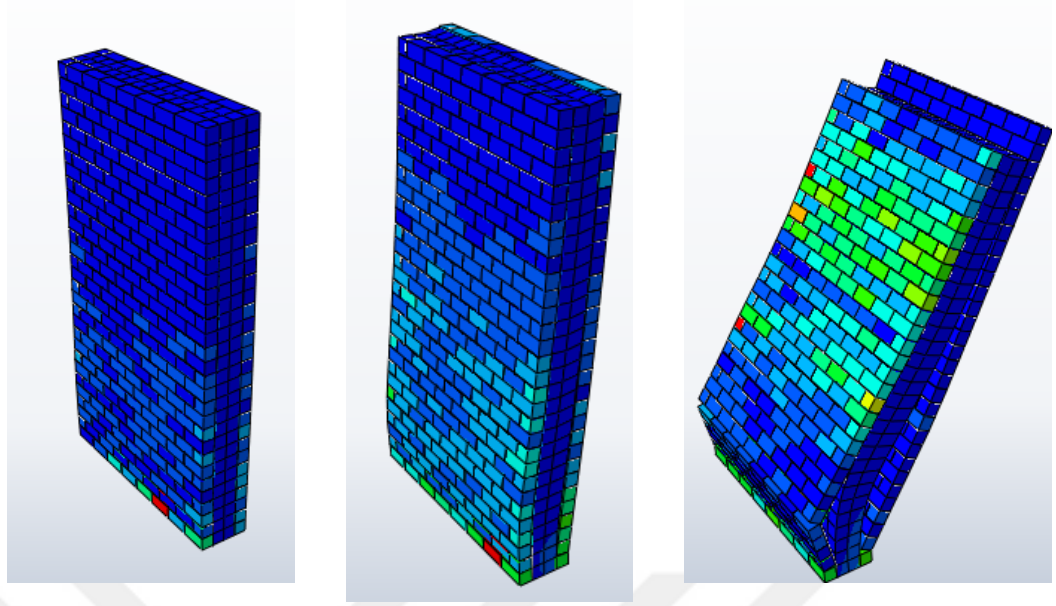
Stabilite kaybına yol açan ötelenme oranını belirlemek amacıyla bir dizi zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirildikten sonra yapının tabanından uygulanan ve düzenli artan ivme yükü (rampa ivme fonksiyonu) altında yapısal davranış izlenmiştir.

- Rampa İvme Fonksiyonu Altında Dinamik Analiz

Şerit meso model üzerinde Şekil 3.8’de görülen ivme yükü kullanılarak dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizde yer ivmesi şerit modelin tabanına yatay doğrultuda tek yönlü olarak uygulanmıştır. Analiz sırasında hasarın başladığı ve göçme yüküne ulaşıldığı durumlarda elde edilen hasarın dağılımı Şekil 3.9’da verilmiştir. Göçme anında, uygulanan yatay ivme değeri ve tepe ötelenmesi oranı sırasıyla 0,12g ve %2,0 olarak bulgulanmıştır.



Şekil 3.8. Rampa İvme Fonksiyonu



(a) Hasarın başlangıcı

(b) Göçmenin başlangıcı
(0,12g ve %2,0 düzlem
dışı ötelenme oranı)

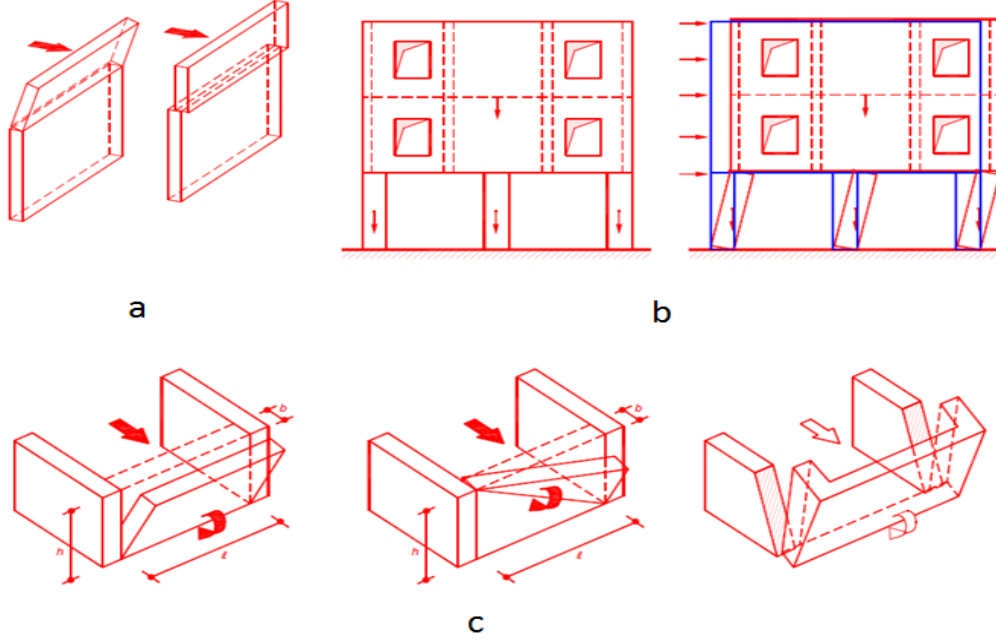
(c) Rampa ivme fonksiyonu
altında bulunan göçme modu

Şekil 3.9 Hasarın gelişimi ve modelin ötelenme oranı cinsinden hasar limitleri

3.5 Duvar Şeridinin “Kinematik Yaklaşım” Kullanılarak Limit Analizi ve Sayısal Analiz Sonuçları ile Kıyaslanması

Yığma yapılarda, genellikle lokal düzensizliklere bağlı olarak depremlerde kısmi göçmeler meydana gelir; bu mekanizmaların belirlenmesi, duvarların devrilmesine engel olmak açısından önemlidir. Duvarlarda çoğunlukla düzlemsel doğrultuda göçme davranışı gibi lokal mekanizmalar meydana gelirken, duvarların düzlemiçi doğrultudaki davranışı yapının bütününe etkileyen mekanizmaları tetikler. Düzlemiçi ve düzlemsel doğrultuda yerel hasar ve göçme mekanizmalarıyla ilgili hesaplar, kinematik mekanizmanın seçimine dayanan kinematik denge durum analizi ile gerçekleştirilebilir. Kinematik analiz, (i) muhtemel göçme mekanizma durumlarının tanımlanması, (ii) her bir mekanizma durumunu harekete geçirecek sismik yatay kuvvetin ve bu yatay kuvveti oluşturmak için gerekli olan yatay deprem ivmesinin belirlenmesi, (iii) Deprem yatay ivme talebinin belirlenmesi ve kapasite ile karşılaştırılması ve ortaya çıkabilecek mekanizma durumunun belirlenmesi olarak tanımlanabilir (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2017). Bir yığma yapının tümünün veya bir bölümünün düşey ve yatay yükler altındaki

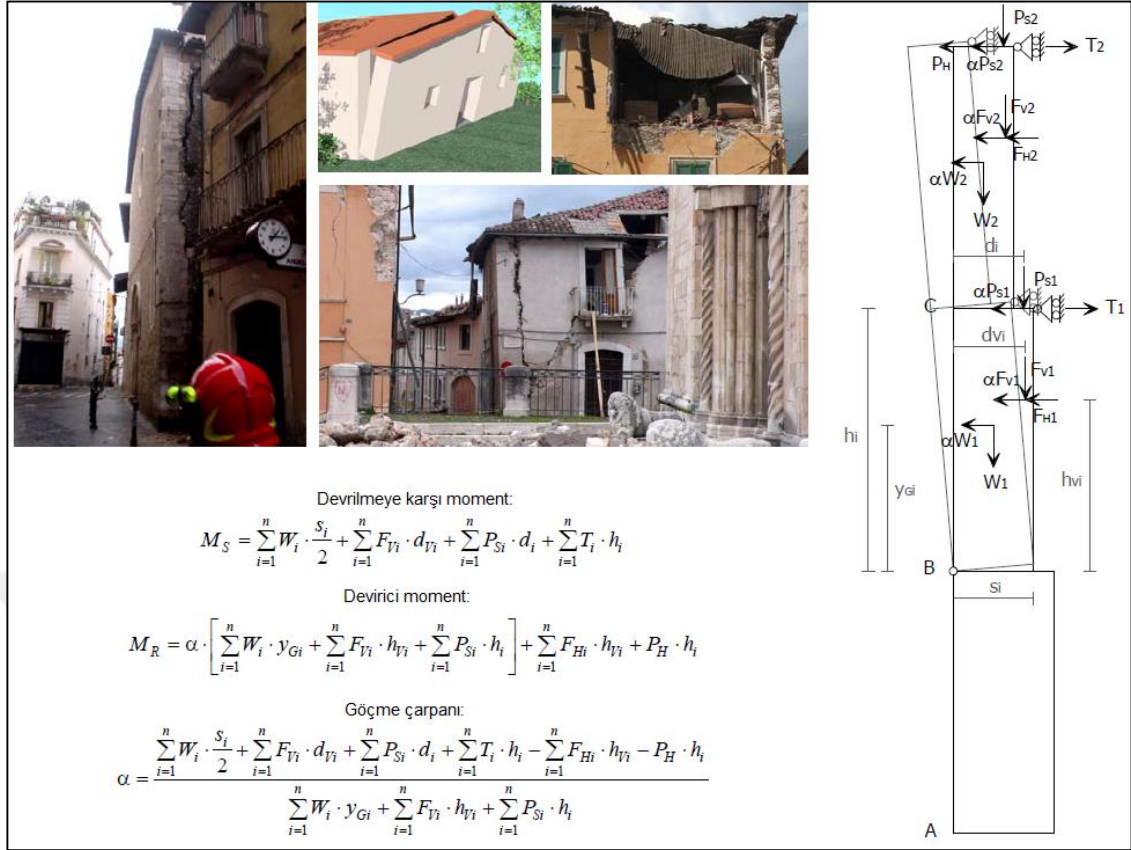
güvenliğinin belirlenmesi için çok sayıda mekanizma durumunun incelenmesi gerekebilir (Şekil 3.10). Yukarıda tanımlanan adımlar, iki farklı mekanizma durumu için sağlatılmıştır.



Şekil 3.10 Çeşitli mekanizma durumları a) Duvarın güç tükenmesi mekanizmaları (eğilme ve kayma), b) Zemin katta yumuşak kat güç tükenmesi mekanizması, c) Cephe duvarının güç tükenmesi mekanizmaları (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2017)

3.5.1 Basit konsol devrilme modeli

Bu mekanizma durumu, cephelerin veya duvar bölümlerinin yatay eksen etrafında düzlemdışı doğrultuda dönmesi ve devrilmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Bu durum genellikle rijit dönmeye engel yapısal elemanın olmayışından kaynaklanmaktadır (Milano, Mannella, Morisi ve Martinelli, , 2008).



Şekil 3.11 Basit konsol devrilme mekanizma durumu (Milano vd., 2008).

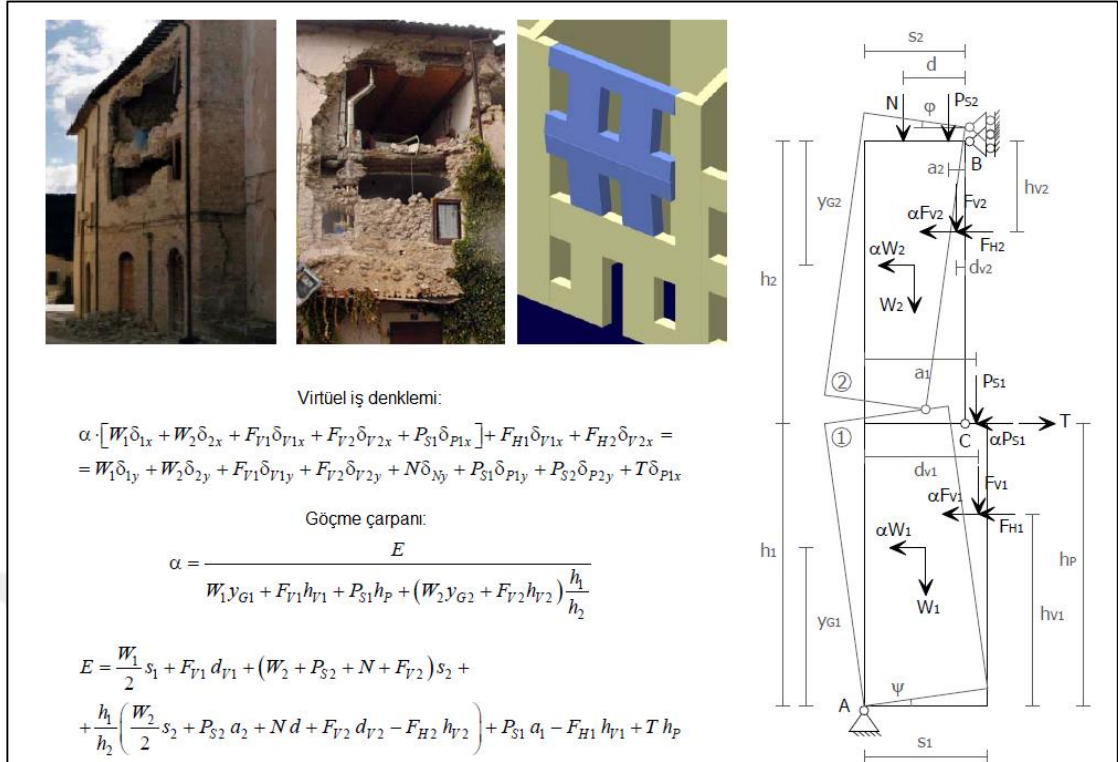
$$M_S = \sum_i w_i \frac{s_i}{2} = (2,2 * 15 * 8 * 1,8) * \frac{1,8}{2} = 427,7 \text{ tm}$$

$$M_r = \alpha * \left[\sum_i w_i * y_{Gi} \right] = \alpha * \left[(2,2 * 15 * 8 * 1,8) * \frac{15}{2} \right] = \alpha * 3563,5 \text{ tm}$$

$$M_r = M_S \rightarrow \alpha = \frac{427,7}{3563,5} = 0,120$$

3.5.2 Düşey duvar burkulması modeli

Mekanizma, duvarı iki bloğa ayıran yatay silindirik bir mafsallı oluşturarak ortaya çıkar ve duvarın bu eksen etrafında, düzlemsel hareketine izin verecek şekilde karşılıklı olarak dönmesiyle sonuçlanır (Milano vd., 2008).



Şekil 3.12 Düşey duvar burkulması mekanizma durumu (Milano vd., 2008).

İsabey Camii avlu duvarından çıkarılan şerit duvarda doğrusal olmayan dinamik analizler sonucunda ortaya çıkan hasar modelleri incelendiğinde duvar üzerinde oluşan yatay mafsallın tabandan itibaren yapı yüksekliğinin üçte birlik seviyesinde olduğu değerlendirilerek eşitlikler yazılmış ve aşağıda verilmiştir.

$$E = \frac{w_1}{2} * s_1 + w_2 * s_2 + \frac{h_1}{h_2} * \left(\frac{w_2}{2} * s_2 \right)$$

$$= \frac{171}{2} * 1,8 + 304,1 * 1,8 + \frac{5,4}{9,6} * \left(\frac{304,1}{2} * 1,8 \right) = 855,23 \text{ tm}$$

$$Mr = \alpha * \left[w_1 * y_{G1} + w_2 * y_{G2} * \frac{h_1}{h_2} \right] = \alpha * \left[171 * \frac{5,4}{2} + 304,1 * \frac{9,6}{2} * \frac{5,4}{9,6} \right]$$

$$= 1282,80 \text{ t} \quad M_r = M_s \rightarrow \alpha = \frac{855,23}{1282,80} = 0,670$$

BÖLÜM DÖRT

SONUÇ VE ÖNERİLER

Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü ve Vakıflar Genel Müdürlüğü (VGM) işbirliğinde yürütülmekte olan AFAD-UDAP-Ç-16-05 nolu araştırma projesinde, narin ve düzlemdışı ötelenmesi engellenmemiş tarihi yığma bina duvarlarının düzlemdışı stabilite kaybına öncülük eden hasar limitlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. İlgili proje kapsamında, İzmir'in Selçuk ilçesinde 1375 yılında inşa edilen tarihi İsabey Camii'nin birbirine dik konumdaki iki avlu duvarı üzerinden dinamik veriler alınmış, elde edilen veriler Operasyonel Modal Analiz teknikleri ile değerlendirilmiş ve yapının dinamik karakteri tahmin edilmiştir.

Tez kapsamında, röleve bilgilerinden de faydalanarak yapıyı oluşturan taşların boyutları ve derz kalınlıkları incelenmiş, endoskopik muayene ile yapı duvarlarının örülme tarzı belirlenmiş, yapı üzerinde az tahribatlı mekanik testler gerçekleştirilerek malzeme parametreleri elde edilmiştir. Ayrıca, ABAQUS yazılımı kullanılarak yapının sayısal modelleri oluşturulmuş, yapıdan elde edilen mekanik ve dinamik parametreler kullanılarak sayısal modeller kalibre edilmiş, makro ve mezo düzeyde hazırlanan bu modeller üzerinde doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir.

Yapısal analizler sonucunda öncelikle duvarın olası güçlü yer hareketleri altında sergileyeceği global davranış makro modelleme kullanılarak tahmin edilmiştir. Ayrıca, öngörülen en olası hasar senaryosu uyarınca göçmesi beklenen lokal bölge (kuzey duvarı üzerinde iki pencere sırası arasında kalan duvar şeridi) için oluşturulan mezo model üzerinde ötelenme oranı cinsinden hasar limitleri tahmin edilmiştir. Şerit modelin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri sonucunda, sismik yükleme sırasında duvarın her üç durumda yaklaşık %1.0 tepe öteleme oranında göçme moduna ulaştığı ortaya konmuştur. Göçme modu genel olarak moloz iç tabakanın çekme mukavemetinin aşılması ile tetiklenmiş, moloz tabakanın göçmesi sonucunda dış duvar tabakalarının düzlemdışı doğrultuda açılmasına, ağırlık yüklerinin de etkisiyle tüm duvarın ayrışmasına neden olmuştur. Bu hasar modu

literatürde de tanımlanmış olup detayları Bölüm 1.1.2.3’de verilen çok tabakalı duvarlar için deprem sonrası saha gözlemleri ile uyumludur. Ölçeklenmiş farklı deprem kayıtları altında ilave analizler ile hasar modu ve tahmin edilen hasar limitinin doğruluğu arttırılabilir.

Mezo model yaklaşımında kullanılan kohesif arayüzler sayesinde duvar birimlerinin arayüzünde beklenen hasar ve doğrusal olmayan ayrılma davranışı gösterilebilmiştir. Böylece yığma yapıların, taş ve harç fazlarını içerecek şekilde üç boyutlu olarak modellenmesi, düzlemiçi ve/veya düzlemdışı yönlerde ve farklı kombinasyonlarda uygulanacak yükler için sayısal çözümlerler yapılabileceği gösterilmiştir. Bu modelleme yaklaşımı, optimizasyona ve her özne tarihi yığma yapı için kendine özgü bir güçlendirme şemasının geliştirilebilmesine imkan tanımaktadır. Bununla birlikte, mezo modelleme sırasında ortaya çıkan önemli miktarda doğrusal olmayan arayüz elemanı sebebiyle bu yaklaşımın tüm yapının modellenmesini engelleyebileceği de burada not edilmelidir.

Kinematik yaklaşımda göz önüne alınan mekanizma durumları arasında, stabilite problemine yol açan en küçük yer ivmesi 0.12g olarak belirlenmiştir (yapının düzlemdışı doğrultudaki kapasitesi). Yapının bulunduğu bölgedeki etkin yer ivmesi olan 0.4g değeri, yığma yapılar için öngörülen deprem yükü azaltma katsayısı 2.0’a bölünerek elastik deprem talebi olan 0.2g değeri elde edilmektedir. Talep kapasiteden büyük olduğu için göz önüne alınan duvar şeridinin göçme riskinin bulunduğu söylenebilir. Kinematik yaklaşımla elde edilen 0.12g değeri, rampa ivme fonksiyonu altında yapılan doğrusal olmayan analiz sonucu elde edilen değer ile uyumludur. Güçlü yer ivmelerinin kullanıldığı analizlerde ise göçmenin gerçekleştiği zaman aralığına karşılık gelen ivme değerleri oldukça değişken olduğundan bu tespit yapılamamıştır. Fakat ilgili analizlerde göçme anına karşılık gelen tepe ötelenmesi oranlarının yaklaşık %1.0 civarında hesaplandığı burada tekrar vurgulanabilir.

KAYNAKLAR

ABAQUS (2017). Dassault Systemes Simulia Corp., Jonhston, RI, USA.

Abrams, D. P., AlShawa, O., Lourenço, P. B., & Sorrentino, L. (2017). Out-of-plane seismic response of unreinforced masonry walls: Conceptual discussion, research needs, and modeling issues. *International Journal of Architectural Heritage* 11(1), 22-30.

Allemang RJ. (2003). The modal assurance criterion—twenty years of use and abuse, *Sound and Vibration* 37(8), 14-23.

ASTM (2014). ASTM C1197-14a – Standard Test Method for in situ measurement of masonry deformability properties using the flat jack method.

Atamturktur S, Laman JA. (2012). Finite element model correlation and calibration of historic masonry monuments: *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 21(2), 96-113.

Augenti, N., & Parisi, F. (2010). Learning from construction failures due to the 2009 L'Aquila, Italy earthquake. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 24(6), 536-555.

Bayraktar A, Sevim B, Altunışık AC, Türker T. (2007). Tarihi Yığma Minarelerin Deprem Güvenliklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu* 1, 415-428.

Binda, L., Cardani, G., Saisi, A., & Valluzzi, M. R. (2006). Vulnerability analysis of the historical buildings in seismic area by a multilevel approach. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 7(4), 343-357.

- Bolhassani, M., Hamid, A. A., Lau, A. C., & Moon, F. (2015). Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages: *Construction and Building Materials* 83, 159-173.
- Brincker R, Zhang L, Andersen, P. (2001). Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition: *Smart Materials and Structures* 10(3), 441-445.
- Brocks, W., Cornec, A., & Scheider, I. (2003). Computational aspects of nonlinear fracture mechanics. *Gkss forschungszentrum geesthacht gmbh-publications-gkss*, 30.
- Carocci, C. F. (2001). Guidelines for the safety and preservation of historical centres in seismic areas. *Historical constructions*, 145-165.
- Casolo, S., & Milani, G. (2013). Simplified out-of-plane modelling of three-leaf masonry walls accounting for the material texture. *Construction and Building Materials*, 40, 330-351.
- CEN. Eurocode 6 (2005). Design of masonry structures, Part 1–1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. *European Committee for Standardization*, Belgium.
- Ceravolo, R., Pistone, G., Fragonara, L. Z., Massetto, S., & Abbiati, G. (2016). Vibration-based monitoring and diagnosis of cultural heritage: a methodological discussion in three examples. *International Journal of Architectural Heritage*, 10(4), 375-395.
- D’Ambrisi A, Mariani V, Mezzi M (2012) Seismic assessment of a historical masonry tower with nonlinear static and dynamic analyses tuned on ambient vibration tests, *Engineering Structures* 36, 210-219.

- Didier, C. Andrei, B. Dominique, B. Celine, D. Sandrine, F. Jean-Sylvain, M. Nicola, T. Leopoldo, T. Paola, T. Christophe, S. Anne, D. Robin, F. (2016). *AFPS Report mission 2016 Amatrice (Italia)*, Retrieved July 11, 2018, from <http://www.afps-seisme.org/>
- Dizhur, D., Ingham, J., Moon, L., Griffith, M., Schultz, A., Senaldi, I., ... & Ventura, C. (2011). Performance of masonry buildings and churches in the 22 February 2011 Christchurch earthquake. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 44(4), 279-296.
- Dizhur, D., Ingham, J. (2015). Seismic Improvement of Load bearing Unreinforced Masonry Cavity Walls, *External Research Report, University of Auckland funded by the Building Research Levy 3*, ISSN: 2423-0839.
- Dolatshahi, K. M., & Aref, A. J. (2011). Three Dimensional Modeling of Masonry Structures and Interaction of In-Plane and Out-of-Plane Deformation of Masonry Walls. *Engineering Mechanics Institute Conference (EMI2011)* .
- Dolatshahi, K. M., Aref, A. J., and Yekrangnia, M. (2014). Bidirectional behavior of unreinforced masonry walls, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* DOI:10.1002/eqe.2455, in press.
- Dolatshahi, K. M., & Aref, A. J. 2016. Multi-directional response of unreinforced masonry walls: experimental and computational investigations. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(9), 1427-1449.
- Doglioni, F., Moretti, A., Petrini, V., & Angeletti, P. (1994). Le chiese e il terremoto. Dalla vulnerabilità constatata nel terremoto del Friuli al miglioramento antisismico nel restauro. In *Verso Una Politica di Prevenzione*. Edizioni Lint Trieste.

- Frunzio, G., Monaco, M., & Gesualdo, A. (2001). 3D FEM analysis of a roman arch bridge. *Historical constructions*, 591-598.
- Gentile C, Saisi A, Cabboi A (2015) Structural identification of a masonry tower based on operational modal analysis, *International Journal of Architectural Heritage* 9(2), 98-110.
- Giuffrè, A., & Carocci, C. (1993). Statica e dinamica delle costruzioni murarie storiche. Atti del Convegno internazionale CNR “Le pietre da costruzione: il tufo calcareo e la pietra leccese”. *Mario Adda Editore, Bari*, 539-598.
- Griffith, M. C., Magenes, G., Melis, G., & Picchi, L. (2003). Evaluation of out-of-plane stability of unreinforced masonry walls subjected to seismic excitation. *Journal of Earthquake Engineering* 7(1), 141-169.
- Ismail, N., Griffith, M., & Ingham, J. M. (2011). Performance of masonry buildings during the 2010 Darfield (New Zealand) earthquake. In *The Eleventh North American Masonry Conference*.
- Lagomarsino, S., Brencich, A., Bussolino, F., Moretti, A., Pagnini, L. C., & Podestà, S. (1997). Una nuova metodologia per il rilievo del danno alle chiese: prime considerazioni sui meccanismi attivati dal sisma. *Ingegneria Sismica*, 3, 70-82.
- Limoge, C. (2016). Méthode de diagnostic à grande échelle de la vulnérabilité sismique des Monuments Historiques: Chapelles et églises baroques des hautes vallées de Savoie . *Doctoral dissertation, Paris Saclay*.
- Lin, Y., Lawley, D., Wotherspoon, L., & Ingham, J. M. (2016). Out-of-plane Testing of Unreinforced Masonry Walls Strengthened Using ECC Shotcrete. In *Structures* 7, 33-42, Elsevier.

- Lorenzoni, F., Casarin, F., Modena, C., Caldon, M., Islami, K., & da Porto, F. (2013). Structural health monitoring of the Roman Arena of Verona, Italy. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 3(4), 227-246.
- Lourenço, P. B. (1996). Computational strategies for masonry structures: *Doctoral dissertation*, TU Delft, Delft University of Technology.
- Lourenço, P. B., & Rots, J. G. (1997). Multisurface interface model for analysis of masonry structures. *Journal of engineering mechanics*, 123(7), 660-668.
- Mallardo, V., Malvezzi, R., Milani, E., & Milani, G. (2008). Seismic vulnerability of historical masonry buildings: a case study in Ferrara. *Engineering Structures*, 30(8), 2223-2241.
- Milani, G., Lourenço, P., & Tralli, A. (2006). Homogenization approach for the limit analysis of out-of-plane loaded masonry walls. *Journal of structural engineering*, 132(10), 1650-1663.
- Milani, G., & Lourenço, P. B. (2010). Monte Carlo homogenized limit analysis model for randomly assembled blocks in-plane loaded. *Computational Mechanics*, 46(6), 827-849.
- Milani, G., & Valente, M. (2015). Failure analysis of seven masonry churches severely damaged during the 2012 Emilia-Romagna (Italy) earthquake: non-linear dynamic analyses vs conventional static approaches. *Engineering Failure Analysis* 54, 13-56.
- Milano, L., Mannella, A., Morisi, C., & Martinelli, A. (2008). Schede illustrative dei principali meccanismi di collasso locali negli edifici esistenti in muratura e dei relativi modelli cinematici di analisi. *Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni*

- Misir, I.S., Ozcelik, O., Durmazgezer, E., Yucel, U., Amaddeo, C., Kuran, F., Tuna, E., Yucel, G., Youssouf, I.B. (2017). Model Calibration of Three Leaf Stone Masonry Walls of Historical Masonry Buildings Under Out-of-Plane Actions: A Case Study on İsabey Mosque. *6th International Symposium on Conservation and Consolidation of Historical Structures*, 2-4 November, Trabzon, Turkey.
- Misir, I.S., Youssouf, I.B., Yucel G. (2018). Out-of-Plane Damage Limits for the Walls in Historical URM Buildings under Earthquake Actions: A Case Study for İsabey Mosque. *3. International conference on civil and environmental engineering*, 24-27 April, Çesme, Turkey.
- Modena, C., Valluzzi, M. R., da Porto, F., & Casarin, F. (2011). Structural aspects of the conservation of historic masonry constructions in seismic areas: remedial measures and emergency actions. *International Journal of Architectural Heritage*, 5(4-5), 539-558.
- Mouyiannou, A, Rota, M, Penna, A, Magenes, G. (2014). Identification of suitable limit states from nonlinear dynamic analyses of masonry structures: *Journal of Earthquake Engineering* 18(2), 231-263.
- Nohutcu H, Demir A, Ercan E, Hokelekli E, Altintas G (2015) Investigation of a historic masonry structure by numerical and operational modal analyses: *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 24(13), 821-834.
- Noor-E-Khuda, S., Dhanasekar, M., & Thambiratnam, D. P. (2016). An explicit finite element modelling method for masonry walls under out-of-plane loading. *Engineering Structures* 113, 103-120.
- Oliveira, D. V., Silva, R. A., Garbin, E., & Lourenço, P. B. (2012). Strengthening of three-leaf stone masonry walls: *Materials and structures* 45(8), 1259-1276.

Ramos, L. F., Lourenço, P. B., & Costa, A. C. (2005). Operational modal analysis for damage detection of a masonry construction.

Ramos, L. F., Lourenço, P. B., De Roeck, G., & Campos-Costa, A. (2008). Damage identification in masonry structures with vibration measurements. *Structural Analysis of Historic Construction: Preserving Safety and Significance, 1 and 2*, 311-319.

RILEM. (2004). Recommendation MDT.D.4: In-situ Stress Tests Based on the Flat Jack. In RILEM TC 177-MDT: Masonry Durability and On-site Testing, Materials and Structures 37:491–496.

Roca, P., Cervera, M., & Gariup, G. (2010). Structural analysis of masonry historical constructions. Classical and advanced approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17(3), 299-325.

Senthivel, R., & Lourenço, P. B. (2009). Finite element modelling of deformation characteristics of historical stone masonry shear walls. *Engineering structures*, 31(9), 1930-1943.

SolidWorks, (2014). Dassault Systèmes SolidWorks Corp, USA.

SVS, (2012) ARTeMIS Extractor. (2011), Retrieved July 11, 2018, from <http://www.svibs.com/>

Systèmes, D. (2007). Abaqus analysis user's manual. Simulia Corp. Providence, RI, USA.

Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu (2017).

- Tomažević, M. (2011). Seismic resistance of masonry buildings in historic urban and rural nuclei: lessons learned in Slovenia. *International Journal of Architectural Heritage*, 5(4-5), 436-465.
- Toumbakari, E., & Van Gemert, D. (1997, May). Lime-pozzolana-cement injection grouts for the repair and strengthening of three-leaf masonry structures. In *Proceedings 4th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean, Rhodes*, 3, 385-394.
- Toumbakari EE (2002). *Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls*. Ph.D. thesis. Belgium: Leuven Catholic University.
- Valente, M., & Milani, G. (2016). Non-linear dynamic and static analyses on eight historical masonry towers in the North-East of Italy. *Engineering Structures*, 114, 241-270.
- Van Overschee P, De Moor BL. (1996). Subspace identification for linear systems, Dordrecht, The Netherlands: *Kluwer Academic Publishers*.
- Vintzileou, E., & Tassios, T. P. (1995). Three-leaf stone masonry strengthened by injecting cement grouts. *Journal of Structural Engineering*, 121(5), 848-856.
- Vintzileou, E., & Miltiadou-Fezans, A. (2008). Mechanical properties of three-leaf stone masonry grouted with ternary or hydraulic lime-based grouts. *Engineering Structures* 30(8), 2265-2276.