KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FARKLI MALZEMELERDEN İNŞA EDİLMİŞ YIĞMA BİNALARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Boudjamaa ROUDANE

EYLÜL 2023
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FARKLI MALZEMELERDEN İNŞA EDİLMİŞ YIĞMA BİNALARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Boudjamaa ROUDANE

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 / 09 /2023
Tezin Savunma Tarihi : 21 / 09 /2023

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Süleyman ADANUR

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

“Farklı Malzemelerden İnşa Edilmiş Yığma Binaların Dinamik Davranışlarının Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi” başlıklı bu tez çalışması; Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak yürütülmüştür.

Bu çalışma sırasında her adımda benimle yakından ilgilenen, bilgilerini, desteğini ve dikkatini benden bir an olsun esirgemeyen ve tecrübelerinden her daim yararlandığım değerli Hocam Sayın Prof. Dr. Süleyman ADANUR’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı inceleyerek bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Sayın Hocalarım Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK ve Prof. Dr. Levent GÜMÜŞEL’e ayrı ayrı teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN’a, Arş. Gör. Dr. Ali Fuat GENÇ’e, Arş. Gör. Dr. Ali KAYA’ya ve Öğr. Gör. Dr. Fezayil SUNCA’ya, Arş. Gör. F. Yesevi OKUR’a, Dr. Mouslem DAMKHİ’ye, Ayşegül ÇOLAKOĞLU ve adını yazamadığım daha birçok arkadaşıma teşekkür ederim.

Türk bursları aracılığıyla bana bu fırsatı sunan Türkiye ile Cezayir arasındaki ikili program yetkililerine teşekkür ediyorum.

Hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen, bana karşı inançlarını her an hissettiğim ve beni bu günlere getiren babam Cherif ROUDANE (Allah rahmet eylesin), annem Mezhoura’ya (Allah şifa versin), abilerim Ahsen, Farid ve Kaçi ve ablalarım Noura ve Leila’ya müteşekkir olduğumu belirtirim. bu çalışmanın, yeni çalışmalara ışık tutmasını ve Türkiye’ye faydalı olmasını temenni ederim.

Boudjamaa ROUDANE

Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Farklı Malzemelerden İnşa Edilmiş Yığma Binaların Dinamik Davranışlarının Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Süleyman ADANUR‘un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 21/09/2023

Boudjamaa ROUDANE

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ IV
İÇİNDEKİLER V
ÖZET IX
SUMMARY X
ŞEKİLLERİN DİZİNİ XI
TABLOLAR DİZİNİ XVIII
SEMBOLLER DİZİNİ XXII
1. GENEL BİLGİLER 1
1.1. Tezin Amacı ve İçeriği 6
1.2. Yığma Yapılar Konusunda Daha Önce Yapılmış Çalışmalar 7
1.2.1. Yığma Yapıların Dinamik Davranışlarının Belirlenmesi ile İlgili Çalışmalar 7
1.2.2. Onarılmış ve/veya TRM Kompozit Malzemelerle Güçlendirilmiş Yığma Yapılar ile İlgili Çalışmalar 24
1.2.3. XFEM Metodu ile İlgili Yapılan Çalışmalar 32
1.2.4. Yığma Yapılar 35
1.2.4.1. Yığma Yapı Malzemeleri 35
1.2.4.2. Tuğla 36
1.2.4.3. Beton Blok (Briket) 37
1.2.4.4. Gazbeton 37
1.2.4.5. Kilitli yığma birim 38
1.2.4.6. Harç 39
1.2.5. Yığma Yapılarda Kullanılan Örgü Çeşitleri 39
1.2.6. Yiğma Duvarın Davranışı 40
1.2.6.1. Tek Eksenli Basınç 40
1.2.6.2. Çift Eksenli Çekme-Gerilme Altında Davranışı 42
1.2.6.3. Kayma (Kesme) Etkisi 44
1.2.7. Yığma Duvar Kırılma Hipotezleri 44
1.2.7.1. Kırılma Türleri 44
1.2.7.2. Kayma Kesme Göçmesi 44
1.2.7.3. Diyagonal Çekme Göçmesi 44

1.2.7.4. Devrilme ve Tabanda Ezilme Göçmesi 45
1.2.8. Yığma Yapıların Onarım ve Güçlendirme Yöntemleri 46
1.2.8.1. Geleneksel Onarım Teknikleri 46
1.2.8.2. Modern Güçlendirme Teknikleri 46
1.2.8.2.1. Elyaf Takviyeli Polimer (FRP) 47
1.2.8.2.2. Elyaf Takviyeli Harç (FRM) 47
1.2.8.2.3. Tekstil takviyeli harç (TRM) 47
1.2.9. Yığma Yapıların Modelleme Stratejileri 49
1.2.9.1. Tek Bileşenli Malzeme Olarak Duvarın Modellemesi (Makro Modelleme) 49
1.2.9.2. İki Bileşenli Malzeme Olarak Duvarın Modellenmesi (Basitleştirilmiş Mikro Modelleme) 50
1.2.9.3. Üç Bileşenli Bir Malzeme Olarak Duvarın Modellenmesi (Detaylı Mikro Modelleme) 50
1.2.10. Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması 51
1.2.11. Yığma Yapıların Doğrusal Olmayan Davranışı 51
1.2.12. Sayısal Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi 52
1.2.13. Sayısal Dinamik Davranışın Belirlenmesi 55
1.2.14. Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Yöntemi (XFEM) Temel Kavramı 57
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR 61
2.1. Benchmark Çalışmaları 61
2.1.1. Betonarme Çerçeveli Bina ve Dolgu Duvar İnşaat Aşamalarının Deneysel Dinamik Karakteristiklerinin Sayısal Olarak Elde Edilmesi 61
2.1.1.1. Yapının Tanımı 61
2.1.1.2. Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması 62
2.1.1.3. Sonlu Eleman Model Güncelleme 64
2.1.2. Karbon Lif Takviyeli Polimerle (CFRP) Güçlendirilmiş Taş Blok Numunelerin Sayısal Olarak Modellenmesi 67
2.1.2.1. Malzeme Özellikleri 68
2.1.2.2. Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması 69
2.1.2.3. Analiz Sonuçları 71
2.1.2.4. Sayısal ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması 73
2.1.3. Dolgu Duvarlı Çerçevenin Sayısal Olarak İncelemesi 75
2.1.3.1. Malzeme Özellikleri 76
2.1.3.2. Tuğla Birim ve Harç Arası Ara Yüz Özelikleri 77
2.1.3.3. Kohezif Yüzey Elemanları 78
2.1.3.4. Sonlu Elemanların Ayrıklaştırılması 79

2.1.3.5. Sayısal Modelleme 79
2.1.3.6. Güçlendirilmiş Duvarların Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması 84
2.1.3.7. Modal Analizi Sonuçları 85
2.1.3.8. Döngüsel Yükleme Analizi 88
2.1.4. Ölçekli Yığma Modeli 92
2.1.4.1. Model Tanıtımı 92
2.1.4.2. Analizlerde Kullanılan Deprem Kayıtlarının Seçimi 93
2.1.4.1. Sonlu Eleman Modeli İyileştirmesi 94
2.1.4.2. Hasarsız Durum İçin Sonlu Eleman Model İyileştirme 95
2.1.4.3. Hafif Hasar Durumu İçin Sonlu Eleman Model İyileştirme 98
2.1.4.4. Ağır Hasar Durumu İçin Sonlu Eleman Model İyileştirme 99
2.1.4.5. Zaman-Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçları 100
2.1.4.6. Deneysel ve Sayısal Göreli Kat Ötelemelerinin Karşılaştırılması 104
2.1.5. Eleman Silme Metodu ile Çatlak Takibi 106
2.1.6. XFEM Kullanarak Başlangıç Çatlak İlerleme Modellemesi 109
2.1.6.1. Yapının Tanıtımı 110
2.1.6.2. Malzeme Özellikleri 111
2.1.6.3. Yük Bileşenleri 111
2.1.6.4. Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması 112
2.1.6.5. Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Yöntemi (XFEM) 114
2.1.6.6. Modal Analiz Sonuçları 115
2.1.6.7. Dinamik Analiz Sonuçları 116
2.1.6.8. Farklı Başlangıç Çatlak Uzunluklarının Etkisi 118
2.1.6.9. Çatlak İlerleme Yollarının Doğrulanması 122
2.1.7. Başlangıç Çatlak Durumu Olmadan XFEM ile Çatlak İlerleme Takibi 123
2.1.7.1. Yapının Tanıtımı 123
2.1.7.2. Modal Analiz Sonuçları 125
2.1.7.3. Dinamik Hasarın Sayısal Olarak Elde Edilmesi 126
2.2. Farklı Kat Adetlerine Sahip Yığma Yapı Modellerinin Sayısal Analizleri 130
2.2.1. Yapıların Özellikleri 130
2.2.1.1. Geometrik Özellikler 130
2.2.1.2. Malzeme Özellikleri ve Yapı Birleşim Detayları 132
2.2.2. Analiz Ayarları 138
2.2.2.1. Yığma Yapıların XFEM Hasar Parametreleri 138

2.2.2.2. Çatlak Elemanının Tanımlanması 139
2.2.2.3. Eleman Silme Metodu (ESM) 140
2.2.2.4. Kabul Edilen Emniyet Gerilmeleri 140
2.3. Sayısal Analizler 142
2.3.1. İki Katlı Yığma Bina Modelleri 142
2.3.1.1. Statik Analizleri 142
2.3.1.1.1. Dinamik Analizleri 144
2.3.1.1.2. Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi 145
2.3.1.2. Hasarlı, Onarılmış ve Güçlendirilmiş Durumlar İçin Gerilme Değişimlerinin Değerlendirilmesi 152
2.3.1.2.1. Hasarlı, Onarılmış ve Güçlendirilmiş Durumlar İçin Yerdeğiştirme Değişimlerinin Değerlendirilmesi 162
2.3.1.3. Hasarlı, Onarılmış ve Güçlendirilmiş Durumlar İçin Hasar Limitleri Dağılımlarının Değerlendirilmesi 163
2.3.2. Üç Katlı Yığma Bina Modelleri 170
2.3.2.1. Statik Analizi 170
2.3.2.2. Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi 173
2.3.2.3. Hasarlı, Onarılmış ve Güçlendirilmiş Durumlar İçin Gerilme Değişimlerinin Değerlendirilmesi 180
2.3.2.4. Hasarlı, Onarılmış ve Güçlendirilmiş Durumlar İçin Yerdeğiştirme Değişimlerinin Değerlendirilmesi 188
2.3.2.5. Hasarlı, Onarılmış ve Güçlendirilmiş Durumlar İçin Hasar Limitleri Dağılımlarının Değerlendirilmesi 190
2.3.3. Tek Katlı Binanın Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması 197
2.3.3.1. Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi 197
2.3.3.2. Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi 199
2.3.3.3. Hasar Analizi 203
2.3.3.4. Silme Elemanı Analizi 207
2.3.3.5. Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Yöntemi (XFEM) Analizi 211
3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 217
4. KAYNAKLAR 223
ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

FARKLI MALZEMELERDEN İNŞA EDİLMİŞ YIĞMA BİNALARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Boudjamaa ROUDANE

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman : Prof. Dr. Süleyman ADANUR
2023, 242 Sayfa

Tez kapsamında dört malzeme kullanılarak modellenen yığma yapıların yapısal davranışının analitik analiz ile elde edilmesi amaçlanmıştır. Tezin ilk bölümünde 6 farklı yapıda doğrulama (Benchmark) çalışmaları gerçekleştirilmiş ve sayısal modelin doğruluğu teyit edilmiştir. Bu tez, ABAQUS yazılımının üç boyutlu sonlu elemanları üzerine bir çalışmayı ele almaktadır. İkinci bölümde, TBDY-2018'e göre dört malzeme kullanılarak tasarlanan iki ve üç katlı yığma binaların dinamik davranışları hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumları için sayısal yöntemler kullanılarak belirlenmiş ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu amaçla 1992 Erzincan depremi dikkate alınmıştır. Çalışma analizlerinde farklı analiz çözüm stratejileri ve modelleme yöntemleri izlenmiş ve beton modeli olarak Beton Hasarlı Plastisite (CDP) beton hasar modeli kullanılmıştır. İncelenen tüm yığma binalardaki gerilmeler, göreli yer değiştirmeler ve hasar dağılımları açısından incelenmiş ve analizlerden elde edilen sonuçlar her bir malzeme için karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çatlaklar, yığma bina davranışında önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle çatlak büyümesinin modellenmesi hasar simülasyonunda çok önemli bir problemdir. Tezin son bölümünde iki farklı çalışma gerçekleştirilmiştir. İlk çalışmada, tek katlı yığma binalarda dinamik çatlak ilerlemesi için sonlu eleman yöntemlerinin performansı araştırılmıştır. Üç yöntem ele alınmıştır: genişletilmiş sonlu elemanlar yöntemi (XFEM), eleman silme yöntemi ve CDP model yöntemi. XFEM ile iki farklı malzeme olarak modellenen tek katlı yapının artan deprem yüklerine maruz kalan çeşitli başlangıç çatlak açılarına göre çatlakların yayılımı ve hasar modları elde edilmiştir. Elde edilen çatlakların dağılımı karşılaştırılmış ve yapının deprem etkisi altındaki hasar davranışı incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: ABAQUS yazılım, Yığma bina, Sonlu Elemanlar Yöntemi, XFEM yöntemi

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF DYNAMIC BEHAVIOR ON MASONRY BUILDINGS CONSTRUCTED BY DIFFERENT MATERIALS USING NUMERICAL METHODS

Boudjamaa ROUDANE

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Süleyman ADANUR
2023, 242 Pages

Within the scope of the thesis, it is aimed to obtain the structural behavior of masonry structures modeled using four materials by analytical analysis. In the first part of the thesis, verification (Benchmark) studies in 6 different structures were carried out and the accuracy of the numerical model was confirmed. This thesis deals with a study on three-dimensional finite elements of the ABAQUS software. In the second part, the dynamic behaviors of two and three storey masonry buildings designed according to TBDY-2018 using four materials were determined by using numerical methods for their undamaged, damaged, repaired and strengthened conditions and examined coMParatively. For this purpose, 1992 Erzincan earthquake was taken into account. In the study analysis, different analysis solution strategies and modeling methods were followed and the Concrete Damaged Plasticity (CDP) concrete damage model was used as the concrete model. The stresses in all masonry buildings examined were examined in terms of relative displacements and damage distributions, and the results obtained from the analyzes were evaluated comparatively for each material. Cracking plays an important role in masonry behavior. Therefore, modeling of crack growth is a very important problem in damage simulation. In the last part of the thesis, two different studies were carried out. In the first study, the performance of finite element methods for dynamic crack propagation in single storey masonry buildings was investigated. Three methods are discussed: the extended finite element method (XFEM), the element deletion method, and the CDP model method. With the (XFEM), the propagation of cracks and damage modes were obtained according to various initial crack angles of the single-storey structure, which was modeled as two different materials, subject to increasing earthquake loads. The distribution of the cracks obtained was coMPared and the damage behavior of the structure under the influence of earthquakes was examined.

Keywords: ABAQUS software, Masonry building, Finite Element Method, XFEM method

ŞEKİLLERİN DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. 1. Toprak yapıların konumu (De Sensi, 2003) 2
Şekil 1. 2. Sismik aktivitenin yüksek olduğu bölgeler (De Sensi, 2003).....2
Şekil 1. 3. Yığma binalarnın İtalya'daki 2016 Amatrice depremi öncesi ve sonrası görünümü (URL-1, 2016).....3
Şekil 1.4. 2000 yılı bina sayımı verilerine göre yüzdeleri (Bekir, 2021).....4
Şekil 1.5. Yıkılmış tuğla bir ev (Williams vd., 1992).....4
Şekil 1.6. Beton çatlak modelleri (Feenstra vd., 2001).....9
Şekil 1.7. İki katlı yığma bina (Yi, 2006) 11
Şekil 1.8. Lineer elastik analiz altında gerilme dağılımının şekilleri 12
Şekil 1.9. Yığma dolgu duvarın sayısal göçme modeli (Stavridis ve Shing, 2010) 15
Şekil 1.10. Sayısal ve deneysel testlerden kesme kırılma modeli (Wang, 2019).....19
Şekil 1.11. Hasar karşılaştırılması (Abdulla vd. 2017).....33
Şekil 1.13. Farklı yığma birim malzeme örnekleri.....35
Şekil 1.14. Yüksek yoğunluğa sahip tuğlalar tipleri (URL-2) 36
Şekil 1.15. Beton briket türleri (URL-3).....37
Şekil 1.16. Gazbeton (Ytong) görünümü (Nian vd., 2016).....38
Şekil 1.17. Kilitli yığma birim inin görünümü (Kayaalp, 2017).....38
Şekil 1.18. Farklı yığma taş yapılar (Lourenço, 1998) 39
Şekil 1.19. Örgü teknikleri (Lourenço, 1998) 39
Şekil 1.20. Tek eksenli basınç altında yığma prizmalarda yerel gerilme durumu (Hilsdorf, 1969).....40
Şekil 1.22. Yük altında yığma duvarların çekme hasarları (Backes, 1985).....42
Şekil 1.23. Tek eksenli çekme altındaki hasar modları (Page, 1983).....42
Şekil 1.24. Çift eksenli çekme-basınç altındaki hasar modları (Page, 1983).....43
Şekil 1.25. Çift eksenli basınç-basınç altında duvarlarında yenilme modu 43
Şekil 1.26. Döngüsel kesme yükleri altında çift diyagonal çatlak 45
Şekil 1.27. Düzlem içi sismik yüke maruz kalan bir yığma duvardaki tipik göçme modları (Tomazeviç, 2000) 46
Şekil 1.28. TRM uygulama aşamaları (a) numuneyı ıslatılması, (b) son harç tabakasının uygulanması, (c) izgara üzerine harç ile kaplama ve (d) son harç tabakasının uygulanması (Bernat-Maso, 2014) 49

Şekil 1.29. Yığma modelleme teknikleri (a) yığma örnek (b) tek bileşenli makro, (c) iki bileşenli mikro (d) üç bileşenli mikro (Lourenço, 2002). 50
Şekil 1.30. XFEM' metodundaki zenginleştirilmiş düğümler (Wang ., 2021).....59
Şekil 1.31. XFEM temel kavramı (Mannn ve Muller, 1982).....60
Şekil 2.1. Betonarme modelinin yapım aşamaları (Türker ve Bayraktar 2016).....62
Şekil 2.2. Betonarme modelinin boyutları ve şematik kesit.....62
Şekil 2.3. ABAQUS yazılımında modelinin yapım aşamaları.....63
Şekil 2.4. Üç katlı sonlu eleman ağı (Roudane vd., 2019).....64
Şekil 2.5. Farklı bina durumları için deneysel ve sayısal modal analiz arasındaki mod şekillerinin karşılaştırılması.....65
Şekil 2.6. Numune geometrisi (Birim mm'dir) (Fayala vb., 2016).....67
Şekil 2.7. Numune deney elemanı için CFRP düzeni (Fayala vb., 2016).....67
Şekil 2.8. Dört noktalı eğme deneyi (Fayala vb., 2016). 69
Şekil 2.9. ABAQUS yazılımında solid model ve güçlendirlmesi 70
Şekil 2.10. ABAQUS yazılımında sınır şartları ve mesh.....70
Şekil 2.11. G4 modeli için kompozit güçlendirme uygulaması (metre).....70
Şekil 2.12. Farklı numunelerine ait sehim kontur görünümleri 71
Şekil 2.13. Farklı numunelerine ait sehim kontur görünümleri 72
Şekil 2.14. Hasar dağılımların açısından deneysel ve sayısal karşılaştırılması 73
Şekil 2. 15. Dolgu duvarlı çerçevenin deneyi (Samberou, 2021).....75
Şekil 2.16. Yığma duvar testinin deneysel kurulumu (Samberou (2021)).....76
Şekil 2.17. Kullanılan çevrimsel yükleme şeması (FEMA 461, 2007). 76
Şekil 2.18. Birleşimlerin kırılma –ayrılma davranışı (Anderson, 2005).....78
Şekil 2.19. ABAQUS yazılımında duvar dolgulu modeli.....79
Şekil 2.20. Detaylı sonlu eleman mikro modeli 80
Şekil 2.21. Tuğla birimi için kohezif elemanlar oluşturması (birim metre) 80
Şekil 2.22. Kohezif elemanlar için adlandırma kuralları (ABAQUS, 2019) 81
Şekil 2.23. Tuğla birimlerin sol yüzeyleri.....81
Şekil 2.24. Tuğla birimleri yatay ve düşey ara yüzeyleri ile temas özelliği 82
Şekil 2.25. Yüzey-yüzey temas ayrıklaştırması (ABAQUS, 2019) 82
Şekil 2.26. Yay elemanının yerleri şematik olarak göstermesi 83
Şekil 2.27. Dolgu duvarlı çerçevenin yatay yükler konumu 83
Şekil 2.28. CFRP ile dolgu yığma duvarın güçlendirilmesi.....84
Şekil 2.29. Hasarsız durum için ilk üç mod şekli (a) deneysel ve (b) sayısal.....85

Şekil 2.30. Hasarlı durum için ilk üç mod şekli (a) deneysel ve (b) sayısal 86
Şekil 2.31. Güçlendirilmiş durum için ilk üç mod şekli 87
Şekil 2.33. Hasarlı modeline ait yük-yer değiştirme eğrisinin grafikeri.....89
Şekil 2.34. Model-W2'nında oluşan yer değiştirmeler.....89
Şekil 2.35. Güçlendirilmiş mode ait yük-yer değiştirme eğrisinin grafikleri 90
Şekil 2.36. Hasarlı model W-1 durumu için son çatlak biçimleri 91
Şekil 2.37. Güçlendirlmiş model W-2 durumu için son çatlak biçimleri 91
Şekil 2.38. Tek katlı yığma bina cephe görünüşleri (cm) 92
Şekil 2.39. İnşa edilmiş tek katlı tuğla model (Kaya vd., 2023). 93
Şekil 2.40. Tek katlı yığma sonlu elema modeli 94
Şekil 2.41. Tek katlı yığma modelin başlangıç durumundan elde edilen mod şekilleri .96
Şekil 2.42. Tek katlı modelin iyileştirme durumundan elde edilen mod şekilleri.....97
Şekil 2.43. Hasarsız için ilk üç mod şekli sonuçlarının karşılaştırılması 98
Şekil 2.44. Az hasar için mod şekli karşılaştırılması (a) deneysel (b) sayısal 99
Şekil 2.45. Ağır hasar için mod şekli karşılaştırılması (a) deneysel (b) sayısal.....100
Şekil 2.46. Farklı depremlerinde tek katlı modeli için duvar hasarı dağılımları.....
(c) Sinus dalgası (0/8 g, 10 Pikli) 101
Şekil 2.47. Farklı depremlerinde tek katlı modeli için göreli kat ötelenmeleri.....103
Şekil 2.48. Farklı deprem durumları için yerdeğiştirme konturları.....103
Şekil. 2.49. Sayısal ve deneysel sonuçların kullanılan depremler için maksimum
göreli kat ötelenmeleri grafiklerinin karşılaştırılması 105
Şekil 2.50. Farklı depremler için tek katlı model sonuçlarının göreli kat
ötelenmesinin karşılaştırılması.....106
Şekil 2.51. Farklı depremler altında silme elemanı sonuçlarının karşılaştırılması.....106
Şekil 2.52. Farklı çatlak ilerleme davranışı (a) deneysel, (b) CDP hasar modeli ve.....
(c) silme eleman metodu 109
Şekil 2.53. Lagoa Comprida barajının kesit geometrisi.....110
Şekil 2.54. Lagoa Comprida barajına uygulanan yatay ve düşey ivme bileşenleri.....111
Şekil 2.55. Baraja etki eden farklı yüklerin ve sınır koşulları tanımlaması 113
Şekil 2.56. Lagoa Comprida Barajı mesh modeli.....113
Şekil. 2.57. XFEM Çalışmasının akış diyagramı 114
Şekil 2.58. Mod şekilleri sonuçlarının karşılaştırılması.....115
Şekil 2.60. Depremler altında baraj üzerinde gerilme dağılımları 116
Şekil 2.61. Makimum çakme gerilmesinin değerinin düğümü belirlenmesi (Pascal) ..117

Şekil 2.62. İki boyutlu Lagoa comprida barajı gömülü başlangıç çatlak konumu 118
Şekil 2.63. Model-C1'in seçilmiş altı zamanla çatlak ilerlemesi (a=0.2 m) 119
Şekil 2.64. Model-C1 durum için (a) STATUSXFEM ve (b) PHILSM (t=10s) 119
Şekil 2.65. Model-C2'in seçilmiş altı zamanla çatlak ilerlemesi (a=0.8 m) 119
Şekil 2.66. Model-C2 durum için (a) STATUSXFEM (b) PHILSM 120
Şekil 2.67. Model-C3'ün seçilmiş dokuz zamanla çatlak ilerlemesi (a=1.4 m).....120
Şekil 2.68. Model-C3 durum için (a) STATUSXFEM ve (b) PHILSM (t=10s) 121
Şekil 2.69. Model-C3'nin seçilmiş sekiz zamanla çatlak ilerlemesi (a=2 m) 121
Şekil 2.70. Model-C4 durum için (a) STATUSXFEM ve (b) PHILSM.....122
Şekil 2.71. Barajdaki eğilme çatlakları hasar biçiminin karşılaştırılması.....123
Şekil 2.72. Koyna barajının modeli 124
Şekil 2.73. 11 Aralık 1967 Koynanagar ivme kayıt ivmeleri.....124
Şekil 2.74. Koyna barajının üzerinde kritik bölge tanımlanması 125
Şekil 2.75. ABAQUS yazılımına göre elde edilen mod şekilleri 125
Şekil 2.76. Seçilen dört zamanda barajdaki öekme hasarın olasılık dağılımının zamanla değişimi.....127
Şekil 2.77. Basınç hasarının gelişimi.....127
Şekil 2.78. Çatlak başlangıcı.....128
Şekil 2.79. Çatlak ilerlemesi 128
Şekil 2.80. Çatlak açılması.....128
Şekil 2.81. Koyna Barajı'nın 1967 depremi altındaki son çatlak biçimleri.....129
Şekil 2.82. Katların planı 131
Şekil 2.83. ARCHİCAD yazılımıyla modellenmiş üç boyutlu iki katlı bina.....131
Şekil 2.84. İki katlı bina için farklı cephe görünümleri 132
Şekil 2.85. Tek katlı, iki katlı ve üç katlı ağ yapısının görünümü.....137
Şekil 2.86. Çatlak içeren duvarların SE modeli ve çatlak ucunun yakın görünümü 140
Şekil 2.87. İki katlı binaların gerilme analizinden elde edilen maksimum gerilme kontur diyagramları.....142
Şekil 2.88. İki katlı binaların gerilme analizinden elde edilen minimum gerilme konturları 143
Şekil 2.89. Farklı malzeme iki katlı binaların için yerdeğiştirme değerleri.....144
Şekil 2.90. Erzincan depremi ivme-zaman grafiği 145
Şekil 2.91. Hasarsız durumu için iki katlı binalarında ait mod şekilleri.....146
Şekil 2.92. Hasarlı durumu için iki katlı modellerine ait mod şekilleri.....147

Şekil 2.93. Onarılmış durumu için iki katlı bina modeline ait mod şekilleri 148
Şekil 2.94. Güçlendirmiş durumu için iki katlı binalarına ait mod şekilleri 150
Şekil 2.95. İki katlı bina hasarlı durumundan elde edilen çekme gerilme konturkarı ..152
Şekil 2.96. İki katlı bina hasarlı durumundan elde edilen basınç gerilmesi konturları 153
Şekil 2.97. İki katlı onarılmış durumundan elde edilen çekme gerilme konturları 155
Şekil 2.98. İki katlı onarılmış durumundan elde edilen basınç gerilme konturları 155
Şekil 2.99. İki katlı yığma bina güçlendirilmiş durumundan elde edilen çekme gerilme kontur diyagramı 157
Şekil 2.100. İki katlı yığma bina güçlendirilmiş durumundan elde edilen basınç gerilme kontur diyagramı 158
Şekil 2.101. Hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumlarından elde edilen çekme ve basınç gerilmelerinin değerlerini karşılaştırılması 161
Şekil 2.102. Hasarlı iki katlı delikli tuğla modeli çekme hasar limit dağılımları 164
Şekil 2.103. Hasarlı iki katlı dolu briket modeli çekme hasar limit dağılımları 164
Şekil 2.104. Hasarlı iki katlı gazbeton modeli çekme hasar limit dağılımları 165
Şekil 2.105. Hasarlı iki katlı kilitli yığma birim modeli çekme hasar limit dağılımları 165
Şekil 2.106. Onarılmış iki katlı deliki tuğla modeli çekme hasar limit dağılımları 166
Şekil 2.107. Onarılmış iki katlı deliki tuğla modeli çekme hasar limit dağılımları 167
Şekil 2.108. Onarılmış iki katlı gazbeton modeli çekme hasar limit dağılımları.....168
Şekil 2.109. Onarılmış iki katlı kilitli yığma modeli çekme hasar limit dağılımları.....168
Şekil 2.110. Güçlendirilmiş iki katlı için çekme hasar limit dağılım diyagramları 169
Şekil 2.112. Üç katlı binaların statik analizinden elde edilen basınç gerilme konturları171
Şekil 2.113. Üç katlı bina için yerdeğiştirme değerleri (a) delikli tuğla (b) dolu briket (c) gazbeton ve (d) kilitli yığma birim 172
Şekil 2.114. Hasarsız durumu için üç katlı modellerine ait mod şekilleri 173
Şekil 2.115. Hasarlı durumu için üç katlı bina modellerine ait mod şekilleri.....174
Şekil 2.116. Onarılmış durumu için üç katlı binalarına ait mod şekilleri 176
Şekil 2.118. Hasarlı üç katlı bina için dinamik davranışından elde edilen çekme gerilmesi kontur diyagramları.....180
Şekil 2.119. Hasarlı üç katlı bina için dinamik davranışından elde edilen basınç gerilmesi kontur diyagramları.....181
Şekil 2.120. Onarılmış üç katlı bina için dinamik davranışından elde edilen çekme gerilmesi kontur diyagramları.....182
Şekil 2.121. Onarılmış üç katlı bina için dinamik davranışından elde edilen basınç gerilmesi kontur diyagramları.....183
Şekil 2.122. Güçlendirilmiş üç katlı bina için dinamik davranışından elde edilen çekme

gerilmesi kontur diyagramları 184
Şekil 2.123. Güçlendirilmiş üç katlı bina için dinamik davranışından elde edilen basınç gerilmesi kontur diyagramları 185
Şekil 2.124. Hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumlar için üç katlı dinamik davranışlardan elde edilen basınç ve çekme gerilme değerlerinin karşılaştırılması 188
Şekil 2.125. Hasarlı durum için dört zaman üç katlı delikli tuğla bina hasar limitleri ... 190
Şekil 2.126. Hasarlı durum için dört zaman üç katlı dolu briket bina hasar limitleri 191
Şekil 2.127. Hasarlı durum için dört zaman üç katlı gazbeton bina hasar limitleri 192
Şekil 2.128. Hasarlı durum için dört zaman üç katlı kilitli yığma modelin çekme hasar limitleri 192
Şekil 2.129. Onarılmış durum için üç katlı delikli tuğla model hasar limitleri 193
Şekil 2.130. Onarılmış durum için üç katlı dolu briket model hasar limitleri 194
Şekil 2.131. Onarılmış durum için üç katlı gazbeton model hasar limitleri 194
Şekil 2.132. Onarılmış durum için üç katlı kilitli yığma birim model hasar limitleri 195
Şekil 2.133. Güçlendirilmiş durum için farklı malzemeler üç katlı hasar limitleri 196
Şekil 2.134. Tek katlı binanın ilk üç doğal frekansının değişimi 197
Şekil 2.135. Hasarsız durumu için tek katlı modellerine ait mod şekilleri 198
Şekil 2.136. U1 doğrultusunda göreli kat ötelemeleri 199
Şekil 2.137. Hasarlı delikli tuğla modelin mod şekilleri 200
Şekil 2.139. Hasarlı gazbeton modelin mod şekilleri 201
Şekil 2.141. Delikli tuğla modelinin farklı zamanları için hasar kontur 203
Şekil 2.142. Gazbeton modelinin farklı zamanları için hasar kontur diyagramları 204
Şekil 2.143. Dolu briket modelinin farklı zamanları için hasar kontur diyagramları 205
Şekil 2.144. Kilitli yığma birim modelinin dört zaman için hasar diyagramları 206
Şekil 2.145. Farklı zamanlara sahip delikli tuğla duvarların hasar şekilleri 208
Şekil 2.146. Farklı zamanlara sahip dolu briket duvarların hasar şekilleri 209
Şekil 2.147. Farklı zamanlara sahip gazbeton duvarların hasar şekilleri 209
Şekil 2.148. Farklı zamanlara sahip kilitli yığma duvarların hasar şekilleri 210
Şekil 2.149. Çatlaksız deprem analiz için maksimum çekme gerilmesi değerleri 212
Şekil 2.150. Duvarlardaki çatlakların yeri 213
Şekil 2.151. Farklı açılarla sahip tuğla duvarların Northbridge deprem altında çatlak ilerlemesi ve hasar biçimleri 214
Şekil 2.152. Farklı açılarla sahip tuğla duvarların Erzincan deprem altında çatlak ilerlemesi ve hasar biçimleri 214

Şekil 2.153. Farklı açılarla sahip tuğla duvarların Parkfireld deprem altında hasar çatlak ilerlemesi ve hasar biçimleri 215
Şekil 2.154. Farklı açılarla sahip tuğla duvarların Cape Mendocino deprem altında hasar çatlak ilerlemesi ve hasar biçimleri 215
Şekil 2.155. Farklı açılarla sahip tuğla duvarların Düzce deprem altında hasar çatlak ilerlemesi ve hasar biçimleri 216

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. 1. Türkiye'deki bina sayısı ve bina yüzdesi (DİE, 2000) 3
Tablo 1.2. Sayısal yaklaşımların özeti 22
Tablo 1.3 Duvar numuneleri üzerinde yapılan deneysel testlerin özeti. 24
Tablo 1.4. Tuğlalarının birim hacim ağırlıkları ve basınç dayanımları (TS705, 1985). 36
Tablo 1.5. Beton blok ve briketlerin basınç dayanımı (Çöğürcü, 2007) 37
Tablo 1.6. Gazbeton sınıfları ve fiziksel özellikleri (TGÜB, 2014). 38
Tablo 1.7. Tekstil türleri (Raoof, 2017). 48
Tablo 2.1. Betonarme yapı elemanlarına atanan boyutlar ve kesit özellikleri 62
Tablo 2.2. Malzeme özellikleri (Türker ve Bayraktar, 2016) 64
Tablo 2.3. Deneysel ve sayısal olarak binaların frekansların karşılaştırılması 65
Tablo 2.4. Duvar numunelerinin adları 68
Tablo 2.5. Sayısal modelde kullanılan malzeme özellikleri (Fayala vb., 2016). 68
Tablo 2.6. CFRP Kompozitinin özellikleri 68
Tablo 2.7. Kırılma yükü ve sehimler sonuçların karşılaştırması 74
Tablo 2.8. Malzeme özellikleri (Samberou, 2021). 77
Tablo 2.9. Duvar için beton hasar plastisitesi modeli parametreleri (Lourenço, 1998). 77
Tablo 2.10. Yığma Tuğla-harç özellikleri (Lourenço, 1998). 78
Tablo 2.11. CFRP için malzeme özellikleri (BASF, 2005) 85
Tablo 2.12. Hasarsız durum için dolgu duvarlı modeline ait sayısal ve deneysel yöntemler ile elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması 86
Tablo 2.13. Hasarlı modeline ait sayısal ve deneysel yöntemler ile elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması 86
Tablo 2.14. Güçlendirilmesinden sonra sayısal olarak ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması 87
Tablo 2.15. Sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması 90
Tablo 2.16. Çalışmada kullanılan yer hareketi verileri 93
Tablo 2.17. Başlangıç malzemelerin mekanik özellikleri (Kaya, 2023) 94
Tablo 2.18. Başlangıç durum için frekans değerlerini sonuçlarının karşılaştırılması 95
Tablo 2.19. İyileştirme durum için frekans değerlerini sonuçları karşılaştırılması 96
Tablo 2.20. Yay uygulama sonrası frekans değerlerini sonuçlarının 97
Karşılaştırılması 97

Tablo 2.21. Az hasarlı durum için frekanslar sonuçlarının karşılaştırılması 98
Tablo 2.22. Ağır hasar durumu için frekanslar sonuçlarının karşılaştırılması 99
Tablo 2.23. Deneysel ve sayısal modellerin maksimum göreli kat ötelemesinın ..... oranları karşılaştırması 104
Tablo 2.24. Farklı depremler için öteleme oranı kontrolü 105
Tablo 2.25. Lagoa Comprida barajı için deneysel ve sayısal frekanslar sonuçlarının karşılaştırılması 116
Tablo 2.26. Koyna baraj modelinde kullanılan malzeme özellikleri..... (Chopra ve Chakrabarti, 1972). 124
Tablo 2.27. Koyna barajının doğal titreşim frekans değerleri.....126
Tablo 2.28. Döşeme, hatıl ve lento elemanları mekanik özellikleri (Coşğun, 2014). ...133
Tablo 2.29. Döşeme, hatıl ve lento elemanları için CDP model parametreleri (Coşğun, 2014). 133
Tablo 2.30. Analizlerinde kullanılan çelik özellikleri (Kayaalp, 2017). 134
Tablo 2.31. Deliki tuğla mekanik özelliklerinin özeti (Dauda vd. 2018). 134
Tablo 2.32. Deliki tuğla için CDP model parametreleri (Dauda vd. 2018). 134
Tablo 2.33. Gazbeton mekanik özelliklerinin özeti (Bayrak 2020).....135
Tablo 2.34. Gazbeton için CDP model parametreleri (Bayrak, 2020). 135
Tablo 2.35 . Dolu briket mekanik özelliklerinin özeti (Abdelmoneim vd. 2016).....135
Tablo 2.36. Dolu Briket için CDP model parametreleri (Abdelmoneim vd. 2016). 136
Tablo 2.37. Kilitli yığma birim için CDP model parametreleri (Kayaalp, 2017). 136
Tablo 2.38. Kilitli yığma birim mekanik özelliklerinin özeti (Kayaalp, 2017).....136
Tablo 2.39. TRM-kompozit için malzeme özelliklerini özeti (Alhaddad vd. 2012). 137
Tablo 2.40. XFEM bölgesi için farklı hasar parametreleri 139
Tablo 2.41. Farklı malzeme tipleri için kabul edilen emniyet gerilmeleri.....141
Tablo 2.42. Farklı malzeme modelleri hasarsız hali için gerilme analizinden elde edilen basınç ve çekme gerilme değerlerinin karşılaştırılması 144
Tablo 2.43. Hasarsız iki katlı bina doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması 146
Tablo 2.44. Hasarlı iki katlı bina frekans değerlerinin karşılaştırılması.....147
Tablo 2.45. Onarılmış iki katlı bina frekans değerlerinin karşılaştırılması.....148
Tablo 2.46. Güçlendirilmiş durumu için iki katlı bina frekans değerlerinin karşılaştırılması 150
Tablo 2.47. Farklı malzeme için iki katlı modeli rijitlik oranı sonuçlarının karşılaştırılması 151
Tablo 2.48. Hasar durumlarının doğrusal olmayan dinamik davranışlarından elde edilen çekme ve basınç gerilme değerlerinin karşılaştırılması 154

Tablo 2.49. Onarılmış durumlarının doğrusal olmayan dinamikm davranışlarından elde edilen çekme ve basınç gerilme değerlerinin karşılaştırılması. 157
Tablo 2.50. Güçlendirilmiş durumunun doğrusal olmayan dinamik davranışlarından elde edilen çekme ve basınç gerilmesi değerlerinin karşılaştırılması 159
Tablo 2.51. Hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumları için ki katlı modellerinde oluşan çekme gerilmesi değerlerinin çekme eminiyet ile karşılaştırılması 160
Tablo 2.52. Hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumları için üç katlı modellerinde oluşan basınç gerilmesi basınç eminiyet değerleri ile karşılaştırılması 160
Tablo 2.53. Hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumları doğrusal olmayan dinamik davranışlarından elde edilen yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılması.....162
Tablo 2.54. Farklı malzemeler kullanırak hasarlı, onarılmış ve güçlendirmiş durumlarına göre hasarlı üç katlı modelleri öteleme oranı kontrolü.....163
Tablo 2.55. Farklı malzeme modelleri hasarsız durumundan elde edilen basınç ve çekme gerilme değerlerinin karşılaştırılması.....172
Tablo 2.56. Üç katlı bina hasarsız durumu için frekans değerlerinin karşılaştırılması .173
Tablo 2.57. Hasarlı durumu için üç katlı olarak elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması 174
Tablo 2.58. Onarılmış durumu için üç katlı olarak elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması 176
Tablo 2.59. Güçlendirmiş durumu için ait üç katlı olarak elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması 177
Tablo 2.60. Delikli tuğla üç katlı bina rijitlik değişimi sonuçlar karşılaştırılması 178
Tablo 2.61. Dolu briket üç katlı bina rijitlik değişimi sonuçlarının karşılaştırılması....179
Tablo 2.62. Gazbeton üç katlı bina rijitlik değişimi sonuçlarının karşılaştırılması.....179
Tablo 2.63. Yğma birim üç katlı bina rijitlik değişimi sonuçlarının karşılaştırılması...179
Tablo 2.64. Hasarlı durumunun doğrusal olmayan dinamik davranışlarından elde edilen çekme ve basınç gerilmesi değerlerinin karşılaştırılması.....182
Tablo 2.65. Onarılmış durumunun doğrusal olmayan dinamik davranışlarından elde edilen çekme ve basınç gerilmesi değerlerinin karşılaştırılması.....184
Tablo 2.66. Güçlendirilmiş durum için doğrusal olmayan dinamik davranışlardan elde edilen çekme ve basınç gerilmesi değerlerinin karşılaştırılması 187
Tablo 2.67. Hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumlar için üç katlı modellerde oluşan çekme gerilme değerlerinin çekme eminiyet değerleri ile karşılaştırılması 187
Tablo 2.68. Hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumlar için üç katlı yığma modellerde oluşan basınç gerilme değerlerinin basınç eminiyet değerleri ile karşılaştırılması.....187
Tablo 2.69. Hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumları için üç katlı doğrusal olmayan dinamik davranışlarından elde edilen çekme ve basınç

gerilme değerlerinin karşılaştırılması 189
Tablo 2.70. Hasarlı durumuna göre üç katlı modelleri öteleme oranı kontrolü 189
Tablo 2.71. Onarılmış durumuna göre üç katlı modelleri öteleme oranı kontrolü 190
Tablo 2.72. Güçlendirilmiş durumuna göre üç katlı modelleri öteleme oranı kontrolü 190
Tablo 2.73. Analizler sonucu elde edilen frekans değerleri 197
Tablo 2.74. Delikli tuğla modelinin frekanslarının değerleri 200
Tablo 2.75. Dolu briket modelin frekanslarının değerleri 201
Tablo 2.76. Gazbeton modelin doğal frekanslarının değerleri 201
Tablo 2.78. Farklı modellerine ait hasarsız ve hasarlı durumlar için sayısal olarak elde edilen birinci frekansların karşılaştırılması 202
Tablo 2.79. Kırılma modu analizinde kullanılan depremler 213

SEMBOLLER DİZİNİ

f_d	: Yığmanın basınç dayanımı
E_d	: Yığmanın elastisite modülü
γd	: Yığmanın birim hacim ağırlığı
f_b	: Yığmanın basınç dayanımı
E	: Yığmanın elastisite modülü
f_m	: Harcın basınç dayanımı
E_m	: Harcın elastisite modülü
σ	: Gerilme
ε	: Şekildeğiştirme
ε_f	: Gerilmeye karşı gelen şekildeğiştirme
G_f	: Yığma malzemesinin kırılma enerjisi
α	: Kütle ile orantılı Rayleigh sönüm oranı
β	: Rijitlik ile orantılı Rayleigh sönüm oranı
ω_i ve ω_j	: i. ve j. modların açısal frekansı
ξ	: Sönüm oranı
A	: Duvar yatay en kesit alanı
σ_d	: Düşey basınç gerilmesi
τ_0	: Kayma dayanımı sabiti
μ	: Sürtünme katsayısı
dc, dt	: Basınç ve çekme için hasar parametreleri
dc, dt	: Basınç ve çekme için hasar parametreleri
CDP	: Concrete Damaged Plasticity
D-B	: Doğu-Batı
DEM	: Ayrık model yöntemi
ESM	: Eleman Silme Metodu
FRCM	: Fabric Reinforced Cementitious Matrix
FRP	: Fiber Reinforced Polymer (Lif Donatılı Polimer)

FTRM	: Kumaş Donatılı Çimentolu Matris
GÖ	: Göçme Öncesi Sınır Durumu
KH	: Kontrollü Hasar Sınır Durumu
N-S	: Kuzey-Güney
OMA	: Operasyonel mod analizini
PEER	: Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi
PGA	: Maksimum Yer İvmesi
SEY	: Sonlu eleman yöntemi
SH	: Sınırlı Hasar Sınır Durumu
S4R	: 4 Düğüm Noktalı Kabuk Eleman
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TRM	: Textile Reinforced Mortar (karbon Tekstil Donatılı Harç)
XFEM	: Genişletilmiş Sonlu Elemanlar
s	: Saniye

1. GENEL BİLGİLER

Donatısız yığma yapılar malzemeye kolay erişim, yığma yapı inşaatının kolaylığı ve yığma duvarın büyük düşey yükleri destekleme potansiyeline sahip olmasından Türkiye'deki tarihi ve mevcut yapıların önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Yığma yapılar çekme kuvvetlerine karşı düşük mukavemet sergilemesinden dolayı sismik kuvvetlere karşı savunmasız hale gelmektedir. Yığma binalarındaki tipik yapısal tasarım özellikleri de bu kırılganlığı artırmaktadır. Bu tipik özelliklerden bazıları temel ve döşeme yapıları, döşeme-duvar zayıf birleşim, plan veya cephelerdeki düzensizlikler ve duvar malzemesi türlerini içermektedir. Bir yığma yapının yanal yüklemeye direnme yeteneği duvar düzlemindeki kuvvetlere direnme yeteneğinden gelir. Bu nedenle yapının genel olarak deprem kuvvetlerine karşı mukavemeti uygulanan kuvvetlerin yapı boyunca etkin bir şekilde aktarılmasına bağlıdır. Öyle ki bunlar öncelikle yükleme düzlemindeki duvarlar tarafından karşılanır. Yığma malzemeler şiddetli deprem veya patlama anında hemen çatlayan düşük sünekliğe sahip kırılgan malzemelerdir (Parisi vd., 2016; Wong ve Karamanoğlu 1999). Yığma duvarların üretiminde kullanılan malzemeler duvarın davranışını etkileyeceğinden kullanılan malzemelerin özellikleri deneylerle belirlenmiştir.

Zengin vd. (2017), meydana gelen geçmiş depremlerde, yığma yapıların gösterdiği zayıf deprem performanslarını vurgulamıştır. Düşük ivmelere sahip depremlerde bile yığma binalarda çatlaklar ortaya çıkmıştır. Ek olarak çatlama farklı zemin oturmalarından da kaynaklanabilir. Harçla yapıştırılmış bloklardan oluşan duvarlardaki çatlaklar, yığma birim ve harç özelliklerine bağlı olarak blok çatlaması da görülebilmesine rağmen genellikle harç derzleri boyunca ortaya çıkar. Yığma yapıların sünekliğini ve dayanımını artırmak, dağılmasını önlemek için uzun yıllar boyunca çeşitli güçlendirme sistemleri geliştirilmiştir.

Blondet (2006) çalışmasında yığma malzemelerin düşük çekme dayanımı nedeniyle yüksek sismik kırılganlığa sahip olduğunu belirtmiştir. Bu durum, yapılar için istenmeyen mekanik özellikler kombinasyonu ile sonuçlanır. Kısaca toprak yapılar masiftir ve bu nedenle büyük atalet kuvvetleri çekerler ve bu güçlere karşı koyamazlar.

Bugün dünyanın çeşitli yerlerinde yığma yapılara rastlamak mümkündür (Şekil 1.1). Bu tip yapıların çoğunlukla bulunduğu bölgeleri Şekil 1.2'de en yüksek sismik aktiviteye sahip bölgeler olarak gösterilmiştir. Hem Şekil 1.1'de hem de Şekil 1.2'den sismik tehlike bölgelerinde önemli sayıda yığma binaların bulunduğu belirlenebilir (De Sensi, 2003).

Şekil 1. 1. Toprak yapıların konumu (De Sensi, 2003)

Şekil 1. 2. Sismik aktivitenin yüksek olduğu bölgeler (De Sensi, 2003)

Geleneksel yığma binalar, çoğunlukla düşük dirençleri ve kırılganlıkları sebebiyle depremlere karşı savunmasızdırlar. Bir deprem sırasında bu yapıların dayanamayacağı büyük sismik kuvvetler oluşur ve bu da yapıların çökmesine sebebiyet vereceği gibi hasarlara da yol açmaktadır (Blondet vd., 2011). İtalyadaki bulunan Amatrice şehrinde yığma binanın tamamen çökmesi gözlemlenmiştir (Şekil 1.3).

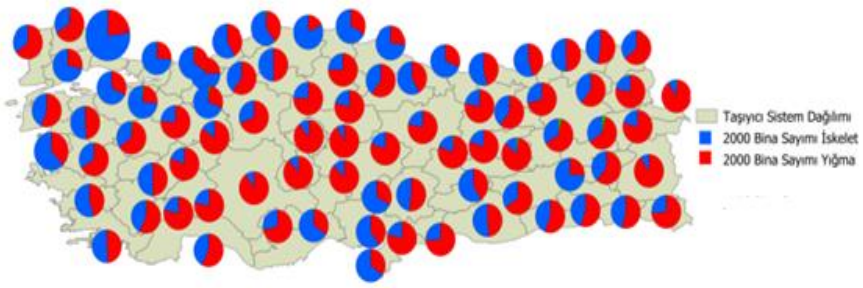
Şekil 1. 3. Yığma binalarnın İtalya'daki 2016 Amatrice depremi öncesi ve sonrası görünümü (URL-1, 2016)

Gelişmekte olan birçok ülkede konut yapımında en çok kullanılan malzeme bol ve düşük maliyetli bir malzeme olması nedeniyle yığma malzemelerdir. Yığma yapıların yapımı yeterli teknik denetim ve mühendislik olmadan gerçekleştirildiği için genellikle kalitesi düşüktür. Türkiye gibi sismik bölgelerde bir deprem meydana geldiğinde yığma binaların birçoğu yıkılarak büyük ekonomik ve can kayıplarına neden olur. Türkiye genelinde 2000 yılında yapılan bina sayımında ülke sınırları içerisinde toplam 7.838.675 bina tespit edilmiştir. Taşıyıcı sistem tiplerine göre yığma binalar %51.1'i kapsarken %48.4'ü iskelet (çerçeve) sistem olarak inşa edilmiştir. Tablo 1.1'de taşıyıcı sisteme göre Türkiye'deki yapı sayısı ve yüzdesi gösterilmektedir.

Tablo 1. 1. Türkiye'deki bina sayısı ve bina yüzdesi (DİE, 2000)

Yapı Türü	Yapı Sayısı	Bina Yüzdesi
Yığma	4.001.954	% 51.1
Iskelet	3.792.092	% 48.4
Prefabrik	23.311	% 0.3
Bilinmeyen	21.318	% 0.3
Toplam	7.838.675	% 100

İnşaatların dolgu maddesi cinslerine göre ise en fazla payı %59.6 ile tuğla almaktadır. Bunu sırasıyla %18 ile briket, %9.8 ile taş ve %7.9 ile kerpiç izlemiştir (DİE, 2000). Bu sayımlardan anlaşıldığı gibi deprem bölgelerinde önemli miktarda yığma yapı bulunmakta ve nüfusumuzun önemli bir kısmı bu yapılarda yaşamaktadır. Şekil 1.4'te Türkiye'deki yığma bina sayımının verileri verilmiştir.



Şekil 1.4. 2000 yılı bina sayımı verilerine göre yüzdeleri (Bekir, 2021)

1992 Erzincan depreminde şehirdeki 15000 binanın % 8`i yıkılmış veya ağır hasar görmüşlerdir (Sucuoğlu ve Erberik (1997)). En yüksek hasar yoğunluğu tipik olarak 4-6 katlı betonarme çerçeve binalarda olmuştur. 6120 adet tek katlı, 1700 adet iki katlı ve 180 adet üç katlı olarak dağıtılan 8000 adet donatısız yığma bina, tuğla ile inşa edilmiş 40 adet iki katlı ev kompleksi dışında genel olarak iyi performans göstermiştir. Kısmen veya tamamen göçme görülmüştür. Şekil 1.5'te Erzincan depremi sırasında iki katlı yığma binanın göçmesini göstermiştir.

Şekil 1.5.Yıkılmış tuğla bir ev (Williams vd., 1992)

Devlet İstatistik Enstitüsü tarafından 1989 yılına ait istatistiklerine göre Türkiye'de yığma yapıların %70'den fazla olması nedeniyle bu yapıların depreme karşı yeterli dayanıma sahip olmaları için donatıların dahil edilmesi olağandır (Uğuz, 2016). Hem Türkiye'de hem de dünyanın başka yerlerinde çeşitli araştırmalar yapılmıştır.

Yığma binaların yapısal davranışlarının tahmini ve değerlendirilmesi için son yıllarda çeşitli araçlar geliştirilmiştir. Yığma yapı karışık mekanik özellikleri ve tarihi yığma

binaların düzensiz geometrileri göz önüne alındığında sayısal araçlar ve sayısal yaklaşımlara göre olumlu bir şekilde geliştirilmiş ve tercih edilmiştir. Buradaki fikir eğer bir model yığma yapıların davranışını simüle edebiliyorsa bir binanın güvenliğini değerlendirerek beklenen etkilerle tepkiyi tahmin edebilir. Bu sayısal araçlar, hasar dağılımları ve zayıf yapısal tepkileri göz önüne alındığında esas olarak mevcut yığma binaların göçme öncesi tepkisinin analizine odaklanmıştır.

Yığma yapının mekanik özellikleri (doğrusal olmayan) ve binaların geometrisini karakterize eden derin karmaşıklıklar göz önüne alındığında yığma yapıların sayısal modellemesi hala zorunlu bir görevdir. Hasar görmüş ve düşük yöntemlerle inşa edilmiş yapıların onarım ve güçlendirilme gereksinimi dünyadaki birçok ülkede ve Türkiye'de yapı sektörlerinin üzerinde çalıştığı en önemli konulardan birisi haline gelmiştir. Yığma yapılarda meydana gelen hasarlar çeşitli yüklerden kaynaklanmış ve bu yapıların onarılması gerekmektedir. Kireç ve çimento harçları veya epoksi reçineler gibi yüksek sertliğe ve düşük deformasyona sahip malzemelerin kullanılması, çatlamış duvarların çekme dayanımını önemli ölçüde artırmaz. Güçlendirilmiş malzemeler kullanarak çatlamış duvarların dayanımında bir artışa neden olarak, çekme yoğunlaşmasının bölgelerinin azaltılmasına izin verilmektedir.

Bazı sünek özelliğe sahip önerilen onarım ve güçlendirme malzemeleri, mimari değerin korunmasını sağlamak için orijinal duvar malzemesi ile kolayca kaplanabilir. Bu nedenle hasarlı bir yapıya veya hasarsız yapının direncini artırmak için neler yapılabileceğinin araştırılması çok önemlidir. Dinamik davranış teorik ve/veya deneysel yöntemlerle belirlenebilir. Teorik yöntemler sayısal modelleme ve sonlu elemanlar (SE) analizi gerektirir. Bunlar mühendislere yer değiştirme, çekme, basınç, titreşim frekansı ve mod şekli gibi birçok yararlı bilgiler sağlar. Mevcut literatür; plastisite, kırılma mekaniği, plastik kırılma ve süreklilik hasarı teorilerine dayanan modelleri içerir.

Çatlak, yığma yapısal davranışında önemli bir rol oynar ve çatlak ilerlemesinin modellenmesi kırılma simülasyonunda büyük önem taşıyan bir problemdir. Mevcut çalışmada kuvvetli yer hareketi altında çeşitli malzeme duvar modellerinin dinamik davranışını karakterize etmek için Genişletilmiş Sonlu Elemanlar (XFEM), Beton Hasarlı Plastisite (CDP) ve Eleman Silme Metodu (ESM) olmak üzere üç yöntem kullanılmıştır. Binanın yığma duvarlarının sismik kırılma tepkisi ve hasar yayılma yolları araştırılmıştır.

1.1. Tezin Amacı ve İçeriği

Bu çalışmada yığma yapıların sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Ticari bir sonlu eleman yazılımı olan ABAQUS üzerinde farklı modellerin iki boyutlu ve üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. ABAQUS yazılımı aracılığıyla yığma yapıların sayısal modellemesine aşina olmak için bu tez, doğrusal ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirmek için gereken yaklaşımları ve kararları göstermek üzere tasarlanmış ayrıntılı modeller içermektedir. Bu farklı analizler, dinamik davranış ve hasar durumlarını belirlemek için yapılmıştır.

Bu çalışmanın yapılmasında dört ana amaç esas alınmıştır. Bu amaçlardan, ilki, oluşturulan modellerin doğrulanması amacıyla farklı sonlu eleman analiz tipi, gerilme analizi, modal analizi, dinamik analizi (CDP, XFEM ve ESM yöntemleri) yapılmış, literatürden alınan altı deneysel çalışma, üç boyutlu ölçekli bina, tek odalı model, baraj, kiriş ve duvar gibi modeller ABAQUS yazılımı kullanılarak doğrulanmıştır. İkicisi ise çeşitli durumlarla hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş yığma yapıların deprem altındaki dinamik davranışlarını nümerik olarak modellemektir. Aynı boyutlu bina geometrisine sahip iki katlı ve üç katlı yapılar modellenip dört farklı malzeme atamasıyla analiz edilmiş ve toplamda 40 farklı yığma yapı modeli incelenmiştir. Daha sonra yığma yapıların doğrusal olmayan dinamik tepkileri hasar ilerleme modeli ile birlikte açıklanmıştır. Son olarak XFEM yöntemini kullanarak farklı yığma bina malzemeleri üzerindeki başlangıç Üç farklı çatlak açısının etkileri incelenmiştir. Bunu gerçekleştirmek için beş deprem ivme kaydı dikkate alınmış ve bu ivmelerin etkisi analiz edilmiştir. Altmış sayısal simülasyon sonucuna dayalı olarak tipik kırılma süreçleri sunulmuştur.

Birinci bölüm yürütülen ilgili geçmiş literatürler hakkında sayısal bir inceleme sağlar. Donatısız yığma yapıların özellikleri, hasar modları, yığma yapı modelleme ve analiz teknikleri, doğrusal olmayan dinamik analizi ve ilgili bazı literatürler Türkiye bağlamında sunulmuştur. Tez çalışmasının amaç ve kapsamından bahsedilmektedir. İkinci bölümde yapılan çalışmalar dört kısma ayrılmıştır. İlk kısımda; çeşitli karşılaştırmalı analizler (Benchmark) sunulmaktadır. Yığma yapıların dinamik davranış ve kırılma analizleri modellemek için ABAQUS yazılımı kullanılarak farklı yaklaşıma dayalı sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. İkinci kısımda ABAQUS/Explicit sonlu eleman yazılımı kullanılarak bir dizi doğrusal olmayan sayısal simülasyon gerçekleştirilmiştir. Yapının farklı durumlardaki (hasar öncesi ve sonrası, onarılmış ve güçlendirilmiş) dinamik özellikleri

incelenmiştir. İkinci kısımda, üç farklı açı ile çatlak gelişimi ve beş farklı sismik uyarım ile analizler ele alınmıştır. Çok sayıda başlangıç çatlağı olan yığma duvarlar üzerinde Genişletilmiş sonlu elemanlar yöntemi (XFEM) kullanarak çatlak ilerlemesi sayısal tahmini incelenmiştir. Üçüncü bölüm, çalışmanın sonuçlarını özetler, vurgular ve gelecekteki çalışmalar için bazı öneriler sunmaktadır.

1.2. Yığma Yapılar Konusunda Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Bu kısımda konu ile ilgili daha önce gerçekleştirilen çalışmalara yer verilmektedir. Bu bağlamda yapılan çalışmalar üç kısma ayrılmıştır.

Bölüm 1.2.1'de hem sayısal hem de deneysel çalışmaları içeren yığma yapı analizi ve dinamik davranış ile ilgili mevcut yayınlanmış literatürler kapsamlı bir şekilde gözden geçirilmiş ve bu bölümde sunulmuştur.

Bölüm 1.2.2'de yığma yapıların tekstil donatılı harç malzemelerle güçlendirilmesi ele alan sayısal ve deneysel çalışmaları incelerken, bölüm 1.2.3'te, yığma yapıların XFEM metodu ve silme elemanı yöntemi analizi dinamik davranışını araştıran çalışmaları detaylandırmıştır.

1.2.1. Yığma Yapıların Dinamik Davranışlarının Belirlenmesi ile İlgili Çalışmalar

Bina türü yapıların dinamik davranışlarının belirlenmesi konusunda geçmişten günümüze pek çok çalışma yapılmıştır. Karmaşık analizlerin gerçekleştirilmesini kolaylaştıran bilgisayar teknolojilerinin gelişmesi bu alanda birçok çalışmanın ortaya konulmasını sağlamıştır. Bu kısımda son yıllarda gerçekleştirilen bina türü yapıların dinamik davranışlarının belirlenmesini farklı açılardan ele alan sayısal ve deneysel çalışmalara yer verilmektedir. Bu kapsamda bina türü yapılar üzerinde sayısal ve deneysel modal analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalara değinilmiştir. Yığma yapılar, yapım sürecinde önemli bir yere sahip olan en eski yapı türleridir. Günümüzde inşaatı geçmişe göre giderek azalsa da geçmişte inşa edilmiş birçok yığma yapı bulunmaktadır. Bu durum hem geçmişte hem de günümüzde yığma yapıların incelenmesi gerekliliğini ortaya çıkarmış, geçmişten günümüze yığma yapılar üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. Tezin kapsamına ilişkin literatür taraması, sayısal çalışmalar ve deneysel çalışmalar başlığı altında

sunulmuştur.

Tanrıkulu (1991), çalışmasında donatılı ve donatısız yığma yapılar için bir matematiksel model önermiştir. Bu önermede kat döşemelerini rijit diyafram olarak kabul etmiş, donatısız durumda olan duvarların eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler kullanarak beş örnek problemle kendi düzlemleri içinde kayma dayanımına sahip olduklarını gözlemlemiştir. Donatısız yığma yapıların sonlu elemanlarla modellenmesinde makro modellemeyi dikkate alan bir algoritma geliştirilmiştir. Kullanılan model için anizotropik bir kırılma yüzeyi tanımlanmıştır.

Berndt (1996), yığma duvarların kırılması için sonlu elemanlar analizi kullanan sayısal bir model sunmaktadır. Sonuçlar duvar biriminin yüksekliğinin ve harç kalınlığının, duvar modellerinin çekme dayanımını etkileyen çok önemli faktörler olduğunu göstermiştir. Çalışmaya göre en yüksek çekme gerilmeleri tuğla birimlerinin tuğla-harç ara yüzeyine yakın köşelerinde oluşmuştur.

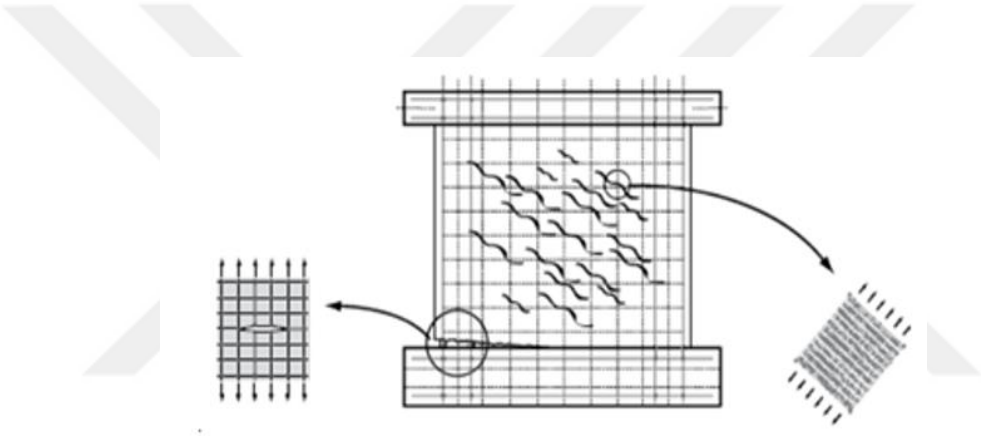
Lourenço (1996), yapmış olduğu doktora çalışmasında özellikle yığma yapılarda kullanılan modelleme teknikleri ile doğrusal olmayan elastik ötesi davranış hakkında bilgiler vermiştir. Yapmış olduğu doktora tezi birçok çalışmaya ve araştırmaya temel teşkil etmiştir. Çalışmasında mikro modelleme tekniğiyle yapılacak olan modellemelerde kayma (kesme), çatlama ve göçme mekanizmalarını birlikte kullanmak suretiyle bir matematiksel model geliştirmiştir. Makro modellemelerde ise malzemeyi orthotrop veya anizotrop kabul ederek Rankine ve Hill kriterlerini birleştirmek suretiyle bir elastiklik sınır yüzeyi elde etmiştir. Geliştirmiş olduğu modellerden elde ettiği bulguları literatürde yapılmış olan deneysel çalışma bulgularıyla karşılaştırmıştır.

Tomazeviç (1999), çalışmasında yığma duvarların deprem davranışının deneysel olarak araştırılması ve modellenmesi üzerine yapılmıştır. Benzer geometri ve deprem yükleri altında bulunan duvar elemanı üzerinde deneysel çalışma yapılmıştır. Şekil ve hızın deney sonuçları üzerinde etkili olduğu küçük ölçekli yığma yapı modelleri için basit deprem sayısal model yapılabileceği belirtilmiştir. Ancak ölçek etkisi zor bir problemin çözümünü temsil etse de yapı davranışını belirlemek için daha fazla çalışma yapılması gerektiği belirtilmiştir.

Gençer (2000), yığma birim olarak bimsblok kullanarak tek katlı ve tek açıklıklı bir yığma yapı inşa etmiş ve bu yapı üzerinde sarsma tablası deneyini uygulamıştır. Deney sonucunda elde ettiği yapı kesme dayanım değerlerini daha önce yapılmış olan çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırmıştır. Çalışmada, literatürde düşey delik oranı farklı tuğlalar ve farklı harçlar kullanılarak inşa edilmiş yığma yapı deneylerinden elde edilen

sonuçlar ile karşılaştırıldığında, bimsblok ile inşa edilen yığma yapının kesme dayanımının ortalama değerlerde kaldığı sonucuna varılmıştır.

Feenstra vd. (2001), yığma malzemeyi kırılma mekaniği ve sürekli ortam mekaniğine göre modellemişlerdir. Ayrık yaklaşım olarak bilinen yaklaşım belirli bölgelerde (harç derzleri vb.) hasar varsayar ve Şekil 1.6a'da verilmiştir. Yayılı çatlak modeli ise süreklilik boyunca çatlak ve hasarı tahmin etmiştir (Şekil 1.6b). Beton yapıların hasar değerlendirmesi temel olarak yapısal davranışın uygun şekilde modellenmesine bağlıdır. Duvar ve beton basınç gerilmesine nispeten iyi direnç göstermiştir. Ancak yalnızca plastik bölgedeki gerilmenin hızlı bir şekilde azalmasıyla (gerilme-yumuşama) düşük çekme gerilmelerine dayanabilmiştir.



(a) Ayrık yaklaşım model (b) Yayılı çatlak model

Şekil 1.6. Beton çatlak modelleri (Feenstra vd., 2001)

Giordano vd. (2002), yığma yapıların analizinde farklı nümerik tekniklerin sonlu elemanlar yöntemi, süreksiz sonlu elemanlar yöntemi ve ayrık eleman modelleme kullanılarak uygulanabilirliğini araştırmıştır. Her modelin belirli sınırlamalarına rağmen her üç yöntemin de mümkün olduğu sonucuna ulaşmıştır. Bir dereceye kadar test edilen numunelerin genel davranışını doğru bir şekilde kavramak, böylece bunların duvar yığma elemanlarının çalışmasında etkili bir şekilde kullanılabileceğini kanıtlamak için çalışmalar yapılmıştır.

Kappos vd. (2002), yığma yapıların pratik olarak analizinde kullanılan modellerin göreli doğruluğunu belirlemek üzere yapılan çalışmada eşdeğer çerçeve modelinin hangi şart ve durumlarda kullanılabileceği belirtmişlerdir. Linear elastik sonlu eleman analizleri kullanılarak yığma yapılar üç boyutlu modellerin davranışı incelenmiştir. Daha sonra bu yapılar çeşitli rijitlik şartları altında eşdeğer çerçeve modeli ile analiz edilmiştir. Sonlu

elemanlar ve eşdeğer çerçeve yöntemi ile yapılan analiz sonuçları pushover analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Aliaari ve Memari (2004), hasarlı yığma dolgu duvarların iyileştirilmesi için bir yöntem önermişlerdir. Çalışmanın amacı gelecek hasarların en az seviyeye indirilmesidir. Yapılan çalışmada iki düşey ve bir yatay çelik elemanla çelik çerçeve sistemi oluşturularak yığma yapının orta şiddetteki deprem hasarına karşı dayanımı araştırılmıştır. Farklı doğrusal olmayan ve iki boyutlu modellerin analizi için ANSYS yazılımı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tek katlı, iki katlı ve üç katlı modellerin güçlendirilmeden ve güçlendirildikten sonra performansı sayısal olarak araştırılmıştır. Bu yöntem ile duvarların dayanımına katkı sağlamıştır.

Galaso vd. (2004), farklı yığma yapılarının sismik performansını değerlendirmişlerdir. Bunun için tamamen üç boyutlu yapı modellemek amacıyla makro tekniğini kullanmıştır. Bu modelleme stratejisi, sınırlı hesaplama yükleri gerektiren doğrusal olmayan statik ve dinamik analiz prosedürleri ile TREMURI programında uygulanmıştır. Modellerden elde edilen sonuçlar ile deneysel araştırmalardan elde edilen mevcut verilerle iyi uyum sağlanmıştır.

Kwak ve Kim (2004), Sonlu elemanlar yöntemi, doğrusal olmayan analizler dahil olmak üzere üç boyutlu yapıların analizi için kullanılan bir araç haline gelmiştir. Bu yöntem, analizin yerel davranışını (örneğin çatlak modelleme, malzeme gerilmeleri ve deformasyonlar) yakalamanın yanı sıra elemanın global davranışını da (kuvvet ve yer değiştirme gibi) gözlemleyebilir. Bu gözlemlere dayanarak, birçok araştırmacı sonlu elemanlar yöntemini deneysel ölçümleri simüle etmek ve yapıların gerçek dünya koşullarındaki davranışını anlamak için kullanmıştır.

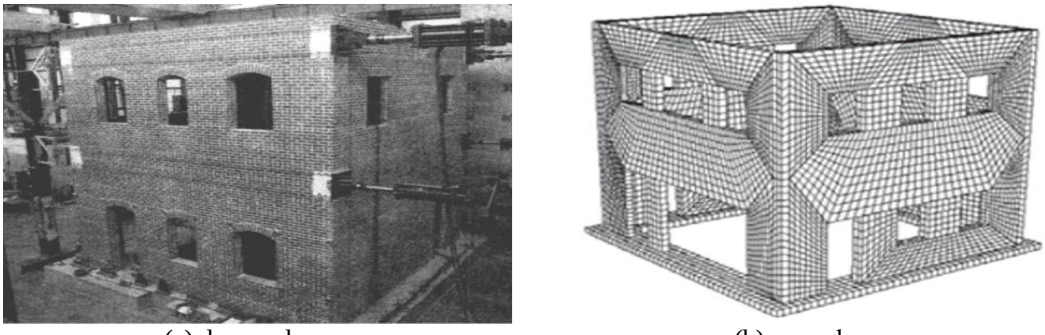
Karaşın ve Karaesmen (2005), çalışmasında 2003 Bingöl depreminde hasar gören yapıları incelemiş ve en çok hasar gören yapı tipinin yığma yapılar olduğunu tespit etmişlerdir. Söz konusu deprem sırasında yığma yapılarda oluşan hasarların nedenleri olarak; yatay ve düşey hatıl eksikliğini, duvar-köşe bağlantılarının iyi yapılmamış olmasını göstermiştir. Ayrıca köşe bağlantıları iri taşlarla oluşturulmuş yapıların depremde daha az hasar gördüğünü tespit etmiştir. Çatlaklı yığma yapılar, depremde hasar görme riski yüksek yığma yapılar olarak tanımlanmış ve bu yapıların güçlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Kuran (2006) tarafından yürütülen çalışmada, düşey delikli tuğla kullanılarak inşa edilen tek katlı bir yığma yapı sarsma tablasında test edilerek önce hasara uğratılmış, ardından hasarlı yapının farklı şekillerde düzenlenen çelik şeritlerle güçlendirilerek tekrar

test edilmiştir. Deneyden elde edilen sonuçlar kullanılarak, çelik şeritlerle güçlendirmenin yığma yapının dayanım, rijitlik, sönüm oranı ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Pallares vd. (2006), çalışmalarında 30m yüksekliğindeki bir endüstriyel yığma bacanın deprem yükleri altındaki davranışını sayısal olarak belirlemişlerdir. Bacaya ait üç boyutlu sonlu eleman modeli makro modelleme yöntemiyle oluşturulmuş ve beş farklı yapay deprem kaydı altında analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada söz konusu depremler etkisi altında yapının maksimum yerdeğiştirmesi, gerilme dağılımları ve göçme modları araştırılmıştır.

Yi vd. (2006), ABD İnşaat Mühendisliği Araştırma Laboratuvarında test edilen tam ölçekli iki katlı donatısız yığma yapının çeşitli elastik ve elastik olmayan sayısal yaklaşımlarını analiz etmişlerdir. Yığma bina tepkisini araştırmak için birkaç iyileştirme uygulamasından önce ve sonra esnek ahşap diyaframlara sahip tam ölçekli, iki katlı bir yığma binayı test etmiştir. Bina, birinci ve ikinci kat yüksekliklerine takılan hidrolik aktüatörler kullanılarak artan yer değiştirme genlik seviyelerinde psödostatik olarak yüklenmiştir (Şekil 1.7a). Test edilen donatısız yığma binanın doğrusal olmayan davranışını analiz etmek için bir üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman modeli, duvarın devrilmesini temsil etmeye çalışan temas yüzeyleri aracılığıyla aralarında etkileşime giren katı blokların bir kombinasyonuna sahiptir. Bu sonlu eleman modeli, tuğla ve harç arasındaki arayüzdeki olası her çatlağı ele almayı amaçlamıştır (Şekil 1.7b). Bu nedenle potansiyel makro çatlaklar önceden tanımlanmış ve temas yüzeyleri olarak yerleştirilmiştir..

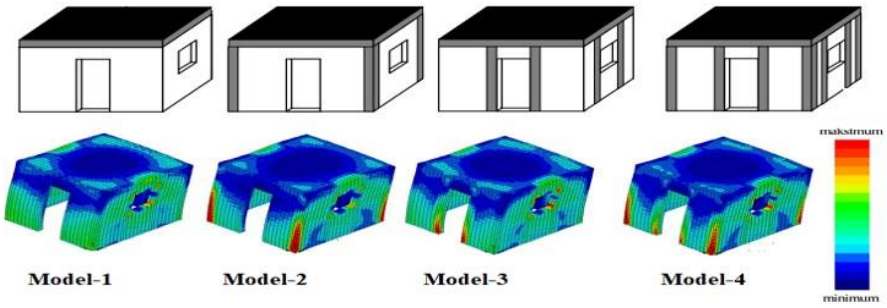


(a) deneysel (b) sayısal

Şekil 1.7. İki katlı yığma bina (Yi, 2006)

Ural ve Doğangün (2007), üçü düşey betonarme hatıllarla desteklenen dört yığma tek

katlı binanın sismik davranışını basitleştirmiş ve mikro modelleme tekniğini kullanarak incelemişlerdir. LUSAS yazılım ile binaları modellemiş, her model için lineer üç farklı analiz yapılmış ve sonuçları elde edilmiştir (Şekil 1.8). Analizden elde edilen sonuçlara göre uzun hatıl elemanına sahip binada en az yer değiştirme değerleri meydana gelmiştir. Düşey hatıl elemanların yığma binaların davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Modellere ait gerilme dağılımı aşağıdaki deforme olmuş şekiller üzerinde görülmüştür.



Şekil 1.8. Lineer elastik analiz altında gerilme dağılımının şekilleri

Bayraktar vd. (2007), 1992 Erzincan depremi kullanılarak yığma yapıların dinamik davranışını sonlu elemanlar modeli ile incelemişlerdir. Bunun için bodrum, zemin kat ve çatı katından oluşan yığma bir yapı üzerinde incelemeler yapılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki farklılıkları en aza indirmek için malzeme özelliklerine dayalı sayısal modelde iyileştirmeler yapılmıştır. İyileştirme öncesi ve sonrası sonlu elemanlar modellerin dinamik davranışı belirlenmiştir.

Çöğürcü (2007), düzlem dışı yüklenen yığma duvarların yatay derzlerinde epoksi reçineli FRP kullanımının duvarlarda oluşan çatlaklara etkisini sayısal ve deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmada harman tuğlası ile aynı geometri ve malzeme özelliğine sahip iki ayrı model duvar üretilmiştir. İlk duvar deprem etkisini düzlem dışı çevrimsel yatay yük etkisi altında test edilmiş ve hasar davranışı incelenmiştir. İkinci duvarın ise yatay derzleri epoksili FRP ile takviye edilmiş ve aynı yükleme protokolü altında deneye tabi tutulmuştur. Çalışma sonunda, yığma duvarlarında gerçekleşen kırılmalara benzeyen çatlaklar oluşturarak kırıldığı ve hasar türünün gevrek olduğu tespit edilmiştir.

Aköz (2008), tarafından yapılan çalışmada, yığma yapıların onarımı ve güçlendirme yöntemleri ele alınmıştır. Tarihi yapılarda oluşan hasar biçimleri, zemin ve malzeme

özelliklerini belirleme yöntemleri anlatılmıştır. Tarihi yapıların onarımında ve güçlendirilmesinde uygulanacak yöntemleri belirlemek için dikkat edilmesi gereken hususlar anlatılmıştır. Örnek olarak İstanbul'da bulunan tarihi Murat Paşa Camii'nin üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş, sayısal analizlerin sonucu değerlendirilmiştir.

Son elli yılda donatısız yığma binalar, Türkiye'de orta şiddette depremlerde bile önemli hasar görmüştür. Buna iki örnek; mühendislik yaklaşımı olmadan yığma yapıların çökmesi nedeniyle çok sayıda insanın hayatını kaybettiği 1995 Dinar ve 2010 Elazığ depremleridir. Bu tür inşaatların sismik hasar görebilirliklerini artıran birçok faktör ve parametre vardır. Bu faktör ve parametrelerden bazıları, yığma duvarların düzlem içi davraışı üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olduğu söylenebilir (Erberik (2008)).

Marques ve Lourenço (2008), AndilWall ve 3Muri yazılım çözümleri arasında karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. İki yığma binanın sismik davranışı, makro elemanlar ve itme analizi kullanılarak tahmin edilmiştir. Sonuçlar, yapıların depremlere etkisinin gerçekçi tahminlerini sağlayan makro elemanların iyi performansını göstermiştir.

Jäger vd. (2009), hem ANSYS hem de LS-DYNA yazılımlarında yığma duvar modellenmelerinin özelliklerini ve zorluklarını araştırmışlardır. Çalışmada, sonlu eleman yönteminde yapılan büyük ilerlemelere rağmen yığma yapı modelleri sayısal olarak modellemenin zorluklarını vurgulamıştır. Mezo modelleme, yığma birimleri ve harç için ayrı parçalar içeren yığma birimleri heterojen olarak kabul ederken makro modelleme büyük ölçekli yapılarda kullanılmış ve yığma birimleri ve harcı homojen olarak temsil etmiştir. Makro modelleme büyük ölçekli yapılar için daha uygundur. Çalışmada, sonlu eleman metodu kullanarak duvar modellemenin ana zorluklarından birinin göçme sırasındaki büyük deformasyon sorunları olduğu belirtilmiştir.

Mendes ve Lourenço (2009), yığma yapıların sayısal simülasyonu için farklı analiz türleri önermişlerdir. Özellikle sonlu elemanlar analizi alanında doğru malzeme tanımlamasını ve yapısal modelleri birleştiren ileri analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Yığma binaların dinamik davranışının daha iyi anlaşılmasına yardımcı olan sağlam doğrusal olmayan modeller sağlayarak tamamlayıcı sonlu eleman analizi geliştirilmiştir.

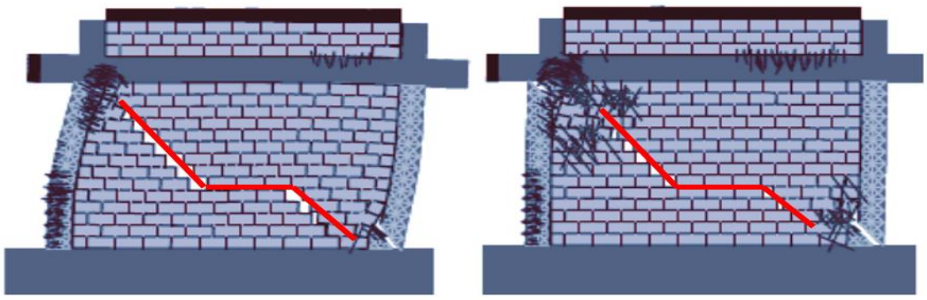
Sayın (2009), yığma yapıların lineer olamayan statik ve dinamik analiz başlıklı tez çalışmasında, duvar malzemesi için şekil değiştirme yumuşamasını göz önüne alan yayılı çatlak modelini kullanmıştır. Bu amaçla Matlab dilinde program yazılmıştır. Sayısal uygulamada pencere boşluğuna sahip bir duvarın lineer olmayan statik ve dinamik analizi yapılmıştır.

Ural (2009), yığma yapıların hesaplamalarına ilişkin modelleme teknikleri ortaya koymuştur. Taşıyıcı duvar davranışlarını etkileyen parametrelerin belirlenmesi ve bu parametrelerin davranışa etkisinin yapılmıştır. İki adet sonlu elemanlar programı LUSAS ve DİANA programı yardımıyla çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yığma duvar dayanımları ve parametreler yapısal modeller yardımıyla irdelenmiştir. Ek bölümde ise sonlu elemanlar programının açık kaynak kodları ve kullanımı verilmiştir.

Bayraktar vd., (2010), çalışmada inşaatın çeşitli aşamalarında betonarme binaların dinamik karakterstiklerini tahmin etmek için operasyonel modal analiz yöntemi kullanmışlardır. Her bir yapı için tamamlanmış betonarme, tuğlalı ve karkas binalar üzerinde doğal frekansları ve mod şekilleri ölçülmüştür. Bu araştırmanın amaçlarından biri binaların dinamik karakteristiklerinin farklı inşa aşamalarında nasıl değiştiğini göstermektir. Binaların ilk iki frekans değerinin birbirine yakın olduğu, üçüncü frekansın ise birinci frekans değerinin kabaca 1,75 katı olduğu belirlenmiştir.

Arıcan (2010), yığma binaların deprem davranışını belirlemeye yönelik tez çalışmasında farklı plan ve geometriye sahip 7 adet yığma yapıya ait 42 modeli, 20 farklı özelliğe sahip deprem verileriyle analiz etmiştir. Sayısal analizleri için SAP2000 programı ile zaman tanım alanında dinamik analiz yöntemiyle gerçekleştirmiştir. Yapılar solid eleman olarak tek katlı, iki katlı ve üç katlı modellenmiş ve yer değiştirme, taban kesme kuvvetine ait gerilme değerleri elde edilmiştir. Sonuç olarak tuğla malzemeli yığma yapıların doğal taş malzemeli yapılara göre daha fazla yer değiştirme ve taban kesme kuvveti olduğu belirtilmiştir. Ayrıca duvar kalınlığı, uzunluğu ve boşluk oranlarının yer değiştirmede etkili olduğu, en fazla yer değiştirmelerin boşluk kenarlarında meydana geldiği belirtilmiştir.

Stavridis ve Shing (2010), sayısal modellerin doğrusal olmayan davranışını deneysel sonuçlar ile iyi bir şekilde eşleştirmiştir. Önerilen modelleme şeması, kırılma mekanizmalarını yakalamıştır (Şekil 1.9). Önerilen modelleme şeması, duvarın tepesinde belirgin bir diyagonal kesme çatlağı tarafından takip edilen dolgu duvarlarında merdiven basamaklı diyagonal bir çatlak oluşturmuştur. Beton, tuğla ve harç derz için elastisite modülü, poisson oranı gibi mekanik özellikleri sayısal modelden elde edilen sonuçların en etkili parametreler olduğu sonucuna varmıştır.



Şekil 1.9. Yığma dolgu duvarın sayısal göçme modeli (Stavridis ve Shing, 2010)

Blondet vd. (2011), yaklaşık 40 yıldır yığma binaların deprem anında davranışları araştırılmakta ve önemli sonuçlar elde etmiştir. Bu incelemelerin amacı yığma yapıların çatlama modelini ve hasar mekanizmalarını belirlemektir. Elde edilen bilgiler, sakinlerinin hayatlarını koruyabilecek depreme dayanıklı yapılar elde eden güçlendirmelerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Yığma birim ve donatıların birleşmesi duvarların esnek olmayan kısımlarında yeterli davranışa izin verdiği görülmüştür.

Demirel (2011), yaptığı çalışmalarda doğrusal olmayan iki katlı yığma yapı modeli oluşturmuştur. Yığma duvar elemanlarının doğrusal olmayan yatay yük-yer değiştirme eğrileri, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yığılı plastik mafsallar olarak tanımlanmıştır. Her duvar elemanı alt ucunda tanımlanan mafsallar, yığma duvarlarının doğrusal olmayan tepkisinde belirleyici olan kesmeye bağlı plastik davranış için kullanılmıştır. Önerilen eşdeğer yığma yapı modeli tam boyutlu bir model üzerinde gerçekleştirilen döngüsel itme testinin statik itme analizi ve yığma binada gerçekleştirilen dinamik sarsma tablası testinin doğrusal olmayan zaman alanı hesaplaması ile karşılaştırılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasında tatmin edici bir uyum gözlendiği belirtilmiştir.

Milani ve Venturini (2011), mevcut yığma kiliselerin kırılganlık eğrilerinin değerlendirilmesi için sonlu eleman analiz yazılımı önermişlerdir. İlk aşamada yığma blokların sonsuz rijit ve dayanıma sahip olduğu, bloklar arasındaki harç derzlerinin kalınlığının sıfır kabul edildiği bir yığma hacim üzerinde basitleştirilmiş kinematik analiz yöntemleri kullanılarak homojenize edilmiş yığma duvar kuvvetleri elde edilmiştir. İkinci aşamada bu kuvvetler düzlemsel bir alan ve hacim üzerinde kinematik sonlu eleman yazılımı ile yapısal bir seviyede uygulanmıştır. Göçme davranışı ve binaların dayanımı simülasyonları ile değerlendirilmiştir.

Bilgin ve Korini (2012), Arnavutluk'un yapı stoğunu oluşturan üç yığma binanın deprem kapasitelerini doğrusal olmayan davranışları göz önünde bulundurarak nümerik

olarak değerlendirmişlerdir. Araştırılan binaların üç boyutlu modelleri SAP2000 sonlu eleman yazılımı ile modellenmiş, x ve y yönlerinde pushover analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bina yüksekliği boyunca duvar kalınlığının ani değişmesi ile göreli kat ötelemeleri fazlaca artmış ve yetersiz kayma mukavemetleri görülmüştür. Kapı ve pencere açıklıklarının daha yoğun olduğu yönde yer değiştirme kapasitesinin diğer yönlün yarısından daha az olduğu görülmüştür. Geçmiş depremlerde binalarda gözlenen hasarlar elde edilen sonuçlarla desteklemiştir. Performans değerlendirmesine göre modellenen üç örnek binadan biri dışında diğer iki binanın beklenen performans seviyesini karşılamadığı görülmüştür.

Bağcı vd. (2012), zemindeki oturma problemi sebebiyle yığma birimlerinde çatlaklar meydana gelmiş İzmir ili Kordon ilçesinde bulunan iki katlı tarihi bir yapının muhtemel deprem yükleri altında davranışını incelemişlerdir. Çalışmada SAP2000 sonlu eleman yazılımı ile yapı modellemesi yapılmış, düzlem gerilmesi analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda bodrum kat yığma elemanlarında Türk Deprem Yönetmeliği 2007'de belirtilen limit gerilmelerin aşıldığı tespit edilmiş ve söz konusu yığma duvarlar kompozit malzemeler (FRP) ile güçlendirilmiştir. FRP ile güçlendirilmiş yığma elemanların sismik davranışının Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007)'deki gerekliliklerini karşıladığı görülmüştür.

Kwiecień ve Kuboń (2012), çeşitli dinamik uyarımlar kullanılarak yerinde test edilen yığma bina üzerinde dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Hasarsız, hasarlı ve onarılmış yığma modelin dinamik tepkisinin nasıl değiştiğini belirlenmiştir. İncelenen yenilikçi onarım yöntemi, Esnek Bağlantı Yöntemi olarak adlandırılmıştır. Yığma modunun üç aşaması için gerçekleştirilen dinamik testlerin sonuçlarına dayanarak, sonlu eleman modellerinin ABAQUS ve MSC MARC sistemi olmak üzere iki yazılım türü gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz, uygulanan onarım yönteminin doğal frekanslar üzerindeki etkisinin yanı sıra sayısal modelin analiz edilen varyantlarındaki gerilim ve ivme değerlerinin belirlenmesine yardımcı olmuştur.

Tarque vd. (2012), kerpiç duvarların düzlem içi sismik kapasitesini belirlemeye yönelik teorik analizler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında daha önce Blondet vd. (2006) elde edilen sonuçlarındaki malzeme özelliklerini kullanmış ve deneysel verilerle karşılaştırmıştır. Makro modelleme tekniği kullanılarak iki boyutlu duvarların analizinde, çatlakların bölgesel oluştuğu varsayımını dikkate alan malzeme modelleri seçilmiştir.

MİDAS 2009 yazılımında toplam gerilme malzeme modeli ve ABAQUS yazılımında

Beton Hasar Plastisite (BHP) malzeme modeli kullanılmıştır. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde iki modelleme yaklaşımının birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca deneysel sonuçlarla uyum yakalandığı belirtilerek bu modelleme yaklaşımlarının kerpiç duvarlarda uygulanabilir olduğu savunulmuştur. Çalışma sonunda, özellikle de maksimum yüke ulaşıldıktan sonra, duvarların çatlak başlangıcı ve çatlak ilerlemesi dahil olmak üzere, çekme dayanımının davranışta temel rol oynadığı vurgulamıştır.

Durutürk (2012) tarafından yapılan çalışmada, yığma yapılarda kullanılan malzeme özellikleri ve taşıyıcı elemanları hakkında bilgi verilmiştir. Yığma yapıların modellenmesinde kullanılan yöntemler anlatılmıştır. Isparta ilinin Yalvaç ilçesinde bulunan Hamidiye Camii'nin rölövesi esas alınarak SAP2000 programı ile statik ve dinamik analizleri yapılmıştır. Taşıyıcı sistem davranışı belirlenerek yorumlanmıştır.

Kuruşçu (2012), yığma duvar ve temellerde doğrusal olmayan modelleme üzerine yaptığı tezde Drucker-Prager kırılma kriterinin gerektirdiği malzeme parametreleri için ilişkiler geliştirilmiş ve duvar davranışının modellenmesinde kullanılmıştır. Bu modeller kullanılarak altı farklı çalışmadan 51 duvar ayrıntılı olarak analiz edilmiş ve deneysel davranışları başarıyla tahmin edilmiştir. Makro modelleme yaklaşımı ile duvarlarda doğrusal olmayan malzeme davranışına dayalı stabilite problemleri de araştırılmıştır. Bu bilgiler neticesinde, daha önce çözülmüş farklı mesnetlenmeye sahip duvar durumuları temel duvar etkileşimi dikkate alınarak incelenmiştir.

Çarhoğlu ve Korkmaz (2013), sonlu eleman yöntemini kullanarak yığma bir binanın deprem altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Yapı modellemeleri SAP2000 yazılımı ile yapılmış, yirmi adet deprem ivme kaydı kullanılarak zaman tanım alanında dinamik analizler yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre gerilme dağılımları incelendiğinde en büyük gerilme değerinde en büyük yer değiştirmenin elde edildiği depremde olduğu, gerilmelerin genellikle kapı ve pencere boşluklarında yoğunlaştığı ve kapı ile pencere bulunmayan kısımlarda ise daha çok diyagonal çatlakların oluştuğu görülmüştür.

Votsis vd. (2013), Kıbrıs'ın Famagusta kentindeki Lala Mustafa Paşa Camisi için sayısal bir hasar değerlendirmesinin sonuçlarını sunmuştur. Değerlendirme için saha testlerinden kalibre edilmiş sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Çalışmanın amacı, farklı konumlarda oluşan hasarın frekanslardaki değişikliklerle belirlenip belirlenemeyeceğini kontrol etmiştir. Doğal titreşim frekanslarda endişe verici değişikliklere neden olmak için yüksek düzeyde hasar gerektiği belirlenmiştir.

Bui vd. (2014), ayrık model yöntemi (DEM) kullanarak yığma yapıların dinamik özelliklerini tanımlayabilecek bir teknik önermişlerdir. Önerilen yaklaşım aynı zamanda ayrık model kullanarak yığma yapıların hasar değerlendirmesinin yolunu açmıştır.

Chamaky'nin (2014) çalışmasında, yığma yapılarda hasar türlerinden ve hasara sebep olan etkenlerden bahsedilmiştir. Değişik tiplerdeki yığma yapıların her biri için kendisine uygun güçlendirme teknikleri ele alınmıştır. Çalışmada deprem ve güçlendirme ile alakalı açıklamalar yapılmış güçlendirme teknikleri hakkında bilgi verilmiştir. Güçlendirme projesinin hazırlanacağı SAP2000 Programının çalışma prensipleri anlatılmıştır. Daha sonra üç yapı çalışma üzerinde değerlendirme yapılmış ve birbirleriyle karşılaştırmıştır.

Korkmaz vd. (2014) çalışma kapsamında gaz beton, pomza, tuğla ve taş malzemeleri kullanılarak dört faklı malzeme döşeme olmayan yapıların deprem davranışlarının belirlenmesi amaçlamışlardır. Bu amaçla örnek mevcut bir yığma yapı ele alınarak bu yapının SAP2000 programı ile dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapının dinamik analizleri sırasında yirmi farklı ivme kaydı kullanılarak zaman tanım alanında dinamik analiz yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarıyla yığma yapıların deprem etkisi altındaki davranışları değerlendirilmiştir.

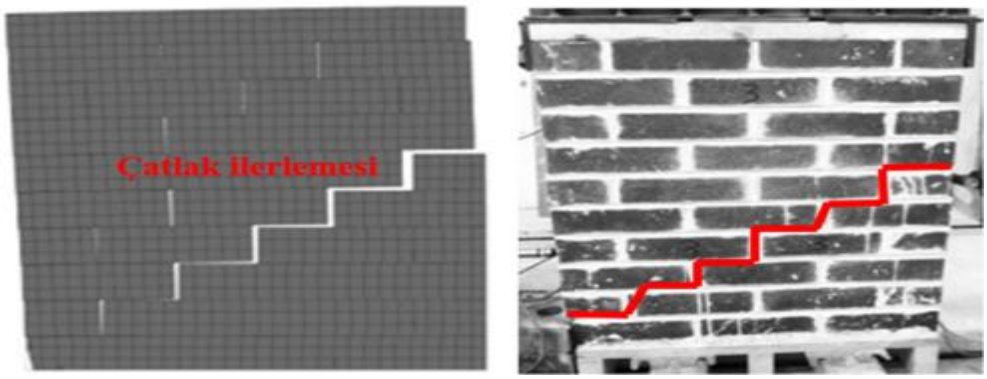
Lourenço vd. (2014), Bu çalışmada, kutu davranışı olmayan, donatısız üç yığma yapının sismik performansı değerlendirilmiştir. Farklı yapısal analiz yöntemleri ele alınmış ve itme yöntemleri ile doğrusal olmayan dinamik analiz arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Deneylerin sonuçları, hasarın lento çatlakların ve üst katın duvar kısımlarındaki yatay çatlakların özellikle belirgin olduğu cephelerde yoğunlaştığını göstermiştir. Doğrusal olmayan dinamik analiz, deneysel gözlemlerle tam olarak uyumlu bulunmamıştır. Yapılan itme analizleri, gözlemlenen tüm mekanizmaları doğru bir şekilde simüle edememiş, yani üst katın ayaklarının (piers) düzlem içi ve düzlem dışı sallanmasını tam olarak yansıtamamıştır.

Mendola vd. (2014), taşıyıcı sistemi donatılı ve donatısız yığma duvarların düzlem dışı davranışını incelemek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Sayısal sonlu eleman modellemesi kullanılarak deneysel bir araştırma yapılmıştır. Tuğla-harç arayüzü üzerindeki etkiyi araştırmak için parametrik bir analiz yapılmıştır. Yığma duvarlar için sayısal modeller, yatay derzlerinin deformasyonunu simüle edebilmiştir. Yığma duvarların gerçek davranışını elde etmek için elastisite modülününün azaltması gerektiğinden bahsedilmiştir.

Ravi vd. (2014), homojen olmayan malzeme özellikleri nedeniyle yığma yapı elemanlarının analiz ve değerlendirmesinin karışık olduğunu belirtmiştir. Bu amaçla basınç

dayanımı, elastisite modülü ve gerilme-şekil değiştirme özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Sayısal çalışmalar için ANSYS yazılımı ile mikro ve makro modelleme tekniği ile analiz edilmiştir. Çalışmanın sonucunda deneysel veriler ile sayısal çalışmalar karşılaştırılmış, harç oranı fazla olan numunenin dayanımının fazla olduğu belirtilmiştir.

Wang (2014), donatısız yığma yapı üzerine deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirmiştir. Sayısal model, üç boyutlu sonlu elemanlar analizi kullanılarak oluşturulmuştur. ANSYS yazılımı, Solid 65 elemanı kullanarak sonlu eleman modelini oluşturmak için kullanılmıştır. Şekil 1.10'da gösterildiği gibi deneysel model verilerile karşılaştırılan sonuçlarla birlikte kesme ve basınç yüklemesine tabi tutulmuştur. Daha düşük gerilmede model, yer değiştirme ve kırılma modellerini doğru bir şekilde tahmin edebilmiştir.



(a) Sayısal (b) Deneysel

Şekil 1.10. Sayısal ve deneysel testlerden kesme kırılma modeli (Wang, 2019)

Çakır vd. (2015), Türkiye'de 2011 yılında meydana gelen 7.2 Mw Van depremini simüle ederek tarihi yığma yapıların sayısal dinamik analizini yapmışlardır. Çalışma ilk olarak ilgili tasarım kodlarında bulunan yapılar üzerinde sismik tasarım için mevcut yönergeleri incelemiştir. Sayısal modeli FEM ve ANSYS yazılımları kullanılarak oluşturulmuştur. Tepki spektrumu analizinden elde edilen sonuçlar, incelenen tüm binalar için hasarların nedenini bulmak için yeterli değildir. Çalışma, çevresel ve insan etkilerinin neden olduğu zayıflamış kolon-kemer eklemlerinden dolayı birçok hasarın meydana geldiğini tespit etmiştir.

Mahini (2015), iki aşamalı makro modelleme yaklaşımı önermiştir ve Cam Elyaf Takviyeli Polimer (GFRP) ile güçlendirilen tarihi bir binanın performansını

değerlendirmiştir. Binanın tuğla ve harç modelleri, yayılı çatlak model olarak kabul edilen malzemeler ve üç boyutlu izoparametrik katı elemanlar kullanılarak, ANSYS sonlu elemanlar yazılımı ile modellenmiştir. CFRP elemanları için anizotropik malzeme özellikli katı sonlu elemanlar kullanılmıştır. Önerilen modelin doğruluğu literatürde yer alan homojenleştirilmiş makro modelleme yöntemleri ile karşılaştırılmıştır.

IllaMPas vd. (2015), kerpiç yığma yapının dinamik davranışını sayısal olarak incelemek için ABAQUS yazılımında geleneksel tek katlı yığma modeli geliştirmiş ve sismik uyarım altında analiz etmişlerdir. Döşemenin ağırlığını taşıyan dört taşıyıcı duvardan oluşan tek odalı dikdörtgen bir yapıyı sonlu eleman olarak modellenmiştir. Güçlendirme öncesi ve sonrası durumları için tek katlı model geliştirilmiştir. Zaman tanım alanında analizlerine tabi tutulmuştur. Yapıların deprem davranışı arasında tahmin edilen hasar dağılımı, yerdeğiştirme kapasitesi ve toplam yanal direnç açısında karşılaştırma yapılmıştır. Hatılların eklenmesini içeren güçlendirme çözümleri, kerpiç yapıların düşük performansını önemli ölçüde iyileştirebilmiş, yalnızca genel yanal dirençlerini artırmakla kalmamış, aynı zamanda gevrek hasarları da önlemiştir.

Churilov vd. (2016), mevcut yığma yapıların Autodesk Robot yapısal analizinde uygulanan yapısal modellemeyi kullanarak matematiksel sonlu eleman modellerini formüle etmeden önce yığma binaların dinamik özelliklerini tanımlamışlardır. Çalışmadaki, üç donatısız yığma bina ve bir kuşatılmış yığma binayı ele almıştır. İlgili yapıların dinamik özelliklerini belirlemek için yerinde çevresel titreşim verileri kullanılmıştır. Bu testlerin amacı yığma duvarların sismik dirençlerini belirlemek için özelliklerini elde etmektir. Duvarlar ve döşemeler düzlem elemanları kullanılarak modellenmiştir. Sonunda dört yığma bina için doğal frekanslar ve mod şekilleri deneysel ve sayısal olarak formüle edilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasında nispeten iyi bir korelasyon olduğu görülmüştür.

Doğan (2016), yığma duvarların modelleme teknikleri ile ilgili lineer olmayan analizer üzerine yapılan bir tez çalışmasında; “Eindhoven duvarları” deney olgularından yola çıkarak mikro ve makro model ile Drucker-Prager malzeme modeli nümerik analiz sonuçları karşılaştırmış, homojenleştirilmiş yığma birim dayanımı ve elastisite modülü için ayrıca bağıntılar sunmuştur.

Varol (2016), 1970 ile 2010 yılları arasında Türkiye’de gerçekleşmiş dokuz adet depremin yığma yapılar üzerindeki etkisini araştırmıştır, daha önce yapılmış çalışmaları araştırarak yığma yapı yapımında dikkat edilmesi gereken hususları derlemiş ve konuya ilişkin öneriler getirmeye çalışmıştır. Deprem sonrasında oluşan hasarların çoğunluğunun

yapı ağırlığı, duvar hatıllarının yapılmaması ve rijitliği sağlanmamış duvarların düzlem dışı davranışlarının sınırlandırılmamasından kaynaklandığını vurgulamıştır.

Baraldi ve Cecchi (2017), yığma duvarların düzlem içi yükleme altında lineer olmayan davranışını araştıran sayısal bir çalışma sunmuştur. Hem sonlu eleman yöntemi (SEY) hem de ayrık eleman yöntemi (DEM) kullanılarak modeller oluşturulmuştur ve iki yöntemden elde edilen sonuçlar arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışma tüm modeller için Mohr-Coulomb kırılma kriterlerini benimsemiştir. Çalışmadaki hem SEY hem de DEM yöntemlerinin duvarın doğrusal olmayan davranışını modellemek için basit ve etkili mekanizmalar olduğu sonucuna varmıştır. Ancak DEM daha basittir ve daha az hesaplama çabası kullanılmalıdır. Yani SEY yöntemine kıyasla daha az doğru sonuçlar vermiştir.

Bikçe (2017) tarafından yapılan çalışmada, 23 Ekim 2011 Van depreminde ağır hasar alan bir yapının güçlendirme öncesinde ve sonrasında sayısal hesapları yapılarak dinamik özellikleri belirlenmiştir. Binanın depremden önce, sonra ve güçlendirme sonrası elde edilen modal analiz veriler ile karşılaştırılmıştır.

Güneş ve Anıl (2017), doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme modelleri kullanarak mevcut bir yığma yapının değerlendirilmesi üzerinde çalışma yürütmüşlerdir. Bu kapsamda betonarme elemanlara sahip yığma bir bina üzerinde malzemenin doğrusal ve doğrusal olmayan olarak değerlendirildiği iki farklı analiz yapılmıştır. Her iki analizde MİDAS yazılımı ile modellenmiştir. Sonuçlara göre her iki modelde de bina göçme seviyesi performans düzeyindedir. Yapı rijitliğinin düşük olduğu doğrultuda doğrusal olmayan modelden elde edilen çatı yer değiştirmeleri, eksenel ve kayma gerilmeleri daha yüksek olduğu görülmüştür. Doğrusal olmayan malzeme modelinde çekme gerilmelerinden göçen duvar sayısı doğrusal malzeme modeline göre daha fazladır. Yazarlar, sonuçları büyük ölçüde değiştirmese de yapı davranışını daha doğru yansıttığını düşündüklerinden analizlerde doğrusal olmayan malzeme modelinin kullanılmasının daha faydalı olduğunu düşünmüştür.

Mobarak vd. (2017), donatısız yığma binaların sismik performansını değerlendirmek için sayısal bir platform sunulmuşlardır. Bu platform katı tuğlaları temel bir makro eleman ve düğüm bölgeleriyle modellemiştir. Bu modelde bünye denklemleri ve şartnameler öncelikli olarak deneylerin sonuçlarına göre kalibre ve karakterize edilmiştir.

Kalliontzis ve Schultz (2017), yapılan bir çalışmada, sonradan ardgerme tekniği kullanılarak güçlendirilmiş duvar panelini simüle etmek için sonlu eleman analizleri kullanmışlardır. Taşıyıcı duvar birimleri, üç boyutlu gerilim sekiz düğümlü doğrusal

elemanlarla modellenirken iki düğümlü doğrusal üç boyutlu kafes elemanlı son ardgerme çubukları ile ayrıca modellenmiştir. Ayrıca yığma yapıları simüle etmek için uygulanan modeli, yığma panellerle dolgu duvar tuğlaları analiz etmek için ek modeller de kullanılmıştır. Özgün malzemenin mekanik performansı güçlendirme malzemesi yeni ve eski yüzeyler arasındaki arayüz simülasyondan önce dikkatlice araştırılmalı ve belirlenmelidir. Sayısal sonuç özelliklerin fazla veya az tahmin edilmesi, sayısal model seçiminden önemli ölçüde etkilenmiştir. Tablo 1.2'de bu yazıda incelenen sayısal yaklaşımlar özetlenmiştir.

Tablo 1.2. Sayısal yaklaşımların özeti

Araştırmalar	Yığma birim i ve Güçlendirme Malzemesi	Eski ve Yeni Yüzey Arasından Arayüzü
Wang vd. (2018)	Tuğlalar elastik malzeme olarak modellenmişlerdir.	Harç ve donatı birleşimi mikro ölçekli model uygulanarak kohezif arayüz elemanı olarak modellenmişlerdir.
Mobarake vd. (2017)	Tuğlaları makro eleman, modellenmiştir.	Düğüm bölgelerini modellemek için rijit arayüzlü makro elemanı kullanılmışlarır.
Maruccio vd., (2014)	Tuğla ve harç, sekiz düzlem gerilme ile modellenmiştir. FRP, eğimli bir kiriş elemanı ile simüle edilmişlerdir.	Arayüz, altı düğümlü eğri sıfır kalınlıkta modellenmişlerdir.
Gattulli vd. (2014)	FRP, kafes eleman olarak modellenmiş ve sadece çekme gerilmesi taşırmışlardır.	Arayüz elemanları bu modelde kullanılmamışlardır.
Gattesco ve Boem, (2017)	Yığma yapı homojen malzeme ile modellenmiştir. GFRP Shell elemanı ile modellenmişlerdir.	GFRP ve yığma yapı arasındaki arayüz mükemmel bağlı olduğu kabul edilmişlerdir.

Asteris vd. (2019), Yunanistan'ın Atina kentinde bulunan iki tarihi donatısız yığma yapının hasar seviyelerini belirlemek için incelemişler. Yapısal modeller anizotropik sonlu elemanlar makro modeli ile modellenmiştir. Her yapısal modelin kırılganlık eğrileri, her ağ (mesh) içinde bulunan düğümlerdeki yer değiştirmeleri temsil eden yapısal analizlerin sonuçları kullanılarak oluşturulmuştur. Son olarak binaların güçlendirilmesi gerekip gerekmediğine ilişkin karar değerlendirilmiştir.

Baran vd. (2022), çalışmada iki farklı duvar malzemesi (tuğla ve gazbeton) kullanılarak modelleme yapmıştır. İki katlı yığma yapının deprem performans analizleri yapılmıştır. StatiCAD-Masonry paket programı ve SAP2000 yardımıyla, 2018 Deprem yönetmeliği (TBDY) kullanılarak modellemeler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda TBDY 2018'de modal analiz ile tespit edilen taban kesme kuvvetlerinde yaklaşık %25 fark tespit edilmiştir. StatiCAD-Yığma paket programı ve SAP2000 programında yapılan

analizler sonucunda elde edilen sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmişlerdir.

Orulkaya (2019), iki katlı yığma bir yapının 2007 Deprem Yönetmeliği'ne göre SAP2000 programı kullanılarak deprem kuvvetleri altındaki performanslarını incelemiştir. Deprem analizi olarak davranış spektrumu kullanılmıştır. Yapı mevcut hali ile deprem dayanımı yetersiz iken püskürtme beton uygulaması uygulandıktan sonra yeterli güvenliğe ulaştığı görülmüştür. Genişletilmiş Ayrık Eleman Yöntemi'ne (EDEM) dayalı yeni bir sayısal simülasyon yöntemi uygulanmışlar ve sarsma tablası testleri sırasında bina davranışının göçme simülasyonları gerçekleştirilmişlerdir. Sarsma tablası testlerinin altında uygulananlara benzer dinamik girdiler sayısal modele uygulanmıştır. yapılan incelemelerde, deneysel testlerde gözlemlenen hasar türleri ile yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen hasar türleri arasında anlamlı bir uyum gözlemlenmiştir.

Kayırga ve Altun (2021), deprem davranışlarını belirlemek için üç adet kalsiyum silikat donatısız yığma bina ile deneysel çalışmalar ve sayısal simülasyon gerçekleştirmiştir. Bina davranışı için, farklı açıklık boyutlarına sahip tam ölçekli yığma binalar döngüsel yüklemeye tabi tutulmuştur. Her çevrimde bilgisayar ortamında yük ve deplasman değerleri kayıt altına alınmış ve meydana gelen hasar bina üzerine işaretlenmiştir. Binanın davranışının maksimum yükün yaklaşık %77'sine kadar lineer olduğu ve birkaç kılcal çatlak dışında herhangi bir hasarın olmadığı gözlemlenmiştir. Sayısal benzetim kapsamında ilk yığma yapı ANSYS yazılımı kullanılarak makro modelleme ile modellenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında meydana gelen hasar, yığma yapı davranışı açısından değerlendirilmiş ve sayısal sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sayısal simülasyon sonuçları maksimum yük seviyesine kadar deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak bu yük seviyesinden sonra simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla uyumlu bulunmamıştır.

Şerbetçigil (2021), güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş modelin performansa dayalı değerlendirmeleri, perde duvarların yapıya katkısı ABAQUS yazılımında sonlu eleman simülasyonları kullanılarak araştırılmıştır. İki adet makro yığma bina modellenmiş ve analizlerde yatay yer hareketi yükleme durumları ayrı ayrı kullanılmıştır. Güçlendirilmiş bina modelleme kısmında ise modelin dört köşesine " L" şeklinde betonarme dış perde duvarlar yerleştirilmiştir. Bulunan sonuçlarda güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş duvar sonuçları karşılaştırılmıştır. Güçlendirme işlemi, yatay yük taşıma kapasitesini oldukça arttırmıştır. Her bir duvar parçasında yükleme adımları süresince oluşan gerilmeler karşılaştırıldığında, güçlendirilmiş bina duvarlarında oluşan kesme gerilmeleri, güçlendirilmemiş bina duvarlarına göre azalmıştır.

1.2.2. Onarılmış ve/veya TRM Kompozit Malzemelerle Güçlendirilmiş Yığma Yapılar ile İlgili Çalışmalar

Tekstil ile güçlendirilmiş sıva katmanı (TRM), yığma duvarın malzeme davranışı üzerindeki etkisi oldukça fazladır. Literatürde nümerik analiz uygulamaları esas olarak çekme tepkisinin ve aderans davranışının simülasyonlarına odaklanmıştır. Bununla birlikte sınırlı sayıda sayısal model ile TRM ile güçlendirilmiş duvarın yapısal performanslarına yönelik araştırmalar önerilmiştir. Tasarım aşamasında dikkate alınması gereken önemli bir konu olan duvarların performans ve göçme modunun güçlendirme sonrasında önemli ölçüde değişebileceği gösterilmiştir. Ayrıca tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken önemli bir konu olan, güçlendirme sonrası hasar modunun değişebileceği de gözlemlenmiştir. FRP'lerin aksine TRM'ler iyi aderans sağlar ve duvarın nefes almasına izin verirken çimento esaslı malzemelerin kendine özgü göçme modu daha sünek duvar davranışı sağlamıştır. TRM ile güçlendirilmiş duvarların yapısal eleman seviyesindeki davranışını simüle etmek ve güçlendirme yöntemi özelliklerinin düzlem içi ve düzlem dışı eleman performansları üzerindeki etkisini daha derinlemesine araştırmak için bazı sayısal analizler de yapılmıştır. Tablo 1.3'te literatürde benimsenen ana özellikleri özetlemektedir.

Tablo 1.3 Duvar numuneleri üzerinde yapılan deneysel testlerin özeti.

Araştırmalar	Yığma Malzemesi	Katman Sayısı	Kalınlık (mm)	Lifli ızgara Tipi	Deney Tipi
Martins vd., 2015	Delikli tuğla	2	20	Karbon/Cam	4 Nokta Eğme
Almeida vd., 2015	Delikli tuğla	2	25	Karbon	Döngüsel
Babaeidarabad vd., 2014	Harman tuğlası	2	10-25	Karbon	Döngüsel
Gams vd., 2017	Harman tuğlası	1/2	5-15	Cam/ Karbon	Çevrimsel
Wang vd., 2019	Harman tuğlası	2	15	Bazalt	Çapraz basınç
Casacci vd., 2019	Harman tuğlası	1/2	10	Cam	Monotonik
Türkmen vd., 2019	Harman tuğlası	1	15	Karbon	Çevrimsel
De Santis vd., 2019	Moloz taş	2	10	Bazalt	Dinamik
Ibrahim vd., 2022	Harman tuğlası	2/4	20	Bazalt	Düşey basınç
Trochoutsou vd., 2022	Harman tuğlası	1/2	10	Kumaş	Döngüsel

Birçok çalışma, TRM'nin hem düzlem içi hem de düzlem dışı göçmeleri önleme kapasitesini değerlendirmiştir. Ancak tamamen yığma binalara uygulanan TRM esaslı malzemelerin dinamik karakterstikler üzerindeki etkisini değerlendirmek için çok az çalışma yapılmıştır, çünkü deneyler para ve zaman açısından maliyetlidir. TRM ile ilgili literatürde mevcut olan sayısal çalışmalar, çoğunlukla, daha önce kapsamlı bir şekilde analiz edilmiş olan TRM katmanlarının gerilme ve bağlanma davranışına odaklanmıştır.

Yığma yapıları sonlu eleman analizi ile modellerken ana zorluk, malzemenin gevrek çekme kırılması ile karakterize edilen doğrusal olmayan davranışıdır. Çoğunlukla malzeme özellikleri ile ilgili olan doğrusal olmayan geometrik tepki ve belirsizlik. Bu bilinmezlik, genellikle mevcut birkaç deneysel kaMPanyanın sonuçlarının geniş çapta dağılmasından kaynaklanır. Tüm yığma binaların ve güçlendirme sistemlerinin bileşenlerinin doğrusal olmayan tepkilerini doğru bir şekilde modellemek için uygun matematiksel yasaların uygulanabileceğini ifade etmiştir. Bununla birlikte makro yaklaşım, gereken yüksek bilgisayar çabası nedeniyle tüm yapıları analiz etmek için yararlıdır. Ayrıca, tekstil takviyeli harç (TRM) kompozitlerinin kullanılması nispeten yeni bir güçlendirme tekniğidir. Bu yöntem, başarılı sonuçlarla duvarda test edilmiştir (Blanksvärd vd., 2008; Papanicolaou vd., 2008; Ortlepp vd., 2006; Garmendia vd., 2011). Ancak, TRM ile güçlendirilmiş yığma yapıların simülasyonunu ele alan uluslararası kabul görmüş bir model bulunmamaktadır. Donatısız yığma yapıları modellemek için geliştirilen sayısal araçların son durumu gözden geçirildikten sonra, TRM ile güçlendirilmiş yığma yapıların durumunu incelemeyi amaçlayan güncel yaklaşımlar analiz edilmiştir. Her şeyden önce, bu özel ama anlamlı vakayı analiz eden az sayıda makalenin bulunduğu söylenmelidir. TRM ile güçlendirilmiş tuğla yığma yapıların dinamik tepkisini simüle etmek için ayrıntılı bir model sunmuştur.

Harajli vd., (2010), tarihi duvar numunelerini güçlendirmek için tekstil örgü ve harç kullanan farklı sistemleri değerlendirmiş, statik ve döngüsel yükleme altında düzlem dışı eğilme davranışlarını belirlemek için deney yapmıştır. Yığma duvarları güçlendirmek için kireç harcı ile kaplanmış bazalt lif donatılı harç kullanımı, en düşük rijitlik ve dayanım azalmasının hem de en yüksek enerji soğurma ve dağıtma kapasiteleriyle sonuçlanmıştır.

Çelik donatılı beton ile tarihi yığma yapıların mantolanması sismik güçlendirme için en geleneksel teknikler arasındadır (Papanicolaou vd. (2011)). Yapısal güçlendirme için malzemeler ve yöntemler ile ilgili en son gelişmeler, lif donatılı çimentolu matris (FRCM) olarak da bilinen TRM kullanımını vurgulamıştır. TRM'ler son zamanlarda doğal harçlardan veya çimentolardan yapılmış matrislere yerleştirilmiş yüksek mukavemetli fiber (bazalt, cam, çelik) ağlara dayanan kompozit malzemelerdir. Farklı ısıl yük konfigürasyonlarında TRM'lerin etkinliğini araştırmak için son on yılda birçok deneysel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar düzlem içi ve düzlem dışı yük koşulları altındaki TRM davranışına odaklanmıştır.

ACI 549.4R (ACI 2013), beton ve yığma binaların onarımı ve güçlendirilmesi için dıştan yapıştırılmış tekstil bazlı sistemlerin tasarlanması ve inşası için esas ilkelere yönelik ilk girişimi oluşturmuştur. TRM ile güçlendirilmiş beton ve yığma elemanların tasarımına

yönelik esasların geliştirilmesi, gerçek uygulamalarda geniş kullanımlarını sağlamak için gereklidir.

Bernat vd. (2014), tam ölçekli tuğla yığma duvarlar üzerinde bir deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Yığma duvarların güçlendirilmesi için TRM'nin etkinliğini ele almıştır. Farklı harç ve lif değişkenlerin etkileri araştırılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre TRM uygulanması eksantrik eksenel yük altında ilk yükün taşıma kapasitesinin artmasını ve daha rijit ve homojen bir davranış elde edilmesini sağlamıştır.

Carozzi vd., (2014), çalışmalarında cam lif gridlerle yapılan tekstil donatılı harç sistemleriyle güçlendirilmiş tuğla davranışı hem deneysel hem de sayısal açıdan tartışmıştır. Duvar sütunlarında üç farklı seride standart bir itme-çekme deneyi gerçekleştirilerek güçlendirilmiş sistemin genel davranışı üzerinde rol oynayabileceği değerlendirilmiştir. Sadece ızgara sistemi dikkate alındığı ve tek boyutlu elemanlarla modellendiği basitleştirilmiş bir sayısal yaklaşım geliştirilmiştir. Deneysel kanıtlar ve sayısal modellemeler arasında iyi bir uyum bulunmuş; bu önerilen birleşik yaklaşımın tasarım değerlendirmeleri için referans olarak kabul edilebileceği anlamına gelmiştir.

Koutas vd., (2015), Ancak, bu çalışmada, mevcut bina yapılarının performansını artırmak için farklı bir yaklaşım önerilmiştir. Tuğla dolguların katkısını tüm yapısal tepki spektrumu boyunca güvence altına alarak daha güvenilir bir direnç kaynağına dönüştürmek alternatif bir yöntem olarak tavsiye edilmiştir. Bu amaçla, tekstil takviyeli harçlar (TRM) tekniği deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, TRM uygulaması neredeyse tam ölçekli as-built ve güçlendirilmiş 3 katlı tuğla dolgulu çerçeveler üzerinde döngüsel yüklemelere tabi tutularak test edilmiştir. Yapılan test sonuçları, TRM'nin katkısını hesaba katan analitik bir model ile birlikte sunulmuş ve tartışılmıştır. Son olarak, modelin açık kaynak yazılım OpenSees'e uygulanmasının ardından yapılan sayısal analiz sonuçları, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, mevcut yapıları güçlendirmek için yenilikçi bir yöntemi deneysel ve analitik olarak değerlendirmektedir.

Ascione vd. (2015), TRM'lerin bir güçlendirme sistemi olarak etkinliği, bileşenlerin (harç ve lifler) mekanik özellikleri, lifler-matris ve matris-alt tabaka arayüzleri ile ilgilenmişlerdir. Harç bazlı kompozitlerin mekanik karakterizasyonuna (çoğunlukla çekme tepkisi) yönelik birkaç çalışma yapılmıştır. Hem deneysel testler hem de sonlu eleman simülasyonlarla bir dereceye kadar araştırılmıştır.

Bertolesi ve Milani (2015), diyagonal basınç deneylerine tabi tutulan duvarların davranışını analiz etmeyi amaçlayan ön deneme sayısal modelleme sunmuştur. Heterojen bir

mikro modelleme tekniği benimsenmiş ve iki farklı TRM tipinden yapılan güçlendirme sistemleri kullanılmıştır. Analizler, sonlu eleman yazılımı ABAQUS yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Bileşen malzemelerin davranışını tanımlamak için daha önce uygulanmış CDP ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar duvarların küresel tepkisi ve kırılmalarda elde edilen çekme hasarı dağılım modeli açısından umut verici bir uyum göstermiştir.

Berna ve Maso (2015), dışmerkez basınç yüklemesine odaklanarak TRM ile güçlendirilmiş yığma duvarlar için sayısal bir model geliştirilmişlerdir. Sayısal sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır. Farklı güçlendirme değişkenlerinin etkisi hakkındaki bilgileri geliştirmek için uygulanmıştır. Önerilen sayısal model, göz önünde bulundurulan çok çeşitli TRM ile güçlendirilmiş tuğla duvar durumlarının yük taşıma kapasitesini tahmin edilmiştir. Ek olarak sayısal modelin bazı sınırlamaları, yığma duvarların elastisite modülü deneysel olarak belirlenmesini geliştirmenin bazı değişkenleri hesaplamak için etkili bir sayısal çözüm metodu ilginç olacağını düşündürmüştür.

Garofano vd. (2016), güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş durumlardaki yığma duvralar bir sonlu eleman modeli geliştirilmiş, yığma ve güçlendirme malzemelerini tanımlayan parametreler deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak kalibre edilmişlerdir. Çalışmadaki duvar yüzeyine uygulanan tekstil donatılardan oluşan kompozit sistemlere (FRCM) ile güçlendirilmiş yığma duvarlarının düzlem içi davranışına ilişkin deneysel sonuçlarla ilgilenmiştir. Sayısal analizler, ticari sonlu eleman paketi DIANA kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yığma birim ve harç derzlerinin mekanik özelliklerinin sürüldüğü eşdeğer bir homojen malzeme modeli olarak modellenmiştir. Son olarak sayısal analizler gridin düşük rijitliği kabul edilse bile sistemlerin hem dayanım hem de süneklik açısından iyi performansa sahip olduğunu göstermiştir. Esas olarak sismik kuvvetler altındaki yığma duvarlarının davranışını iyileştirmeyi amaçlayan harç tabakalarına gömülü kompozit gridlerin etkinliği hakkında faydalı bilgiler sağlamıştır.

Basili vd., (2016), çalışmalarında MIDAS bilgisayar programı kullanılarak doğrusal olmayan sonlu elemanlar duvarını gerçekleştirmişlerdir. Yığma duvar BTRM donatılı ile güçlendirilmiştir. Yığma duvar alt katmanına mükemmel bir şekilde bağlanan tekstil ve matris olmak üzere iki tabaka sürekli ortam izotropik malzeme kullanılarak modellenmiştir. İki boyutlu makro bir modele dayanmaktadır. Sonuçlar genel olarak modelin basitliğine ve kullanılan malzeme parametrelerinin sınırlı sayıda olmasına rağmen uygun bir kalibrasyon yapıldığında güçlendirilmiş yığma duvarların düzlem içi kesme davranışını doğru bir şekilde tahmin edebildiğini göstermiştir.

Mininno vd. (2017), DİANA programını kullanarak yığma duvarların düzlem içi ve düzlem dışı davranışlarında TRM sistemlerinin etkinliğini sayısal olarak araştırmışlardır. Duvarın düşey ve yanal yük altındaki performansını araştırmak için bir statik analiz (itme) yapılmıştır. Bunun için, güçlendirme öncesi ve sonrası durumlar için duvarların doğrusal olmayan davranışını ve göçme mekanizmalarını tanımlamak için sayısal modeller benimsenmiştir. Farklı lif türleri (PBO, Bazalt, Cam) ele alınmıştır. TRM ile güçlendirilmiş duvarlar, duvarın her iki tarafında harcı temsil eden CQ40S shell eleman özelliği kullanılarak arayüz elemanları ile yığma yapı ile birleştirilmiş olarak modellenmiştir.

Akhundi vd. (2018), düzlem içi döngüsel yüklemeye maruz kalan yaklaşık olarak yarı ölçekli iki model üzerinde TRM ile güçlendirilmiş duvar dolgulu çerçevelerin performansını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar duvarların güçlendirilmesi ve TRM katmanları kolonların ve kirişin yüzlerine kolayca uzatılmasıyla betonarme çerçeveye bağlanması, yanal rijitlikte ve maksimum dayanmda yaklaşık %40'lık bir artış sağlamıştır.

İsmail vd. (2018), bazalt tekstil donatılı sıva ile güçlendirilmiş dolgulu çerçevenin düzlem içi dayamının ve yük kapasitesinin, karbon tekstil donatılı güçlendirilmiş numunenin karşılık gelenlerinden daha yüksek olduğunu araştırmışlardır. Buna karşılık bazalt-TRM nedeniyle dolgulu çerçevelerin yanal kapasitesindeki artış %40 olmuştur. Önceki çalışmalar ayrıca karbon-TRM kullanıldığında, cam-TRM ile karşılaştırıldığında düzlem dışı yüklemeye maruz kalan sonradan takılan dolgulu çerçevenin eğilme mukavemeti ve rijitliğinin daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Kouris ve Triantafillou (2018), az müdahale tersine çevrilebilirlik, uyumluluk ve dayanıklılık gibi mimari mirası koruma ilkelerinin yakın zamanda yenilenmesi sonucunda farklı bir kompozit türü geliştirilmişlerdir. Buradaki fikir polimerik matrisi lif donatılı çimentolu matris (FRCM) malzemeleri ve tekstil donatılı harç (TRM) güçlendirmesi formundaki daha uyumlu bir harç bağlayıcı ile değiştirirken hafif tekstil lif ağının yüksek performansını korumuştur.

Kariou vd., (2018), yüksek dayanımlı lifleri çimento veya hidrolik kireç bazlı harçlar gibi inorganik matrislerle birleştirmişlerdir. TRM katmanı düşük maliyetlidir, el işçileri için uygundur, yangına dayanıklıdır, beton ve duvar altlık malzemeleriyle uyumludur ve ıslak yüzeylere veya düşük sıcaklıklarda uygulanabilir. Tüm bu nedenlerle, yaygın olarak kullanılan FRP'ye paralel olarak, mevcut yapıların güçlendirilmesi için TRM kullanımı giderek daha çekici hale geliyor. TRM sistemlerinin ilk uygulamaları beton elemanlarda olmasına rağmen tipik veya tarihi yığma yapıların TRM ile güçlendirilmesi, FRP

sistemlerinin sınırlamaları göz önüne alındığında oldukça umut verici görünmüştür.

Koutas ve Bournas (2018), betonarme çerçevelerde yığma dolgu duvarların düzlem dışı performansını iyileştirmenin bir yolu olarak TRM mantolamaların kullanımı üzerine deneysel bir çalışma yürütmüştür. Dolgu duvar ve betonarme çerçeve elemanları arasındaki hem farklı bağlantı düzen sahiplerinin hem de duvar kalınlığının etkisi araştırılmıştır. Dolgu duvarların düzlem dışı yük kapasitesini arttırmada TRM güçlendirme tekniğinin oldukça etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Güçlendirme etkililik faktörü, tek katlı duvar numuneleri için 4 ile 5 arasında değişmiştir ve iki katlı duvar numuneleri durumunda yaklaşık 1.5'e eşittir. Ayrıca güçlendirilmiş duvarların enerji yutması, bağlantı düzene sahiplerinin önemli bir rol oynamasıyla kontrol duvarlarına kıyasla %140'tan %260'a yükseltilmiştir.

Basili vd., (2019), bazalt lif donatılı harç ile güçlendirilmiş tuğla yığma duvarların düzlem içi davranışının deneysel ve sayısal bir incelemesini sunmuştur. Sayısal modelleme, iki boyutlu bir makro modele dayalı olarak toplam gerilme yayılı çatlak modelini MİDAS yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar genel olarak donatısız ve donatılı elemanları tepkisini başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Kesme dayanımı, rijitlik, süneklik ve çatlak dağılımları, açısından duvarların göçmeye kadar davranışı tahmin etmede genel olarak iyi bir anlaşma gözlemlenmiştir. Son olarak Bazalt lif donatılı harç (BTRM) kompozitinin kullanılması tuğla duvar panellerinin düzlem içi kesme davranışını geliştirmiştir.

Bertolesi vd., (2019), antik duvar tonozlarını onarmak için TRM verimliliğini incelemeyi amaçlamıştır. Deneysel araştırma, tonozun testinden ve TRM malzemeleri aracılığıyla aşağıdaki onarımdan oluşmuştur. TRM güçlendirme, bir harç matrisinin yaklaşık 5 mm kalınlığında iki katmanına gömülü 25x25 mm'lik bir cam ızgaradan oluşan bir tabakasından oluşturulmuştur. Elde edilen deneysel sonuçların doğrudan karşılaştırılması, TRM güçlendirmesinin tonozun küresel yapısal davranışı üzerindeki olumlu etkisini göstermişlerdir. Ayrıca, testler sırasında yapının davranışını incelemek için bir üç boyutlu makro modeli sonlu eleman stratejisi benimsenmiştir. Modeller, ABAQUS sonlu eleman ticari yazılımı aracılığıyla geliştirilmiştir. Yığma duvar ve TRM kabuk elemanları vasıtasıyla simüle edilmiştir. TRM, tepe yüklerini arttırarak yapının TRM yüzeyi boyunca çatlak oluşumunu önleyebilmiştir. Son olarak deneysel ve sayısal sonuçlar arasında tatmin edici bir anlaşma elde edilmiştir.

Filippou vd. (2019), tekstil donatılı harç (TRM) kompozitleri, yığma duvarların doğrusal olmayan tepkisi ve göçme modları üzerindeki etkisi üzerine pushover analizini kullanarak kapsamlı bir sayısal araştırma yapmıştır. TRM tipinin güçlendirilmiş duvarların

performansı üzerindeki etkisi olarak tartışılmış ve sunulmuştur. Güçlendirilmiş yığma panellerin doğrusal olmayan davranışını simüle etmek için sonlu eleman paketi DIANA 10 yazılımında iki boyutlu doğrusal olmayan bir model hazırlanmıştır.

Wang vd. (2019), literatürdeki TRM ile güçlendirilmiş duvarların yapısal düzeyde sayısal modellemesi üzerine sadece birkaç çalışma yapmıştır. TRM'lerin sayısal modellemesi çoğunlukla çekme tepkisi ve bağ davranışına odaklanmıştır. Güçlendirilmiş duvarların sayısal modellemesi, karmaşık bir görev olmasına rağmen güçlendirilmiş yapıların performansına etki eden parametreleri ve güçlendirme sonrası göçme modlarındaki değişiklikleri anlamak için ilginç bir yaklaşımdır. Ayrıca FRP ve CFRP ile güçlendirilmiş yapılar üzerine yapılan çok sayıda çalışma ile karşılaştırıldığında TRM ile ilgili araştırmalar hala çok erken aşamadadır ve bu nedenle daha fazla çalışmaya değer bulunmuştur.

Mardani vd. (2019), iki katlı yığma bir duvarın deprem kuvvetleri etkisini hesaplanmıştır. Ayrıca yığma yapıların donatılı püskürtme betonu ile güçlendirilmesi incelenmiştir. Aynı geometri ve malzeme özelliklerine sahip iki yığma duvarı laboratuvar da inşa edilmişler, bu inşalardan birini donatılı püskürtme betonu ile güçlendirilmiştir. Daha sonra her iki duvarın düzlem dışındaki tersinir yükler altında deneye tabii tutulmuştur. Deney sonucunda güçlendirilmiş duvarın sünekliğinin ve enerji yutma kapasitesinin arttığı gözlemlenmiştir.

Altunişik vd. (2020), çalışmada Kuşluca tarihi ahşap camisinin doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları gibi yapısal dinamik karakteristiklerinin restorasyon sonrası çevresel titreşim testleri kullanılarak belirlenmesine yönelik bir çalışmayı rapor etmiştir. Restorasyon çizimlerinden hareketle caminin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve modal analizi yapılmıştır. Yerinde testler kullanılarak sayısal sonuçları doğrulamak için inşaattan sonra deneysel ölçümler yapılmıştır. İlk üç doğal frekans sayısal ve deneysel olarak elde edilmiştir. Mod şekilleri arasında yakın bir uyum olduğunu belirtilmiştir. Ancak doğal frekanslarda %30 fark bulunmuştur. Bu fark en aza indirmek için deneysel dinamik karakteristikler iyileştirilmiş sonlu eleman modelinin elde edilmesinde kullanılmıştır.

Gulinelli vd. (2020), tekstil takviyeli harç (TRM) ile güçlendirilmiş yığma duvarlarını simüle etmek için sayısal bir modelleme yaklaşımıyla birleştirilmiş deneysel bir çalışmayı bildirmişlerdir. Deneysel testlerde, yığma panellere iki farklı TRM sistemi uygulanmıştır. Numuneler daha sonra TRM'nin yapısal performans üzerindeki etkilerini değerlendirmek için diyagonal basınç testlerine tabi tutulmuştur. Bir temele dayalı olarak önerilen sonlu eleman modeli diyagonal basınç testlerini simüle etmek için orijinal çok ölçekli yaklaşım

kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar, kırılma modu da dahil olmak üzere deneysel verilerle çok iyi bir uyum göstermiştir.

Günaydın vd. (2021), bu çalışmanın amacı hasar ve güçlendirme uygulamalarına maruz kalan iki katlı betonarme yapı modelinin dinamik özellik değişimlerini izlemiştir. Her bir durum için (hasarsız; az hasarlı; orta hasarlı) iki farklı model dinamik karakteristikleri deneysel olarak karşılaştırma yapılmışlardır. Elde edilen deneysel doğal frekanslar, hasarın varlığı ve yayılması ile azalma eğilimi gösterirken hasar varlığında sönüm oranları artan bir eğilime sahiptir. CFRP laminatlar kullanılarak önerilen güçlendirme sistemlerinin çerçeve modelinin dinamik karakteristikleri üzerindeki önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir.

Scacco vd. (2021), çalışmada TRM bağ çözme fenomeni için gelişmiş bir heterojen yaklaşım tartışılmışlardır. Böyle bir doğrulama sürecinde, yığma elemanların karbon fiberlerle güçlendirilmesini simüle eden deneysel veriler kullanılmıştır. ABAQUS yazılımı kullanarak üç boyutlu tuğla elemanlar kullanılarak, güçlendirilmiş numunenin her bir bileşeni ayrı ayrı modellenmiştir. Beton Hasar Plastisitesinden yararlanılarak doğrusal olmama sorunu giderilmiştir. Matrisin iki katmanını, karbon fiberleri ve aralarındaki arayüzleri içeren güçlendirmenin modellenmesine büyük dikkat gösterilmiştir. Bu sonuncusu, tipik yapışkan-sürtünme davranışını yeniden oluşturmak için, CDP'de kalibre edilmiş mekanik özellikler girişi ile birlikte ihmal edilebilir 0,3 mm'lik bir kalınlık atanmıştır. Yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırılmasından böyle bir yöntemin deneysel sonuçları başarılı bir şekilde tahmin edilebildiğini göstermiştir.

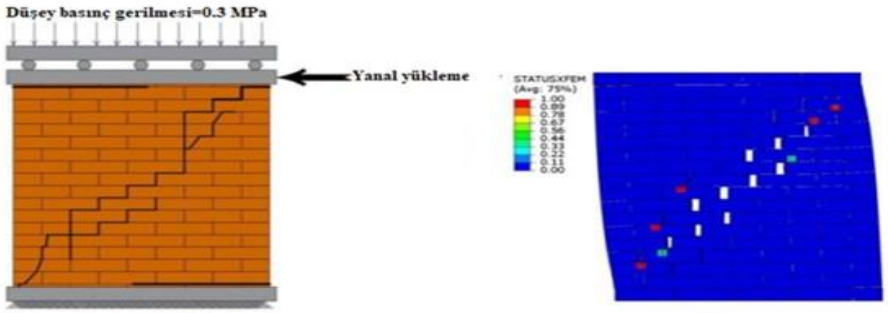
Yığma duvarların mekanik sınırlarını ve yığma duvarlar için mevcut yapısal gereksinimleri bilerek güvenlik seviyesini korumak ve mevcut yapıları iyileştirmek için yakın gelecekte güçlendirme yöntemlerine ihtiyaç duyulacağı açıktır. Böylece yığma duvarlar için en önemli güçlendirme tekniklerinin kısa bir incelemesi yapılmıştır. TRM duvar ile uyumluluğu (fiziksel, kimyasal ve termal) nedeniyle en umut verici güçlendirme yöntemi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, TRM'nin taşıyıcı yığma duvarlarını mekanizma oluşum göçmesine karşı güçlendirme yeteneğinin araştırılmasının ilginç ve anlamlı bir araştırma alanı olduğu fark edilmiştir. Bu güçlendirme sisteminin herhangi bir yöntem veya standart düzenleme olmadan uygulandığı düşünüldüğünde, bu uygulama ile ilgili bir çalışma yapılmasının önemi daha da ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, TRM güçlendirme tekniğinin dezavantajları da vardır. İki ana teknik sorun, çoğunlukla harcın sertleşmesi için gereken uzun süre ile ilişkili zaman tüketimi, FRP veya çelik plakalardan daha fazla deforme olabilen TRM'nin daha küçük sertliğidir. Bu nedenle, güçlendirme

müdahalesi yapının deforme olabilirliğini azaltmayı hedefliyor ise, FRP, TRM'inden daha verimli olabilir. Diğer olumsuz yönler, TRM hakkında yapılan küçük araştırma ve erken geliştirme aşaması ile ilgilidir. Ayrıca, bu güçlendirme teknolojisini uygulayacak deneyimli insan eksikliği olduğu gerçeğini kabul eden TRM üreticilerinin de dikkate değer bir eksikliği var. Yine de, TRM'in teknolojik gelişimi ile ilgili bu son problemlerin, bu tekniğin kullanımı yaygınlaştığında aşılacağı varsayılmaktadır.

1.2.3. XFEM Metodu ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Drosopoulos ve Stavroulakis (2018), yığma duvarların yerel kırılmalarına odaklanan bir hesaplamalı homojenizasyon çalışması yürütmüşlerdir. Çalışma, sayısal yöntemlerin daha doğru sonuçlar gösterdiğinden bahsetmiştir. Ancak bu tür yöntemlerin karmaşık yapılara uygulanması zordur. Genişletilmiş sonlu elemanlar yöntemi (XFEM), makro ölçekte kohezif çatlamayı simüle etmek için duvar modelleri geliştirmede uygulanmıştır. Modele, tuğla harcı arayüzünü simüle etmek için kullanılan temas koşulları ile çekiş ayırma yasaları dahil edilmiştir. Ortalama alma teknikleri kullanılarak tuğla-harç arayüzü arasında geçirgen olmayan bir arayüz oluşturulur. Sunulan model, karmaşık kırılma modellerinin tahmin edilmesine çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar mevcut deneysel çalışmalar kullanılarak doğrulandığından karmaşık çatlak modellerine sahip çalışmalar için kullanılabileceği bulunmuştur.

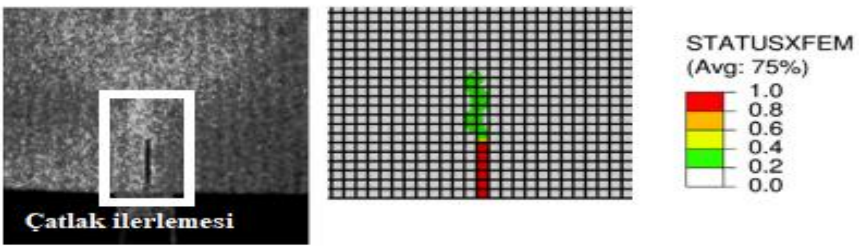
Abdulla vd. (2017), basitleştirilmiş bir mikro model yaklaşımı kullanarak yığma duvarların davranışını simüle etmek için bir model önermiştir. Çalışma, yükleme altındaki duvarın tepkisini görmeyi amaçlamıştır. Deneysel olarak test edilen (Eurocode 6)'de rapor edilmiş yığma duvarların verileri, XFEM yöntemi kullanılarak sayısal modeli doğrulamak için kabul edilmiştir. Sayısal sonuçlar yük yer değiştirme ilişkileri açısından deneysel sonuçlarla iyi bir uyum göstermiştir. Ayrıca sayısal olarak elde edilen hasar modları deneysel olarak da bununla tutarlı bir şekilde temsil ettiği gözlemlenmiştir (Şekil 1.11).



(a) Deneysel (b) Sayısal

Şekil 1.11. Hasar karşılaştırılması (Abdulla vd. 2017)

Ferretti vd. (2014), gazbeton malzemesin uygun bir kohezif yasasını kalibre etmek için genişletilmiş, XFEM analizi gerçekleştirmislerdir. XFEM temel olarak yer değiştirme alanının süreksiz yapısını dikkate alan birlik bölümü kavramına dayanan geleneksel sonlu eleman yönteminin bir uzantısıdır. XFEM, mesh iyileştirmesi ile etkin bir şekilde çözülmeyen ana çatlağın varlığı, yerelleştirilmiş özelliklerle ilgili sorunların çözümündeki zorlukları kolaylaştırmıştır. XFEM metodunun gazbeton modeldeki çatlak oluşumunu ve ilerlemesi gerçekçi bir şekilde tanımlayabildiğini gösteren sayısal analiz ve deneysel yük sonuçları arasında uygun bir anlaşma göstermiştir (Şekil 1.12).



Şekil 1.12. Maximum yükün altında deneysel ve sayısal çatlak biçimlerinin karşılaştırılması (Ferretti vd, 2014)

Zhai vd. (2017), dolgu yığma duvarlarındaki çatlakların ve basınç kırılmalarının davranışını modellemek için XFEM kullanmışlardır. Ayrık ara yüz elemanı, yığma bağlantıların ve çerçeve-duvar ara yüzünün davranışına hasar parametreleri tanımlanmıştır. XFEM ile analiz sırasında çatlak keyfi olarak yayılabilmektedir. Ek olarak bu modelde birkaç sürekli çatlağa izin verilmiştir. Doğrusal olmayan sonlu eleman modeli, mevcut deneysel verilerle doğrulanmıştır. Önerilen modelin yığma betonarmenin yük yer değiştirme

tepkisini tahmin edebildiği sonucuna varılmıştır. Duvar panellerinin çatlaması, çekme kırılması ve harç derzlerinde sıkıştırması için hasar modelleri çok iyi bir şekilde elde edilmiştir.

Yazdani ve Habibi (2021), eski kemer köprülerin maksimum kapasitelerini elde etmek için XFEM kullanmışlardır. XFEM, kırılma mekaniğinde geometrik olmayan bir yaklaşımı benimsemiştir. Yapının kırılma tanımlayıp çatlak ilerleme modelini kullanarak çatlakların nihai kapasitesini kolayca tahmin edebilmişlerdir. Bu çalışmadaki köprülerin nihai kapasiteleri ve güvenlik faktörleri, farklı koşullarda birkaç başlangıç çatlak tanımlanarak incelenmiştir. Son olarak deneysel sonuçları kullanarak doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile birlikte beton hasarlı plastisite modeli sonuçları XFEM'in diğer yöntemlerle çok iyi uyum sağladığını göstermiştir. Üç boyutlu sonlu elemanlar metodu analiz sonuçları göz önüne alındığında XFEM, köprülerinde oluşan çatlak analiz etmek için etkili ve verimli bir şekilde kullanılabilirlikleri araştırılmıştır. Ticari sonlu eleman analiz yazılımlarında genişletilmiş sonlu elemanlar yönteminin uygulanması hala sınırlıdır ve bu yetenekleri içeren en yaygın olanı ABAQUS yazılımdır. Bununla birlikte nispeten yakın zamanda piyasaya sürülmesi nedeniyle XFEM tekniğinin, doğrusal elastik malzeme modellerini içeren sadece birkaç basit kıyaslama yığma yapı probleminde güvenilir sonuçlar sağladığı kanıtlanmıştır.

Eleman silme yöntemi, karmaşık değişklikleri olmaksızın geleneksel sonlu eleman çerçevesinde kırılma problemlerini simüle edebilen en basit yöntemlerden biri olmuştur (Song vd. (2008)). Hasarlı elemanlar, maksimum asal gerilmenin sıfıra ayarlandığı bir dizi eleman tarafından genel olarak yansıtıldığından yer değiştirme alanlarında güçlü süreksizlikleri açıkça temsil etmeye gerek görülmemiştir. LS-DYNA gibi bazı programlar, bu elemanlar için atalet etkilerini ortadan kaldırmak için elemanın kütlesini küresel kütle matrisinden çıkarır ancak bu kütle kaybolmadığı için yersiz görünmüştür. Kütleyi korumuş, ancak burada ele alınan problemler için çok az fark yaratmıştır.

Farklı yapı türlerinin sayısal modellemesi ve analizi için çok sayıda ticari genel amaçlı sonlu eleman ve ayrık eleman yazılım paketleri mevcuttur. Bu yazılım paketleri, doğrusal olmayan statik veya dinamik analizleri iki veya üç boyutlu olarak gerçekleştirebilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi temelinde geliştirilen paketlerin çoğu farklı eleman türleri, çözüm stratejileri ve malzeme davranış modları içerir ve bu nedenle kırılgan yığma yapıların analizi için kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, havacılık ve inşaat mühendisliği ile ilgili yapısal mekanik problemlerini çözmek için farklı endüstrilerdeki mühendisler tarafından

bağımsız olarak geliştirilmiştir. Aşağıda verilen destekli sistem modelleri hakkında fikir vermektedir. Bu tez için farklı yığma yapılar için sonlu eleman modelleri geliştirmek ve analizleri için ticari sonlu eleman analiz yazılımı ABAQUS kullanılmıştır.

1.2.4. Yığma Yapılar

1.2.4.1. Yığma Yapı Malzemeleri

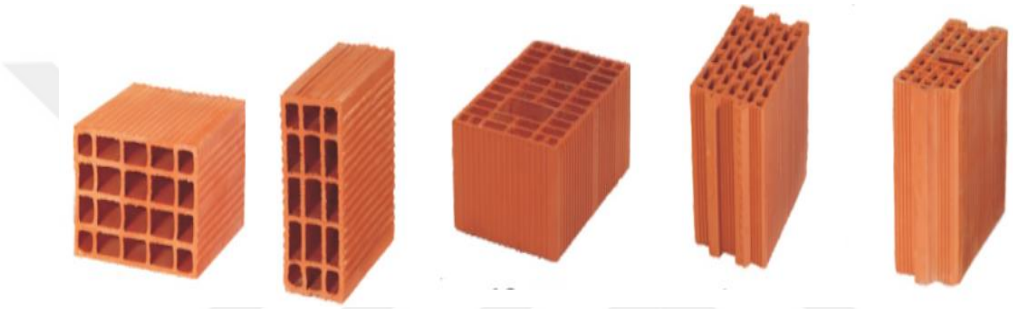
Duvarlarda taşıyıcı veya bölme amaçlı kullanılan tuğla, beton, gazbeton, yapay ve doğal taş yapı malzemeleri yığma birimler arasında yer almaktadır. Bu birimleri birbirlerine bağlayan harçlar ise kireç, çimento, takviyeli ve lifli harç olmak üzere sınıflandırılmştır. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri duvarların davranışını etkilemiştir. Bu nedenle duvar yapımında kullanılan bağlayıcı malzeme ile örgü malzemesinin istenilen özellikleri taşımasında malzemenin seçimi önemlidir. Genellikle bu tür yapılarda döşemelerin ahşap veya betonarme inşa edildiği görülmüştür. Çatı sistemleri ise bulunduğu ortama göre değişmiştir. Kırsal bölgelerde toprak dam, şehirlerde ise betonarme plak olarak inşa edilebilmektedir. Fakat bu tür yapılarda kullanılan söz konusu malzemeler yapıya ve çevresine uyumlu, dış etkenlere dayanıklı ve çoğunlukla doğal malzemelerdir. Yığma duvarlarda kullanılan yığma birim örnekleri Şekil 1.13'te görülmüştür.

Şekil 1.13. Farklı yığma birim malzeme örnekleri

Duvarların örülmesinde aşağıdaki malzemeler; taş, tuğla, kerpiç, briket, gazbeton ve alçı blok vb. olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca duvar oluşturtmak maksadıyla alçı levha, beton levha, yonga levha gibi levhalar kullanılarak duvarlar yapılmıştır.

1.2.4.2. Tuğla

Tuğla birimler, yığma duvarlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tuğla birimler şist, kalsiyum silikat ve kil kullanılarak kalıplama yöntemiyle yapılmaktadır. Tuğla duvarlar, çeşitli şekil ve boyutta üretilen tuğlaların bir bağlayıcı harçla örülmesiyle oluşturulur. Yapı sektöründe en çok kullanılan duvar örgü elemanlarıarasında yer alırmaktadır. Şekil 1.14'te yüksek yoğunluğa sahip TS EN 771-1 (2005) standardına göre sınıflandırılmış ve birçok tuğla modeli birimler görülmektedir.



Şekil 1.14. Yüksek yoğunluğa sahip tuğlalar tipleri (URL-2)

Fabrika tuğlalarının basınç dayanımları; yapıldığı toprağın cinsi, porozitesi, pişirilme ısısı, üretim biçimi, deliklerinin miktarı ve yerleri, yükleme yönleri, kenarlarının biçimi gibi birçok faktöre bağlıdır (Sayın, 2009). Fabrika tuğlalarının birim hacim ağırlıkları ve basınç dayanımları Tablo 1.4'te verilmiştir.

Tablo 1.4. Tuğlalarının birim hacim ağırlıkları ve basınç dayanımları (TS705, 1985)

Tuğla Sınıfı	Birim Hacim Ağırlık (kg/m³)	Delik Oranı (%)	Ortalama Basınç (MPa)
Dolu Tuğla	2	%15	24
			18
			12
	1.8	%15	22
			15
			10

1.2.4.3. Beton Blok (Briket)

Beton briketler, çimento, az ve orta ağırlıklı agregalar, su ve katkı maddelerinin birleştirilmesiyle yapılır. Hatta gerekirse yerinde üretilebilirler. Daha sonra mukavemet oluşturmak için kuru koşullarda havaya maruz bırakılırlar. Beton briketlerden sadece dolu beton briketlerin taşıyıcı duvar yapımında kullanılabileceği, boşluklu beton briketlerin ise taşıyıcı duvar yapımında kullanılamayacağı TS 2510'da belirtilmektedir. Farklı kullanılan beton briketleri ve bazı türlerinin basınç dayanımı Şekil 1.15'te ve Tablo 1.5'te sırasıyla verilmiştir.

Şekil 1.15. Beton briket türleri (URL-3)

Tablo 1.5. Beton blok ve briketlerin basınç dayanımı (Çöğürcü, 2007)

Türler	Basınç Dayanımının Değerleri	
	Ortalama Değer (MPa)	Minimum Değer (MPa)
BB2	2.5	2
BB4	5	4
BB6	7.5	6
BB12	15	12

1.2.4.4. Gazbeton

Nian vd. (2016), gazbeton 150 ile 800 kg/m3 arasında değişen kütle yoğunlukları ve %90'a kadar gözenekliliğe sahip yaygın olarak kullanılan ticari bir yapı malzemesidir. Gazbeton nispeten yüksek mukavemet/ağırlık oranına, iyi çekme gerilme kapasitesine, düşük termal genleşme katsayısına ve yüksek ısı ve ses yalıtım özelliklerine sahiptir.

Gazbeton, basınç yükleri altında çok kolay ezilen çeşitli boyutlarda gözeneklerden oluşur. Farklı özelliklerdeki gazbetonların mekanik özellikleri ve gazbetonun temsili görünümü Tablo 1.6'da ve Şekil 1.16'da sırasıyla verilmiştir.

Tablo 1.6. Gazbeton sınıfları ve fiziksel özellikleri (TGÜB, 2014).

Türler	Hacim Ağırlığı (kg/m^3)	Basınç Dayanımı (MPa)	Isı İletkenlik Hesap Değeri (λ) w/mK
G2/04	400	2.5	0.13
G3/05	500	3.5	0.16
G4/06	600	5	0.19

*Taşıyıcı duvarlarda yapı için kullanılacak gazbeton G4 sınıfı olmalıdır

Şekil 1.16. Gazbeton (Ytong) görünümü (Nian vd., 2016)

1.2.4.5. Kilitli yığma birim

Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvarında özel bir kilitli yığma birim üretilmiştir. Dolgusuz, dolgulu ve donatılı duvarlar, belirlenen kilitli yığma birim parçaları kullanılarak harçlı veya harçsız olarak inşa edilebilmiştir. Kilitli yığma elemanlarla oluşturulan prizmatik deney elemanının eksenel basınç deneyinde maksimum gerilme 8.40 MPa. Kullanın elaman Şekil 1.17'de görülmüştür (Kayaalp, 2017).

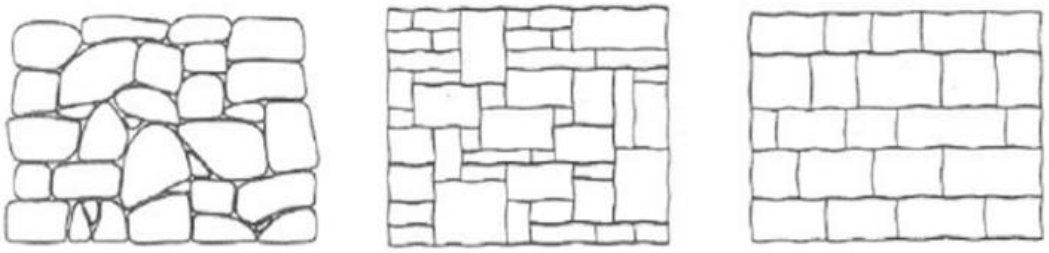
Şekil 1.17. Kilitli yığma birim inin görünümü (Kayaalp, 2017)

1.2.4.6. Harç

Harç, yığma blokları birbirlerine bağlamak amacıyla kullanılan bir malzemedir. Kum, bağlayıcı malzeme olarak çimento veya kireç ve su kullanılarak harç karışımı elde edilmektedir. TS 2510'da Kargır Duvarlar Hesap ve Yapım Kurallarına göre harç, mineral bağlayıcılar, kum ve yeterli miktardaki su ve gerektiğinde harcın özeliklerini geliştirmek amacı ile kullanılan katkı maddelerinin karıştırılması ile elde edilen bir yapı malzemesidir.

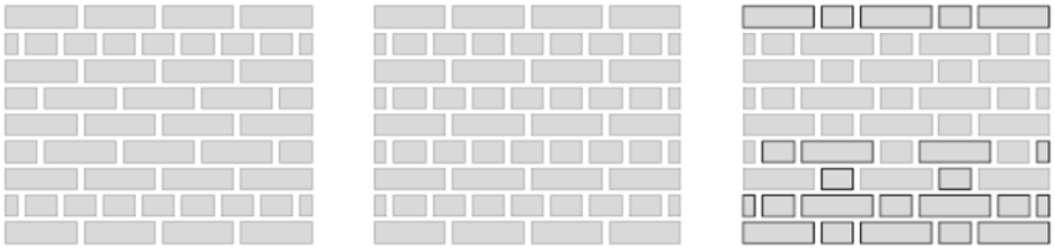
1.2.5. Yığma Yapılarda Kullanılan Örgü Çeşitleri

Yığma yapı, birimler ve eklemlerden oluşan heterojen bir malzemedir. Birimler tuğla, blok, kesme taş, kerpiç, düzensiz taşlar ve diğerleridir. Harç kil, bitüm, tebeşir, kireç/çimento bazlı harç, bağlayıcı veya diğerleri olabilir. Taş yığmanın çok basit bir sınıflandırması Şekil 1.18'de gösterilmiştir. Bazı örgü tarzı Şekil 1.19'da geliştirilmiştir.



(a) Moloz taş (b) Kesme taş (c) İri Kesme taş

Şekil 1.18. Farklı yığma taş yapılar (Lourenço, 1998)



(a) Basit (b) Çapraz (c) Flaman

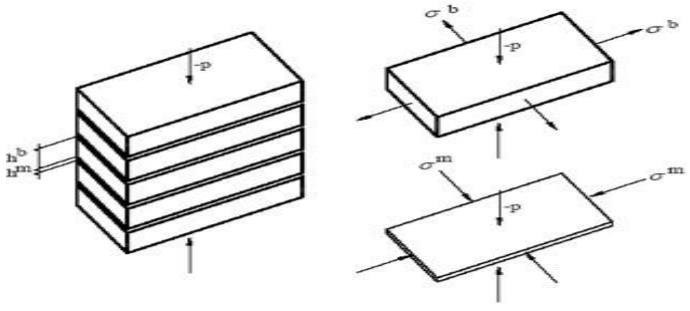
Şekil 1.19. Örgü teknikleri (Lourenço, 1998)

1.2.6. Yığma Duvarın Davranışı

Farklı yükleme koşulları altında farklı ölçeklerdeki duvar davranışını anlamak bir yandan deprem durumunda yapısal düzensizliklerin ve çatlakların başlayacağı elemanların belirlenmesi, diğer yandan yığma hesap ve modelleme yöntemlerinin iyileştirilmesi, malzemenin yüksek heterojenliği nedeniyle her zaman hassastır. Yığma yapı, genel olarak anizotropik davranışa sahip kompozit bir malzemedir. Böyle bir anizotropi, bu bileşenlerin özellikleri izotropik olsa bile birimlerin ve harcın geometrik düzenlemelerinden kaynaklanır. Ayrıca, bileşenler, yatay ve düşey yönlerin açıkça eşdeğer olmayacağı şekilde düzenlenmiştir. Harç derzleri, zayıflık düzlemleri görevi görür. Bu nedenle yapısal tepki büyük ölçüde yatak bağlantılarının yönelimlerine bağlıdır.

1.2.6.1. Tek Eksenli Basınç

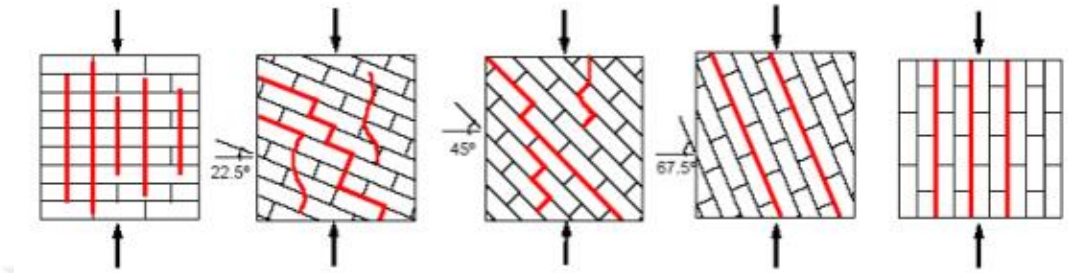
Birim ve harcın elastik özelliklerindeki farklılığın, kırılmanın habercisi olduğunu göstermiştir (Hilsdorf, 1969). Aslında birimler normalde harçtan daha serttir ve kireç harcı ile inşa edilmiş eski duvarlarda fark daha belirgindir. Yığma duvar yatak derzlerine dik yönde tek eksenli basınç, harçta üç eksenli bir basınç ve birimde basınç/çift eksenli gerilme durumuna yol açmıştır (Şekil 1.20).



Şekil 1.20. Tek eksenli basınç altında yığma prizmalarda yerel gerilme durumu (Hilsdorf, 1969)

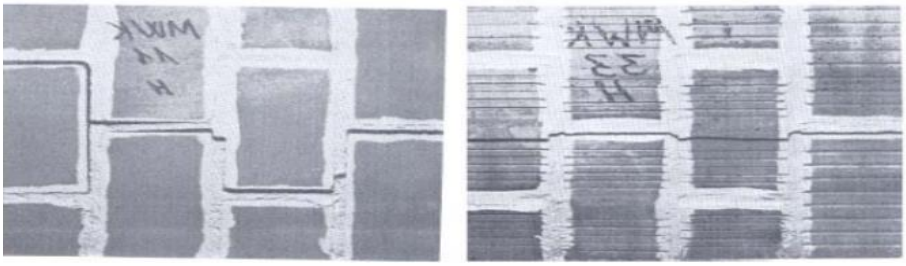
Artan deformasyon üzerine kırılmaya kadar ek düşey çatlaklar ortaya çıkmaktadır. Duvarın tek eksenli basıncı harçta üç eksenli bir basınç durumuna ve tuğla elemanlarda iki eksenli bir basınç ve çekişe yol açar. Dayanım ve göçme modu, yataklı bağlantıların farklı

eğimleri göz önüne alındığında değişir (Page, 1981; Samarasinghe ve Hendry, 1982). Tek eksenli basınçteki kırılmanın genellikle test edilen panele dik bir düzlemde gerçekleşmektedir. Eksenel basınç altındaki yığma duvar numunelerindeki basınç etkisi Şekil 1.21'de gösterilmiştir.



Şekil 1.21. Tek eksenli basınç altındaki hasar modları (Page 1981)

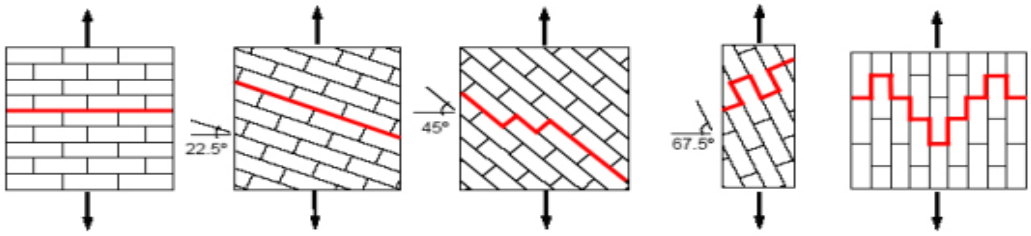
Yatay derzlerine dik çekme yüklemesi için kırılma genellikle yatak derzi ile birim arasındaki derzin ayrılmasından kaynaklanır. Kaba bir yaklaşım olarak duvarın çekme mukavemeti, derz ve birim arasındaki gerilme birleşim kuvvetine eşitlenebilir. Düşük mukavemetli birimlere ve yatak derzi ile birim arasında daha büyük çekme birleşimi mukavemetine sahip duvarda, örn. yüksek mukavemetli harç ve dübel etkisi oluşturan çok sayıda küçük delikli birimlerde, birim çekme mukavemetini aşan gerilmeler sonucunda kırılma meydana gelmektedir. Kabaca bir tahmin olarak bu durumda duvarın çekme dayanımı, birimin çekme dayanımına eşitlenebilir. Yatak derzlerine paralel çekme yüklemesi için Backes (1985) tarafından eksiksiz bir deney programı oluşturulmuştur. Bu çalışmada duvar panellerini doğrudan gerilim altında test etti ve gerilim kırılmasının harcın tipinden ve kilitli yığma birimlerden etkilendiğini bulmuştur. Daha güçlü harç ve daha zayıf duvar birimleri için Şekil 1.22a'da gösterildiği gibi çekme çatlakları harç derzleri boyunca ve tuğlaların ortasından geçen sıralarda gerçekleşmiştir. Daha zayıf harç derzleri ve daha güçlü duvar birimleri için, Şekil 1.22b'de gösterildiği gibi çekme çatlağı, duvar birimlerinin derzleri boyunca ve kademeli düşey derzleri arasındaki yatay derzlerinin uzunluğu boyunca görülmüştür.



(a) Zikzak tipi (b) Geçiş tipi

Şekil 1.22. Yük altında yığma duvarların çekme hasarları (Backes, 1985)

Page (1983) tek eksenli çekmeye maruz kalan katı kil birimli yığma duvarlarında gözlemlenen farklı hasar modlarını göstermiştir. Görüldüğü gibi yatay derzlerin ara eğimleri için kırılma derzlerde yoğunlaşmıştır. Eksenel çekme altındaki yığma duvar numunelerindeki çekme etkisi Şekil 1.23'te gösterilmiştir.

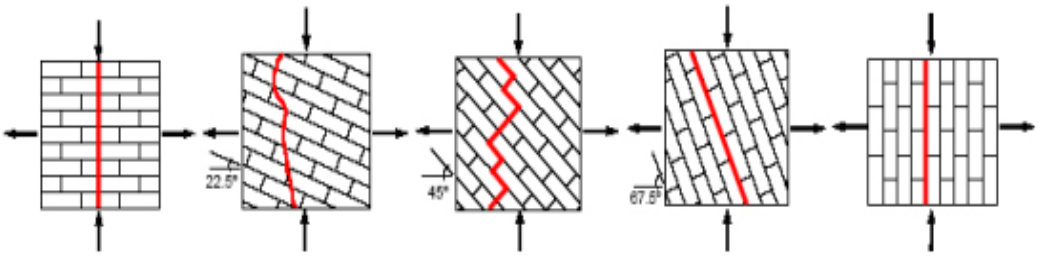


Şekil 1.23. Tek eksenli çekme altındaki hasar modları (Page, 1983)

1.2.6.2. Çift Eksenli Çekme-Gerilme Altında Davranışı

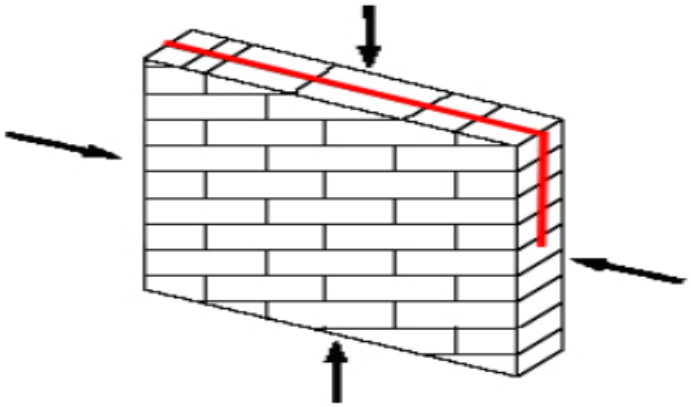
Bir duvar elemanının tuğla ve/veya bloklara kıyasla derzlerin zayıflığından kaynaklanan anizotropi, çift eksenli yükleme altındaki davranışın analizini gerektirir. Davranış, tam bir gerilim tensörü tarafından tanımlanmalıdır. Yani malzeme eksenleri boyunca farklı davranışlar anlamına gelen duvar malzemesinin anizotropisini hesaba katarak duvarın çift eksenli gerilme durumları altındaki yapısal davranışı, tek eksenli yükleme koşulları altındaki yapısal davranışıyla tam olarak tanımlanamaz. Oransal çift eksenli yüklemeye maruz kalan duvarların en eksiksiz deneysel verileri, Page (1981, 1983) tarafından sağlanmıştır. Deneysel olarak yarı ölçekli katı kil birimleri ile gerçekleştirilmiştir. Hem malzeme eksenlerine göre asal gerilmelerin oryantasyonu hem de asal gerilme oranı, kırılma modunu ve mukavemeti önemli ölçüde etkiler. Çekme-sıkıştırmada kırılma ya

bağlantıların çatlaması ve kaymasıyla ya da hem birimleri hem de bağlantıları içeren birleşik bir mekanizmada meydana gelmektedir. Çift eksenli çekme-basınç altındaki yığma duvar numunelerin etkisi Şekil 1.24'te gösterilmiştir.



Şekil 1.24. Çift eksenli çekme-basınç altındaki hasar modları (Page, 1983)

Çift eksenli basınçtaki kırılma tipik olarak ana gerilmelerin doğrultusundan bağımsız olarak numunenin orta kalınlıkta, serbest yüzeyine paralel bir düzlemde bölünmesiyle meydana gelir. Bu durumda, hem eklem kırılması hem de yanal çatlakları içeren kesme, birleşik bir mekanizma içinde meydana gelir. Farklı duvar tiplerinin çift eksenli mukavemetini karakterize etmek için kapsamlı programlar tam ölçekli numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir; delikli yığma tuğla birimler için, Ganz ve Thürlimann (1982), tuğla ve kalsiyum silika tuğla birimler için, Guggisberg ve Thürlimann (1987) ve yığma beton birimler için, Lurati vd. (1990). Çift eksenli basınç-basınç altındaki yığma duvar numunelerindeki etki Şekil 1.25'te gösterilmiştir.



Şekil 1.25. Çift eksenli basınç-basınç altında duvarlarında yenilme modu (Page 1981).

1.2.6.3. Kayma (Kesme) Etkisi

Yığma duvarlar, kendi düzlemlerinde ve ayrıca duvarlara dik düzlem boyunca rüzgar, toprak darbeleri ve depremler gibi yatay kuvvetlere maruz kalabilir. Kesme kuvvetleri nedeniyle duvarın direncinin değerlendirilmesi, yapının stabilitesini ve güvenilirliğini tahmin etmeyi mümkün kılmaktadır. Düzlem içi kesme durumunda duvar düzlemindeki düşey yüklemeye ek olarak duvar yatay kuvvetlere maruz kalmaktadır.

1.2.7. Yığma Duvar Kırılma Hipotezleri

1.2.7.1. Kırılma Türleri

Hem düşey hem de yatay kuvvet taşıyan yığma duvarlarda göçme mekanizmasının şekli üç farklı şekilde meydana gelmektedir. Bunlar; eğilme, kayma ve dönmeden yatay ötelenme göçmesidir. Mekanizmalar öncelikle duvarın geometrisine bağlıdır. Yükseklik/uzunluk oranı, sınır şartları, düşey yüklerinin büyüklüğü ve kilitli yığma birimin özellikleri tam olarak araştırmacılar tarafından belirlenmiştir (Tomazevic, 1999; ElGawady vd., 2007).

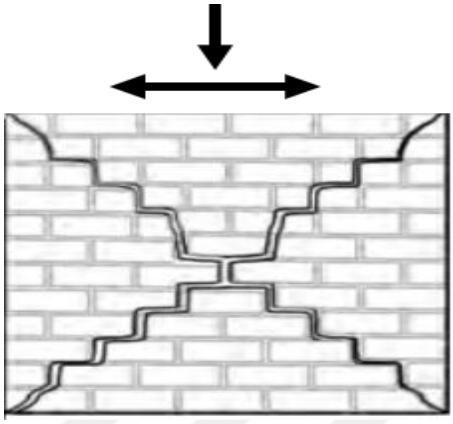
1.2.7.2. Kayma Kesme Göçmesi

Düşey ve yatay kuvvet taşıyan yığma duvarların göçme şekillerinden biri kayma göçmesidir. Harç mukavemeti zayıf veya ön sıkıştırması düşük olan bir duvarda, yatak derzler boyunca kayarak kırılma meydana gelmesi muhtemeldir. Yatak derzleri boyunca sürtünme direnci aşıldığında kayma meydana gelmektedir. Döngüsel hareketler sırasında gelişen eğilme çekme çatlaklarının birleştirilmesiyle de kayma düzlemleri oluşturulmuştur (Magenes ve Calvi, 1997).

1.2.7.3. Diyagonal Çekme Göçmesi

En-boy oranı düşük ve eksenel yüklerin yüksek olduğu duvarlarda, kırılma diyagonal çatlama ile meydana gelmesi muhtemeldir. Tuğla birimlerinde veya harç derzlerinde

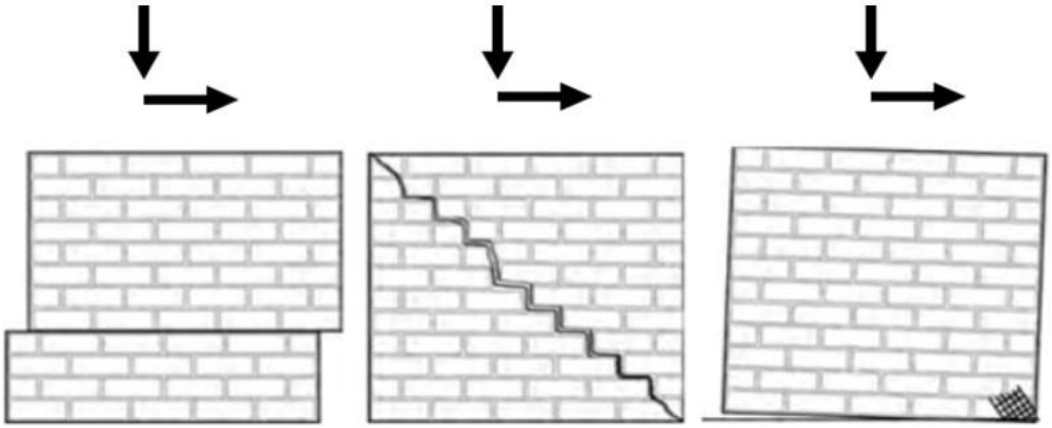
kademeli bir şekilde diyagonal çatlak oluşabilir. Yığma duvarlarda, kesme-düzlem içi hasarı daha yaygın olup bu hasar tipi (X) şeklinde çift diyagonal kesme çatlağı olarak ifade edilebilir (Şekil 1.26).



Şekil 1.26. Döngüsel kesme yükleri altında çift diyagonal çatlak

1.2.7.4. Devrilme ve Tabanda Ezilme Göçmesi

Yüksek moment/kesme oranlarına veya geliştirilmiş kesme direncine sahip duvarlarda, yanal kuvvet ya da deplasman talebi arttıkça yığma panel alt bölgelerinde çekme çatlaklarına maruz kalır ve tabandaki basınç bölgesinde ezilme oluşana kadar mafsallaşmadan ötürü devrilme tespit edilmiştir. Diyagonal çatlama göçme modu, bir duvar perde duvarın en az tercih edilen göçme modu olarak kabul edilir. Genellikle kapasitede hızlı bir düşüş ve zirve yüke ulaştıktan sonra sınırlı deformasyonlar ile gevrek davranış ile karakterize edilmiştir (Zhao vd, 2003). Öte yandan sallanma ve kayma, deformasyon kapasitesi, stabilite ve enerji kaybı göz önüne alındığında yeterli hasar mekanizmaları olarak kabul edilmiştir. Düzlem içi sismik yüke maruz kalan bir yığma duvardaki tipik göçme modları Şekil 1.27'da verilmiştir.



(a) kayma kesme (b) diyagonal çekme (c) devrilme ve tabanda ezilme

Şekil 1.27. Düzlem içi sismik yüke maruz kalan bir yığma duvardaki tipik göçme modları (Tomazeviç, 2000)

1.2.8. Yığma Yapıların Onarım ve Güçlendirme Yöntemleri

1.2.8.1. Geleneksel Onarım Teknikleri

Yığma yapıların çatlaklarının onarımında çatlak genişliklerine göre değişen yöntemler kullanılabilir. Kılcal çatlaklar, gözle görülemeyen ancak belirlenebilen çatlaklar ile 1-2 mm' ye kadar olan çatlaklardır. Çatlakların büyüklüğü, özellikle dış hava koşullarına açık taşıyıcı elemanların kısa zamanda güçlerini yitirmelerine yol açmaktadırlar. Yapılarda oluşan çatlakların doldurulmasında; çimento şerbeti, epoksi reçineleri ve özel katkı maddeli harçlar kullanılmaktadır. Farklı onarım türleri aşağıdaki gibidir;

- Çimento Şerbeti ile onarım,
- Çimento Enjeksiyonu ile onarım,
- Epoksi enjeksiyon yöntemi,
- Epoksi harcı ile onarım
- Sıvama ile onarım

1.2.8.2. Modern Güçlendirme Teknikleri

Geleneksel güçlendirme tekniklerinin sınırlamalarının aşılması ihtiyacının bir sonucu olarak yeni malzeme ve tekniklerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu dezavantajların çoğu

modern güçlendirme teknikleri kullanılarak bastırılabilir. Elyaf takviyeli polimerler, monotonik, sismik ve patlayıcı yükler altında duvar elemanlarının davranışını iyileştirdikleri için verimli bir alternatiftir. Ek olarak eklenen kütle ve rijitlik ihmal edilebilir olduğundan, güçlendirilmiş yapının dinamik özellikleri değişmeyecektir.

1.2.8.2.1. Elyaf Takviyeli Polimer (FRP)

Sistemi iki ana malzemeden oluşur: reçine ve lifler. Bu FRP kompozitleri, inorganik bir polimerik matris içinde birbirine bağlanmış karbon (CFRP), cam (GFRP) veya aramid (AFRP) liflerden yapılır. Liflerin yönünde yüksek mukavemet ve sertlik, korozyona karşı dayanım, düşük ağırlık, sınırsız uzunlukta laminat, kumaş ve tendon gibi çeşitli formlarda bulunabilirlik, birçok ortamda olağanüstü dayanıklılık elyaf takviyeli polimerlerin avantajlarındandır. Lif çok ince filamentlerden yapılmıştır ve sisteme sağlamlık sağlayan en önemli elementtir. FRP sistemleri doğrusal-elastik basınç-çekme ilişkisi sergiler. Çekme kuvvetlerine maruz kaldığında ani çatlak ve plastik davranış gözlenmez. FRP sistemlerinin özellikleri şu şekilde tanımlanır: lif hacmi tipi, yönü ve kalınlığı ve reçine tipi. FRP kompozitlerin en önemli özelliklerinden biri, bir yapısal eleman FRP ile takviye edildiğinde, gerilmelerin kesme ve epoksi ara yüzey yoluyla substrattan FRP 'ye aktarılmasıdır. Diğer avantajların yanı sıra, FRP malzemelerinin en kullanışlı özelliklerinden bazıları şunlardır: i) kolay uygulama; ii) az işçilik, iii) yığma duvarın malzeme bütünlüğünün iyi korunması.

1.2.8.2.2. Elyaf Takviyeli Harç (FRM)

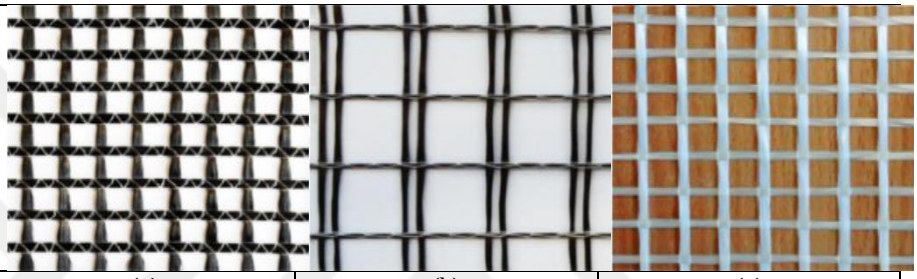
Çelik, cam, sentetik lifler ve doğal liflerden oluşan mikro liflerin harç içine gömülmesiyle oluşan bir pekiştirme tekniğidir. Polipropilen lifler, harçla temas alanı boyunca mekanik olarak bağlanan kimyasal olarak inert liflerdir.

1.2.8.2.3. Tekstil takviyeli harç (TRM)

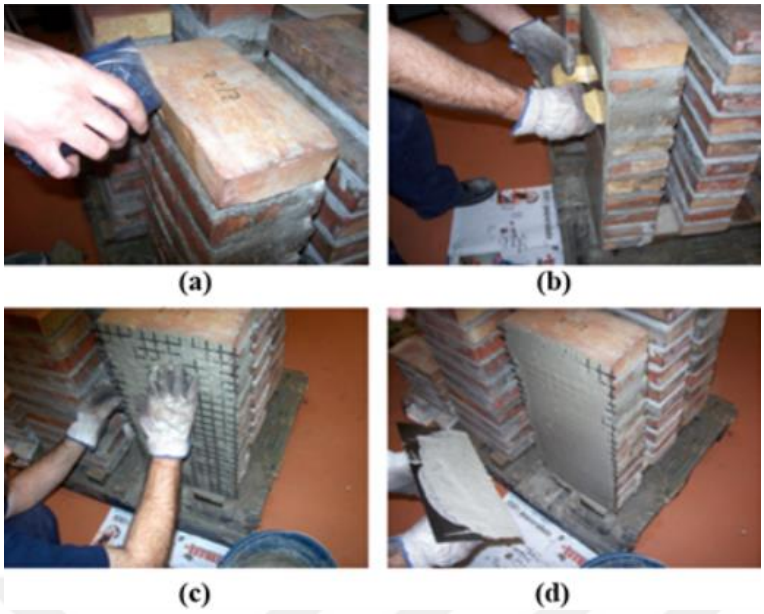
Tekstil takviyeli harç (TRM), FRP'nin belirtilen eksikliklerini gidermek için bir organik bağlayıcının (matris) inorganik olanla (çimento veya kireç harcı) değiştirilmesiyle oluşturulan daha yeni bir kompozittir. Harçlara dışarıdan gömülü tekstil ızgaraları kullanarak

hem geleneksel hem de modern malzemelerin temel özelliklerini birleştiren bir tekniktir. Izgara, iki ortogonal yönde düzenlenmiş uzun elyaf fitillerden (karbon, cam veya aramidden yapılmıştır. Polimer reçineleri yerine çimento veya kireç bazlı harçlar kullanılır. TRM'nin kompozit etkisi, ızgara yapısının ve harcın mekanik olarak kenetlenmesi yoluyla elde edilmişlerdir (Papanicolaou vd., 2011). Kesme dayanımını, rijitliğini ve sünekliğini arttırır. Karbon fiber tekstil, cam fiber tekstil ve bazalt fiber tekstil olmak üzere üç farklı tekstil dış takviye olarak kullanılmıştır (Tablo 1.7).

Tablo 1.7. Tekstil türleri (Raoof, 2017).

Tekstil Türleri			
	(a)	(b)	(c)
Malzeme	Karbon Fiber	Cam Elyaf	Bazalt Elyaf
Ağırlık (gm/m^2)	384	220	220
Mesh (mm)	10x10	10x10	10x10

Ağırlık, tekstilin mekanik özelliklerini ve ağ üzerinden harca nüfuz etme derecesini etkileyen her yönde bağımsız olarak kontrol edilebilir. TRM, duvarın düzlemde kesme ve bükülmeye karşı direncini arttırır, düzlemden dışarı eğilir ve aynı zamanda dikey yük taşıma kapasitesini arttırır. Ayrıca yığma kemerleri, tonozları ve kubbeleri güçlendirmek için de kullanılmıştır (Kouris, 2018). TRM Kompozitleri, FRP kompozitleri ile aynı şekilde, çoğunlukla "el yatırma" yöntemiyle yerleştirilir. Önce bir kat harç, ardından bir kat file ve ardından tekrar bir kat harç uygulanır ve istenilen kat sayısına göre işlem tekrarlanır. Her bir harcın bir önceki harcın taze iken uygulanması önemlidir (Şekil 1.28). TRM'nin mekanik özellikleri iyi bilinirken dış etkilere maruz kalmaya karşı dayanıklılığı şimdiye kadar yeterince araştırılmamıştır (Al-Lami, 2020).



Şekil 1.28. TRM uygulama aşamaları (a) numuneyı ıslatılması, (b) son harç tabakasının uygulanması, (c) izgara üzerine harç ile kaplama ve (d) son harç tabakasının uygulanması (Bernat-Maso, 2014)

1.2.9. Yığma Yapıların Modelleme Stratejileri

Yapısal yığma sayısal modellemesi, yapı mühendisliği araştırma ve uygulamasındaki en karmaşık problemlerden biridir. Bu karmaşıklık, kilitli yığma birimleri boyutu ve anizotropisi, derz genişliği ve derzlerinin düzeni hem kilitli yığma birim hem de harcın malzeme özellikleri ve işçilik kalitesi gibi çok sayıda etkileyen faktöre bağlanmıştır. Asteris vd (2014)'ye göre, bilgisayar yazılımlarından faydalanılarak yapılan yığma türü yapıların analizlerinde genellikle üç farklı tip strateji özetlenemiştir:

1.2.9.1. Tek Bileşenli Malzeme Olarak Duvarın Modellemesi (Makro Modelleme)

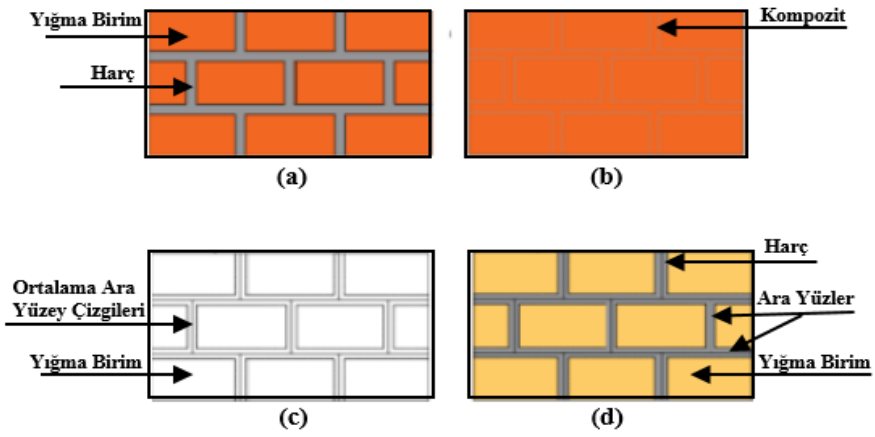
Bu stratejide, birimler harç ve birim-harç arayüzü homojen bir süreklilik içinde dağıtılır (Şekil 1.29 (b)). Başka bir deyişle, tek tek birimler ve eklemler arasında ayrım yapılmaz ve yığma homojen, izotropik veya anizotropik bir sürekli ortam olarak dikkate alınır. Bu yöntem, büyük ölçekli yığma yapıların analizi için tercih edilebilirken tüm beklenen göçme modlarını yakalamanın zorluğundan dolayı küçük bir yığma panelin detaylı gerilme analizi için uygun değildir. Ana zayıflık ve doğrusal olmama kaynağı olarak mevcut harç derzlerinin etkisi, bu strateji kullanılarak ele alınamaz.

1.2.9.2. İki Bileşenli Malzeme Olarak Duvarın Modellenmesi (Basitleştirilmiş Mikro Modelleme)

Bu stratejide, tuğlalar orijinal tuğla boyutları artı gerçek derz kalınlığı ile aynı boyutta sürekli elemanlar tarafından hayali genişletilmiş tuğlalar olarak temsil edilir. Harç derzi de Şekil 1.29 (c)'te gösterildiği gibi sıfır kalınlıkta bir ara yüzey olarak modellenmiştir. Arayüzün sertliği, gerçek eklemlerin sertliğinden çıkarılır. Bu prosedüre göre harç ve birim/harç ara yüzünün özellikleri ortak bir elemanda toplanırken genişletilmiş elemanlar tuğla birimlerini temsil etmek için kullanılır. Bu yaklaşım, hesaplama çabasının azaltılmasına yol açar ve daha geniş bir yapı yelpazesine uygulanabilir bir model verir.

1.2.9.3. Üç Bileşenli Bir Malzeme Olarak Duvarın Modellenmesi (Detaylı Mikro Modelleme)

Bu stratejide, derzlerdeki birimler ve harç süreklilik elemanları ile temsil edilirken birim harç ara yüzeyi süreksiz elemanlar ile temsil edilmiştir (Şekil 1.29 (d)). Bu modelleme daha doğru sonuçlara yol açarken iyileştirme seviyesi ilgili analizin hesaplama açısından yoğun olduğu ve uygulamasını küçük ölçekli laboratuvar numuneleri ve yapısal detaylarla sınırladığı anlamına gelmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için basitleştirilmiş mikro modelleme prosedürleri önermiştir(Sutcliffe vd., 2001; Asteris ve Tzamtzis, 2003).



Şekil 1.29. Yığma modelleme teknikleri (a) yığma örnek (b) tek bileşenli makr, (c) iki bileşenli mikro (d) üç bileşenli mikro (Lourenço, 2002).

1.2.10. Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Her parametrenin yapının genel davranışı üzerindeki izole etkisini incelemenin bir yolu, sonlu elemanlar yöntemine dayalı sayısal modelleme kullanmaktır. Numuneleri test etmek yerine araştırma yapmanın daha ucuz bir yolu olduğu için sayısal analizin deneysel testlere göre avantajları vardır. Ayrıca sayısal modelleme, bu tip duvarların davranışını etkileyen en etkili parametrelerin çalışılmasına olanak sağlar. Ancak bu modellerin deneysel testlerle kalibre edilmesi ve doğrulanması gerekir. Sonlu elemanlar yöntemi, yapıların farklı sınır koşulları altındaki davranışlarını incelemek için kullanılabilecek güçlü bir araçtır. Böylece sonlu elemanlar için yapılan basit yaklaşımlar ile yapının tümü için kabul edilebilir sonuçlar elde etmek mümkün olmaktadır. Duvar davranışının karmaşıklığı, aralarında çatlak oluşumu, ezilme ile kırılma, çekme ile kırılma ve farklı malzemeler arasındaki etkileşim gibi bir dizi faktörden kaynaklanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, yığma duvarların elemanlarında ortaya çıkabilecek tüm olası göçme mekanizmalarının bilinmesini gerektirir. Farklı yapı türlerinin sayısal modellemesi ve analizi için çok sayıda ticari genel amaçlı sonlu eleman ve ayrık eleman yazılım paketleri mevcuttur. Bu yazılım paketleri, doğrusal olmayan statik veya dinamik analizleri iki veya üç boyutlu olarak gerçekleştirebilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi temelinde geliştirilen paketlerin çoğu farklı eleman türleri, çözüm stratejileri ve malzeme davranış modları içerir ve bu nedenle kırılgan yığma yapıların analizi için kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, havacılık ve inşaat mühendisliği ile ilgili yapısal mekanik problemlerini çözmek için farklı endüstrilerdeki mühendisler tarafından bağımsız olarak geliştirilmiştir. Aşağıda verilen destekli sistem modelleri hakkında fikir vermektedir. Bu tez için farklı yığma yapılar için sonlu eleman modelleri geliştirmek ve analizleri için ticari sonlu eleman analiz ABAQUS yazılımı kullanılacaktır.

1.2.11. Yığma Yapıların Doğrusal Olmayan Davranışı

Doğrusal olmayan analizde, kuvvet ve yer değiştirme arasındaki ilişki artık doğrusal değildir. İlişki lineer değildir ve mevcut yer değiştirmeler genellikle daha önceki aşamalardaki yer değiştirmelere bağlıdır. Böyle bir analizde amaç bir yer değiştirme vektörünü hesaplamaktır. Farklı doğrusal olmayan etkileri hesaba katarak iç ve dış kuvvetleri dengeler. Böylece problem uzayda (sonlu elemanlar) ve aynı zamanda (arttırımlı) ayrık hale gelmektedir. Yani her bir artışın sonunda dengeye ulaşmak için, çoğu durumda

yinelemeli bir çözüm algoritması kullanılır: bir kademeli arttırımlı ardışık yöntemi (Hibbitt vd. 1997). Doğrusal olmayan analizde, iç kuvvet vektörü, malzemelerin doğrusal olmayan mekanik davranışından dolayı (fiziksel veya doğrusal olmayan malzeme analizi) genellikle doğrusal olmayan bir şekilde yer değiştirmelere bağlıdır. Ancak yüklemenin büyüklüğü veya yönü yer değiştirmeye bağlı olduğundan (geometrik doğrusal olmayan analiz) dış kuvvet vektörü de yer değiştirmelere bağlı olabilir. Aynı analizde her iki tür doğrusal olmama durumu da mümkündür. Doğrusal olmayan yapı analizinde kullanılabilecek birkaç paket uygulaması vardır. ABAQUS yazılımı beton, taş ve yığma yapılardaki hasarı simüle etmek için dört alternatif modelleme yöntemi bulundurmaktadır. Bunlar Drucker Prager (DP), Mohr Colulomb Plastisite (MC), ve Concrete Damaged Plasticity veya Beton Hasarlı Plastisite (CDP) malzeme model yaklaşımlarıdır. Gevrek malzemelerin doğrusal olmayan davranışı, gerçekte gerilmede çatlama ve basınçta ezilme olarak ifade edilmektedir. Bu modeller içinde DP modeli ve CDP modeli yığma yapılarda yaygın olarak kullanılan dayanım hipotezlerinden biridir. Söz konusu modelde akma kriterinin Von-Mises kriterinin genelleştirilmiş formu olduğu söylenebilir. CDP modeli ise DP modelinin geliştirilmiş halini kullanmaktadır. Akma kriterlerinde kullanılan denklemlerde gerilim tensörleri kullanıldığı için öncelikle gerilim tensörü ve bileşenleri konusu ele alınmıştır. CDP modeli, ABAQUS/Standart ve ABAQUS/Explicit analiz yöntemlerinde kullanılan ve basınç ve çekme gerilmeleri altında betonun plastik davranışını tanımlama olanağı sağlamayan plastisite tabanlı bir modelleme yaklaşımıdır. CDP yaklaşımı statik/dinamik, herhangi bir yükleme şartları altında beton ve yığma yapıların doğrusal olmayan analizine izin vermektedir. Bu çalışmada, sonlu elemanlar analizi sırasında kullanılan beton hasar plastisite modeli parametre değerleri literatürde yer alan çalışmalarda tavsiye edilen değerler olarak seçilmiştir. (Dere ve Koroğlu, 2017; Obaidat, 2011; Hafezolghorani vd., 2017).

1.2.12. Sayısal Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Modal analiz, bir yapının başlangıç şartlarına ve uygulanan dış yüklere karşı göstermiş olduğu tepkiye bağlı olarak dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi için yapılan sayısal ve deneysel çalışmaların tümünü içeren bir analiz türüdür. Eğer bir sistem, mesnet hareketi veya dış etki olmaksızın sadece başlangıç şartları sebebiyle titreşiyorsa bu tür titreşim serbest titreşim olarak adlandırılır. Buradaki serbest sözcüğü titreşim sırasında zamana bağlı herhangi bir dış etkinin bulunmadığını ifade eder. Dış etkiler, sistemde zorlanmış titreşim

meydana gelmesinden bir müddet sonra kaldırılırsa yine serbest titreşim meydana gelir. Bu durumda, serbest titreşimin meydana gelmesinde zorlanmış titreşimin bittiği (dış etkilerin kaldırıldığı) ve serbest titreşimin başladığı andaki şartlar (yer değiştirme ve hızın değeri) etkili olmuştur (Celep, 2011). Gerçekte sistemlerin çoğu çok serbestlik derecesine sahiptir. Tek serbestlik dereceli sistemlerin titreşimindeki skaler değerlerin yerini, çok serbestlik dereceli (ÇSD) sistemlerde vektörel ve matris büyüklükler almıştır (Chopra, 2006).

Dinamik karakteristikler içerisinde yer alan sönüm, malzemenin tekrarlı elastik şekil değiştirmesinin yol açtığı ısıl etkilere, şekil değişimi sırasında oluşan içsel sürtünmelere, taşıyıcı sistem ile bölme duvarlar gibi taşıyıcı olmayan elemanlar arasındaki sürtünme hareketine bağlı olarak oluşan enerji tüketimidir. Gerçek bir yapıda tüm bu tüketim mekanizmalarını tespit edip matematiksel olarak ifade etmek oldukça zordur (Chopra, 2011). Bu nedenle dinamik karakteristiklerin (frekans ve mod şekilleri) sayısal yöntemler ile belirlenmesinde, sönümün dikkate alınmadığı sönümsüz serbest titreşim analizleri kullanılmaktadır. İki serbestlik dereceli bir sistemin sayısal modeli denklem (1.1) verilmektedir.

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathrm{U}}(\mathrm{t})\}+[\mathbf{C}]\{\dot{\mathrm{U}}(\mathrm{t})\}+[\mathbf{K}]\{\mathrm{U}(\mathrm{t})\}=\{\mathbf{F}(\mathrm{t})\} \tag{1.1}$$

Şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada **[M], [C] ve [K]** sistemin sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, $\{\ddot{\mathrm{U}}(\mathrm{t})\},\{\dot{\mathrm{U}}(\mathrm{t})\}$ ve $\{\mathrm{U}(\mathrm{t})\}$ ise aynı sistemin rölatif yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. $\{\mathbf{F}(t)\}$ ise sisteme etkiyen dış yük vektörüdür. $\{\mathbf{F}(t)\}$=0 olması durumunda serbest titreşimin türevsel denklemi elde edilir, sönüm olmayan sistemlerde (C=0) ise bu denklem aşağıdaki şeklini alır. Bu durumda denklem (1.2)'de sönümün ve dış kuvvetin olmadığı kabul edilirse serbest titreşimin türevsel denklemi elde edilir. Bu denklem aşağıdaki şeklini ifade edilebilmektedir (Chopra, 2006).

$$[\mathrm{M}]\{\ddot{\mathrm{U}}(\mathrm{t})\}+[\mathrm{K}]\{\mathrm{U}(\mathrm{t})\}=0 \tag{1.2}$$

Serbest titreşim hareketi harmonik bir harekettir ve yerdeğiştirmeler denklem (1.3) yardımıyla elde edilebilir.

$$\{\mathrm{U}(\mathrm{t})\}=\mathbf{A}\cos(\omega_{\mathrm{n}}\mathrm{t})+\mathbf{B}\sin(\omega_{\mathrm{n}}\mathrm{t}) \tag{1.4}$$

Burada **A** ve **B** başlangıç şartlarından elde edilir. Bununla birlikte, α faz açısı, ω_n doğal açısal frekans ve ϕ hareketin genlik vektörü olmak üzere, sönümsüz bir sistemin serbest titreşimi için çözüm,

$$\{U(t)\} = \{f\}\cos(\omega_n t - \alpha) \tag{1.5}$$

Şeklinde yazılabilir. (1.16) denkleminden,

$$\{\ddot{U}(t)\} = -\omega_n^2 \{f\} \cos(\omega_n t - \alpha) \tag{1.6}$$

Elde edilir. (1.5) ve (1.6) denklemleri (1.3)'de yerine yazılırsa,

$$-\omega_n^2 [\mathbf{M}]\{\phi\} \cos(\omega_n t - \alpha) + [\mathbf{K}]\{\phi\} \cos(\omega_n t - \alpha) = 0 \tag{1.7}$$

Elde edilir. Bu denklem düzenlenirse,

$$([K] - |\omega_n^2[M])|\{f\} = 0 \tag{1.8}$$

Bu denklemin sıfırdan farklı çözümleri için aşağıda belirtilen karakteristik determinant ifadesi kullanılabilir;

$$\mathbf{det}\left|[\mathbf{K}] - \omega_n^2[\mathbf{M}]\right| = 0 \tag{1.9}$$

Bu değerlere karakteristik değer, normal değer veya özdeğer denklemi olarak bilinen denklem (1.11)'in kökleri olan n tane ω'den doğal açısal frekanslar ω 'ler $[\omega_1, \omega_2, \omega_3, \ldots \ldots \omega_n]$ belirlenir ve bunlar geleneksel olarak $[\boldsymbol{\omega_1 < \omega_2 < \omega_3, \ldots \ldots < \omega_n}]$ biçimde küçükten büyüğe doğru sıralanır, tekabül eden n tane bağımsız $\{\phi\}$ vektörü vardır. Bu vektörler, "Doğal Titreşim Modları" veya "Doğal Titreşim Mod Şekilleri" olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca öz vektör, karakteristik vektör veya olağan vektör olarak da bilinmektedir. Sistemin mod şekillerinin genel görünümünü veren bu değerler, denklem

(1.9)'in çözülmesiyle bulunabilir. ÇSD sistemin doğal açısal frekanslarına bağlı olarak doğal titreşim periyotları T_n ve doğal devir frekansları f_n aşağıdaki bağıntılarla; (1.10) ve (1.11)

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \tag{1.10}$$

$$f_n = \frac{1}{T_n} \tag{1.11}$$

şeklinde ifade edilebilmektedir.

1.2.13. Sayısal Dinamik Davranışın Belirlenmesi

Sayısal analizler, yapının kendi ağırlığı ve dış kuvvetler altında meydana gelen yerdeğiştirme ve gerilmeleri elde etmek için kullanılmaktadır. Bu kısımda, sonlu eleman yöntemine dayalı doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerin dinamik denklemleri verilmektedir. Nümerik analiz edilecek olan bir yapının doğrusal dinamik davranışını temsil edebilecek hareket veya dinamik denge denklemi şeklinde yazılabilir.

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{U}(t)\} + [\mathbf{C}]\{\dot{U}(t)\} + [\mathbf{K}]_L \{U(t)\} = \{\mathbf{F}(t)\} \tag{1.12}$$

Burada **[M]**, **[C]** ve $\{\ddot{U}(t)\}, \{\dot{U}(t)\}, \{U(t)\}$ Bölüm 1.19'da tanımlandığı gibidir. $[\boldsymbol{K}]_{\boldsymbol{NL}}$ ise doğrusal sistemin tanjant rijitlik matrisini göstermektedir. {F(t)} sisteme etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörüdür. Doğrusal davranış göstermeyen sistemlerin dinamik denge denklemi, lineer sistemlere benzer,

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{U}(t)\} + [\mathbf{C}]\{\dot{U}(t)\} + [\mathbf{K}]_{NL} \{U(t)\} = \{\mathbf{F}(t)\} \tag{1.13}$$

şeklinde yazılabilir. Burada $[\mathbf{M}]$ ve $[\boldsymbol{C}]$ doğrusal olmayan sistemin sırasıyla kütle ve sönüm matrislerini, $\{\ddot{U}(t)\}$, $\{\dot{U}(t)\}$ ve $\{U(t)\}$ ise aynı sistemin rölatif yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. $[K]_{NL}$ doğrusal olmayan sistemin tanjant rijitlik matrisini göstermektedir. $\{F(t)\}$ ise sisteme etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörüdür.

(1.13) denklemi, doğrusal sistemlerin çözümünde kullanılan denge denklemi ile benzerdir. Denklem (1.13)'da doğrusal sistemlerin tanjant rijitlik matrisi $[\boldsymbol{K}]_{\boldsymbol{NL}}$'in yerine $[\boldsymbol{K}]_{\boldsymbol{NL}}$ tanjant rijitlik matrisi konulmuştur. Doğrusal olmayan sistemlerde gerilme deformansyon eğrisi doğrusal davranış göstermediğinden $[\boldsymbol{K}]_{\boldsymbol{NL}}$ rijitlik matrisi her zaman aralığının başında yeniden hesaplanmaktadır.

Denklem (1.12) ve (1.13) matematiksel olarak ikinci dereceden lineer diferansiyel denklem sistemi göstermektedir. Bu denklemlerin çözümü, sabit katsayılı lineer diferansiyel denklemlerin çözümü gibi yapılabilir. Ancak denklemlerin genel çözümü için uygulanan işlemler, eğer matrislerin dereceleri büyük ise zor ve zaman alıcıdır (Bathe, 1996). Bu denklemlerin çözümü için birçok yaklaşık sayısal yöntem bulunmakla birlikte, pratik ve kolay uygulanabilir olması nedeniyle direkt integrasyon yöntemleri ile çözüm aranmaktadır. Direkt integrasyon işleminde dinamik hareket denklemi, adım adım sayısal işlem kullanılarak integre edilmektedir.

Çözümde, $\{\ddot{U}_0(t)\}$, $\{\dot{U}_0(t)\}$ ve $\{U_0(t)\}$ ile gösterilen, $t = 0$ anındaki yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörleri bilinmektedir. Dinamik hareket denkleminin çözümü, $t = 0$ ile $t =$ T zaman aralığında dikkate alınırsa, T çözüm zamanı n eşit zaman aralığına bölümü,

$$\Delta_t = \frac{T}{n} \tag{1.14}$$

Burada t anındaki çözüm bilindiği için, $t + \Delta_t$ anındaki çözüm elde edilebilir. Yani başlangıç şartlarından hareketle, Δ_t zaman sonraki çözüm bulunabilmektedir. Bu işlem, çözüm aralığı boyunca tekrar ettirilir. En çok kullanılan direkt integrasyon yöntemlerinden birisi merkezi farklar yöntemi, Houbolt ve Newmark yöntemi (Akköse, 2004). Rayleigh sönüm katsayıları Alfa ve Beta, birinci ve üçüncü modlar kullanılarak Denklem (1.15) ve Denklem (1.16)'da verilen formüller yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\alpha = \xi \frac{2\omega_i \omega_j}{\omega_{i+} \omega_j} \tag{1.15}$$

$$\beta = \xi \frac{2}{\omega_{i+} \omega_j} \tag{1.16}$$

1.2.14. Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Yöntemi (XFEM) Temel Kavramı

Matematiksel olarak çatlak yayılımı ve kırılma analizi problemleri çözülebilir. Son yıllarda, sayısal bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde belirli bir etki alanı üzerinde bir dizi fonksiyon tanımlanmıştır. Melenk ve Babuška, 1996 ve Gifford ve Hilton, 1978, tarafından geliştirilen zenginleştirme yöntemi, zenginleştirme bölgesine bağlıdır. Bu yöntemdeki yer değiştirme yaklaşımı, aşağıdaki denklem 2.17'de görüldüğü gibi sonlu elemanın standart çözümü u_{std} ile zenginleştirme çözümü u_{enr}'in toplamı olarak kabul olarak,

$$u = u_{std} + u_{enr} \tag{1.17}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Belytschko vd. (1988), yerel bölgelerin zenginleştirilmesinde uzmanlaşmış bir zenginleştirme yöntemi önermiştir. Belytschko ve Black (1999) tarafından geliştirilen XFEM, betonda çatlak ilerlemesi gibi süreksizlik sorunları için kullanılan bir zenginleştirme yöntemidir. Sayısal çözüm için birimin parçalanış tekniğini kullanmıştır.

Bu süreksizlikler, alanın belirli bir bölgesindeki malzemenin kırılmasından kaynaklanan çatlak ara yüzünün bir sonucu olabilir veya iki malzeme arasındaki ara yüzey bölgesinde yer alan bir kompozit malzemede üretilen bir malzeme ara yüzeyi olabilir. XFEM, beton gibi gevrek malzemelerde meydana gelen süreksizlik problemlerini çözmek için kullanılan sayısal bir tekniktir. Genişletilmiş sonlu elemanlar, birimin parçalanış yöntemine dayalı geleneksel sonlu elemanlar yönteminin bir uzantısıdır. XFEM'in yerelleştirilmiş bir zenginleştirme işlevi kullanmasına rağmen, süreksizliğin yakınında bir düğüm zenginleştirmesi geliştirilir. Bu zenginleştirme, zenginleştirme fonksiyonları kullanılarak matematiksel olarak yapılmıştır.

Zenginleştirilmiş bir sonlu eleman yaklaşımı kullanılarak çatlak yayılımının analizi orijinal olarak Moës vd. (1999) ve Fries vd., (2012) tarafından tanıtılmıştır. Bu yöntemde, çatlağın modellenmesi için birliğin bölünmesi yaklaşımı yoluyla önde gelen tekil çatlak ucu asimptotik yer değiştirme alanları eklenerek, çatlak ucu etrafındaki ve çatlak yolu boyunca elemanlar zenginleştirilir. Melenk ve Babuska (1996) tarafından önerilen birliğin bölünmesi yöntemi, XFEM metodun matematiksel temellerinden birini temsil etmiştir. Sukumar ve Prevost (2003), Stolarska vd. (2001) gibi bazı yazarlar tarafından özellikle kırılma mekaniği alanında deneyimlenmiştir. Bu yöntemin ana fikri, sonlu elemanların standart yaklaşımını

uygun fonksiyonlarla zenginleştirmektir. XFEM, yer değiştirme alanının yaklaşıklığına iki tür zenginleştirme sunmaktadır. Bölünmüş düğümleri zenginleştiren süreksiz bir işlev H (Heaviside işlevi). Aşağıdaki tanımlamalar kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem 1.18). (Belytschko ve Black, 1999).

$$(\mathrm{x})=\begin{cases}+1 & \text{if } \varphi(\mathrm{x})\geq 0\\ -1 & \text{if } \varphi(\mathrm{x})\leq 0\end{cases} \tag{1.18}$$

Burada $\varphi\ (x)$ düğümünün çatlaktan normal konumunu belirleyen seviye seti işlevidir.

XFEM, süreksiz fonksiyonlarla standart yer değiştirme tabanlı sonlu eleman yaklaşımını zenginleştirir. XFEM'inde birlik zenginleştirme bölgesi ile bir yer değiştirme vektörü fonksiyonu u için,

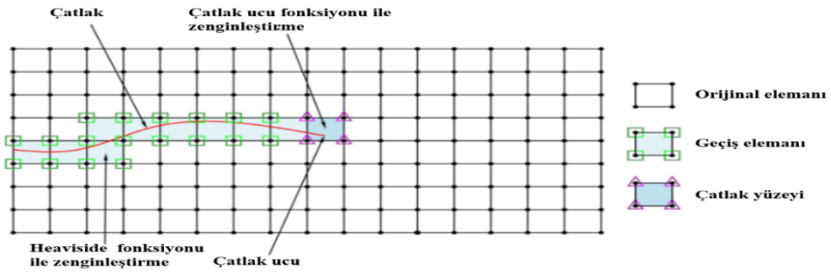
$$u=\sum_{I=1}^{N}N_I\left(X\right)\left[u_I+H\left(x\right)a_I+\sum_{\alpha=1}^{4}F_\alpha\left(x\right)b_1^\alpha\right] \tag{1.19}$$

şeklinde ifade edilmektedir (Moës vd., 1999):Yukarıdaki denklem modeldeki tüm düğümler, şekil işlervi desteği çatlak iç kısmı ve çatlak ucu tarafından kesilen düğümler için geçerlidir. Burada, I ağın düğümleri kümesidir, u yer değiştirme vektörü, u_l düğüm yer değiştirme vektörü, $H(x)$ atlama işlevi, $\alpha_1 = a_1$ düğümle zenginleştirilmiş serbestlik derecesi vektörü, $N_1(x)$ şekil denklemi, $F_\alpha(x)$ asimptotik çatlak ucu işlevleri, $b_1^\alpha(x)$ elastik asimptotik çatlak ucu denklemleriyle ilgili serbestlik derecesidir . Her uç düğümü için dört tekil işlev,

$$\mathrm{F}=\sqrt{\mathrm{r}}\left\{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right),\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin(\theta),\ \cos\left(\frac{\theta}{2}\right),\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin(\theta)\right\} \tag{1.20}$$

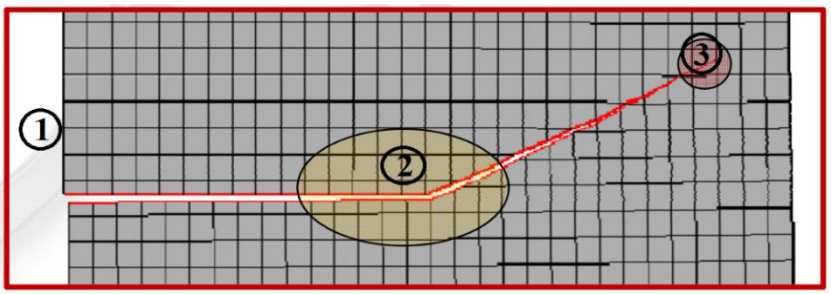
şeklinde ifade edilebilmektedir. Özel yer değiştirme fonksiyonları ile serbestlik derecelerini zenginleştirerek bir elemanda süreksizliklerin varlığını sağlar. Ağdaki konumu ne olursa olsun, 4 düğümlü elemanlardan oluşan bir çatlağı XFEM ile modellemek mümkündür. Yaklaşık yer değiştirme alanları: $F_\alpha(x)$ Düzey seti (level set) yöntemine level set yöntemiyle, ABAQUS çatlağın konumunu otomatik olarak bulabilir (Şekil 1.30). Bu yöntem çatlağı Φ ve Ψ izofanlarını kullanarak tanımlar. ABAQUS yazılımında Ψ çatlağın ön tarafını tanımlar ve Φ çatlak yüzünün yüzünü tanımlar, buna PHILSM denir ve STATUSXFEM

terimi, elemanın çatlama durumunu belirmektedir.



Şekil 1.30. XFEM' metodundaki zenginleştirilmiş düğümler (Wang ., 2021)

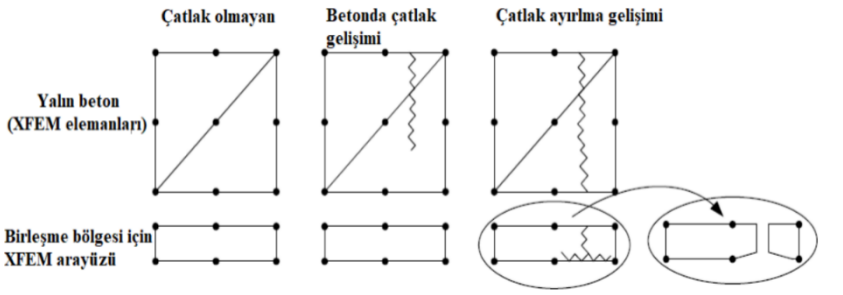
XFEM kavramı aslında üç bölüme ayrılmıştır. İlk terim (1), modeldeki tüm düğümlere uygulanan yükün bir parçası olan geleneksel/orijinal FEM geliştirmesi olarak şekil fonksiyonudur. İkinci terim (2), bir çatlak mekanizması sağlamak için zenginleştirmenin sunulduğu atlama fonksiyonudur. Bu fonksiyon, şekil fonksiyonu desteği çatlak iç kısmı tarafından kesilen düğümler için geçerlidir. Son terim (3), çatlak ucu tarafından şekil fonksiyonu desteği kesilen düğümlere fonksiyonun eklendiği çatlak ucu gelişiminin bir parçası olarak tanıtılmıştır. Şekil 1.31(a)'da geleneksel sonlu eleman yöteminde zenginleştirme fonksiyonunu kullanarak çatlak gelişimini göstermiştir. ABAQUS yazılımında çatlak ve kırılma tahminlerini başlatmak için çeşitli hasar kriterleri vardır. Farklı çatlak gelişimi Şekil 1.31(b)'de verilmiştir. Bu durumda, hasar başlatmanın maksimum gerilme (MAXPS) temelinde olduğu bir hasar tahmin kriteri kabul edilebilir. MAXPS, eğilme kırılmasının belirlenmesinin hasar edildiği ile ilişkili olduğu XFEM ile zenginleştirilmiş bölgede kullanılır. MAXPS veya MAXS kriterleri şu şekilde tanımlanabilir:



(a) Zenginleştirmiş bölgelerei

Şekil 1.31. XFEM temel kavramı (Mannn ve Muller, 1982)

Şekil 1.31'in devamı,



(b) Çatlak gelişimi

ABAQUS yazılımında çatlak ve kırılma tahminlerini başlatmak için çeşitli hasar kriterleri vardır. Bu durumda, hasar başlatmanın maksimum gerilme (MAXPS temelinde olduğu bir hasar tahmin kriteri kabul edilebilir. MAXPS, eğilme kırılmasının belirlenmesinin hasar edildiği ile ilişkili olduğu XFEM ile zenginleştirilmiş bölgede kullanılır. MAXPS ve MAXS kriterleri,

$$\text{MAXPS: } f=\left\{\frac{\sigma_{max}}{\sigma^{0}_{max}}\right\} \tag{1.21}$$

$$\langle\sigma_{max}\rangle=\begin{cases}0, & \text{if} \quad \sigma_{max}<0\\ \sigma_{max}, & \text{if} \quad \sigma_{max}\geq 0\end{cases} \tag{1.22}$$

şeklinde ifade edilmektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar, sayısal çalışmalar olarak üç kısımda incelenmiştir. Birinci kısımda uygulanacak sayısal modellemelerin doğrulanması amacıyla literatürde daha önce deneysel olarak çalışılmış yedi adet model seçilmiş ve bu modeller üzerinde sayısal doğrulama gerçekleştirilmiştir. İkinci kısımda, onarılmış ve TRM kompozit malzemelerle güçlendirilmiş farklı tipte malzemeler kullanılarak modellenmiş yığma binaların dinamik davranışlarının sayısal yöntemler kullanılarak belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla çalışmada, tamamen iki katlı ve üç katlı yığma bina modeli uygulama olarak seçilmiş ve bu modeller üzerinde sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Son kısımda ise genişletilmiş sonlu elemanlar yöntemi kullanarak farklı deprem altında dört çeşit yığma malzemeye sahip olan tek katlı binada çatlak ilerleme sürecinde başlangıç çatlaklarının etkisi incelenmiştir.

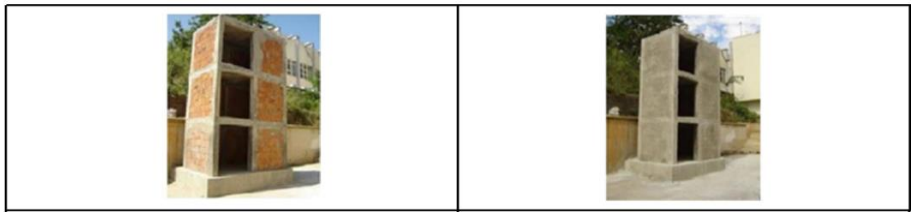
2.1. Benchmark Çalışmaları

2.1.1. Betonarme Çerçeveli Bina ve Dolgu Duvar İnşaat Aşamalarının Deneysel Dinamik Karakteristiklerinin Sayısal Olarak Elde Edilmesi

2.1.1.1. Yapının Tanımı

Türker ve Bayraktar (2016), betonarme yapı şartlarını sağlayacak standartlarda önerilen 1/2 ölçekli farklı inşa durumlarını gösteren bir model inşa etmişlerdir. İnşa ettikleri bu model üzerinde tek katlı, iki katlı, üç katlı dolgusuz (karkas) bina, tuğla duvar dolgulu, tuğla duvar ve sıva dolgulu durumları olan deneysel modellemeler gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.1'de, deneysel inşa aşamaları gösterilmiştir. Bu çalışma doğal titreşim frekansları ve mod şekilleri elde edilmesi amacıyla geliştirilmiştir. Ayrıca, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan sayısal analiz ABAQUS yazılımı kullanarak bu çalışmanın doğrulması yapılmıştır (Roudane vb., 2019).

(a) Tek katlı (b) İki katlı (c) Üç katlı



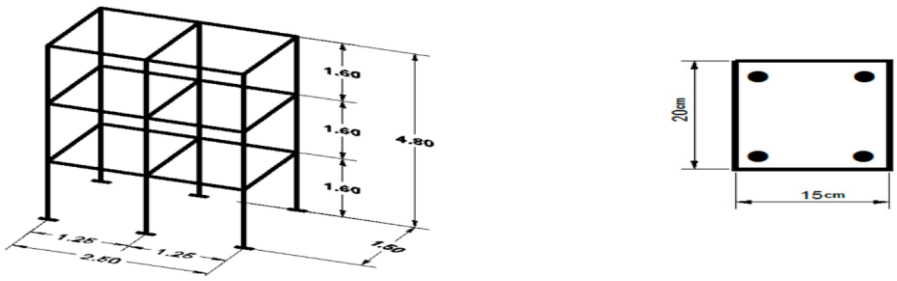
(d) Dolgu tuğla duvarlı (e) Dolgu tuğla sıvalı duvar

Şekil 2.1.Betonarme modelinin yapım aşamaları (Türker ve Bayraktar 2016).

Betonarme bina elemanları malzeme özellikleri ve modelinin boyutları ve şematik kesit sırasıyla Tablo 2.1 ve Şekil 2.2'de verilmektedir.

Tablo 2.1. Betonarme yapı elemanlarına atanan boyutlar ve kesit özellikleri

Kolon ve Kiriş (mm)		Temel (mm)	Döşemeler (mm)	Tuğla duvar (mm)
Donatılar	Boyutlar	Kalınlık		
4 Φ10	150x200	500	75	190

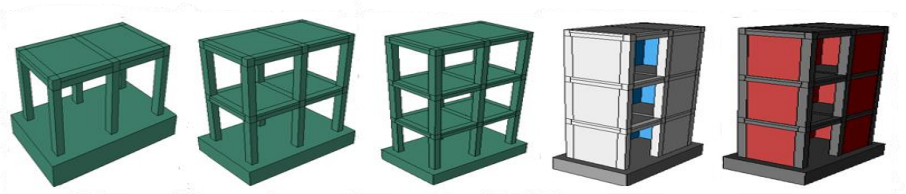


Şekil 2.2. Betonarme modelinin boyutları ve şematik kesit

2.1.1.2. Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması

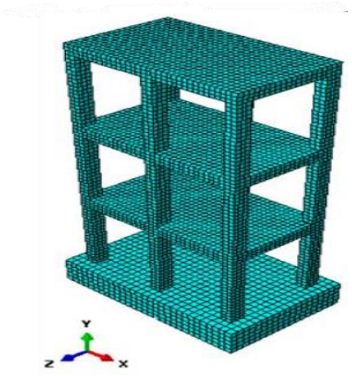
Sayısal çalışmaların amacı, gerçekleştirilen operasyonel modal analizini (OMA) doğrulamaktır (Türker ve Bayraktar, 2016). Sayısal çalışmalarda, doğrusal modeller üzerinden sonlu elemanlar yöntemiyle binanın dinamik davranışının uygunluğunu

değerlendirmek için ABAQUS yazılımı ile analiz yapılmıştır (ABAQUS, 2019). Bu çalışmadaki, binanın fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlı olarak yapım aşaması çalışmaları için farklı bina tiplerinin doğal titreşim frekansları ve bunlara karşılık gelen mod şekillerinin belirlenmesi için ABAQUS yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca; betonarme binaların dinamik parametreleri farklı binalar üzerindeki farklı inşa durumları için üç boyutlu linear sonlu elemanlar yöntemi de modal analiz yapılmıştır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. ABAQUS yazılımında modelinin yapım aşamaları

Tuğla duvar dolgulu durumlarda, çerçeve ve duvar arasındaki etkileşim dolgu karkasların davranışında çok önemli bir rol oynar. Bu etkileşim, binaların yanal yük taşıma kapasitesini değiştirebildiğinden, yapıların sismik performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu çalışmada yüzey kontak elemanları kullanılmış; normal ve kesme gerilmelerini aktarabilen etkileşim/kısıtlama elemanları ile birbirine bağlanmıştır. Çerçeve duvar arayüzünün sonlu eleman modellemesi, sismik yükleme altındaki çerçevelerin genel tepkisi etkisinden dolayı önemlidir. Uygulamaya yönelik çalışmalarda, azaltılmış yığma bina hesaplama çabasından dolayı makro modelleme tercih edilmektedir. Bu durumda birimler ve derzler arasında ayrım yapılmamakta, yığma yapı sürekli bir malzeme olarak kabul edilmektedir (Laurenço vd., 1995; Penna vd., 2014). ABAQUS yazılımında beton elemanlar üzerinde boyuna ve enine donatı gömülü seçeneği kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca analiz sonucunu önemli derecede etkileyen "Mesh" seçeneğinin uygun şekilde girilmesi önemli bir adım olarak görülmüştür. Beton elemanların katı elemanlarla modellenmesinde üç boyutlu sekiz düğümlü elemanlar (C3D8R) kullanılırken; donatı elemanlarla modellenmesinde ise iki düğüm noktalı lineer elemanlar (B31) özellikli "wire" eleman olarak tanımlanmıştır. Üç katlı karkas bina için sonlu eleman modelinin tipik ağı Şekil 2.4'te göstermektedir. Yapılan bir duyarlılık çalışmasına göre uygun ve doğru sonuçlar elde etmek için ağ boyutu 75 mm olarak seçilmiştir. Modelin mesnetlerinin tam ankastre olmasını sağlayabilmek adına, modele 500 mm kalınlığında radye temel yapılmıştır.



Şekil 2.4. Üç katlı sonlu eleman ağı (Roudane vd., 2019)

Yığma duvarların basınç dayanımı Türkiye'de kullanılan tuğla dikkate alınarak 5 MPa olarak alınmıştır. Ayrıca Türk Standartları (TS-705, 1985) yöntemine göre düşey delikli tuğlaların yoğunluğu 1800 ile 2200 kg/m^3 arasında değişmektedir. Sıva harcının sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri daha önceki çalışmadan alınmıştır (Dilrukshi, 2008). Tablo 2.2'de modelde kullanılan malzeme özelliklerini özetlemektedir.

Tablo 2.2. Malzeme özellikleri (Türker ve Bayraktar, 2016)

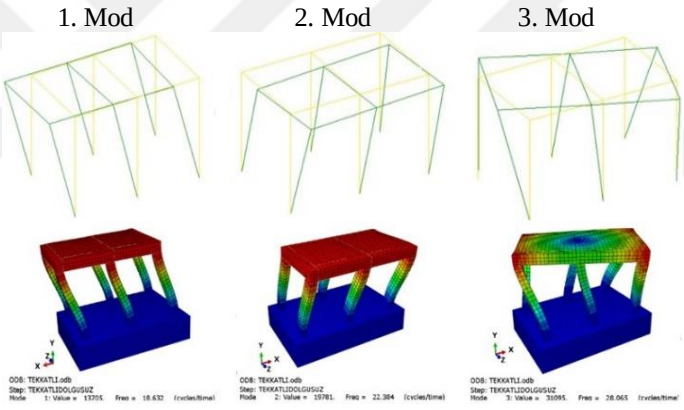
Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Birim Hacim Kütlesi (kg/m^3)	Basınç Dayanımı (MPa)
Beton	22000	0.2	2350	20
Donatı	210000	0.3	7850	420
Delikli Tuğla	1000	0.2	2000	05
Sıva harcı	10000	0.2	1950	7.5

2.1.1.3. Sonlu Eleman Model Güncelleme

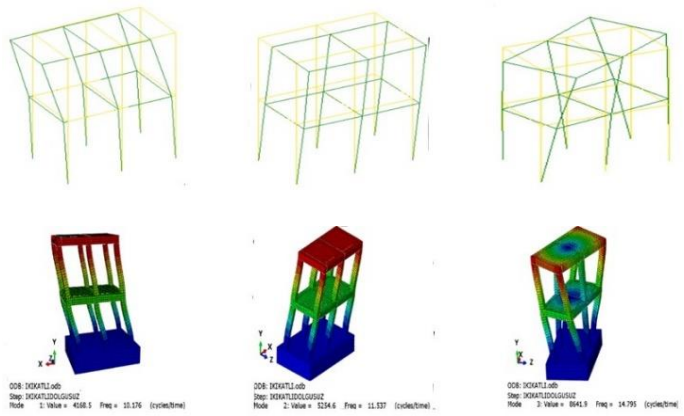
Yapı dinamik karakteristiklerinden doğal titreşim frekanslar ve mod şekillerindeki değişimlerinin izlenmesi için yapının beş farklı inşa aşaması (tek katlı, iki katlı ,üç katlı, dolgu tuğla duvarlı ve dolgu tuğla sıvalı duvar) ABAQUS yazılım ile elde edilmiştir. Ayrıca bina modal davranışını belirleyebilmek amacıyla her bir inşa aşamasının ilk üç mod şekli elde edilmiştir. Elde edilen frekans sonuçları Tablo 2.3'te sunulmaktadır. Mod şekilleri ise Şekil 2.5'da sunulmaktadır. Deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar incelendiğinde farkların kabul edilebilir sınır olan %5 değerini aşmadığı gözlemlenmiştir . Bu bağlamda oluşturulan sonlu eleman mdoellerinin gerçek yapıları temsil edebileceği düşünülmektedir.

Tablo 2.3. Deneysel ve sayısal olarak binaların frekansların karşılaştırılması

Mod		Doğal Titreşim Frekansları (Hz)		Hata Oranı (%)	Ortalama Hata Oranı (%)
		Deneysel	Sayısal		
Tek Katlı Dolgusuz Duvar Durumu	1	18.91	18.63	1.48	2.70
	2	23.40	22.38	4.35	
	3	28.72	28.07	2.26	
İki Katlı Dolgusuz Duvar Durumu	1	6.93	6.98	3.58	3.60
	2	7.32	7.47	2.00	
	3	9.33	9.84	5.18	
Üç Katlı Dolgusuz Duvar Durumu	1	9.69	10.18	4.81	3.72
	2	11.36	11.54	1.56	
	3	14.08	14.79	4.80	
Üç Katlı Dolgulu Duvar Durumu	1	11.18	11.96	0.58	1.75
	2	13.17	12.91	1.54	
	3	20.67	20.05	3.09	
Üç Katlı Sıvalı Dolgu Duvar Durumu	1	13.89	14.54	4.47	4.12
	2	16.79	17.25	2.67	
	3	31.23	29.68	5.22	



Tek Katlı Dolgusuz Duvar Durumu

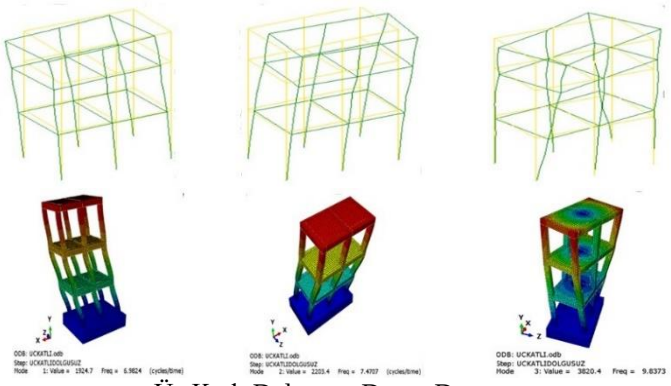


İki Katlı Dolgusuz Duvar Durumu

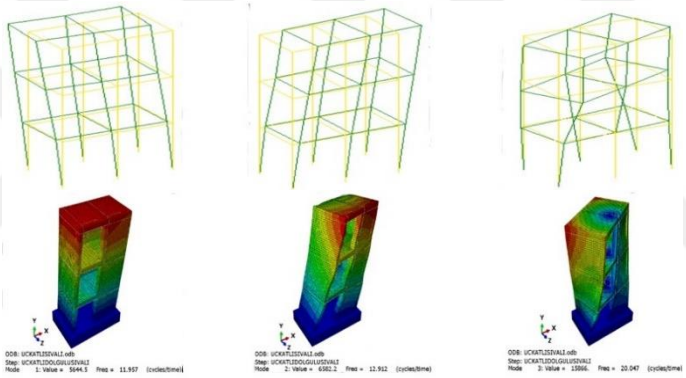
Şekil 2.5. Farklı bina durumları için deneysel ve sayısal modal analiz arasındaki mod şekillerinin karşılaştırılması

Şekil 2.5’in devamı,

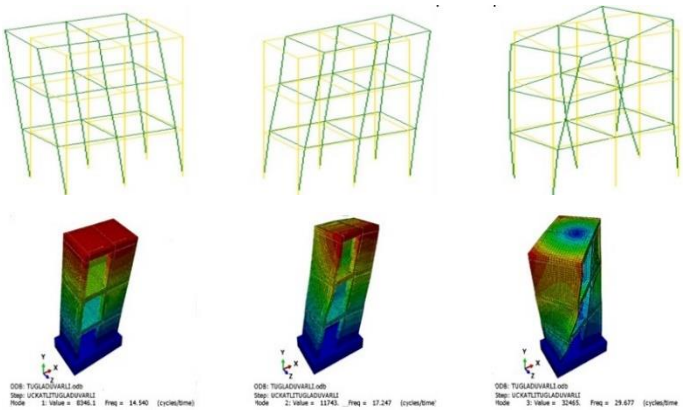
1. Mod 2. Mod 3. Mod



Üç Katlı Dolgusuz Duvar Durumu



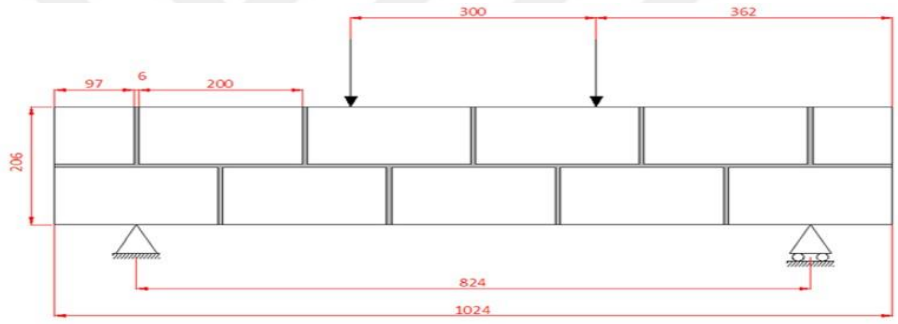
Üç Katlı Dolgulu Duvar Durumu



Üç Katlı Sıvalı Dolgu Duvar Durumu

2.1.2. Karbon Lif Takviyeli Polimerle (CFRP) Güçlendirilmiş Taş Blok Numunelerin Sayısal Olarak Modellenmesi

Şekil 2.6'da sunulan üç taş blok numunesinin ortalama uzunlukları 1.024 m ve derzleri yaklaşık 6 mm kalınlığında inşa edilmiştir (Fayala vb., 2016). Test edilen tüm numuneler iki sıra taş duvar birimine sahiptir. Her eleman, hidrolik kireç harçlı derzler kullanılarak birleştirilen 11 adet prizmatik taş bloktan yapılmıştır. Taş bloklar test amacıyla 100x100x200 mm'lik prizmatik numuneler halinde örülmüştür. Numumeler alt ve üst yüzeylerin üzerinde Karbon lif takviyeli polimer (CFRP) şeritleriyle güçlendirilmiştir. Şekil 2.7'da verilmektedir. CFRP şeriti, yapısal bir tiksotropik epoksi yapıştırıcı kullanılarak duvar numunelerine harici olarak yapıştırılmıştır. Bu yapısal takviyeleri yapıştırmak için tasarlanmış epoksi, reçine ve özel dolguların karışımıdır.



Şekil 2.6. Numune geometrisi (Birim mm'dir) (Fayala vb., 2016)

Şekil 2.7. Numune deney elemanı için CFRP düzeni (Fayala vb., 2016)

Tablo 2.4'te gösterildiği gibi üç adet numune ayrılmıştır. Birinci numune güçlendirilmemiş ve referans olarak tutulmuştur, geri kalan iki numune ise iki ve dört katmanlı olarak CFRP şeritleriyle alt ve üst yüzeyi güçlendirilmiştir.

Tablo 2.4. Duvar numunelerinin adları

Numune Adı	Tanımlama	CFRP Geometrisi (mm)	
		L_{CFRP}	B_{CFRP}
G0	CFRP Güçlendirilmemiş Numune- Referans Numune	-	-
G2	Çift Katman CFRP Şerit ile Güçlendirilmiş Numune	982	90
G4	Dört Katman CFRP Şerit ile Güçlendirilmiş Numune	982	90

2.1.2.1. Malzeme Özellikleri

Taş blok ve harç izotropik malzeme olarak modellenmiştir. Deney sonuçları literatürde yer alan ve yukarıda sözü edildiği gibi üç boyutlu modeli yapılan deney numunelerinin ABAQUS yazılımında Drucker-Prager akma kriterine göre, plastik analizinin yapılabilmesi için malzeme parametreleri olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinin veri olarak sağlanması gerekmektedir. Taş birimler arasında tanımlanan kontağın sıfır kalınlıklı olması sebebiyle normal davranış sert (hard) kontak olarak dikkate alınmıştır (Bolhassani vd., 2015). Bu çalışmadaki sürtünme katsayısı değerinin 0.78 olmasına karar verilmiştir. Malzeme ve kompozit özellikleri sırasıyla Tablo 2.5 ve Tablo 2.6'da özetlenmektedir.

Tablo 2.5. Sayısal modelde kullanılan malzeme özellikleri (Fayala vb., 2016).

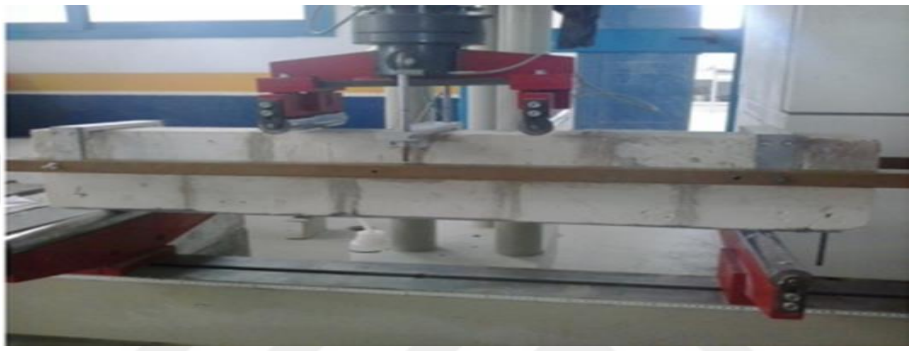
Malzeme	Parametre	Özellikleri
Taş Blok (DP Kriteri)	İçsel Sürtünme Açısı, βt	45°
	Kohezyon Değeri, d't	5.4 MPa
	Çekme Dayanımı, fç	2.7 MPa
	Elastisite Modülü, E	17 GPa
	Poisson Oranı, υ	0.2
Harç (DP Kriteri)	İçsel Sürtünme Açısı,βh	58°
	Kohezyon Değeri, d'h	2.8 MPa
	Çekme Dayanımı, fç	0.87 MPa
	Elastisite Modülü, E	1.2 MPa
	Poisson Oranı, υ	0.3
CFRP Kompoziti (Elastik)	Elastisite Modülü, E	6 GPa
	Poisson Oranı; ν	0.3

Tablo 2.6. CFRP Kompozitinin özellikleri

Numune Özellikleri	Kalınlık (mm)	Hasar Yükü (kN)	Kesit (mm^2)	Çekme Dayanımı (MPa)
2 katman	1.8	3.6	39.68	90.5
4 katman	3.6	9.2	87.54	105.1

2.1.2.2. Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması

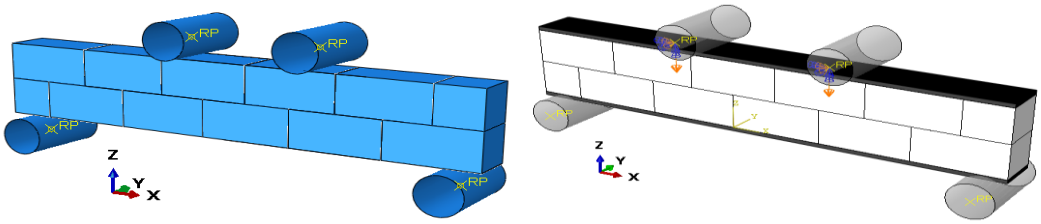
Bu çalışmanın amacı CFRP ile güçlendirilmiş taş blok yapısal davranışını tahmin etmek için bir sonlu eleman modeli geliştirmektir. Analiz için kullanılan malzeme özellikleri daha önce gösterilen laboratuvar deneylerinin sonuçlarına dayanmıştır. Her numunede kırılmaya kadar dört nokta eğilme testleri yapılmıştır. Yükleme ve destek düzenlemesini içeren deney düzeneği Şekil 2.8'da verilmektedir.



Şekil 2.8. Dört noktalı eğme deneyi (Fayala vb., 2016).

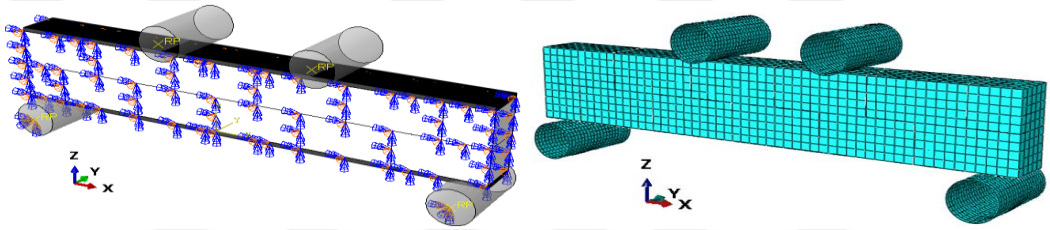
Bu çalışmada, doğrusal olmayan sonlu elemanlar yazılımı olan ABAQUS v.2019 kullanılarak explicit analiz ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Analizde kullanılan geometri, sınır şartları, yük ve ağı içeren tipik bir üç boyutlu katı modelini Şekil 2.9'te göstermektedir. Analizler için ABAQUS/ malzeme modeli seçimi için numuneler üzerinde Drucker-Prager akma kriteri (DP kriteri) denemeleri yapılmıştır. Sonlu elaman analiz için üç boyutlu sekiz düğümlü lineer tuğla elemanlar kullanılmıştır. Şekil 2.9 (a)'da gösterildiği gibi ABAQUS yazılımında geometrik modeli verilmiştir. Şekil 2.9 (b)'de yükleme deneyde olduğu gibi numune üst yüzeyine yapısal tekli yer değiştirme kontrollü olup mesnetler bir taraf sabit diğer taraf hareketli olacak şekilde tanımlanmıştır. İki nokta yükleme çubuğunun A ve B numunesinde sağ kenarından sırasıyla 362 ve 300 mm düşey bir yer değiştirme değerini uygulanmıştır. Aynı sınır koşullarını deneydeki gibi tutmak için sayısal analiz iki adım kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 2.10 (a)'te gösterildiği gibi numune CFRP kompoziti (siyah renk) alt ve üst yüzeylerine kabuk (Shell) olarak tanımlanmıştır. Yarı statik analiz olarak tanımlanmıştır. Analiz sonrası yer değiştirme kontrollü mesnetlerden, sehim ise numune orta noktasından okunmuştur. Ağ boyutu ve genişleme açısı gibi model

parametreleri üzerinde değişiklikler yapılarak model doğrulanmaya çalışılmıştır. 3456 elemandan (taş bloklardan) oluşan bir ağ ile sonuçlanmış Şekil 2.10 (b)'da görülmektedir.



(a) Geometrik modeli (b) Yük uygulaması

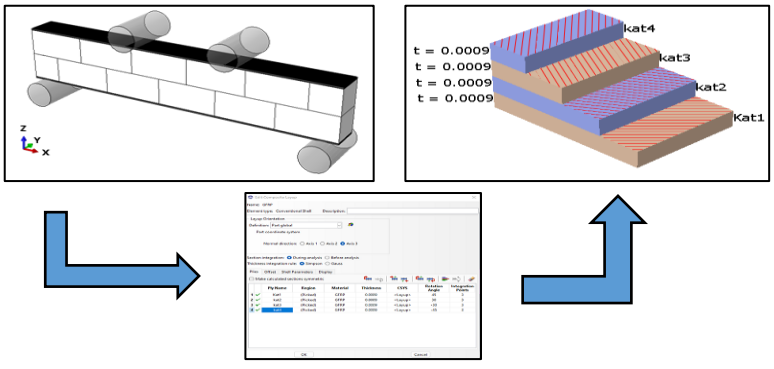
Şekil 2.9. ABAQUS yazılımında solid model ve güçlendirlmesi



(a) Sınır şartları (b) Ağ modeli

Şekil 2.10. ABAQUS yazılımında sınır şartları ve mesh

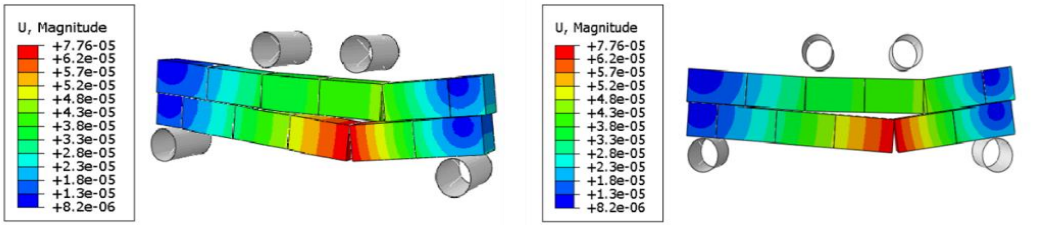
Model, destek (silindir) çizgileri kullanılarak yükleme planı çevirisinin dışında desteklenip kısıtlanmıştır. CFRP ile duvar arasında tam bağ (Tie) olduğu varsayılmaktadır. Şekil 2.11'da görüldüğü gibi G4 numune modeli için güçlendirilmiş ile uygulanmıştır. Bu çalışmada gerçekleştirilen model Drucker-Prager (DP) kriterine uyduğu kabul edilmiştir. Bu yaklaşım, yakınsaması nedeniyle hesaplama açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.



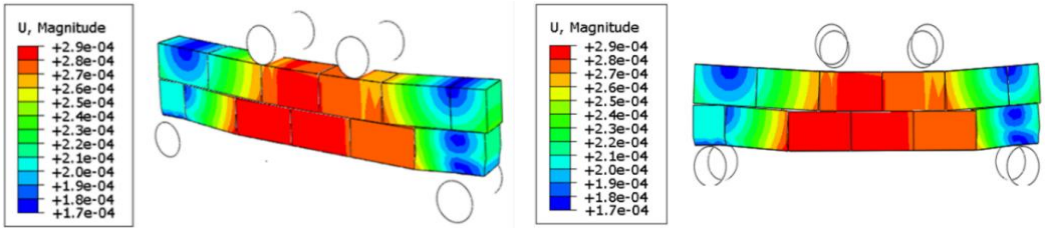
Şekil 2.11. G4 modeli için kompozit güçlendirme uygulaması (metre)

2.1.2.3. Analiz Sonuçları

Bu bölümde belirtilen parametrelerle elde edilen sayısal sonuçlar sunulmakta ve tartışılmaktadır. ABAQUS yazılım kullanılarak ve önceki deneysel testlerden mekanik özellikler ve uygulanan yer değiştirme alıntılanarak üç sonlu eleman duvar modeli analiz edilmiştir. Elde edilen sayısal analiz sonuçlarına dayanarak, model kesme hasarı ile gevrek bir şekilde göçme konumuna gelmiştir. Şekil 2.12'de göçme sırasında farklı numune modellerinin yer değiştirme konturlarının iki ve üç boyutlu görüntülerini gösterilmektedir. Deforme edilmiş modelleri, maksimum şekil değiştirmelerin uygulanan yer değiştirme altında kalan yakın bölgelerde meydana geldiğini göstermektedir. Deneysel veriler ışığında ABAQUS yazılımlarına göre hesaplanan, ilk numune (G0-referans numunesi) etkisini de dikkate alan taş blok modeli Şekil 2.12 (a)'da görülmektedir. Numune maksimum kırılma yer değiştirmesi 0.07 mm ve maksimum yük taşıma kapasitesi de 2.70 kN olarak belirlenmiştir. İki katman CFRP şerit ile güçlendirilmiş numune (G2) etkisini de dikkate alan taş blok modeli Şekil 2.12 (b)'de görülmektedir. Numune maksimum kırılma yer değiştirmesi 0.3 mm ve maksimum yük taşıma kapasitesi de 9.50 kN olarak belirlenmiştir. Dört katman CFRP şerit ile güçlendirilmiş numune (G4) etkisini de dikkate alan taş blok modeli Şekil 2.12 (c)'te görülmektedir. Numune maksimum kırılma yer değiştirmesi 0.79 mm ve maksimum yük taşıma kapasitesi de 14.40 kN olarak belirlenmiştir.



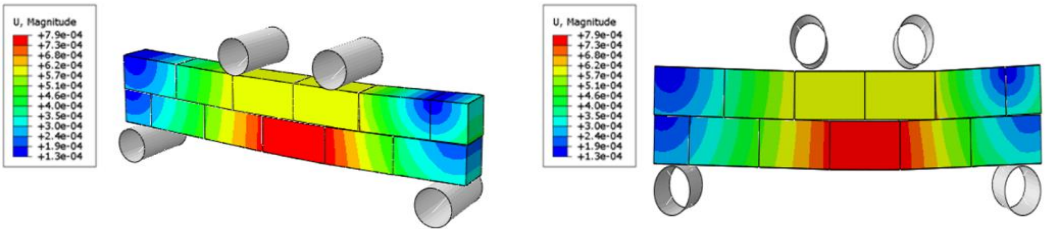
(a) G0 numunesi



(b) G2 numunesi

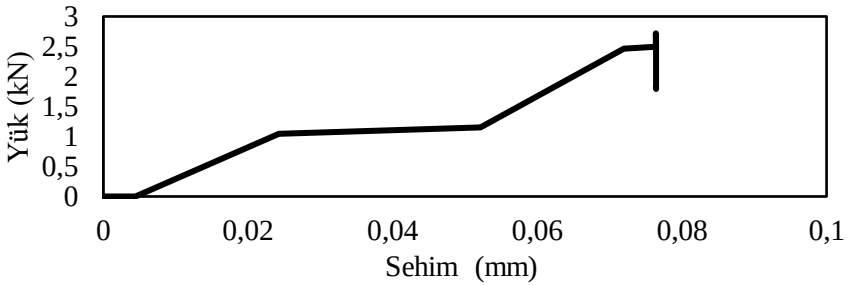
Şekil 2.12. Farklı numunelerine ait sehim kontur görünümleri

Şekil 2.12'nin devamı,

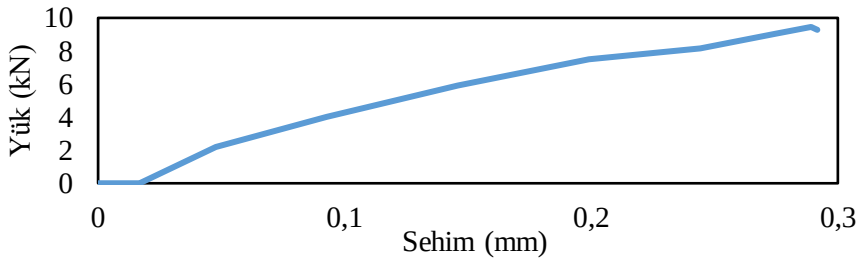


(c) G4 numunesi

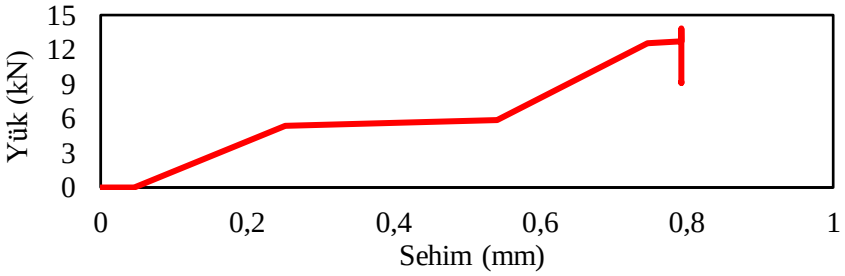
Numunelerdeki sehim, yüke bağlı olarak, yük-sehim eğrileri ABAQUS yazılım üzerinden elde edilmiştir. Sayısal analize tabi tutulan modellerin, analiz sonucunda elde edilen yük-sehim eğri değerleri Şekil 3.13'te verilmiştir.



(a) G0 numunesi



(b) G2 numunesi

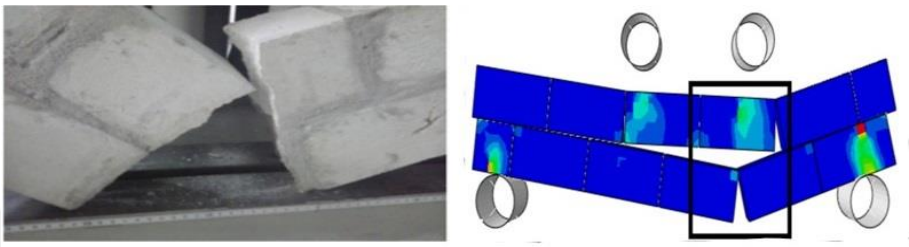


(c) G4 numunesi

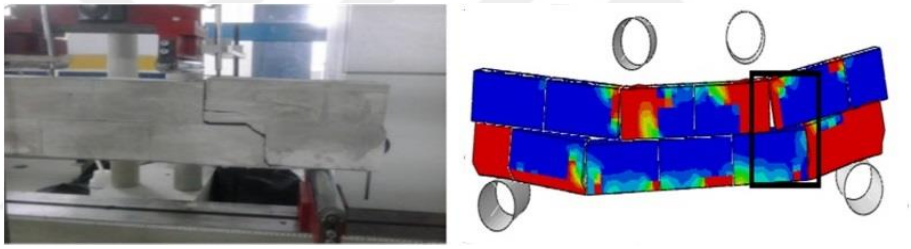
Şekil 2.13. Farklı numunelerine ait sehim kontur görünümleri

2.1.2.4. Sayısal ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

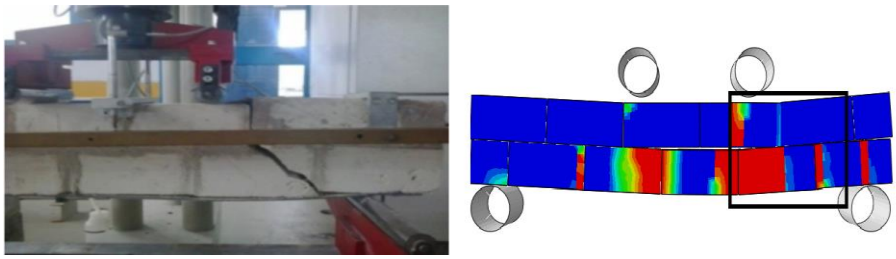
Simülasyon modeller, dört noktalı eğilme deneyi sırasında hasarı tahmin etmek için numuneleri deneysel ile karşılaştırmak için ABAQUS yazlımı kullanılarak oluşturulmuştur. Aşağıda sırasıyla G0, G2 ve G4 numunelerde maksimum yük anında oluşan çatlakların dağılımı ve göçme görünümü görülmektedir (Şekil 2.14).



(a) G0 numunesi



(b) G2 numunesi



(c) G4 numunesi

Şekil 2.14. Hasar dağılımların açısından deneysel ve sayısal karşılaştırılması

Deneysel testlerden elde edilen çatlakların dağılımı iyi bir uyum içinde simüle edilmiştir. Düşey çatlaklar, kırılma modu ve kesme kırılması olduğunu göstermiştir. Çekme gerilmelerinin meydana getirdiği çatlak, ayrılma ve dağılma Şekil 2.14 verilmektedir. Çekme gerilme yoğulaşmasının artması sebebiyle çatlaklar oluşmuş ve gelişmiştir. Şekil 2.14(a) incelendiğinde ABAQUS yazılım analizinde numune-G0'ın modelinde A nokta yüklemesi altında düşey ayrılmaya neden olan bir eğilme-kesme görülmüştür. Taş birim-

harç ara yüzeylerindeki maksimum çekme dayanımına ulaşıldığı belirlenmiştir. Şekil 2.14(b) numune-G0'ın göçme modlarını göstermektedir. Şekil 2.14(c)'te numune-G2'nin modelinde meydana gelen hasarlar incelendiğinde oluşan çatlaklar uzunluk, genişlik ve kalınlık yönlerinde olduğu görülmektedir. A nokta yüklemesi altında taş birim-harç birleşim yerlerini takip eden basamak şeklinde diyagonal hasar oluşmuştur. Numune-G4'ün modelinde ise çatlak mesnet seviyesinde başlayıp, CFRP-numune arayüzünü geçerek daha sonra harç derzlerini takip etmiştir. Numune G2'nin modeli, dört noktalı eğilme yüküne maruz kalan bağlantıda hasar yayılması açısından numune G4'ün modelinden daha etkili olmaktadır. Bu gözlem, CFRP'nin yüksek çekme mukavemeti ve dayanıklılığa karşı güçlü bir dirence sahip olduğunu ve yapıları verimli bir şekilde güçlendirdiğini doğrulmaktadır. Genel olarak, sayısal sonuçların deneysel sonuçlar ile çok yakın olduğu görülmüştür. G0, G2 ve G4 numuneleri için hem deneysel hem de sayısal sonuçları için maksimum kırılma yükleri ve sehim değerleri Tablo 2.7'da verilmiştir.

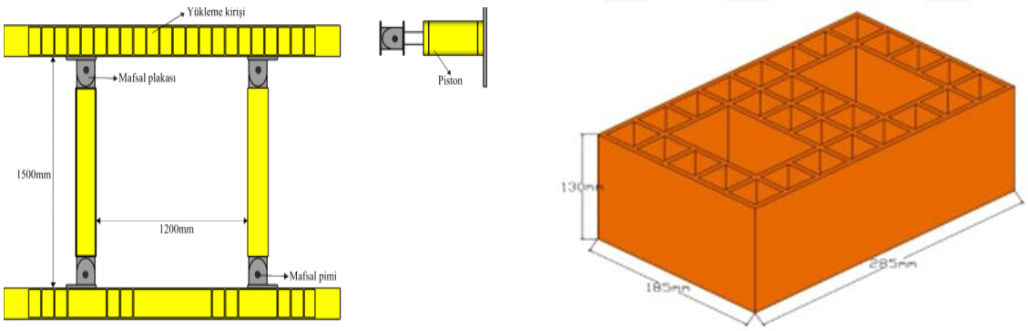
Tablo 2.7. Kırılma yükü ve sehimler için sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırması

Numune Adı	Maksimum Kırılma Yükleri (kN)			Maksimum Sehim (m)		
	Denseysel	Sayısal	Hata oranı (%)	Denseysel	Sayısal	Hata oranı (%)
G0	2.8	2.72	2.85	0.08	0.078	2.50
G2	9.5	9.45	0.52	0.285	0.29	1.75
G4	14	13.83	1.21	0.78	0.79	1.30

Tablo 2.7 incelendiğinde, deneysel ve nümerik maksimum kırılma yükleri ve sehim değerleri arasındaki en büyük farkın sırasıyla numune-G0'ın modelinde %2.72 ve %2.50, numune-G2'nin modelinde %0.52 ve %1.75, numune-G4'ün modelinde ise %1.21 ve %1.30 olduğu görülmektedir. Sayısal ve deneysel maksimum kırılma yükleri ve sehimler değerleri arasındaki fark %5'in altında elde edilmiştir. Deneysel veriler ile sayısal analiz sonuçlarının birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Katman sayısı, güçlendirilmiş kirişlerin davranışında önemli bir rol oynamıştır. Numuneler için çift ve dört katman uyguladığında; yük taşıma kapasitesi referans numunesine göre sırasıyla %352 ve %533 oranında artmıştır. CFRP katmanlarının sayısındaki artışın, güçlendirilmiş numunelerin maksimum yük kapasitesinde artışa neden olduğu gözlenmiştir. Güçlendirilmiş numunelerin referans numuneden daha sünek olduğu tespit edilmiştir.

2.1.3. Dolgu Duvarlı Çerçevenin Sayısal Olarak İncelemesi

Tek adet çelik çerçeveye dolgu tuğla duvar ekleyerek ve CFRP şeritlerle güçlendirerek test edilen model bu bölümde incelenmiştir. Samberou (2021) tarafından Karadeniz Teknik Üniversitesi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalı modelin doğrulanması için döngüsel yük deneyi modeli kullanılmıştır. Dolgu duvar için 185x285x100 mm ölçülerinde delikli tuğla kullanılmıştır (Şekil 2.15(a)). 10 mm kalınlığında çimento harcı ile yapılmıştır. Dolgu duvarın boyutları 1200 mm uzunluğu ve 1500 mm yüksekliği olarak inşa edilmiş, yükleme sistemi dahil deney kurulumunu Şekil 2.15 (b) göstermektedir. Çelik çerçeve, W200x46 kiriş ve iki W250x58 kolon kullanılmak üzere belirlenmiştir. Çerçevenin sağ üst köşesinde kademeli olarak yatay yük uygulanmıştır. Delikli tuğla dolgulu duvar kullanılarak, tersinir tekrarlanır yatay yük tesirleri altında test edilmiştir. Hasarsız, hasarlı ve güçlendirilmiş durumları simüle etmek için üç farklı durum oluşturulmuştur. Doğrusal olmayan analiz, delikli tuğla dolgu duvar davranışını daha iyi yakalamak için üç boyutlu gerçekleştirilmiştir. Hasarsız Model-W0, hasarlı dolgu duvar Model-W1, güçlendirilmiş dolgu duvar Model-W2 olarak adlandırılmıştır.



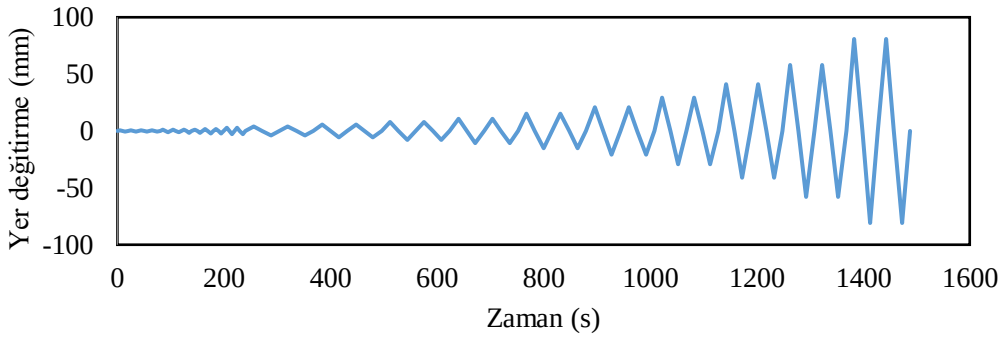
(a) Deney çerçevesi (b) Delikli tuğla boyutları

Şekil 2. 15. Dolgu duvarlı çerçevenin deneyi (Samberou, 2021)

Laboratuvardaki yığma duvar döngüsel yüklemeye tabi tutulmuştur. Bu amaçla çelik çerçeve sistemi hidrolik kriko yardımıyla uygulanmıştır. Delikli tuğla duvarlarında kullanılan tersinir tekrarlanır yatay yük -100 ile 100 kN altında deneye tabi tutulmuştur. İnşa edilmiş tamamlanan yığma duvar deney elemanı Şekil 2.16'da görülmektedir.

Şekil 2.16. Yığma duvar testinin deneysel kurulumu (Samberou (2021).

Çevrimsel yatay yük uygulanması için tuğla duvarlarına, FEMA 461 (2007) yöntemine göre hazırlanan yükleme protokolü, bilgisayar yardımıyla uygulanmıştır. Deney elemanları üzerine uygulanan Şekil 2.17'deki yatay yük protokolü, iki yönlü (itme ve çekme) artımlı yerdeğiştirme çevrimleri şeklinde verilmiştir. Bu yük protokolü, karşılık gelen kırılganlık modellerini geliştirmek için tüm hasar durumlarının ölçülmesine izin verdiğinden, yapısal olmayan bileşenlerin deprem performans değerlendirmesi için yaygın olarak kullanılır (Wang vd., 2019).



Şekil 2.17. Kullanılan çevrimsel yükleme şeması (FEMA 461, 2007).

2.1.3.1. Malzeme Özellikleri

Sayısal modelin oluşturulmasında kullanılan malzemelere ait mekanik özellikler literatürde yapılan çalışmalardan ve ilgili standartlardan (ASTM-A36, 2000) yapısal çeliğin özellikleri elde edilmiştir. Çelik çerçevesi ve kilitli yığma birim mekanik özellikleri sırasıyla

Tablo 2.8 ve Tablo 2.9'da verilmiştir. Yarı gevrek malzemelerin modellenmesinde kullanılan beton hasar plastisitesi (CDP) kilitli yığma birimleri modellemek için kullanılmıştır. Yığma duvarın çekme davranışını modellemek için bu yöntem benimsenmiştir (Belarbi ve Hsu, 1994). Hasar değişkeni, hasarın yalnızca yumuşama aralığında meydana gelmesinin beklendiği belirtilmektedir (Lubliner vd., 1989).

Tablo 2.8. Malzeme özellikleri (Samberou, 2021).

Malzeme	Yoğunluk (t/mm^3)	Young Modülü (MPa)	Poisson oranı
Delikli Tuğla	1.6 E-09	16700	0.20
Harç	-	2802.8	0.2
Çerçeve Elemanları	7.7E-09	200000	0.30

Tablo 2.9. Duvar için beton hasar plastisitesi modeli parametreleri (Lourenço, 1998).

Dilatasyon Açısı	Dışmerkezlik	fb_0/fc_0	K		Viscocity Parametresi
30	0.1	1.16	0.67		0.002
Basınç Davranışı			Çekme Davranışı		
Akma Dayanımı (MPa)	Inelastik Şekil Değiştirme	Hasar Parametresi	Akma Dayanımı (MPa)	Inelastik Şekil Değiştirme	Hasar Parametresi
15.32	0	0	12.16	0	0
22.7	1.25E-04	2.85E-02	10.75	4.02E-05	3.85E-01
38.25	3.43E-03	4.53E-01	7.01	2.96E-03	9.00E-01
42.10	7.55E-03	8.89E-01	4.33	8.07E-03	9.96E-01

2.1.3.2. Tuğla Birim ve Harç Arası Ara Yüz Özelikleri

Bu çalışmada, Lourenço'nun açıkladığı gibi kilitli yığma birimler ve harç özelliklerine göre ara yüzey özelliği belirlenmiş, delikli tuğla birim ve harç tek bir homojen malzemeye sürülmüştür (Lourenço, 1997). Çekme-ayırma yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Bu davranış üç aşamadan oluşmaktadır: doğrusal elastik, hasar oluşum ve hasar gelişim aşamasıdır. ABAQUS çekme-ayrılma modelinde eleman için başlangıç davranışının lineer elastik olduğu kabul edilir. Bunu hasarın başlaması ve ilerlemesi takip eder. Oluşan hasarın başlangıç ve gelişim kriteri, karma mod tarafından yönlendirilir. Çekme davranışı (Mod I) ve kesme davranışı (Mod II). Oluşan hasarın başlangıç için kuadratik gerilme kriteri benimsenmiştir. Oysa hasar gelişimi doğrusaldır ve harç ekleminin çekme ve kesme kırılması enerji açığa çıkma hızına G_{I}^{f} ve G_{II}^{f} bağlıdır. Bu kırılma çekmesi enerji oranları,

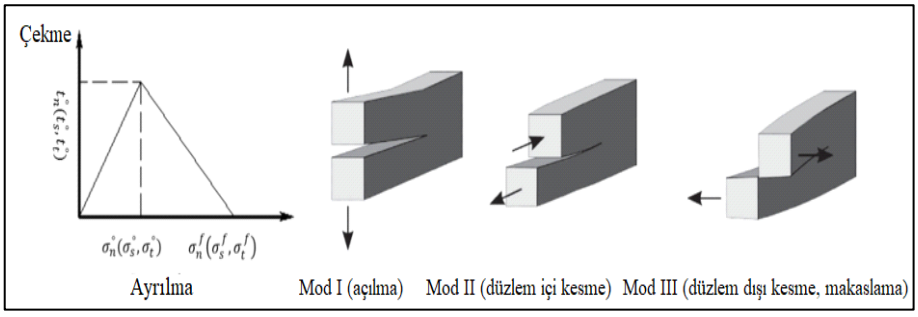
Lofti'nin çalışmasına dayalı olarak tahmin edilmiştir (Lotfi ve Shing, 1991). Benzeggagh ve Kenane kriteri ile hesaplanan karışık mod kırılması altında kesme kırılması enerji hızına ulaşıldığında harç derzinin kırılması meydana gelmiş, ABAQUS yazılımında karışık mod davranışı uygulanarak dikkate alınmıştır (Li vd., 2019). Kohezif yüzey elemanlarında, 0.7 sürtünme katsayısına sahip teğetsel davranış ve sert kontak (hard contact) normal davranış kullanılarak modellenmiştir. Delikli tuğla birimler arasında arayüzey üç sertilik katsayısı dikkate alınan malzeme özellikleri Tablo 2.10'da verilmektedir.

Tablo 2.10. Yığma Tuğla-harç özellikleri (Lourenço, 1998).

Rijitlik Katsayıları (MPa/mm)			Hasar Patamterleri MPa)			Enerji Kırılma Değerleri (Nmm/mm2)		
K_{nn}	K_{ss}	K_{tt}	t_{nn}	t_{ss}	t_{tt}	G_{Ic}	G_{IIc}	G_{III}
70	40	40	0.23	0.15	0.15	0.3	0.025	0.5

2.1.3.3. Kohezif Yüzey Elemanları

Kohezif etkileşim, potansiyel çatlakların kenarları arasındaki yer değiştirme ayrımının bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır (Dugdale, 1960). Ayrıca, gevşek malzemeler için kohezyon etkileşim performansını etkileyen parametreleri incelemek için geçirgen araştırmalar yapılmıştır. Bunlar kohezif elemanların mekanik davranışının üç yöntemle tanımlanabileceği sonucuna varmıştır: (1) tek eksenli gerilime dayalı, (2) sürekliliğe dayalı ve (3) çekme-ayırma yapısal modelidir. Çekiş-ayırma modeli, normal gerilmenin neden olduğu ilk ayrımı temsil eder (Şekil 2.18).



.(a) çekme-ayrılma kanunu (b) Çatlak ilerleme modları

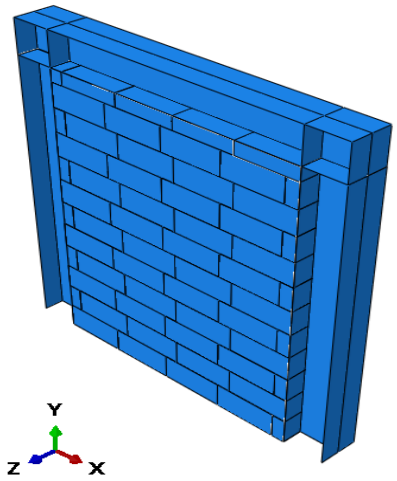
Şekil 2.18. Birleşimlerin kırılma –ayrılma davranışı (Anderson, 2005).

2.1.3.4. Sonlu Elemanların Ayrıklaştırılması

Yığma duvarların modellenmesi için Lourenço, (1997) tarafından önerilen basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi kullanılmıştır. Harç, sürtünme katsayısı, normal davranış olarak sert temas, üç sertilik katsayısı olarak kohezif özelliği hasar kullanılarak etkileşim davranışı olarak kullanılmıştır. Bu şekilde ABAQUS yazılımında, tuğlalar arasındaki harç kohezyif yüzey etkileşimi olarak tanımlamıştır. Kohezif yüzey elemanlarının davranışını kullanmanın avantajı yalnızca modelleme kolaylığı değil aynı zamanda açık (Explicit) sonlu elemanlar çözüm yöntemi durumunda nispeten düşük hesaplama maliyetidir.

2.1.3.5. Sayısal Modelleme

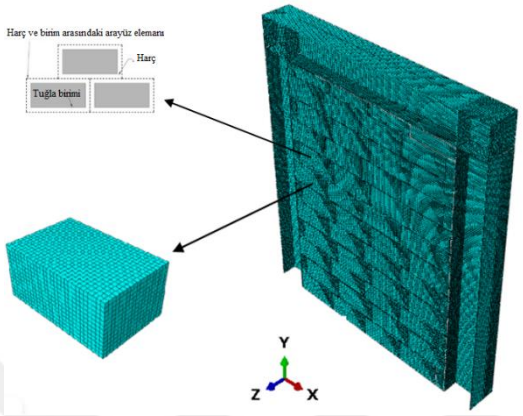
Samberou (2021) çalışmasına göre ABAQUS yazılımında dolgu duvarlı çelik çerçevelerin üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Şekil 2.19'da verilmektedir.



Şekil 2.19. ABAQUS yazılımında duvar dolgulu modeli

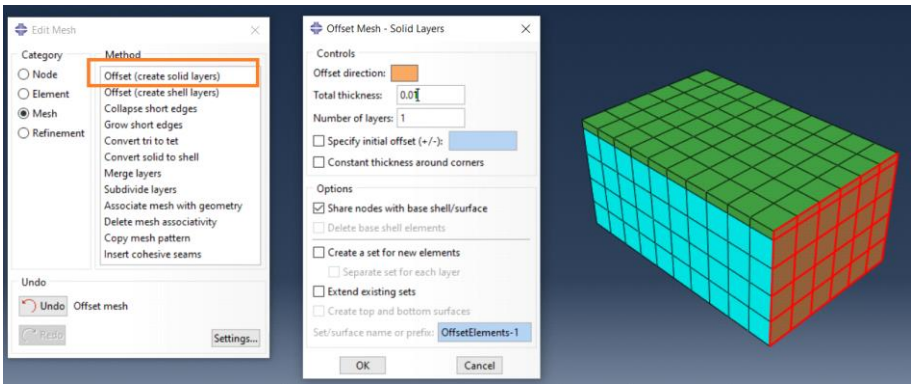
Modelleme çalışmaları kapsamında, basitleştirilmiş mikro modelde çelik çerçeve ve tuğla birimleri, katı eleman (solid) C3D8R türünde modellenmiştir. C3D8R elemanı sekiz düğümlü noktasına ve bir entegrasyon noktasına sahip lineer üç boyutlu hekzahedral sonlu eleman ağ kullanılarak modellenmiştir. Ağ duyarlılığı analizinin sonuçlarına göre sırasıyla

kilitli yığma birimlerin ve çelik çerçevenin Sayısal simülasyonları için ağ boyutu 100 mm uygulanmıştır. Ek olarak, çelik çerçeve için dört düğüm noktalı kabuk S4R ile modellenmiştir. Şekil 2.20'de verilen mesh modeli oluşturulan sonlu elemanları sunmaktadır.



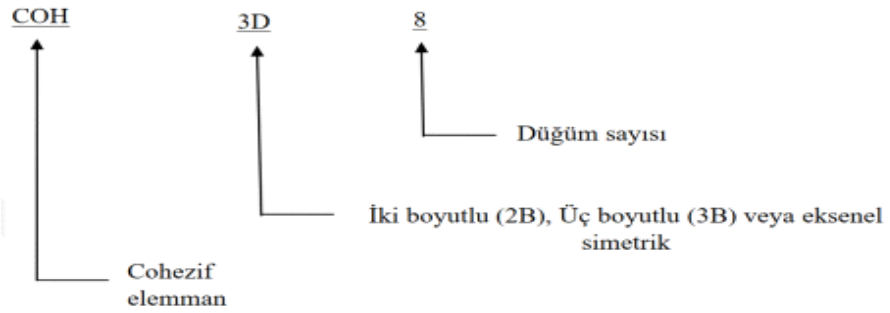
Şekil 2.20. Detaylı sonlu eleman mikro modeli

Ağ yoğunluğu 100x100 mm'ye ve kohezif tabakanın kalınlığı 10 mm'ye eşittir. Şekil 2.21'da Mesh adımında bir "ofset katı katman" oluşturmak için temas yüzeyleri ve harç kalınlığının uygulandığı delikli tuğlanın birimler arasında etkileşim için "ofset katı tabaka" oluşturulmuştur.



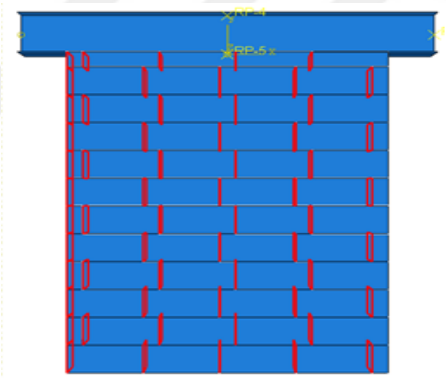
Şekil 2.21. Tuğla birimi için kohezif elemanlar oluşturması (birim metre)

Harç, tuğlalar arasındaki çekiş ayrımı açısından tepki göz önüne alındığında, Kohezif elemanlardan oluşan bir tabaka (COH3D8) olarak modellenmiş, Şekil 2.22'de verilmektedir.



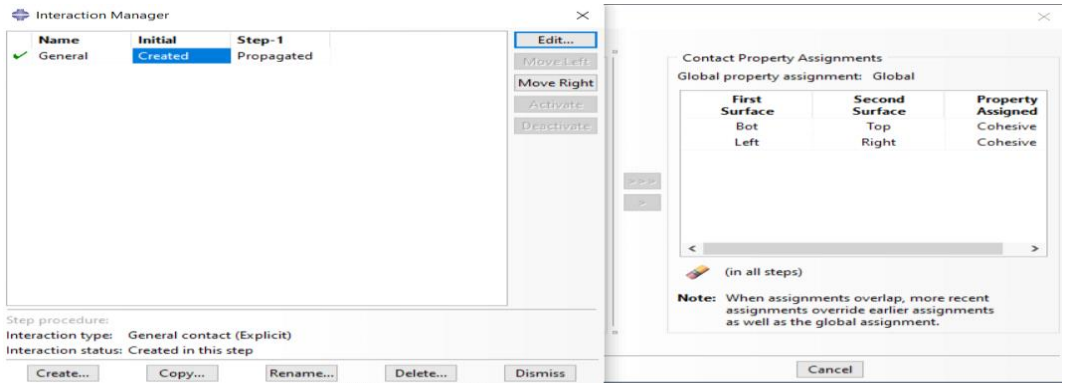
Şekil 2.22. Kohezif elemanlar için adlandırma kuralları (ABAQUS, 2019)

Her kenardaki tuğla birimleri ve harç derz kalınlığını temsil eden genişletilmiş birimler bir dizi sürekli eleman olarak modellenmiştir. Şekil 2.23'te yatay ve düşey derzler yüzeylerini boyunca genişletilmiş birimler arasındaki etkileşim, yüzey-yüzey (surface-to-surface) temas elemanlar kullanılmıştır.



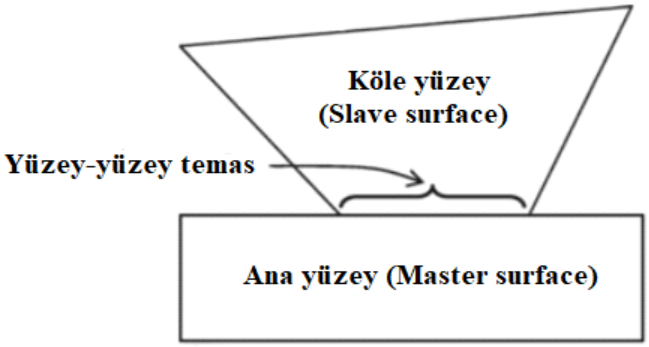
Şekil 2.23. Tuğla birimlerin sol yüzeyleri

Kohezif arayüzlerinin ilk tepkisi doğrusal elastik ve duvar bağlantılarının en kritik göçme modlarını çekme çatlağı ve kayma deformasyonlarını tanımlayan çatlakların davranışını izlemektedir. Tuğla birimlerin arasındaki tuğla teması "general contact interaction" özelliği kullanılarak tanımlanmıştır (Şekil 2.24). Kontak etkileşimi için "hard contact" özelliği ile yüzeylerin birbiri ile tam etkileşimi modellenmiştir.



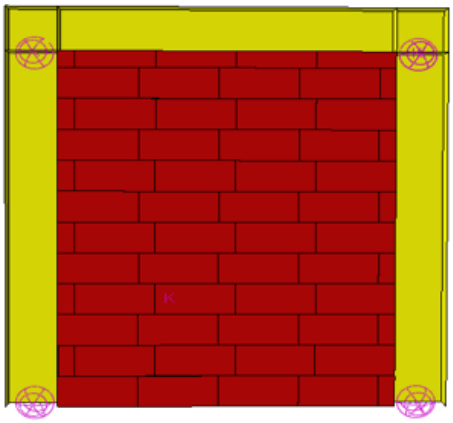
Şekil 2.24. Tuğla birimleri yatay ve düşey ara yüzeyleri ile temas özelliği

Bu seçilmiş yüzler tuğla birimleri genel temasla birbirine bağlandığında paralel ile temas edecek olanlardır. Ancak dikkate alınması gereken başka bir modelleme parametresi vardır. Yani genellikle yüzey etkileşimi olarak adlandırılan ara yüzeyler arasındaki bağlantıdır. Tuğla birimi ve harç, duvar ve çelik çerçevesi arasında Ana yüzey (master) ve Köle (slave) ilişkisi tanımlanmıştır (Şekil 2.25).



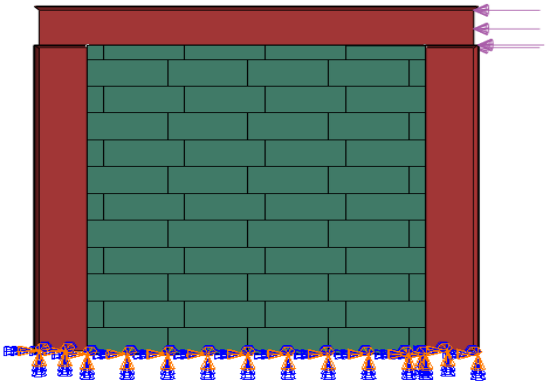
Şekil 2.25. Yüzey-yüzey temas ayrıklaştırması (ABAQUS, 2019)

Dört mafsalı deneysel test olarak modellemek için yay elemanları kullanılmıştır. Yaylar iki düğüm arasında hareket etmiş, hareket çizgisi iki düğümü birleştiren çizgidir. Şekil 2.26'da tuğla dolgu duvar modelinde mafsallar pembe renk ile gösterilmiştir. Kiriş-kolon ve kolon-zemin arasında bağlantılar yaylar elemanı ile modellenmiştir.



Şekil 2.26. Yay elemanının yerleri şematik olarak göstermesi

Bu çalışmada uygulanan sınır koşulları ve yükler, deneysel olarak test edilen dolgulu duvar temel alınarak inşa edilmiştir. Sayısal çalışma için duvarın altı ankastre olarak tanımlanmış ve deneyle aynı sınır koşullarını simüle etmek için yükler sağ tepesinin üzerine uygulanmıştır. Bunun için Loads modülündeki Pressure komutu tıklanarak yanal yük kiriş için Şekil 2.27'da yük verisinin girişi girilmiştir. Modelin yükleme işlemi tamamlandıktan Boundary Condition komutu ile sınır şartının tipi seçilmiştir ve sınır şartları tanımlanmıştır.



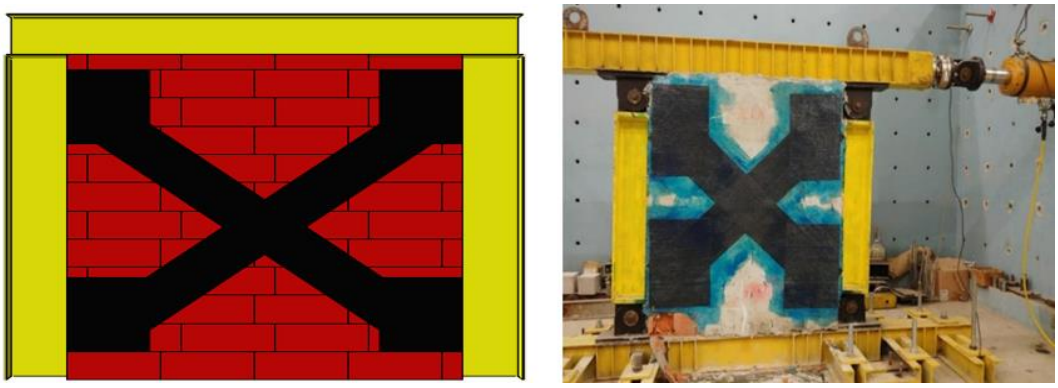
Şekil 2.27. Dolgu duvarlı çerçevenin yatay yükler konumu

Kirişin sağ üst köşesine yatay yönde tersinir tekrarlı quasi-statik yük uygulanmıştır. Yer değiştirmenin, yükü artan genlikler ve yük seviyesi başına üç döngü ile zaman içinde sinüzoidal olarak değiştiği uygulanmıştır. Bu analizde, dolgu duvarlı çelik çerçeve analizi doğrusal elastik olmayan analiz yöntemleri kullanılmıştır. Aslında bu yöntemin temel sorunu doğrusal olmayan aralıkta ıraksak davranış ve hasar analizidir. Bu nedenle malzemelerin

gevşek ve oldukça doğrusal olmayan davranışı nedeniyle sonunda dinamik Açık (Explicit) sonlu elemanlar analiz yöntem seçilmiştir. Simülasyon modelinin ortaya çıkan yük-yer değiştirme eğrisi, deneysel çevrimsel yük yer değiştirme eğrisinin zarfı ile karşılaştırılmıştır.

2.1.3.6. Güçlendirilmiş Duvarların Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması

Dolgu duvarın harç ve tuğla kısımlarının doğrusal olmayan davranışını simüle etmek için CDP modeli seçilmiştir. Bu yöntem çekme kırılması ve basınç ezilmesi olmak üzere iki tipik hasar mekanizmasını etkin bir şekilde modellemiştir. Döngüsel yük simülasyonlarında malzemenin azalmasını yakalamak için kullanılabilir. Hasar sonrası duvarları CFRP malzeme kullanılarak güçlendirilmiştir. Doğal titreşim frekans, mod şekilleri, yer değiştirme ve yük taşıma kapasitesi gibi dinamik parametreler hasarlı durum ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Duvar ve çerçeve birbirine bağlamak için kullanılan kısıtlama türü bağ (Tie) teması seçilmiş, CFRP şeritleri ana yüzey (master) olarak belirlenmiş, diğer yüzey ise, delikli tuğla duvar (Slave) olarak tanımlanmıştır. Yığma duvarın ön yüzeyinden CFRP şeritlerle etkili şekilde güçlendirilebilmektedir. Güçlendirlmiş duvar ABAQUS yazılımında ve deneysel ortamında Şekil 2.28'de verilmektedir.



(a) Sayısal (b) Deneysel

Şekil 2.28. CFRP ile dolgu yığma duvarın güçlendirilmesi

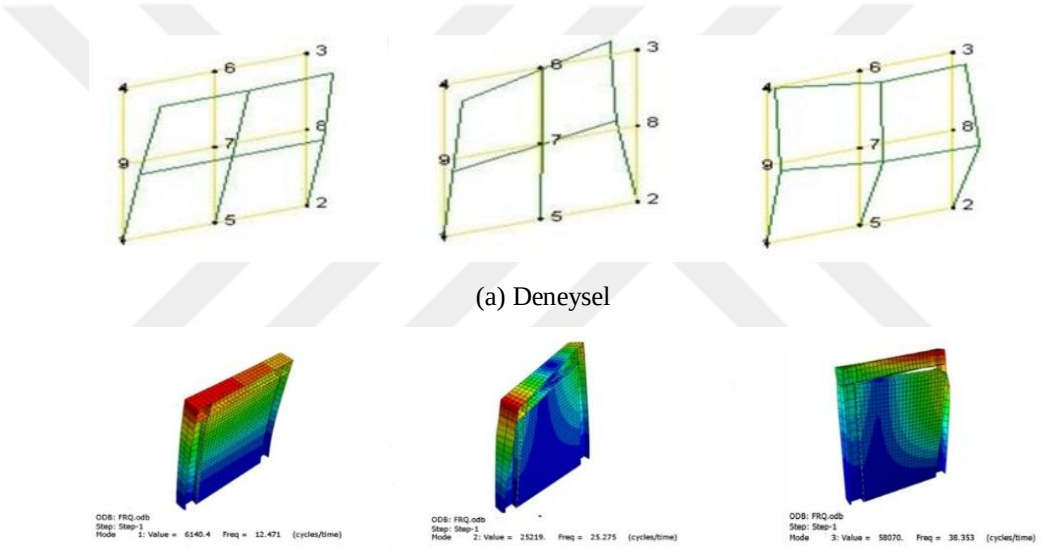
Güçlendirilmiş duvar kalınlığının tipik olarak 0.15-0.3 mm civarında olduğu göz önüne alındığında CFRP kabuk elemanı ile modellenmiştir. Duvar güçlendirme uygulaması için BASF tarafından üretilen Mbrace Fibre CF 230/4900 türü karbon lifli polimer kumaş kullanılmıştır. CFRP şeritlerinin mekanik özellikleri Tablo 2.11'da sunulmaktadır.

Tablo 2.11. CFRP için malzeme özellikleri (BASF, 2005)

Özellikler	Mbrace Fibre CF 230/4900 200 g/m^2
Elastisite Modülü (MPa)	230000
Çekme Dayanımı (MPa)	4900
Toplam Lif Ağırlığı (g/m^2)	210
Genişlik (mm)	500

2.1.3.7. Modal Analizi Sonuçları

Model-W0'ın hasarsız durumu için elde edilen ABAQUS yazılımından ve deneysel verilerinden ilk üç mod şekli Şekil 2.29'da verilmektedir.



(a) Deneysel

(b) Sayısal

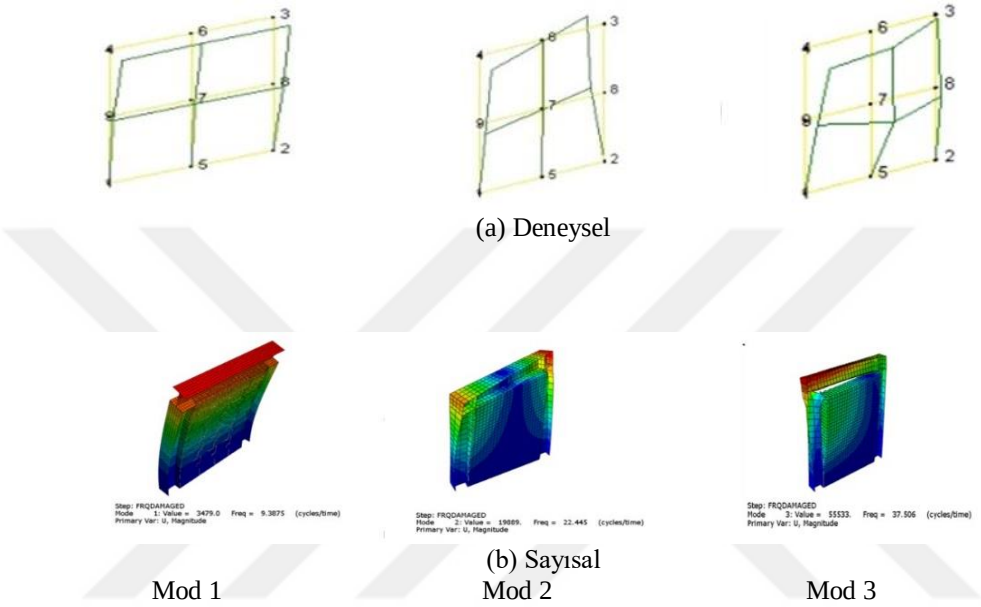
1. Mod 1 2. Mod 3. Mod

Şekil 2.29. Hasarsız durum için ilk üç mod şekli

Hasarsız durum için dolgu duvarlı modelin etkin ilk üç mod şekli sırasıyla düzlemin enine doğrultusunda ötelenme, burulma ve düzlem dışı doğrultusunda ötelenme olarak deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilmiştir. Tablo 2.12'de hasarsız dolgu duvar modeline ait sayısal ve deneysel olarak elde edilen doğal titreşim frekansların karşılaştırılması görülmektedir. Tablo 2.12 incelendiğinde, frekans değerleri arasındaki maksimum fark %1.19 olarak elde edilmektedir. Model-W1'ın hasarlı durumu için elde edilen ABAQUS yazılımından ve deneysel verilerinden ilk üç mod şekli Şekil 2.30'da verilmektedir.

Tablo 2.12. Hasarsız durum için dolgu duvarlı modeline ait sayısal ve deneysel yöntemler ile elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması

Mod	Doğal Titreşim Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
	Sayısal	Deneysel	
1	12.47	12.62	1.19
2	25.27	25.02	1.00
3	38.35	38.36	0.03



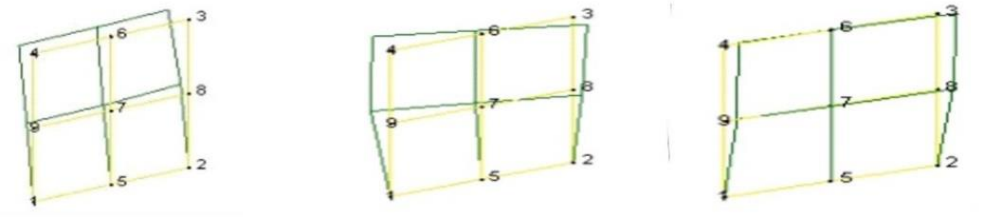
Şekil 2.30. Hasarlı durum için ilk üç mod şekli

Hasarsız durumlar gibi mod şekilleri hasarlı durumlara benzer, deneysel ve sayısal yöntemlerle belirlenmiştir. Dolgu duvarlı modelin etkin ilk üç mod şekli sırasıyla enine doğrultusunda ötelenme, düzleminde burulma ve düzlem dışı doğrultusunda ötelenme olarak deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilmiştir. Tablo 2.13'te hasarlı durumdaki dolgu duvar modele ait sayısal ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması görülmektedir.

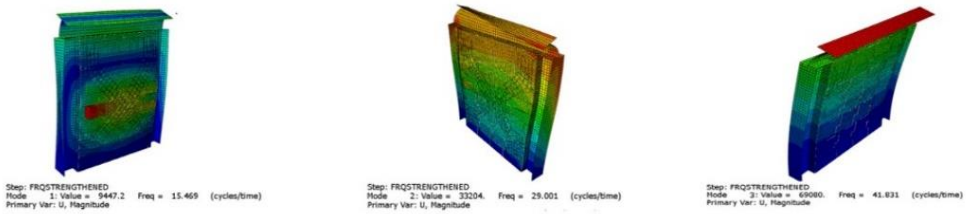
Tablo 2.13. Hasarlı modeline ait sayısal ve deneysel yöntemler ile elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması

Mod	Doğal Titreşim Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
	Sayısal	Deneysel	
1	9.84	9.39	4.97
2	21.64	22.45	3.60
3	36.25	37.51	3.36

Tablo 2.13 incelendiğinde, doğal frekans değerleri arasındaki maksimum farkın %4.57 olduğu görülmektedir. Model-W2'nın güçlendirilmiş durumu için elde edilen ABAQUS yazılımından ve deneysel verilerinden ilk üç mod şekli Şekil 2.31'de verilmektedir.



(a) Deneysel



(b) Sayısal

1.Mod 2. Mod 3. Mod

Şekil 2.31. Güçlendirilmiş durum için ilk üç mod şekli

Birinci mod ve üçüncü mod şekli sırasıyla düzlem içi enine doğrultusundan düzlem dışı doğrultusuna ve düzlem dışı doğrultusundan düzlem içi enine doğrultusuna değiştirmiş, ancak ikinci mod şekli davranışı değişmemştir. Güçlendirilmiş Model-W2 etkin ilk üç mod şekli sırasıyla düzlem dışı doğrultusunda ötelenme, düzlem içindeki burulma ve enine doğrultusunda ötelenme olarak deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilmiştir. Tablo 3.14'te Model-W2 için elde edilen sayısal ve deneysel frekansların karşılaştırması bulunmaktadır.

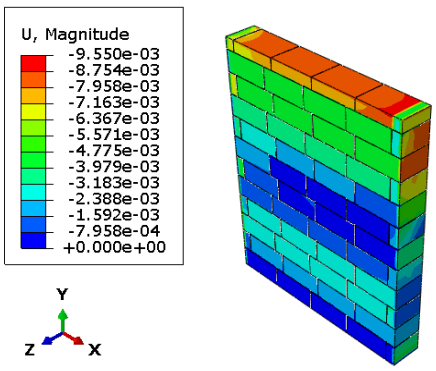
Tablo 2.14. Güçlendirilmesinden sonra sayısal olarak ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

Mod	Doğal Titreşim Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
	Sayısal	Deneysel	
1	15.47	15.37	0.65
2	29.00	29.51	1.73
3	41.83	41.58	0.60

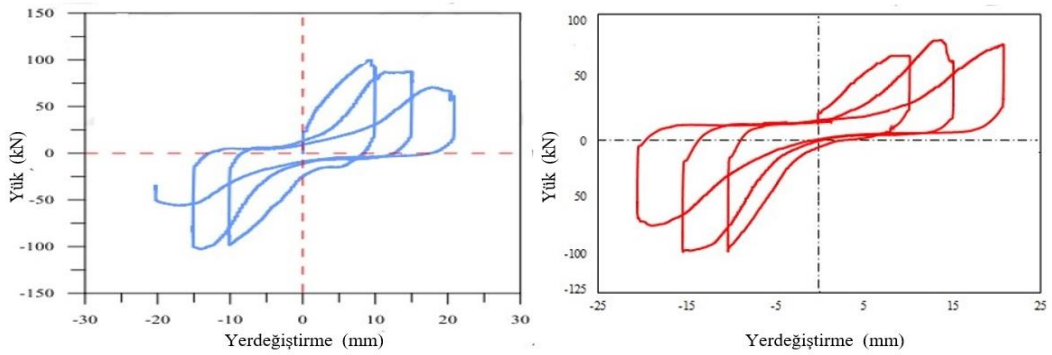
Tablo 2.14 incelendiğinde, doğal frekans değerleri arasındaki maksimum farkın %1.73 olduğu görülmektedir. Tablo 2.12, Tablo 2.13 ve Tablo 2.14'te sunulduğu gibi ilk üç doğal titreşim frekansının sayısal ve deneysel verilerinin sonuçlarını ve hata oranlarını göstermektedir. ABAQUS yazılımı tarafından hesaplanan sonuçların, tüm modlar için hata oranı %5'ten düşük olduğu zaman deney sonuçları ile modelin iyi uyduğu kabul edilebilir. Sonuçlara göre deneysel ve sayısal modal analizi sonunda elde edilen frekanslar birbirine yakın çıkmıştır. Sonuç tatmin edici görünse de, doğal titreşim frekanslardaki iyi benzeşim yapının dinamik davranışının model tarafından yeniden üretildiğinin yeterli kanıtı değildir. Modelin gerçek yapıya uygun davrandığından emin olmak için sadece frekansların değil mod şekillerinin de benzer olmalıdır. Şekil 2.29, Şekil 2.30 ve Şekil 2.31'den anlaşıldığı gibi geliştiren modelin deneyler ile uyumlu sonuçlara sahip olduğu görülmektedir.

2.1.3.8. Döngüsel Yükleme Analizi

Hasarlı model W1 ve güçlendirlmiş model W2 deneysel verileri ve sayısal analiz sonuçlarından elde edilen yük-yer değiştirme eğrisi ve çatlakların dağılım karşılaştırmaları yapılmıştır. Model-W1'ın hasarlı durumu için doğrusal olmayan analizi sonunda elde edilen yer değiştirme konturu Şekil 2.32'de verilmektedir. Deneysel veriler ile sayısal olarak elde edilen sayısal sonuçlar yük-yerdeğiştirme grafikleri üzerinde karşılaştırılarak Şekil 2.33'te gösterilmiştir.



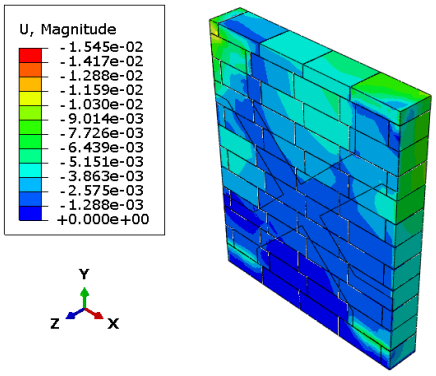
Şekil 2.32. Model-W1'ında oluşan yer değiştirmeler (Birim m)



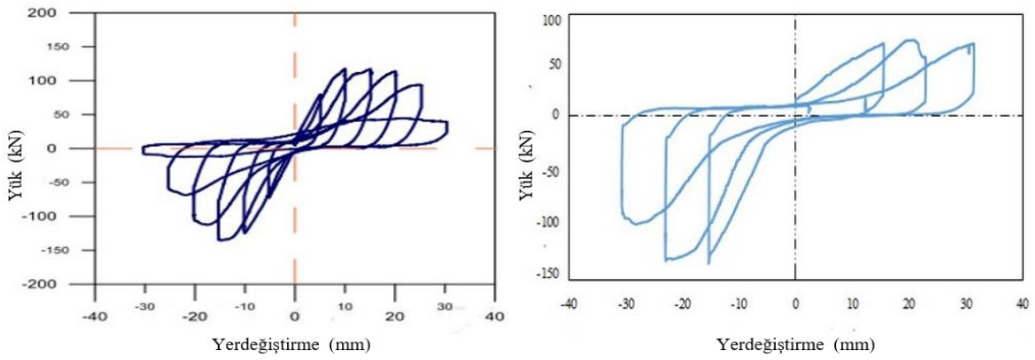
(a) Deneysel (b) Sayısal

Şekil 2.33. Hasarlı modeline ait yük-yer değiştirme eğrisinin grafikeri

ABAQUS yazalımında tepe noktasının en büyük yer değiştirme miktarı 9.5 mm, bu değere karşı gelen yük yaklaşık 96.37 kN olarak elde edilmiştir. Yük taşıma kapasitesi değerleri sayısal ve deneysel çalışmalar karşılaştırıldığında %3.63 ve maksimum yer değiştirme %1 'den daha az hata oranıyla hesaplandığı belirlenmiştir. Güçlendirlmiş model davranışı ile ilgili hesaplanan karakteristik değerlerden 15.45 mm'lik tepe yer değiştirmesine karşı gelen yük değeri 136.62 kN, yük taşıma kapasitesi ve maksimum yer değiştirme yaklaşık %42 ve %63 hasarlı modelinden daha büyük olarak elde edilmiştir. Maksimum yer değiştirme değerleri ve deneysel veriler ile yazılım sonucunda elde edilen sayısal sonuçlar yük-yerdeğiştirme eğrisinin grafikleri üzerinde karşılaştırılarak sırasıyla Şekil 2.34 ve Şekil 2.35'te gösterilmektedir. Sayısal sonuçlar ve deneysel verilerin sayısal olarak karşılaştırılması Tablo 2.15'ta sunulmaktadır.



Şekil 2.34. Model-W2'nında oluşan yer değiştirmeler



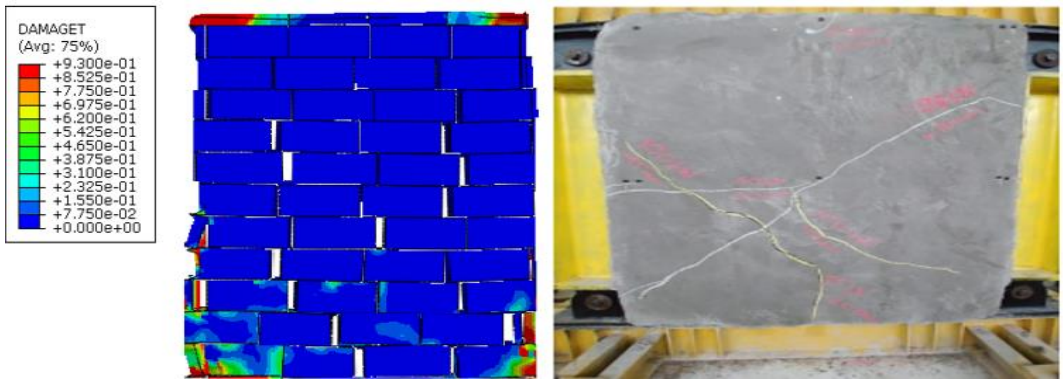
(a) Deneysel (b) Sayısal

Şekil 2.35. Güçlendirilmiş mode ait yük-yer değiştirme eğrisinin grafikleri

Tablo 2.15. Sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

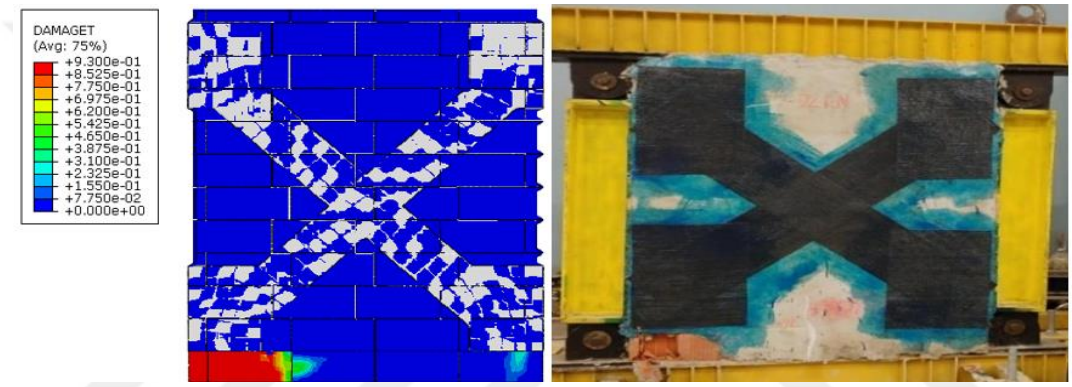
Numune Adı	Karakteristik Değerleri	Sayısal	Deneysel	Hata Oranı (%)
W-1	Yük taşıma kapasitesi (kN)	-96.37	-100	3.63
	Maks Yer değiştirme (mm)	-9.55	-9.5	0.53
W-2	Yük taşıma kapasitesi (kN)	-136.62	-140	2.86
	Maks Yer değiştirme (mm)	-15.45	-15	3.00

Sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında ABAQUS yazlımına ait sonuçların deneysel sonuçlara çok yakın olduğu görülmüştür. Tablo 2.15 incelendiğinde maksimum yükü sayısal modellemede oldukça iyi tahmin ederken, yer değiştirmesi ve yük taşıma kapasitesini sırasıyla %3.63 ve %3 hata oranı tespit etmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında incelenen yer değiştirmeler ve yük taşıma kapasitesinin gerçek değere çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. ABAQUS yazılımı içerisinde kullanılan kohezif davranış modeli delikli tuğla duvar ile çerçeve arasındaki teması ve dolgu duvarlı çerçeve davranışını gerçekçi bir şekilde temsil etmiştir. Ancak sert kontak ve bağlantı (tie link) modellerinde, bu davranışın tam olarak temsil edilemediği görülmüştür. Hasarlı Model-W1 ve güçlendirlmiş Model W-2 sayısal modellerinin son çatlak biçimleri, Şekil 2.36 ve Şekil 2.37'da gösterildiği gibi, sırasıyla deneysel olarak elde edilen son modellerle karşılaştırılmıştır.



(a) Sayısal (b) Deneysel

Şekil 2.36. Hasarlı model W-1 durumu için son çatlak biçimleri



(a) Sayısal (b) Deneysel

Şekil 2.37. Güçlendirlmiş model W-2 durumu için son çatlak biçimleri

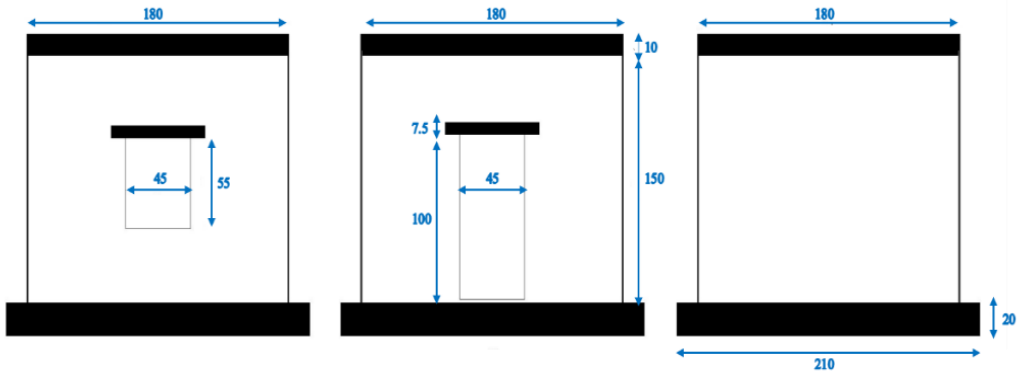
Şekil 2.36 incelendiğinde en büyük hasar limitleri hasarlı duvarda hem orta bölgede hem de sağ ve sol alt köşelerinde yoğunlaştığı belirlenmiştir. Yatay ve düşey derzler boyunca çatlak ilerlemesi ile duvarın ortasında genel olarak iki basamak şeklinde hasar biçimleri meydana gelmiştir. Ayrıca Şekil 2.37 incelendiğinde güçlendirme sonrasında oluşan çatlakların belirgin bir şekilde daha az olduğu görülmüş, ancak duvar alt sol köşesinde güçlendirilmiş bölgesinde önemli hasar yoğunlaşması görülmüştür. Şekil 2.36 ve Şekil 2.37'de görüldüğü gibi sayısal sonuçlar ve deneysel verilerin hemen hemen benzer son çatlak biçimleri elde edildiği görülmektedir.

2.1.4. Ölçekli Yığma Modeli

Bu çalışmanın amacı, deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin ve hasar dağılımlarının sayısal modeller aracılığıyla elde edilmesi ve karşılaştırılmasıdır. Makro modelleme yaklaşımı ile ABAQUS kullanılarak doğrusal olmayan sayısal tek katlı, tek odalı, yarım ölçekli donatısız yığma yapı modellenmiştir. Aynı model kullanılarak dört farklı sismik kaydı altında çekme gerilme değelerinden oluşan hasar limitleri dağılımı ve binaya etki eden frekansları, mod şekilleri ve göreli kat ötelemeleri, Ali Kaya (2023) çalışmasındaki deneysel sonuçları ile karşılaştırılmalı olarak yapılmıştır.

2.1.4.1. Model Tanıtımı

Yarım ölçekli tek katlı analiz modeli, sarsma tablası deneyindeki yığma yapı modeli ile aynı olup aşağıdaki şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan yapının boyutları sayısal model için sabit tutulmuş olup yatay doğrultudaki sırasıyla uzunlukları ve yüksekliği, 1.8 m ve 1.5 m olarak inşa edilmiştir. Modeldeki kat betonarme döşeme ile yapılmış olup, döşeme kalınlığı ve duvar kalınlığı 100 mm olarak seçilmiştir. Kuzey ve güney duvarlarında sırasıyla 0,45 m x 1 m ve 0,45 m x 0,55 m boyutlarında kapı ve pencere açıklıkları bulunmaktadır. Doğu ve batı duvarlarında ise boşluksuz duvar kullanılmıştır. Modelin düzenlemesi Şekil 2.38'de gösterilmektedir. Şekil 2.39'da gösterilen bina modeli Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Sağlığı Laboratuvarı'nda sismik etkilere maruz bırakılmıştır.



(a) Güney cephe (b) Kuzey cephe (c) Doğu ve batı cepheler

Şekil 2.38. Tek katlı yığma bina cephe görünüşleri (cm)

Şekil 2.39. İnşa edilmiş tek katlı tuğla model (Kaya vd., 2023).

2.1.4.2. Analizlerde Kullanılan Deprem Kayıtlarının Seçimi

Modelle yapılan sonlu eleman analizleri sırasında, giriş yer hareketi verileri için geçmiş depremlerden kaydedilen ivme kayıtları ve sinüs dalgaları kullanılmıştır. Farklı hasar durumları elde etmek için yapıya kademeli olarak sismik uyarımlar uygulanmıştır. Bu işlem tepe yer ivmeleri (PGA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu ivme kayıtları Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi Veritabanından (Berry vd., 2004) elde edilmiştir. Tablo 2.16'da seçilen giriş yer hareketlerinin zaman geçmişlerini göstermektedir.

Tablo 2.16. Çalışmada kullanılan yer hareketi verileri

Model	Deprem	İstasyon	PGA (g)	Büyüklük
DN-1	Northridge	W Pico Canyon Rd.	0.35	6.69
DN-2	Coyote Lake	Gilroy Array #6	0.42	5.74
DN-3	Parkfield	Parkfield - Fault Zone 1	0.60	6.00
DN-4	Sinus dalgası (6 Çevrimli)	-	0.80	-
DN-5	Sinus dalgası (6_2 Çevrimli)			
DN-6	Sinus dalgası (10 Çevrimli)			

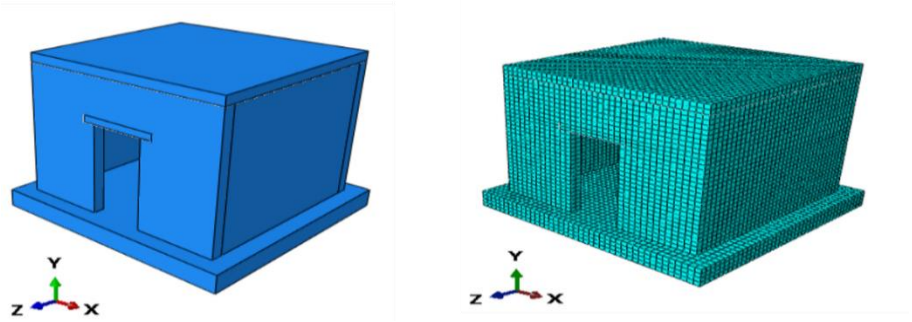
Bu deneysel çalışmada, daha önce Kaya (2023) tarafından sunulan, yığma yapıların sismik davranışını incelemek temel amaçtır. Çalışmada, farklı deprem yükleri altında tuğla birimlerden oluşturulan tek katlı bir modelin davranışı araştırılmıştır. Büyük modellerin detaylı modellenmesi için gereken önemli zaman ve çaba nedeniyle, tek katlı bina makro modelleme tekniği kullanılarak modellenmiştir. Kompozit malzemeler, iki farklı bileşen malzemeden oluşmaktadır. Analizlerde, yığma binanın doğrusal olmayan malzeme davranışı CDP malzeme modeli ile temsil edilmiştir Tablo (2.17).

Tablo 2.17. Başlangıç malzemelerin mekanik özellikleri (Kaya, 2023).

Eleman	Malzeme Özellikleri		
	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson oranı	Yoğunluk (kg/m^3)
Temel	330000	0.2	2286
Döşeme	280000	0.2	2286
Duvar	1100	0.2	1660

2.1.4.1. Sonlu Eleman Modeli İyileştirmesi

İyileştirilme parametrelerinin seçimi, model iyileştirilme prosedürünün en önemli adımlarından biridir. Geometrik basitlik nedeniyle, iyileştirilme sürecinde sınır koşulları ve yapısal geometri dikkate alınmamıştır. Sonlu eleman modeli, oluşturulan modellerle aynı geometriye sahiptir. Bu çalışma için, deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki hata oranını en aza indirmek için iyileştirme parametresi olarak elastiste modülü seçilmiştir. Sonlu elemanlar modeli ile operasyonel modal analiz arasındaki farklar %2-5 gibi kabul edilebilir düzeydedir (Tuhta, 2021). Tek katlı model makro modelleme tekniği kullanılarak sonlu elemanlar modellenmişti., Tuğla ve harcın tek homojen malzeme olarak kullanılmıştır. Farklı malzemelerin ortak düğümleri paylaştığından emin olmak için yığma duvar ve beton elemanlar için düzenli hesaplama ağı boyutu seçilmiştir. Başlangıç sonlu eleman modeli 8 düğüm noktalı ve üç serbestliği bulunan katı (solid) eleman C3D8R ile modellenmiştir. Analiz için mesh aralığı 50 mm olarak seçilmiştir. Modelin ağırlığı 5.94 tondur (Şekil 2.40).



Şekil 2.40. Tek katlı yığma sonlu elema modeli

Bu çalışma dört ana aşama olarak gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, Frequency çözücü olarak ABAQUS/Standart'ta Lineer pertubation kullanılarak modal analizi gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada yığma binanın başlangıç sonlu eleman modeli, deneysel

dinamik sonuçlar kullanılarak kalibre edilmiştir. Üçüncü aşamada zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz, modelin deprem yükleri altındaki dinamik davranışı elde edilmiştir. Son aşama ise, doğal frekansları, mod şekilleri, duvarlarda meydana gelen hasar davranışı ve göreli kat ötelenmesi uygun bir şekilde temsil edilmesi gereken deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Üçüncü aşamalı için açık (Explicit) dinamik çözücü aracılığıyla yapılmıştır.

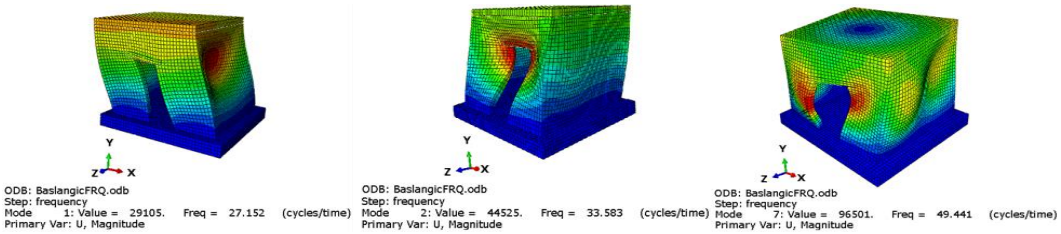
2.1.4.2. Hasarsız Durum için Sonlu Eleman Model İyileştirme

Modal analiz, ilk üç titreşim modunu uygun oluşturulmuş modelden deneysel modal analiz verileriyle karşılaştırarak sayısal modeli dinamik olarak doğrulamak için bir yöntem olarak kullanılmıştır. Yığma model için doğal frekansları ve mod şekillerini sayısal olarak elde etmek için sonlu elemanlar modal analizi yapılmıştır. Tek katlı binanın İyileştirme öncesi durumunda elde edilen sayısal ve deneysel dinamik karakteristiklerin karşılaştırılması Tablo 2.18'de verilmektedir.

Tablo 2.18. Başlangıç durum için frekans değerlerini sonuçlarının karşılaştırılması

Mod	Mod Yönü	Doğal Titreşim Frekansları (Hz)		Hata Oranı (%)
		Sayısal	Deneysel	
1	Enine	27.15	22.07	18.70
2	Boyuna	33.58	27.49	18.13
3	Burulma	49.44	45.16	8.66

İyileştirme öncesi durumunda ilk üç doğal frekans sırasıyla 27.15Hz, 33.58Hz ve 49.44Hz olarak elde edilmiştir. Tablo 2.18'de görüldüğü gibi, tek katlı yığma bina sayısal ve deneysel doğal frekans değerleri arasında hesap edilen en büyük fark %18.70'dir. Bu fark %5'ten oldukça büyük olduğu için başlangınç tek katlı yığma bina sonlu eleman modeli üzerinde iyileştirme yapılmalıdır. Şekil 2.41'de görüldüğü gibi tek katlı model başlangıç durumunda ilk iki mod enine ve boyuna ötelenme, üçüncü mod ise burulma modu olarak elde edilmiştir.



1. Mod 2. Mod 3. Mod

Şekil 2.41. Tek katlı yığma modelin başlangıç durumundan elde edilen mod şekilleri

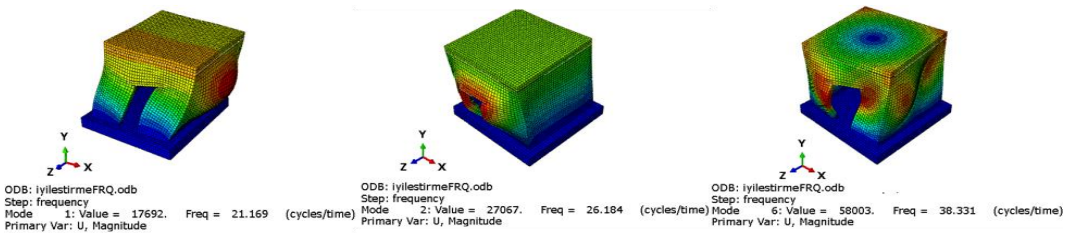
İyileştirme durumu, yığma duvarların elastisite modülünün değiştirilmesiyle sağlanmıştır. İyileştirme işlemi ile yığma duvarlar için elastisite modülü değerleri 1100 MPa dan 700 MPa'ya kadar azaltarak değiştirilmiştir. Tek katlı binanın iyileştirme sonrası durumunda elde edilen sayısal ve deneysel olarak belirlenmiş doğal frekansların karşılaştırılması Tablo 2.19'da verilmektedir.

Tablo 2.19. İyileştirme durum için frekans değerlerini sonuçları karşılaştırılması

Mod	Mod Yönü	Doğal Titreşim Frekansları (Hz)		Hata Oranı (%)
		Sayısal	Deneysel	
1	Enine	21.17	22.07	4.08
2	Boyuna	26.18	27.49	4.76
3	Burulma	38.33	45.16	15.12

İlk üç doğal frekans değerleri sırasıyla 21.17Hz, 26.18Hz ve 38.33Hz olarak elde edilmiştir. Tablo 2.19 incelendiğinde birinci ve ikinci mod için SE modelimden elde edilen doğal titreşim frekans değerleri ile deneysel ölçümden elde edilen değerler arasında önemli bir fark olduğu görülmüştür. Sonlu elemanlar model iyileştirilmesi, yapısal bir modeldeki elastisite modülü gibi belirsizlik parametrelerini belirlemiştir. Deneysel ve sayısal olarak tanımlanmış dinamik özellikler arasındaki farkları en aza indirmek için çok etkili bir yöntemdir. Ancak üçüncü mod için deneysel ve sayısal frekanslar arasında net bir uyum yoktur. Deneysel ve sayısal doğal frekans değerleri arasındaki maksimum hata oranı %15.12 olarak hesaplanmıştır.Sonlu elemanlar model iyileştirilmesi, yapısal bir modeldeki elastisite modülü gibi belirsizlik parametrelerini belirlemiştir. Deneysel ve sayısal olarak tanımlanmış dinamik özellikler arasındaki farkları en aza indirmek için çok etkili bir yöntemdir. Bu farkın %5'in altına düşürülebilmesi için sarsma tabalasının üzerinde bulunan tek katlı binanın

iyileştirme sonlu eleman modelinin tabanına yay model elemanı uygulanması gerekmektedir. Şekil 2.42'de görüldüğü gibi model binanın iyileştirilmiş tek katlı durumunda ilk iki mod enine ve boyuna ötelenme, üçüncü mod ise burulma modu olarak elde edilmiştir.



1. Mod 2. Mod 3. Mod

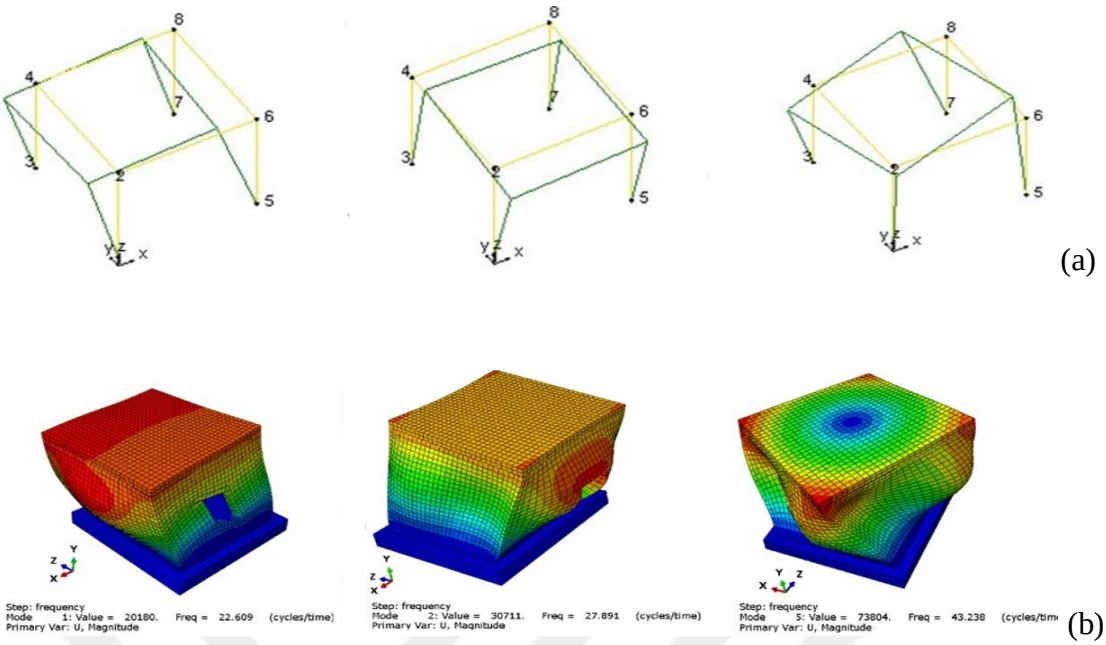
Şekil 2.42. Tek katlı yığma modelin iyileştirme durumundan elde edilen mod şekilleri

Sonlu elemanlar model iyileştirilmesi, yapısal bir modeldeki elastisite modülü gibi belirsizlik parametrelerini belirlemiştir. Deneysel ve sayısal olarak tanımlanmış dinamik özellikler arasındaki farkları en aza indirmek için çok etkili bir yöntemdir. İyileştirilmiş tek katlı yığma modelin tabanının üzerine yay elemanı uygulanmıştır. Bu durumunda elde edilen sayısal ve deneysel dinamik karakteristiklerin karşılaştırılması Tablo 2.20'da verilmektedir.

Tablo 2.20. Yay uygulama sonrası frekans değerlerini sonuçlarının Karşılaştırılması

Mod	Mod Yönü	Doğal Titreşim Frekansları (Hz)		Hata Oranı (%)
		Sayısal	Deneysel	
1	Enine	22.61	22.07	2.27
2	Boyuna	27.89	27.49	1.46
3	Burulma	43.24	45.16	4.25

Tablo 2.20 incelendiğinde, elde edilen sayısal sonuçlarında ilk üç doğal frekans değerlerinin sırasıyla 22.61Hz, 27.89Hz ve 43.24Hz olarak elde edilmiştir. Modelin yay eleman uygulama sonrası sayısal ve deneysel doğal frekans değerleri arasında hesap edilen en büyük farkın %4.25 olarak üçüncü modda elde edildiği görülmektedir. Buradan deneysel ve sayısal doğal frekansların birbiriyle uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 2.43. Hasarsız durumu için ilk üç mod şekli sonuçlarının karşılaştırılması (a) deneysel ve (b) sayısal

Şekil 2.43'te görüldüğü gibi iyileştirilmiş yay uygulanmış durumunda ilk iki mod enine ve boyuna ötelenme, üçüncü mod ise burulma modu olarak elde edilmiştir. Hasarsız durumu için deneysel ve sayısal mod şekilleri benzer şekilde davranış göstermişlerdir.

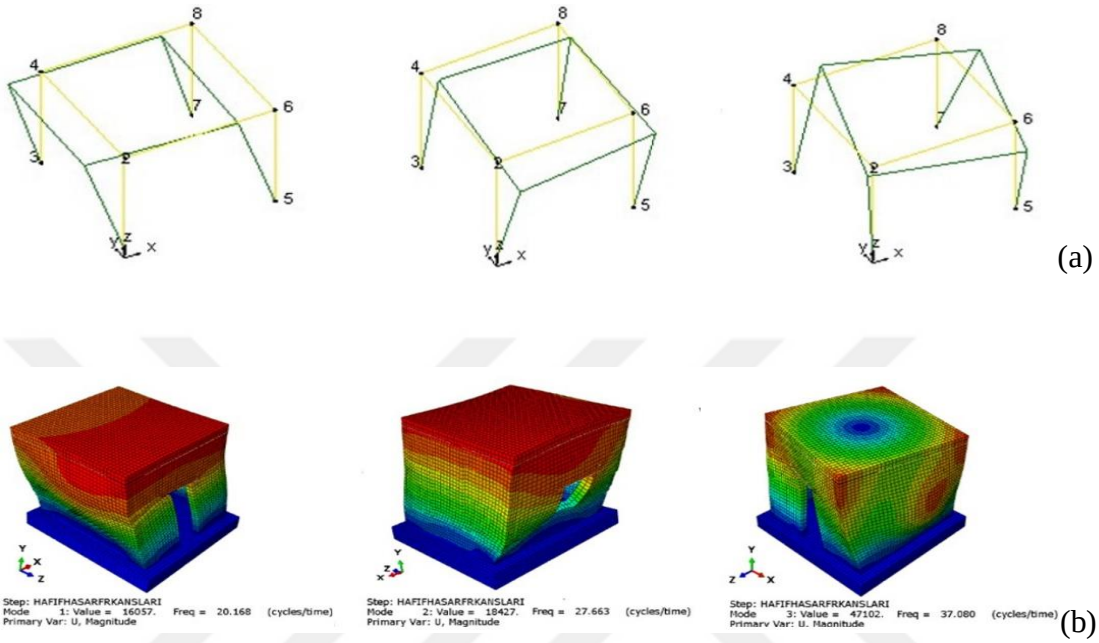
2.1.4.3. Hafif Hasar Durumu için Sonlu Eleman Model İyileştirme

Dinamik analizlerde yer hareketleri olarak meydana gelen üç deprem Northridge, Coyote Lake ve Parkfield depremleri aynı modele enine yönde uygulanmıştır. Parkfield depremi uygulandıktan sonra yeniden başlatma yöntemi kullanılarak modal analizi yapılmış ve dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Sayısal sonuçları, deneysel veriler ile modelden elde edilen frekans değerlerinin Tablo 2.21'de karşılaştırması verilmektedir.

Tablo 2.21. Az hasarlı durum için frekanslar sonuçlarının karşılaştırılması

Mod	Mod Yönü	Doğal Frekansları (Hz)		Hata Oranı (%)
		Sayısal	Deneysel	
1	Enine	20.17	19.51	3.38
2	Boyuna	27.66	27.06	2.21
3	Burulma	37.08	38.28	3.13

Şekil 2.44'te görüldüğü gibi sayısal mod şeklilerinde ilk iki mod enine ve boyuna ötelenme, üçüncü mod ise burulma modu olarak elde edilmiştir. Hafif hasar durumu için deneysel ve sayısal mod şekilleri benzer şekilde davranış göstermişlerdir.



Şekil 2.44. Az hasar durumu için mod şekli karşılaştırılması (a) deneysel ve (b) sayısal

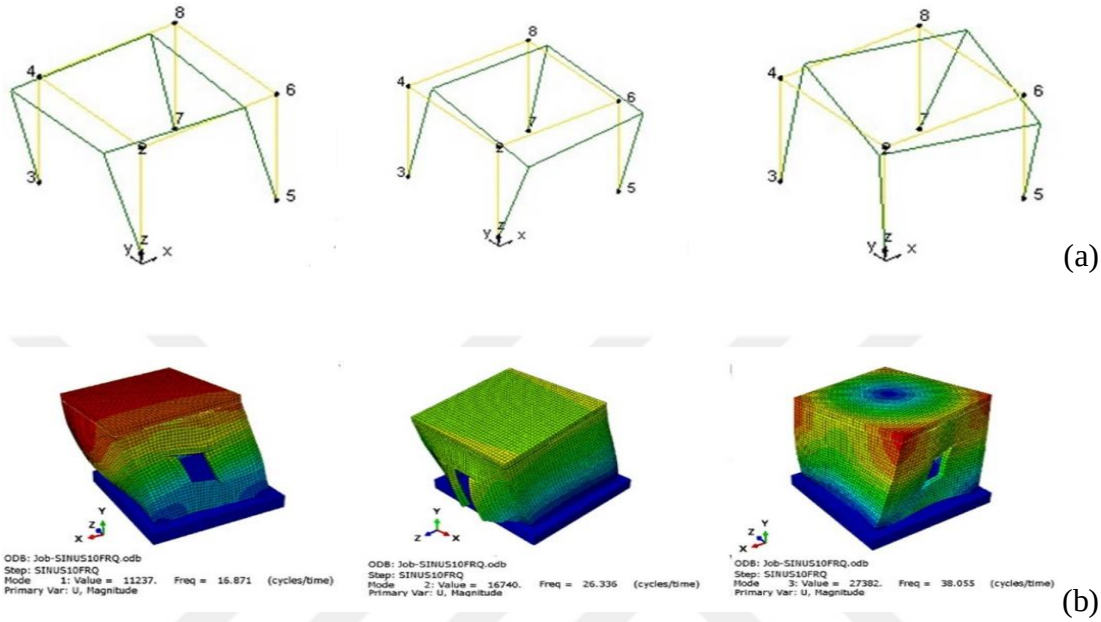
2.1.4.4. Ağır Hasar Durumu için Sonlu Eleman Model İyileştirme

Dinamik analizlerde yer hareketleri olarak meydana gelen tüm depremlerin aynı model binaya enine yönde sırasıyla uygulanmıştır. Sinus dalgası 10 çevrimli (Ağır hasarlı durum) uygulandıktan sonra yeniden başlatma yöntemi kullanılarak modal analizi yapılmış ve dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Sayısal sonuçları, deneysel veriler ile modelden elde edilen doğal frekans değerlerinin Tablo 2.22'de karşılaştırması verilmektedir

Tablo 2.22. Ağır hasar durumu için frekanslar sonuçlarının karşılaştırılması

Mod	Mod Yönü	Doğal Frekansları (Hz)		Hata Oranı (%)
		Sayısal	Deneysel	
1	Enine	16.87	16.69	1.1
2	Boyuna	26.33	26.46	0.5
3	Burulma	38.05	38.11	0.2

Şekil 2.45'te görüldüğü gibi sayısal mod şekillerinde ilk iki mod enine ve boyuna ötelenme, üçüncü mod ise burulma modu olarak elde edilmiştir. Ağır hasar durumu için deneysel ve sayısal mod şekilleri benzer şekilde davranış göstermişlerdir.

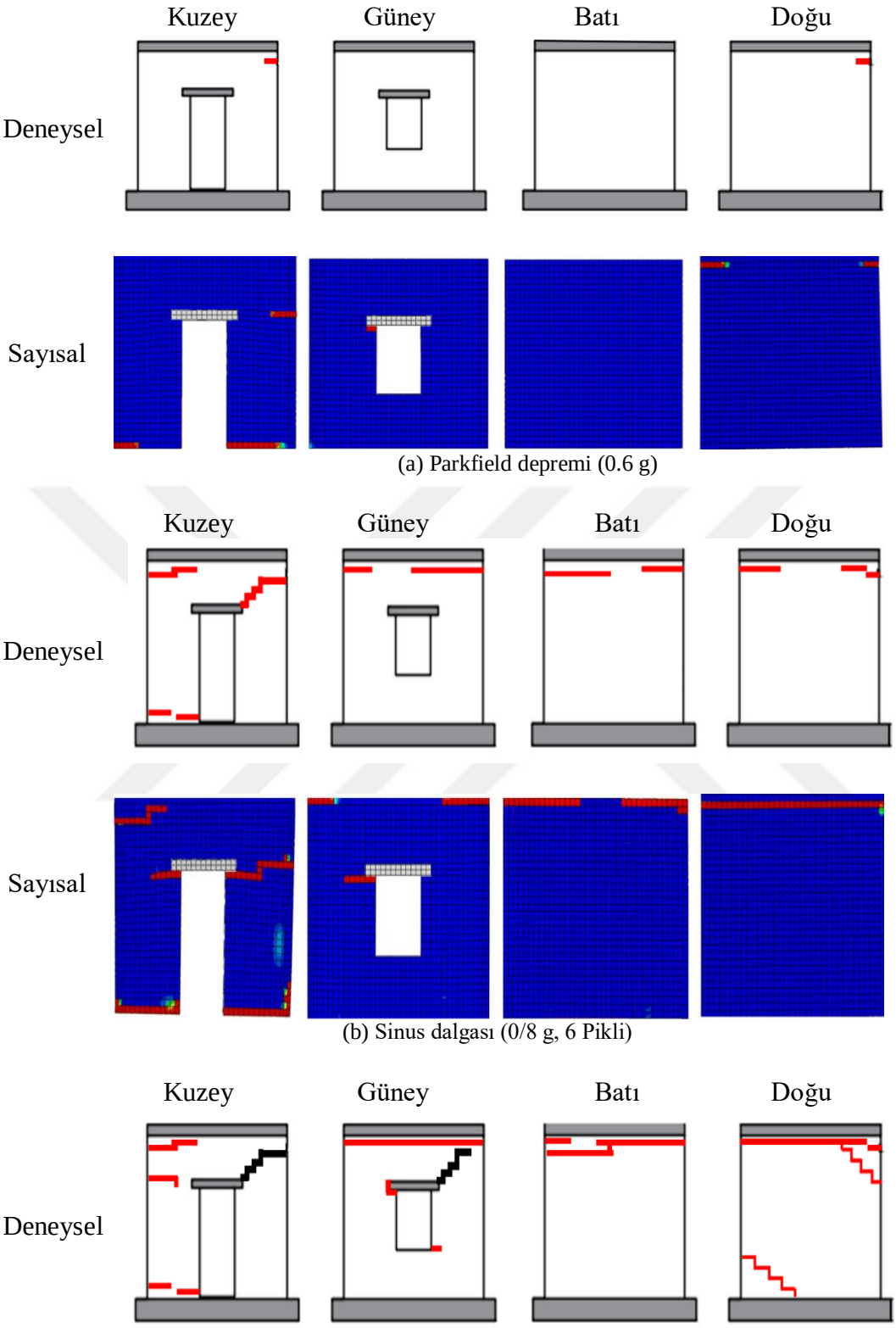


Şekil 2.45. Ağır hasar durumu için mod şekli karşılaştırılması (a) deneysel, (b) sayısal

Sayısal ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında yazılımına ait sonuçların deneysel sonuçlara çok yakın olduğu görülmüştür. Tablo 2.22 incelendiğinde frekans değerleri sayısal modellemede oldukça iyi tahmin ederken, hata oranının %5 altında tespit etmiştir. Sayısal ve deneysel dinamik karakteristiklerden mod şekilleri birbiriyle uyumlu olduğu görülmüş, frekans değerlerinin arasında az belirli bir oranda farklılık olduğu tespit edilmiştir.

2.1.4.5. Zaman-Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçları

Tek katlı yığma binanın çekme hasarı dağılımlarını sayısal olarak elde etmek için sonlu elemanlar modal analizi yapılmıştır. Farklı sismik durumlarında elde edilen sayısal ve deneysel hasar dağılımlarının karşılaştırılması Şekil 2.46'da verilmektedir. Her sayısal analizin sonunda yığma duvarların hasar dağılımları gözlenmiştir.



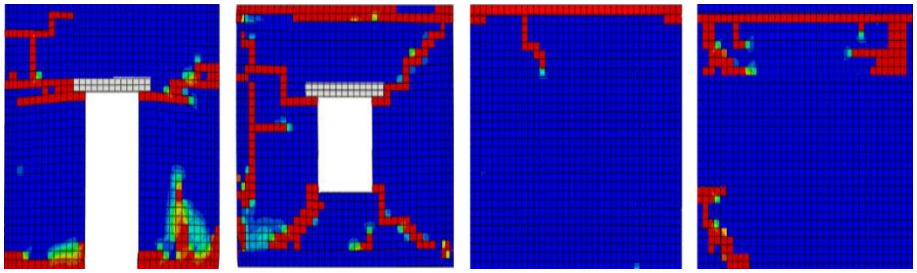
(a) Parkfield depremi (0.6 g)

(b) Sinus dalgası (0/8 g, 6 Pikli)

Şekil 2.46. Farklı depremlerinde tek katlı modeli için duvar hasarı dağılımları

Şekil 2.46'nın devamı,

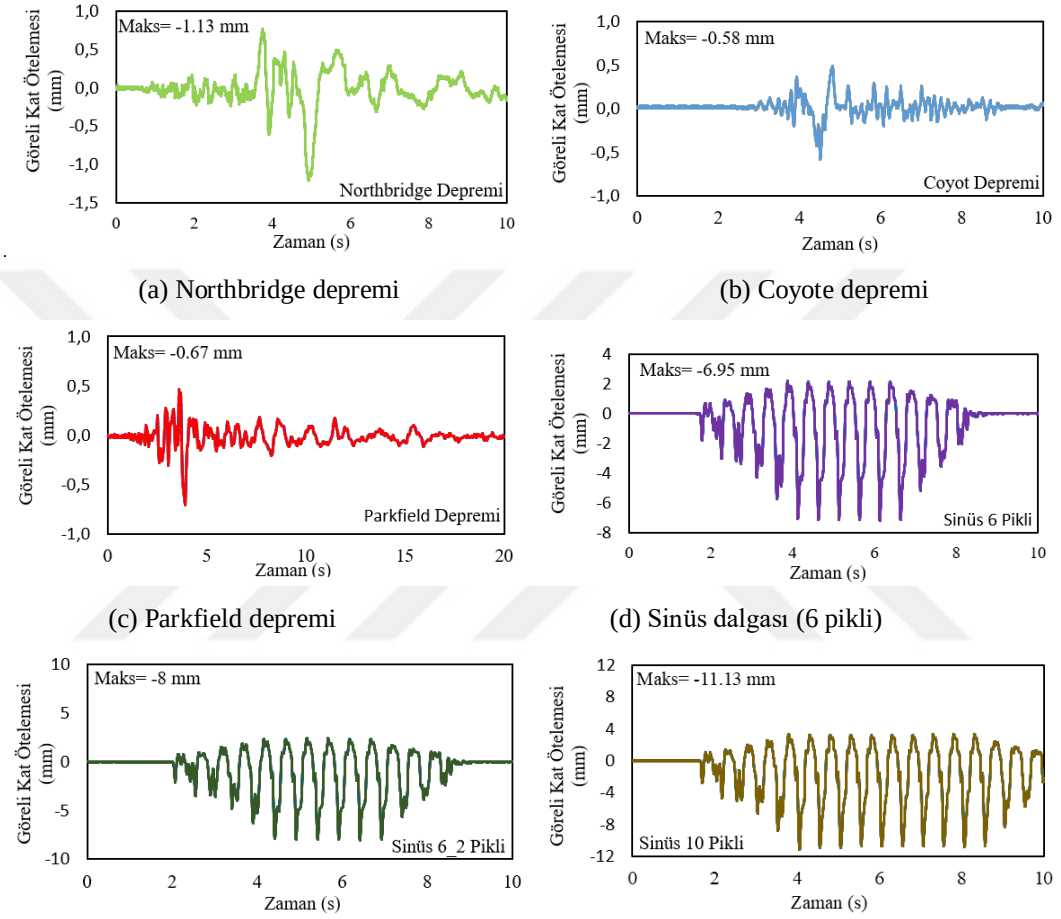
Sayısal



(c) Sinus dalgası (0/8 g, 10 Pikli)

Doğrusal olmayan zaman tanım alan analizi sırasında, Northridge, Coyote Lake ve Parkfield depremleri modele uyguladıktan sonra kuzey, güney ve doğu duvarlarında kılcal çatlaklar oluşmuş, batı duvarında ise hiç çatlak gözlenmemiştir. Önceki analizle karşılaştırıldığında, daha fazla çatlak oluşmuş ve daha geniş bir duvar alanına dağılmıştır. Batı ve doğu duvarlar için çatı ile paralel yatay kesme çatlağı oluşmuştur. Kuzey duvarında bulunan kapının üzerinde çatlak diyagonal olarak başlamıştır. Çatlaklar kılcal bir şekilde oluşmuş ve duvarın köşesine kadar ulaşamamıştır. Deneysel çalışmadaki gibi boşluklukların üzerinde başlangınç çatlakları bulunmuştur. Ayrıca kırmızı renk, deneysel ve sayısal analiz sırasında oluşan çatlakları, siyah renk ise göçme esnasında oluşan çatlakları temsil etmektedir. Son analizde, on döngülü sinüs dalgasının hareketi, duvarların üst kısımlarında bulunan mevcut çatlakların genişlemesine neden olmuştur. Kuzey duvarının tabanında ve diğer duvarların lento kirişlerinin çevresinde kayma/kesme çatlakları da gözlenmiştir. Deneysel testin sonunda, çatlaklar sayısal analize göre önemli ölçüde daha az yayılır. Ancak sayısal analizinden, pencere ve kapıdaki kesme diyagonal çatlak hasarlarının yoğunlaşmasında önemli artışlar olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, sayısal ve deneysel modellerde gözlemlenen çatlak dağılımları, Şekil 2.46'da gösterildiği gibi birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Sonlu eleman modelinde simüle edilen hem düzlem içi hem de düzlem dışı hasar mekanizmalar uyumlu olarak elde edilmiştir. Ancak, deneysel hasar ile sayısal hasarı arasında az farklar gözlenmiştir. Bu farklılıkların nedeni, deneysel modelin çekme hasar parametresinin (DAMAGET) rijitliğini azaltmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum sonucun kalitesini etkileyebilecek ana parametrelerdendir. Benzer çatlakların dağılımı, tek katlı yığma yapılar için önceki deneysel çalışmalarda rapor edilmiştir (Chellappa ve Dubey, 2018, Ersubas ve Korkmaz, 2010).

Farklı yer hareket kayıtları altında tek katlı yığma binaya ait göreli kat ötelenmesi ile ilgili sonlu eleman modelinin göreli kat ötelenmeleri Şekil 2.47'da verilmiştir. Farklı yer hareket kayıtları altında tek katlı yığma binaya ait göreli yerdeğiştirme kontur grafiği Şekil 2.48'de verilmiştir.

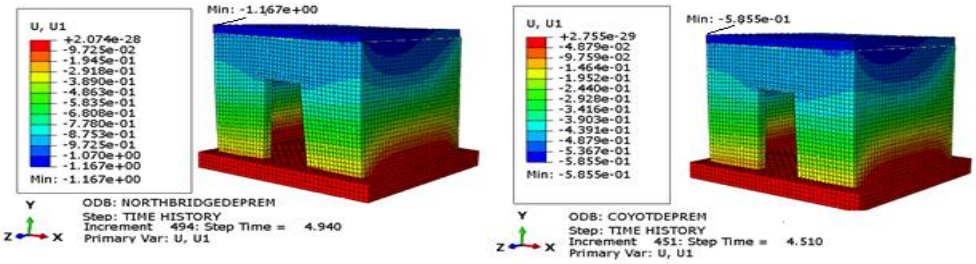


(a) Northbridge depremi (b) Coyote depremi

(c) Parkfield depremi (d) Sinüs dalgası (6 pikli)

(e) Sinüs dalgası (6_2 pikli) (f) Sinüs dalgası (10 pikli)

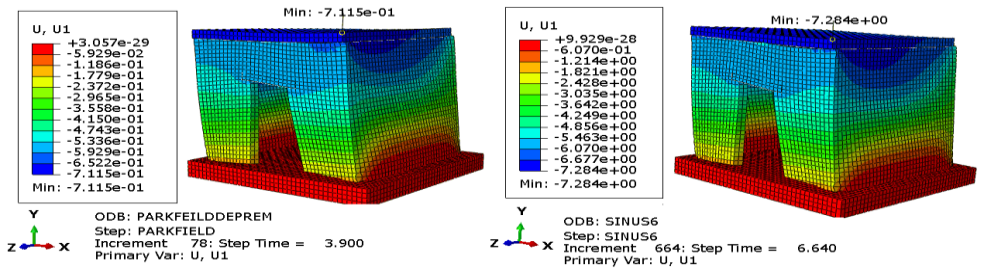
Şekil 2.47. Farklı depremlerinde tek katlı modeli için göreli kat ötelenmeleri



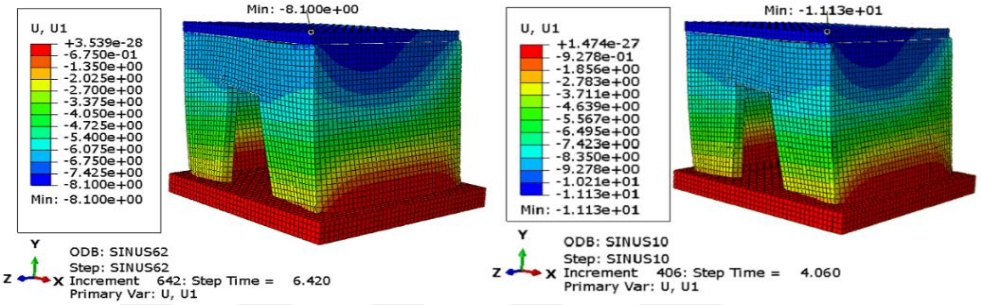
(a) Northridge depremi (b) Coyoto depremi

Şekil 2.48. Farklı deprem durumları için yerdeğiştirme konturları

Şekil 2.48'in devamı,



(c) Parkfield depremi (d) Sinüs dalgası (4 pikli)



(e) Sinüs dalgası (6 pikli) (f) Sinüs dalgası (10 pikli)

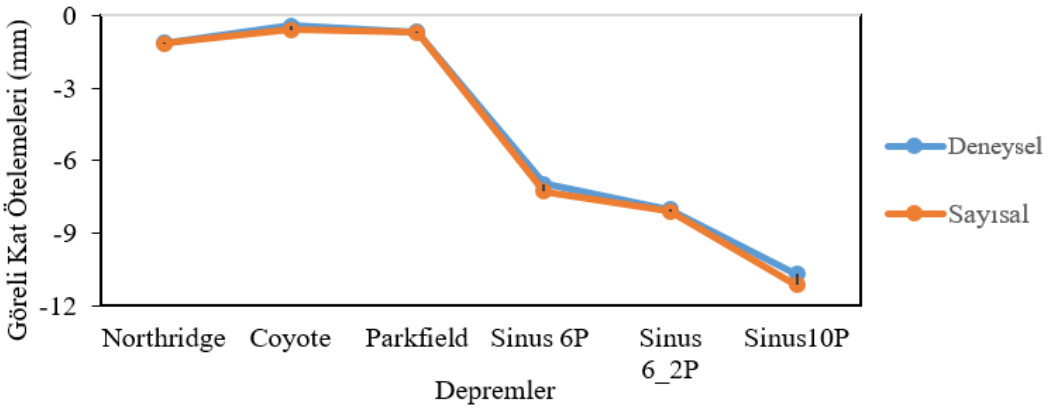
2.1.4.6. Deneysel ve Sayısal Göreli Kat Ötelemelerinin Karşılaştırılması

Farklı deprem kayıtlarına ait maksimum göreli kat ötelenmenin değerleri Tablo 2.23'te, bu değerlerin grafiksel karşılaştırılması ise Şekil 2.49'da verilmiştir.

Tablo 2.23. Deneysel ve sayısal modellerin maksimum göreli kat ötelemesinın oranları karşılaştırması

Deprem	*PGA* (*g*)	Maksimum Göreli Kat Ötelemesi (mm)		Hata Oranı (%)
		Deneysel	Sayısal	
Northridge	0.35	-1.13	-1.16	2.65
Coyot	0.42	-0.43	- 0.58	3.35
Parkfield	0.60	-0.67	0.71	3.90
Sinus 6 Çevrimli	0.8	-6.95	-7.28	4.80
Sinus6_2 Çevrimli		-8.00	-8.10	1.25
Sinus 10 Çevrimli		-10.68	-11.13	4.21

Tablo 3.23'te görüldüğü üzere, deneysel ve sayısal maksimum göreli kat ötelemesi arasındaki fark %5'in altında elde edilmiştir. Tek katlı için göreli kat ötelenme değerleri, analizlerine göre, deneysel hasar koşulları sayısal model ile benzer şekilde simüle edilmiştir. Ayrıca, deneysel sonuçlara benzer şekilde maksimum göreli kat ötelenmeleri elde edilmiştir.

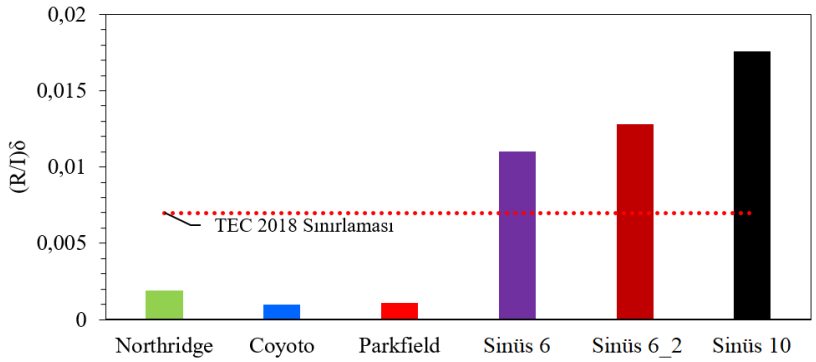


Şekil. 2.49. Sayısal ve deneysel sonuçların kullanılan depremler için maksimum göreli kat ötelenmeleri grafiklerinin karşılaştırılması

Tablo 2.24. Farklı depremler için öteleme oranı kontrolü

Deprem Adı	Öteleme Oranı (%)		Sınırlı Hasar Sınır Durumu (SH)	Kontrollü Hasar Sınır Durumu (KH)	Göçme Öncesi Sınır Durumu (GÖ)
	Deneysel	Sayısal			
Northridge	0,176	0.181	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR
Coyote	0,06	0.090	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR
Parkfield	0,105	0.111	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR
Sinus 6 Pikli	1,086	1,116	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILIYOR
Sinus 6-2 Pikli	1,280	1,296	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILIYOR
Sinus 10 Pikli	1,171	1,788	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILIYOR

Her bir deprem kaydı için Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu (2017)'ye göre değerlendirilmesi Tablo 2.24'te verilen performans düzeyleri için öteleme oranları karşılaştırılmıştır. Sınırlı hasar sınır durumu (SH), kontrollü hasar sınır durumu (KH) ve göçme öncesi sınır durumu (GÖ) azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranları sırasıyla %0.3, %0.7 ve %1 olarak verilmiştir. Modelin sınırların aşıldığı durumlarda ''AŞILIYOR'', aşılmadığı durumlarda ise ''AŞILMIYOR'' olarak elde edilmiştir. Seçilen deprem kayıtları altında yapılan doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler sonucu, göreli kat ötelemeleri için Türk Deprem Yonetmeliğinde hasar görebilirlik sınırı olarak verilen %0.7 değerinin (TEC 2018) aşıldığı şekil 2.50'de gösterilmiştir. Analizlerde kullanılan modelde farklı deprem durumları bulunduğu için Şekil 2.50'de görüldüğü gibi modelin Sinüs Pikli 6, Sinüs Pikli 6_2 ve Sinüs Pikli 10 dalgalarında göreli kat ötelemeleri Türk Deprem Yönetmeliğinin sınırlamasından daha büyüktür. Bu durum yapının deprem yükü altında ciddi hasar alması anlamına gelmektedir ve model hasar sınırlarına ulaşmaktadır.

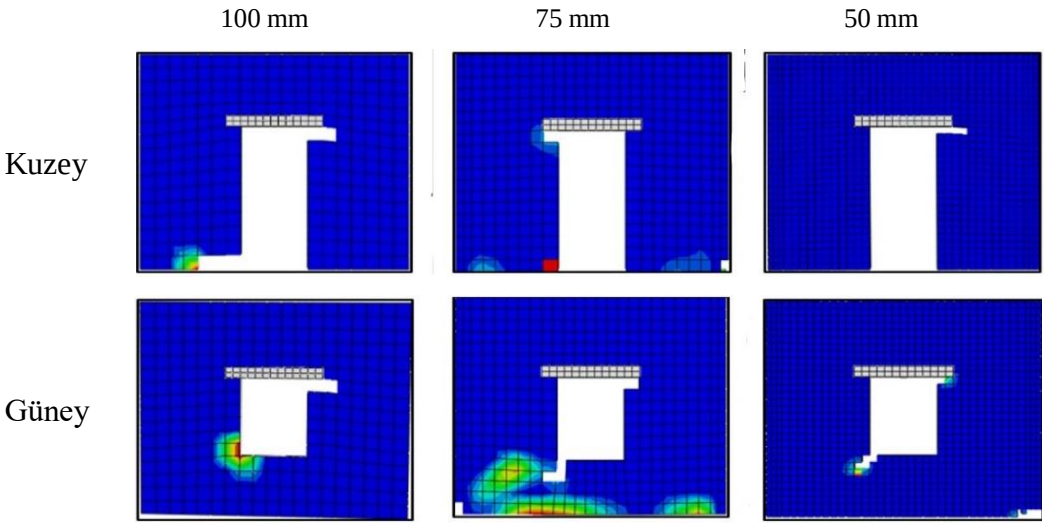


Şekil 2.50. Farklı depremler için tek katlı model sonuçlarının göreli kat ötelenmesinin karşılaştırılması

2.1.5. Eleman Silme Metodu ile Çatlak Takibi

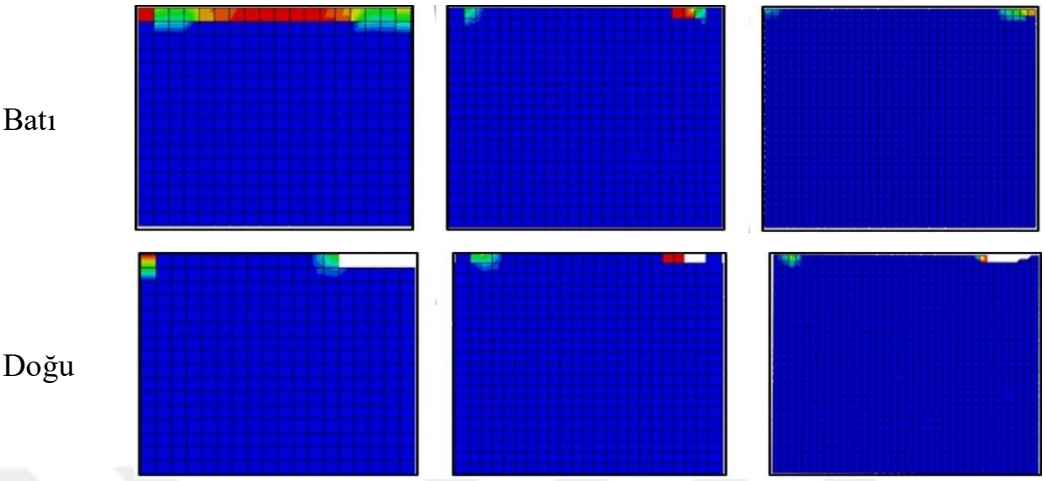
Bu çalışmada, ilgili uygulamalar farklı yüksek deprem yüklemesi içerdiğinden, CDP modeli hasar ilerlemesini doğru bir şekilde tanımlamıştır. Aynı zamanda yığma duvarların makro-modelleme yaklaşımı gerçekleştirilmiştir.

Analizlerde sonlu eleman ağı oluşturulurken, sonuçların etkilenmediği en uygun mesh yapısı araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı deprem altında tek katlı yığma binada meydana gelen hasarların tahmini üzerine yöntem kullanılmıştır. Yapısal mesh tipleri 100, 75 ve 50 mm ile eleman silme yöntemiyle geliştirilen çatlak yolları ve dağılımlarının karşılaştırılması Şekil 2.51'de verilmektedir.

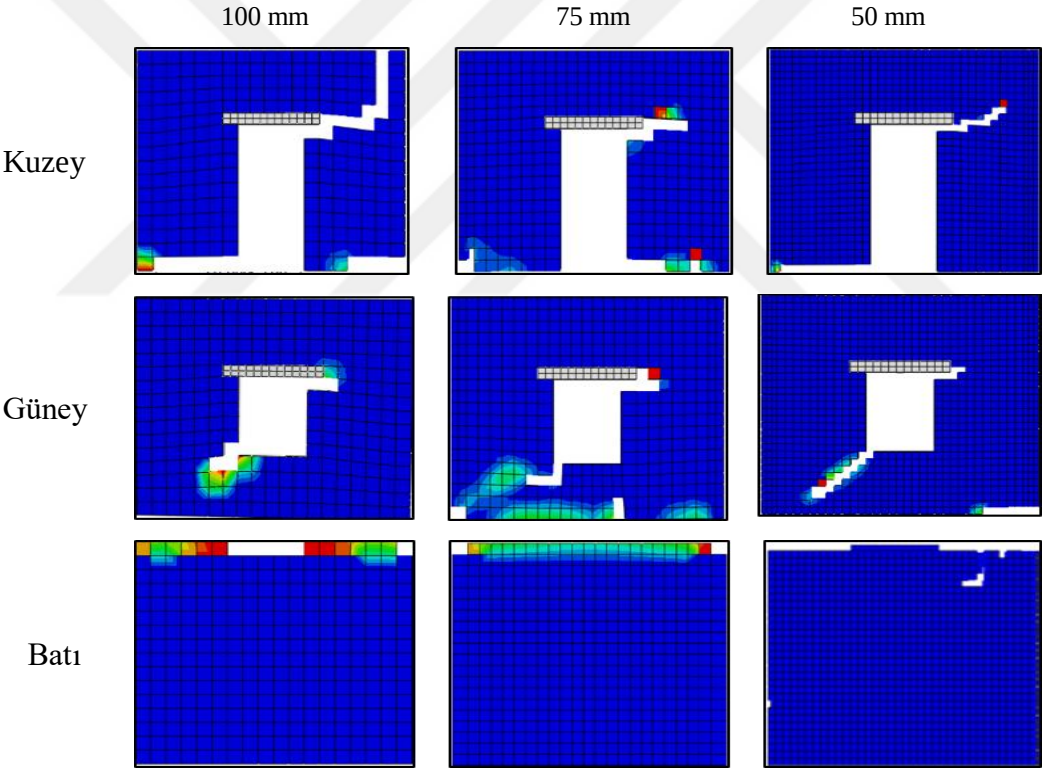


Şekil 2.51. Farklı depremler altında silme elemanı sonuçlarının karşılaştırılması

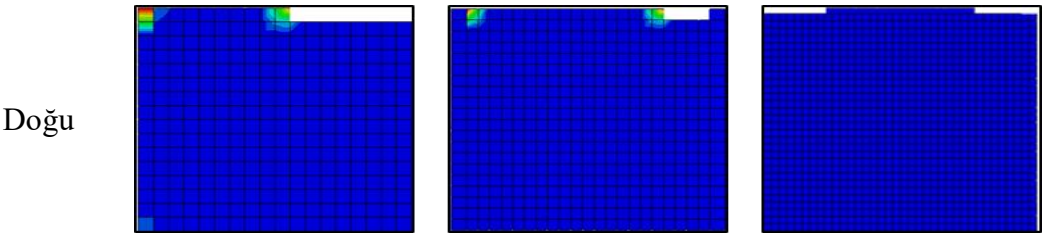
Şekil 2.51'in devamı,



(a) Parkfield depremi (0.6 g)

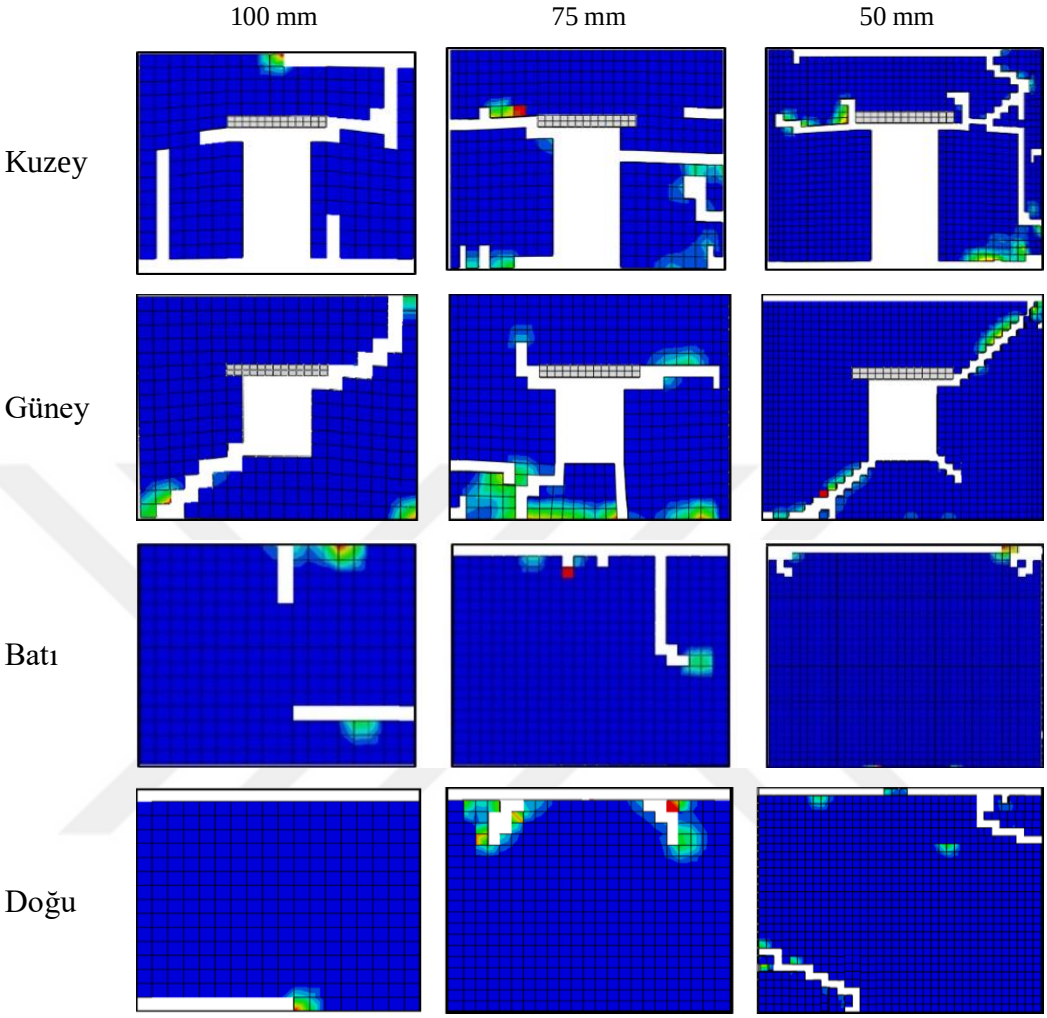


(b) Sinüs dalgası (0/8 g, 10 Pikli)



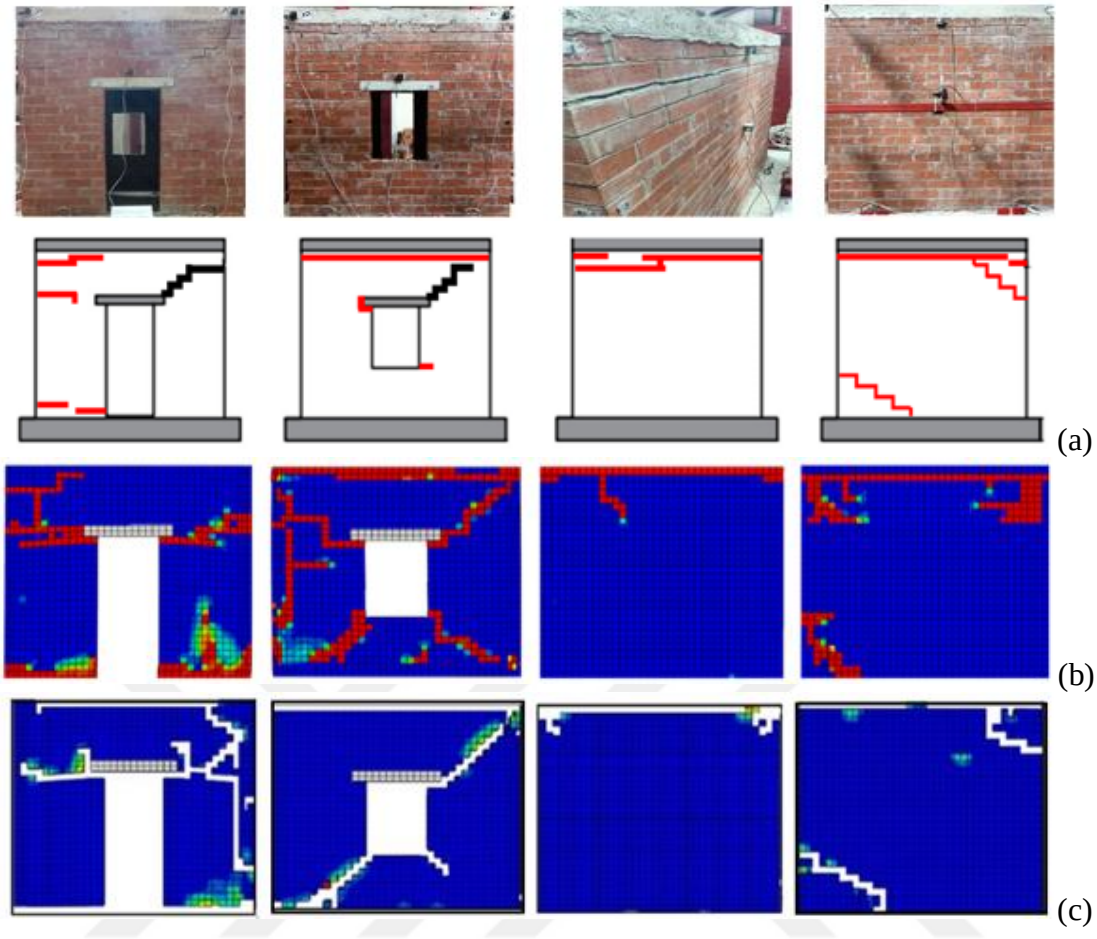
(b) Sinüs dalgası (0/8 g, 10 Pikli)

Şekil 2.51'in devamı,



(c) Sinüs dalgası (10 pikli)

Farklı mesh tipleri için çatlak ilerlemesini modellemek için eleman silme yöntemi kullanılmıştır: 50mm, 75mm ve 100mm Şekil 2.51'de gösterilmiştir. Çeşitli depremler için çatlak ilerlemesinin yolları, deneysel sonuçlara göre daha büyük hasar davranışı sergiledi. 100mm aralıklı bir mesh kullanan duvarların hasar ilerlemesinin tahmin edilemez olduğu görülmüştür. 75mm mesh tipi için ise duvarlarda oluşan ve ilerleyen çatlakların deneysel sonuçlara göre farklı davranışlar sergilediği gözlenmiştir. 50mm mesh modeli, deneysel çatlak şekillerini başarılı bir şekilde tahmin etmiş ve uyumlu bir sayısal model göstermiştir. Mesh oluşturma boyutu, yapılan simülasyon sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahipti. Farklı çatlak ilerleme davranışları, deneysel sonuçlar, CDP hasar modeli ve eleman silme yöntemi karşılaştırıldığında sonuçlar Şekil 2.52'de sunulmuştur.



Şekil 2.52. Farklı çatlak ilerleme davranışı (a) deneysel, (b) CDP hasar modeli ve (c) silme eleman metodu

Şekil 2.52 incelendiğinde, hasar dağılım sonuçları, iki farklı sonlu eleman modeli, doğrusal olmayan CDP modeli ve silme elemanı metodu ile deneysel son hasar biçimlerini karşılaştırarak, yığma duvarların çatlak ilerlemesi açısından mükemmel bir uyum göstermektedir. Sonuç olarak, modal analiz incelendiğinde doğal frekansları sayısal modellemelerinde oldukça iyi tahmin etmiş ve ortalama %5 hatalı tespit etmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında incelenen farklı duvar hasar dağılımları ve maksimum yer değiştirme kapasitesinin deneysel sonuçlara çok yakın olduğu gözlemlenmektedir.

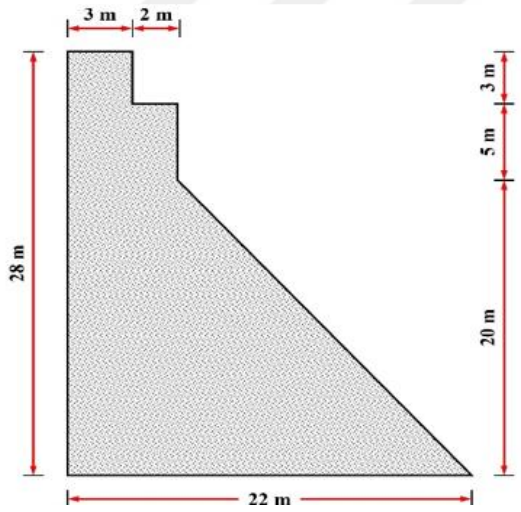
2.1.6. XFEM Kullanarak Başlangıç Çatlak İlerleme Modellemesi

Yığma ağırlık baraj yapılarında çatlak ilerlemesi ile ilgili deneysel yeterli çalışmaların olmaması nedeniyle, iki durum simüle edilmiştir. Raijmakers ve Velmertfoort (1992)

tarafından yapılan deneylerin yapıldığı betonarme barajın sayısal çalışması yapılmıştır. Addessi vd., (2014) tarafından yapılan çalışmada, yığma ağırlık baraj üzerinde Ayrık Eleman Yöntemi ile bir yazılım paketi yardımıyla analiz gerçekleştirilmiştir.

2.1.6.1. Yapının Tanıtımı

Lagoa Comprida barajı, Portekiz'in Seia belediyesinde bulunan, M şeklinde planlı, temelden 28 m yükseklikte, yapı kret kotu 1600 m, uzunluğu 1200 m olan yığma ağırlık barajıdır. Baraj modelinin genel görünümü Şekil 2.53'te verilmektedir.



Şekil 2.53. Lagoa Comprida barajının kesit geometrisi

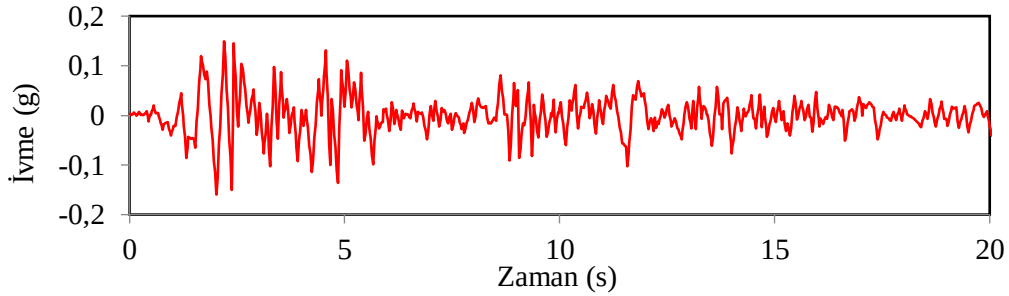
1912 yılında Lagoa Comprida baraj inşaatına başlanmış, 1914 yılında yüksekliği 6 m'ye ulaşmıştır. Daha sonra yapıya bir sürü yükseltme yapılmıştır. Sonuncusu büyük bir rehabilitasyon ile 1964 ve 1967 yılları arasında yapı 28m'ye ulaşmıştır. Lagoa Comprida barajının güçlendirme işleri, memba yüzü üzerinde, toprağa demirlenmiş ve yeterince drene edilmiş bir beton levhanın inşasını içermektedir. Beton levhanın kalınlığı kret yakınında 0,5 m ile temel yakınında 0,7 m arasında değişmektedir. Barajın eski tepesinin (1597m) üzerine, beton perdeye bağlanan, 2.0 m'ye 3.0 m'lik bir kesite sahip yeni bir beton blok inşa edilmiştir (Silveira ve Ramos, 1994).

2.1.6.2. Malzeme Özellikleri

Beton ve yığma ağırlık yapı modellemek için iki farklı malzeme düşünülmüştür. Tüm malzemeler için yoğunluk 2500 kg/m^3 ve Poisson oranı 0,2'dir. Elastisite modülü, malzeme tipine bağlı olarak değişmekte olup beton için 30 GPa ve duvar için 11 GPa'dır. Tüm eklemler için çekme dayanamı için 0,3 MPa, kohezif için 0,15 MPa ve sürtünme açısı için 35° kabul edilmiştir (Bretas vd., 2015). Bu değerler, Lagoa Comprida barajının izleme sisteminden geriye dönük çözümleme analiz ile elde edilmiştir. Yükselme basıncının barajın stabilizesi üzerindeki etkisini incelemek için drenaj sistemi ihmal edilmiştir.

2.1.6.3. Yük Bileşenleri

Yük kombinasyonu, barajın bulunduğu bölge için beklenen maksimum depreme ek olarak, barajın normal işletme durumuna karşılık gelmektedir. Rayleigh sönümlemesi kritik sönümünün %5'i olarak alınmıştır (USBR, 1987). Lagoa Comprida barajı dinamik analizinde Rayleigh sönüm katsayıları birinci ve üçüncü baraj titreşim modlarından ve %5 olan kritik sönüm oranından hesaplanmıştır. Şekil 2.54'te yapay olarak oluşturulmuş, 0.15g tepe ivmesi ve 20s'lik tam süreli bir ivme kaydı seçilmiştir (EC8, 2010). Bu değer, Seia bölgesindeki barajlar için maksimum tasarım depremine karşılık gelmektedir. Bu analizde üç farklı yük uygulanmıştır. Ölü yükü yani kendi ağırlığı altında, memba yüzündeki hidrostatik su basıncının yükü ve iki bileşeni yatay ve düşey yer hareketi temelin tabanına üniform olarak uygulanmaktadır.



Şekil 2.54. Lagoa Comprida barajına uygulanan yatay ve düşey ivme bileşenleri

Hidrostatik basınç, memba yüzüne düşey kuvvet olarak ölçülmüştür. Bu basınç,

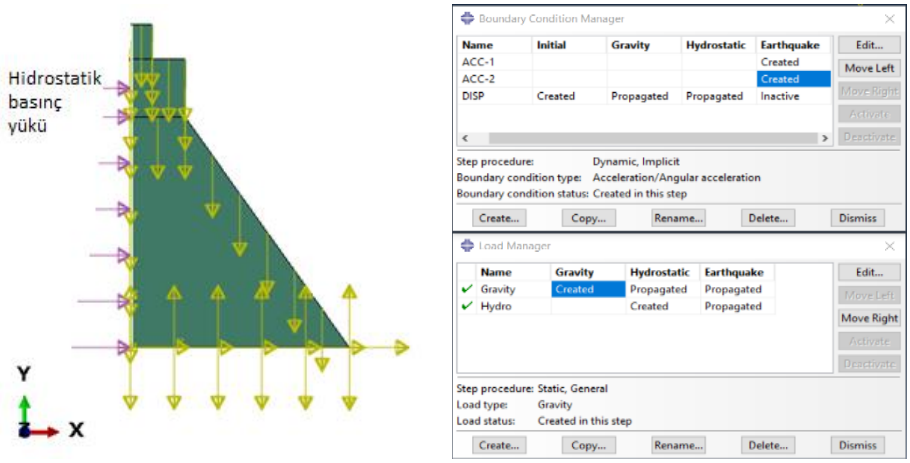
şiddetli yer hareketleri altında membada baraj gövdesine hasar verebilir. Hidrostatik basıncının yük hesaplanması için denklem (3.1),

$$F_H = \frac{\gamma_w \, H^2}{2} \tag{3.1}$$

şeklinde ifade edilebilmektedir (Gedik, 2019). Burada F baraja uygulanan suyun hidrostatik basıncı, γ_w bu çalışmada 1000 kg/m^3 kabul edilen su yoğunluğu, yerçekimi ivmesi 9.81 m/s^2'dir. Bu kuvvetin etki hat üzerindeki konumu su yüzeyinin 2/3'ü derinliğindedir ve H ise bu modelde 18.67 m olan barajın memba tarafında depolanan suyun yüksekliğidir. Yukarıda belirtilen verileri kullanarak denklemin (3.1)'in hesaplanmasıyla hidrostatik basıncın 3.06 MPa olduğunu göstermiştir.

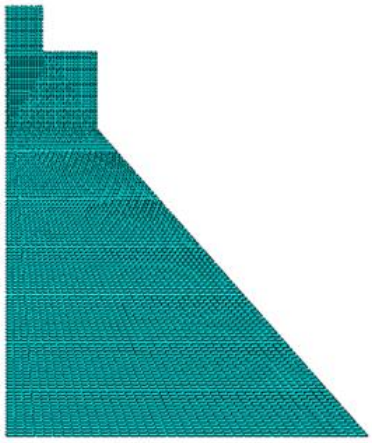
2.1.6.4. Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Lagoa Comprida barajına uygulanan yükleri temsil etmek için üç adım kullanılmıştır. İlk adımda girilen barajın kendi ağırlığıdır, ikinci adımda hidrostatik su basıncı ve üçüncü adım olarak deprem yükleri uygulanmıştır. Analiz yöntemi dinamik örtük (Implicit) sonlu elemanlar yöntemi tabanlı bir çözücüdür. Kendi ağırlığının etkisi altındaki yapının analizinde, yerdeğiştirmenin x ve y doğrultusunda sabitlenmesi için barajın tabanına sınır koşulları uygulanmıştır. Bu analiz, su dalgası ve sismik yükleri gibi farklı doğrusal olmayan statik ve dinamik analizler için kullanılmıştır. Modelin iki boyutlu izoparametrik elemanları, Lagoa Comprida barajının ayrıklaştırılması için uygulanmıştır. Farklı yüklere maruz kalan, barajın kendi ağırlığı, hidrostatik su basıncı ve deprem yükleri gibi etkiler baraja uygulanmıştır. ABAQUS yazılımında iki boyutlu sonlu eleman model olarak baraja gerçekleştirilen sınır koşulları ve yüklemeleri Şekil 2.55'te göstermektedir.



Şekil 2.55. Baraja etki eden farklı yüklerin ve sınır koşulları tanımlaması

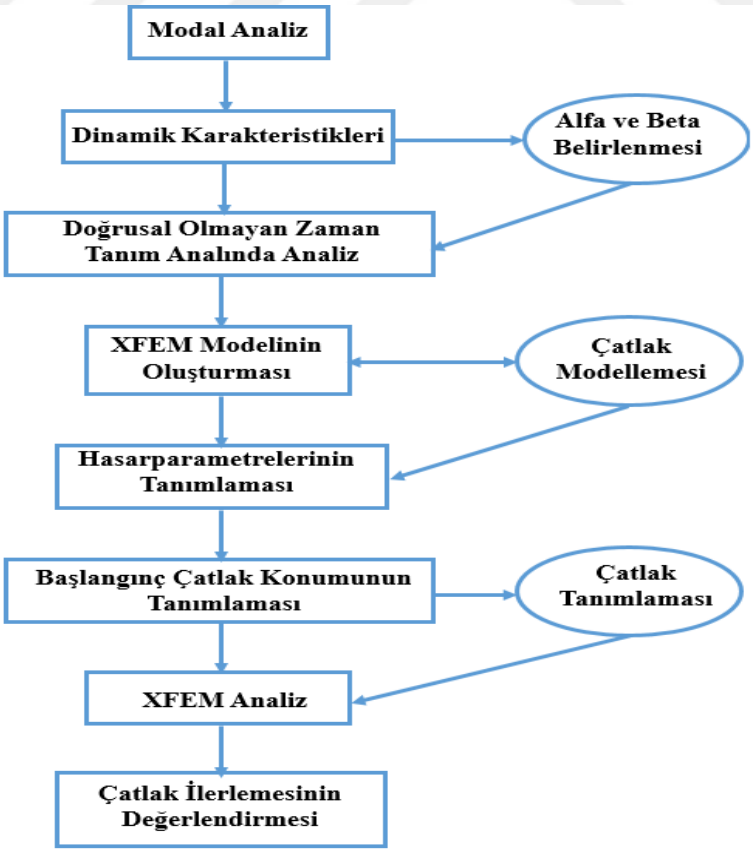
Baraj gövdesi, sürekli bir sonlu eleman mesh olarak modellenmiştir. Lagoa Comprida ağırlık barajının analizinde kullanılan sonlu eleman ağları, 4989 düğüm ve 4816 elemandan oluşmaktadır. Şekil 2.56'da birinci dereceden doğruluk, düz gerilme elemanları azaltılmış entegrasyon (CPS4R). Mesh oluşturma, yakınsama elde etmek için kademeli olarak rafine edilmiş. Bu çalışmada uygun ağ boyutu 0.25 m olarak bulunmuştur. Çatlaksız ve çatlaklı olmak üzere iki farklı yaklaşımın ilerlemesini analiz etmek için iki yöntem kullanılmıştır. Yapılarda çatlak modelleri ayrık (discrete) ve yayılı (smeared) çatlak olmak üzere iki model sınıfında toplanmıştır (Navayi Neya ve Ahmadi, 2019). Bu çalışmada level set düğüm tekniğine dayanan XFEM gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.56. Lagoa Comprida Barajı mesh modeli

2.1.6.5. Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Yöntemi (XFEM)

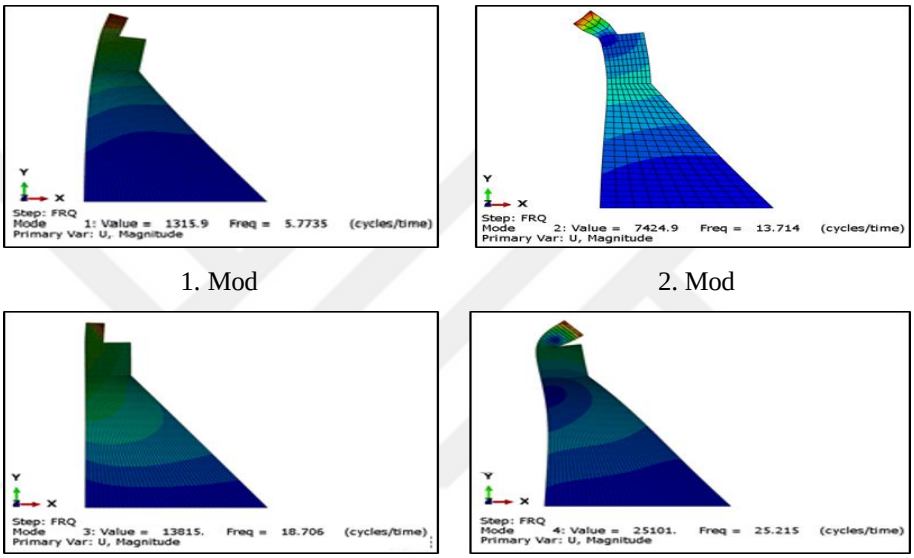
Doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analiz sonrası en yüksek gerilme bölgeleri belirlenmiştir. Çatlakların varlığı yerel olarak gerilme değerlerini arttırmaktadır. Buna karşılık kırılmaların etrafındaki gerilme dağılımı çatlamaların ilerlemesine neden olmaktadır (Wang vd., 2021). Bir malzemenin çatlak ilerleme yolunu tahmin etmek son derece zordur, çünkü gerilme ve hasar yüksek oranda birbirine bağlıdır. Bu çalışmada, çatlak ilerleme analizi, yazılım içindeki XFEM metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Başlangıç çatlak uzunlukları 0,6 m aralıklarla 0,2 m ile 2 m arasında değişmektedir. Memba yüzeyindeki başlangınç çatlak ve topuktan 15.1 m yükseklikte bulunan çatlak uzunluğu a (0.2m, 0.8m, 1.2m ve 2 m), çatlak isimleri sırasıyla Model-C1, Model-C2, Model-C3 ve Model-C4 olarak seçilmiştir. Çatlak ilerleme analizleri için farklı çatlak uzunluklarına sahip iki boyutlu model kullanılmıştır. Bu çalışmada, sayısal simülasyonlar için içinde XFEM ile irdelenen çatlak oluşumu ve ilerleme analizleri bulunan ABAQUS yazılımı kullanılmıştır. Çalışmanın akış diyagramı Şekil 2.57'de verilmiştir.



Şekil. 2.57. XFEM Çalışmasının akış diyagramı

2.1.6.6. Modal Analiz Sonuçları

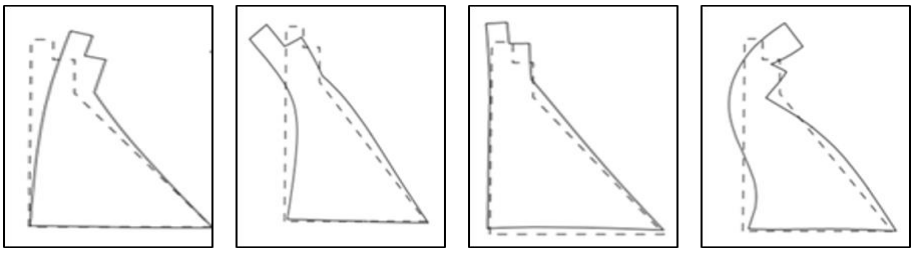
Birinci adım olarak modal analiz uygulanmış, bu adımın amacı Lagoa Comprida barajının doğal titreşim frekans değerleri ve mod şekillerini elde etmektir. Bu analiz dikkate alınarak mesh boyutu 25 cm seçilmiştir. ABAQUS yazılımında oluşturulan mod şekilleri Bretas vd. (2015) tarafından elde edilen ayrık elemanlar yöntemi sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve Şekil 2.58'de sunulmuştur.



1. Mod 2. Mod

1. Mod 2. Mod

(a) Sayısal



Mod 1 Mod 2 Mod 3 Mod 4

(b) Deneysel

Şekil 2.58. Mod şekilleri sonuçlarının karşılaştırılması

Lagoa Comprida barajında elde edilen sayısal ve deneysel ilk dört doğal titreşim frekans değelerlerinin karşılaştırılması Tablo 2.25'ta verilmektedir.

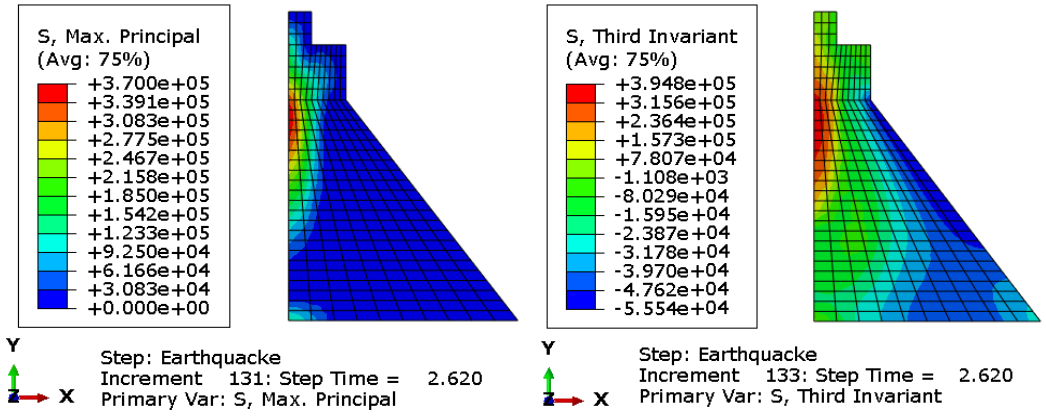
Tablo 2.25. Lagoa Comprida barajı için deneysel ve sayısal frekanslar sonuçlarının karşılaştırılması

Mod	Doğal Titreşim Frekansları (Hz)		Hata Oranı (%)
	Deneysel	Sayısal	
1	5.70	5.77	1.21
2	13.3	12.93	2.65
3	18.9	18.71	1.02
4	24.5	25.21	2.81

Tablo 2.25'ta görüldüğü gibi, Lagoa Comprida barajının sayısal ve deneysel doğal frekanslar arasında hesap edilen en büyük fark %2.81'dir. Bu fark %5'den küçük olduğu için sonlu eleman modeli üzerinde iyileştirme yapılmayacaktır. Şekil 2.59 incelendiğinde, elde edilen sayısal ve deneysel mod şekillerinin uyumlu olduğu görülmektedir.

2.1.6.7. Dinamik Analiz Sonuçları

Baraj gövdesindeki çatlak konumlarının belirlenmesi için öncelikle barajın deprem analizi yapılmıştır. Model barajin doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizinden elde edilen maksimum gerilme kontur diyagramları Şekil 2.60'da verilmektedir.

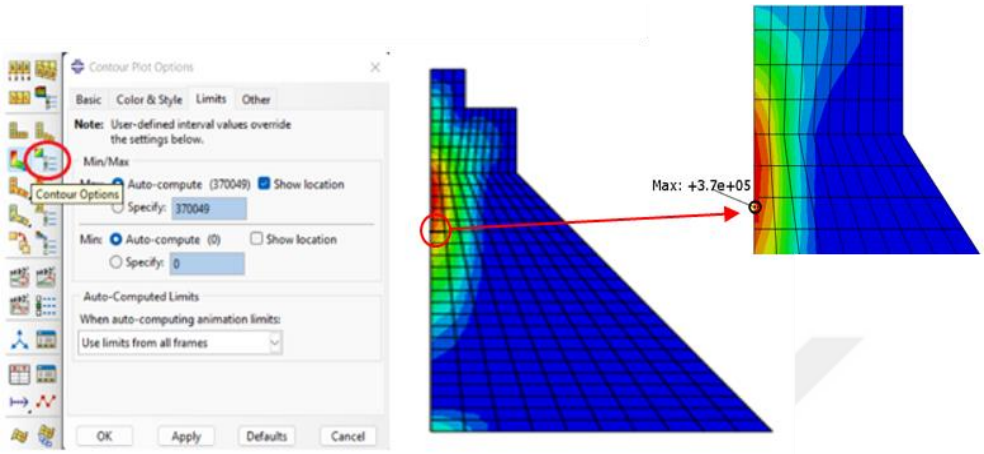


(a) Maksimum gerilme (b) Üçüncü gerilim değişmezi (I3)

Şekil 2.60. Depremler altında baraj üzerinde gerilme dağılımları

Yatay ve düşey yer hareketi için ise maksimum gerilme ve üçüncü gerilim değişmezi diyagramları barajın memba yüzeyinde sırasıyla 0.37MPa ve 0.39MPa civarında meydana gelmektedir. Memba yüzeyindeki çatlak başlangıcı olabilecek maksimum gerilme

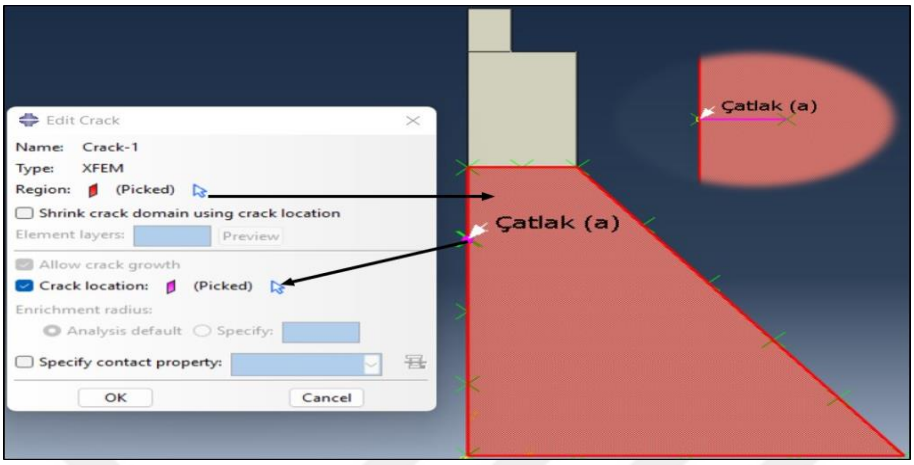
yoğunlaşma düğümünün yükseklik konumunu belirlemek için, kontur limitleri seçeneklerini kullanarak maksimum değeri belirlemektedir. En büyük çekme gerilmesinin oluştuğu düğüm Şekil 2.61'de gösterilmektedir.



Şekil 2.61. Makimum çakme gerilmesinin değerinin düğümü belirlenmesi (Pascal)

Şekil 2.61'de gösterildiği gibi baraj memba yüzeyinde çatlaklar, çekme gerilme yoğunluğu yüksek olan topuktan 14 m ile 22 metre arasında başlamış ve yaklaşık bir metre memba derinliği bölgesinde meydana gelmiştir. Bu kritik bölgede çekme gerilmesi tipik olarak kırmızı renkle temsil edilmiştir. En büyük çekme gerilmesi değerinin noktasını belirlenmek için, coutour komutu seçeneği kullanılmıştır. Bretas ve diğerleri (2015) tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarına göre, çatlaklar menba eteğinden 15 metre yükseklikte yayılmaya başlamıştır. Ancak, bu çalışmada, barajın maksimum çekme gerilme değeri 15.1 metre uzaklıkta bulunmaktadır. Deneysel ve sayısal çalışmalarla karşılaştırılarak çatlak konumu yüksekliğinin arasındaki fark yaklaşık %1'in altında elde edilmiştir. Bu durumda, deprem sonrasında barajın maksimum çekme gerilmesinin değeri, çekme dayanımı 0.3 MPa değerinden yaklaşık 23% daha yüksek bulunmuştur. Bunun için baraj gövdesinde memba yüzeyinin üzerine farklı kritik bölgelerde çatlak oluşabilir ve bu yerlerde önemli hasar meydana gelebilir. Mevcut çalışma, yarı gevrek malzemelere odaklanmaktadır. Bu nedenle, kırılma kriteri üçüncü gerilim değişmezi I3'e göre seçilmiştir. Papadopoulos (1987) çalışmasındaki gerilme tensörünün determinantı kritik bir değere ulaştığında kırılmanın meydana geleceği sonucuna varmıştır. Şekil 2.62'de gösterildiği gibi memba yüzeyindeki bulunan düğüm noktasının üzerine yatay başlangıç çatlak a uzunluğuna sahip modellenmiştir. Pembe renkle görülen zenginleştirilmiş eleman seçerek tanımlanmış

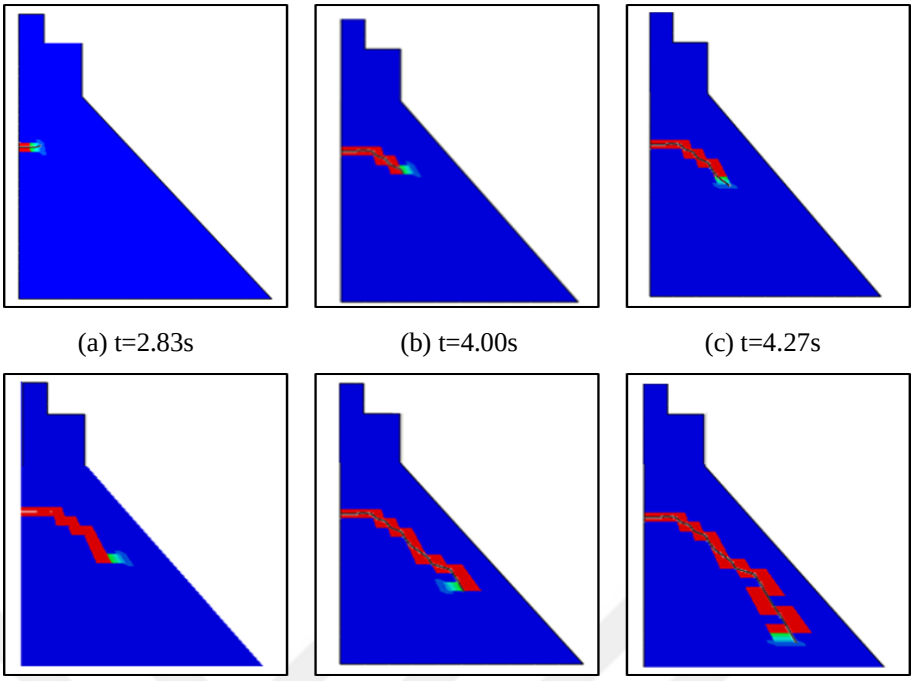
kısımda XFEM ayrıklaştırmaları gösterilmiştir.



Şekil 2.62. İki boyutlu Lagoa comprida barajı gömülü başlangıç çatlak konumu

2.1.6.8. Farklı Başlangıç Çatlak Uzunluklarının Etkisi

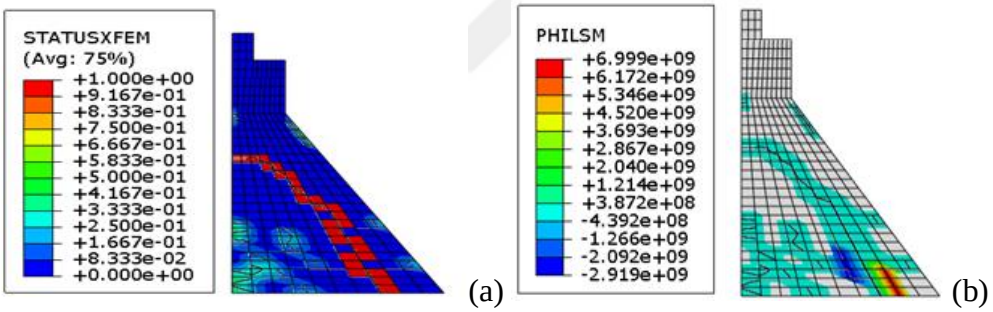
Lagoa Comprida ağırlık barajı, deprem altında başlangıç olarak tek çatlak modellenmiş ve XFEM yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yığma barajın çatlak ilerlme yolları, kırılma davranışı açısından gözlenmiştir. Farklı çatlak ilerlemesi yollarının zamanla değişim durumları Şekil 2.63, Şekil 2.65, Şekil 2.67 ve Şekil 2.69'da verilmektedir. Çatlak yüzeyinin görselleştirilmesini PHILSM işlevi sağlamıştır. Bu parametre, zenginleştirilmiş model parçası içindeki çatlağın yerini tanımlamak ve/veya göstermek için kullanılmış ve yalnızca zenginleştirilmiş model parçası için sıfırdan farklıdır. STATUSXFEM, model parçasının zenginleştirme bolgesinde hasarın veya "çatlamış" derecesini gösteren skaler bir parametredir. Tamamen çatlamış bir model parçası için bu parametrenin değeri 1'dir. Aynı şekilde içinde çatlak olmayan bir model parçasının değeri de 0'dır. 0 ile 1 arasındaki değerleri modelin zenginleştirme bolgesinde kısmi hasar veya çatlak olduğunu gösterir. Baraj gövdesinde başlangıç çatlağın konumuna bağlı olarak çatlak ilerleme yollarının son hali sırasıyla Şekil 2.64, Şekil 2.66, Şekil 2.68 ve Şekil 2.70'de göstermektedir.



(a) t=2.83s (b) t=4.00s (c) t=4.27s

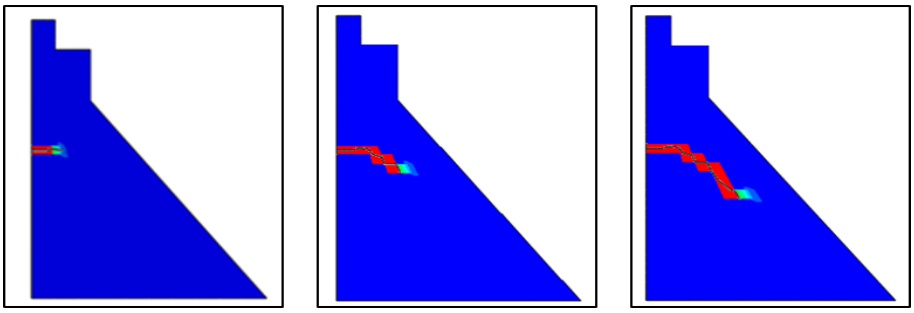
(d) t=4.48s (e) t=4.75s (f) t=5.26s

Şekil 2.63. Model-C1'in seçilmiş altı zamanla çatlak ilerlemesi (a=0.2 m)



(a) (b)

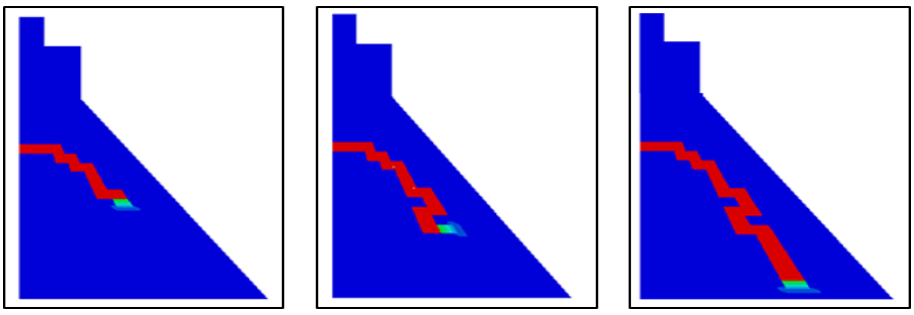
Şekil 2.64. Model-C1 durum için (a) STATUSXFEM ve (b) PHILSM (t=10s)



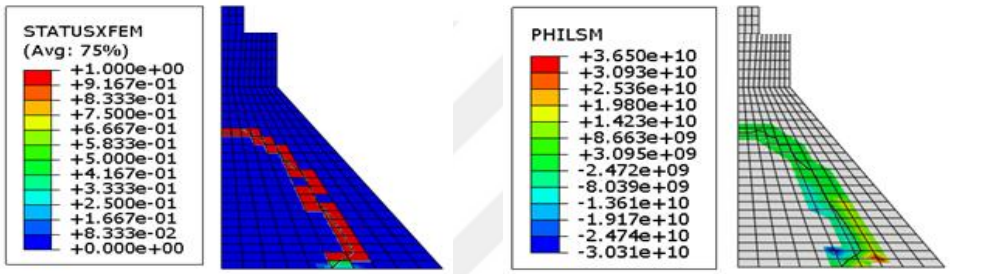
(a) t=2.83s (b) t=4.00s (c) t=4.27s

Şekil 2.65. Model-C2'in seçilmiş altı zamanla çatlak ilerlemesi (a=0.8 m)

Şekil 2.65'in devamı,

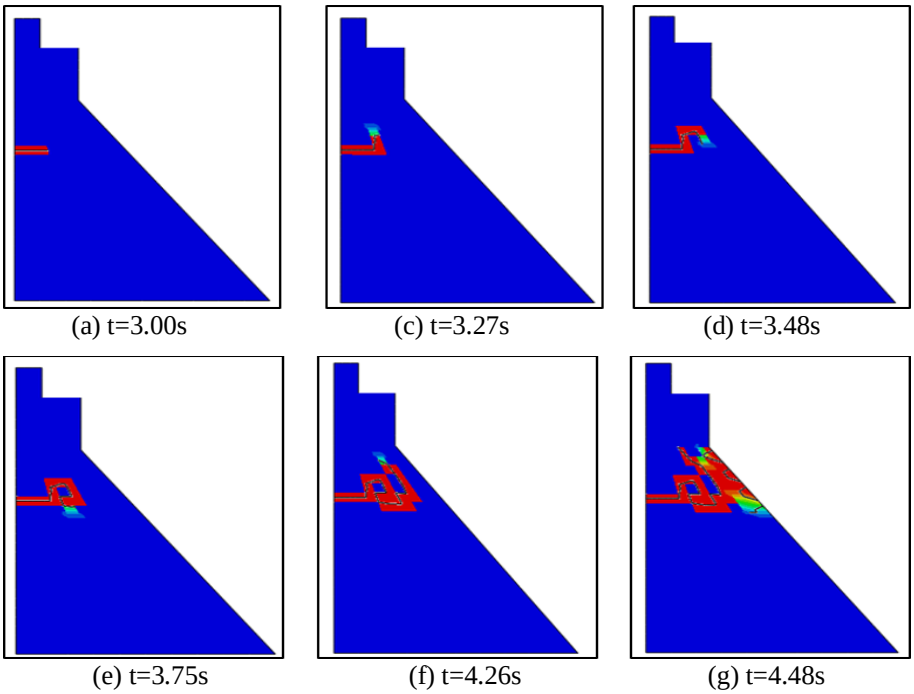


(d) t=4.48s (e) t=4.75s (f) t=5.26s



(a) (b)

Şekil 2.66. Model-C2 durum için (a) STATUSXFEM (b) PHILSM

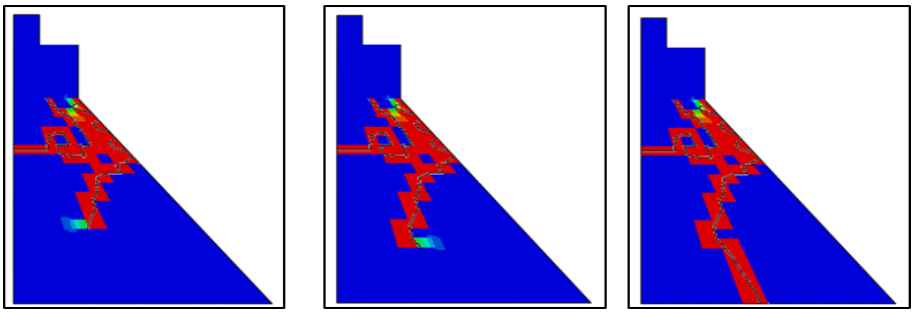


(a) t=3.00s (c) t=3.27s (d) t=3.48s

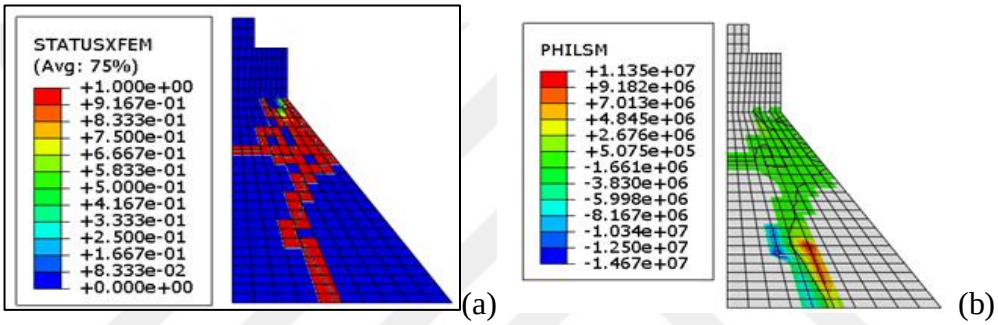
(e) t=3.75s (f) t=4.26s (g) t=4.48s

Şekil 2.67. Model-C3'ün seçilmiş dokuz zamanla çatlak ilerlemesi (a=1.4 m)

Şekil 2.67'nin devamı,

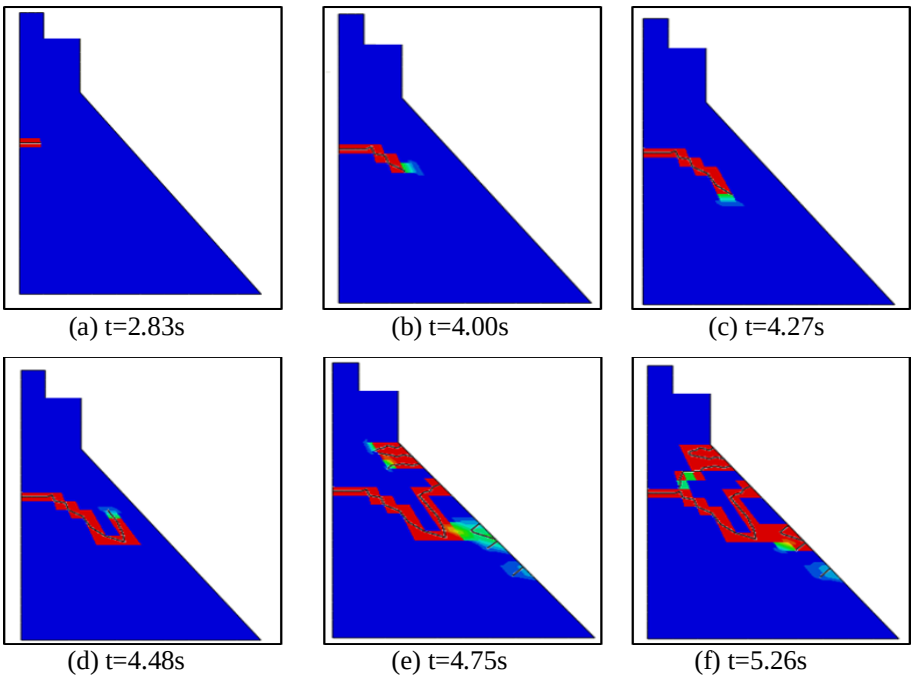


(h) t=4.75s (i) t=5.26s (k) t=5.60s



(a) (b)

Şekil 2.68. Model-C3 durum için (a) STATUSXFEM ve (b) PHILSM (t=10s)

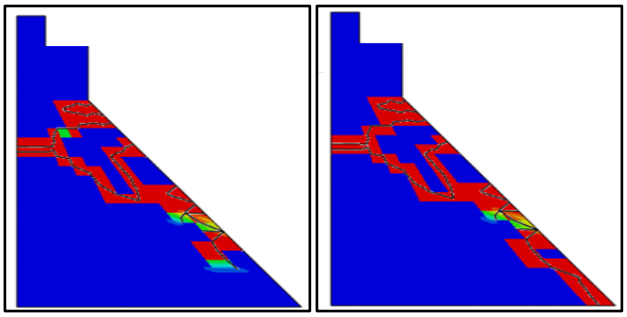


(a) t=2.83s (b) t=4.00s (c) t=4.27s

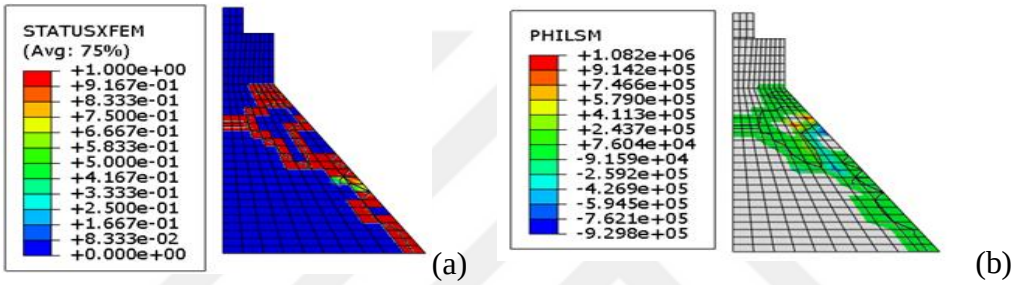
(d) t=4.48s (e) t=4.75s (f) t=5.26s

Şekil 2.69. Model-C3'nin seçilmiş sekiz zamanla çatlak ilerlemesi (a=2 m)

Şekil 2.69'un devamı,



(g) t=5.60s (h) t=10s



(a) (b)

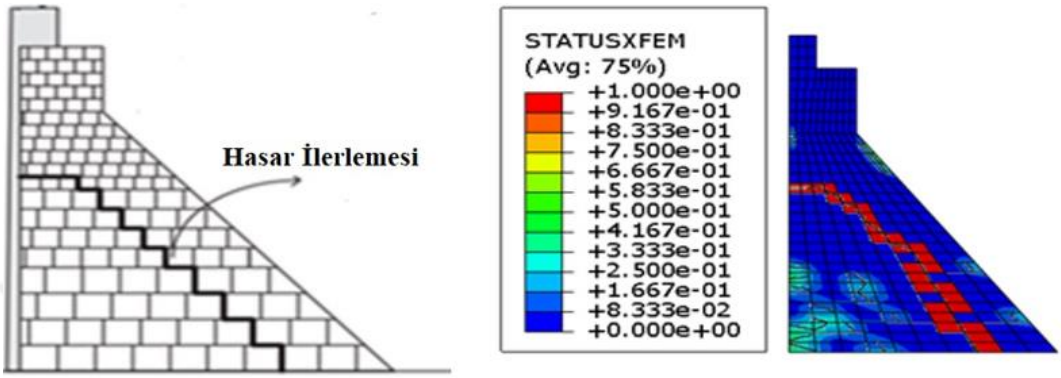
Şekil 2.70. Model-C4 durum için (a) STATUSXFEM ve (b) PHILSM

Model-C1, Model-C2 ve Model-C3'ün durumu sırasıyla 4 saniye ve 4.75 saniye, baraj gövdesinde çatlak yolu değişip baraj tabanının ortasına doğru düşey bir şeklide ilerlerek yüzeye ulaşmaktadır. Model-C4 için, diğer modeller olması durumuyla karşılaştırıldığında baraj gövdesinde önemli hasarlar oluşmaktadır. Mansap yüzeyinden barajın burnuna kadar hasar meydana gelmektedir. Tüm bu durumlar için 5.60 saniyeden sonra herhangi yeni bir hasar gözlenmemiş ve hasarlı yığma baraj analizin sonuna kadar aynı kalmıştır. Model C-1, Model-C-2 ve Model-C-3 için son hali olan hasarlı baraj modelleri benzerdir. Farklı durum için çatlalkların dağılımı, son biçimine göre barajın gövdesinde önemli hasara veya yıkıma neden olmaktadır.

2.1.6.9. Çatlak İlerleme Yollarının Doğrulanması

Bu çalışmanın amacı, başlangıç çatlak uzunluğunun beton ağırlık barajlarının sismik performansı ve çatlak ilerlemesi üzerindeki etkisini değerlendirmektir. Şekil 2.71'de verilen sonuçlar dikkate alındığında, Bretas vd. (2015) tarafından tahmin edilen çatlak biçimlerine

benzer sonuçlar elde edilmiştir. XFEM yönteminin başlangıç çatlakları olan beton ağırlık baraj modellerindeki çatlak ilerleme yolları ve çatlak yörüngesini etkili bir şekilde yakalayabildiğini göstermektedir. Model-C1 durumu için, önerilen XFEM modelinin baraj yapısında beklenen hasar biçimlerini simüle edebileceği kabul edilmektedir.



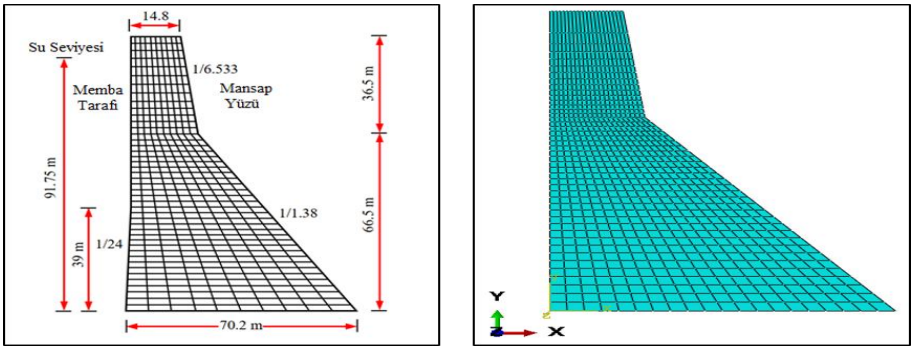
(a) DEM modeli (b) ABAQUS modeli

Şekil 2.71. Barajdaki eğilme çatlakları hasar biçiminin karşılaştırılması

2.1.7. Başlangıç Çatlak Durumu Olmadan XFEM ile Çatlak İlerleme Takibi

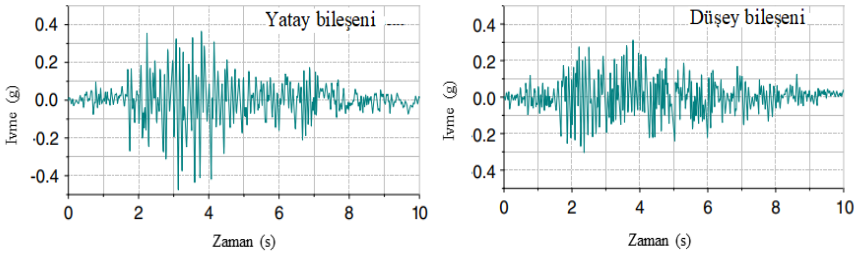
2.1.7.1. Yapının Tanıtımı

Depremler sırasında yapısal hasar görmüş birkaç beton barajdan biri olan Koyna beton ağırlık barajı, sayısal modelinin doğrulanması için seçilmiştir. Bu çalışmada, SE yazılımında uygulanan XFEM metodu çatlakların oluşması, ilerlemesi ve daha sonraki doğrusal olmayan yapısal davranışı tahmin etmek için kullanılmıştır. Koyna Barajının dinamik davranışını hesaplayabilmek için ayrık çatlak modelleri geliştirilmiştir. Baraj gövdesinin sonlu eleman modeli Şekil 2.72 (a)'da ve barajın boyutları Şekil 2.72 (b)'de gösterilmiştir. Dinamik analizde Koyna depremi kullanılmıştır. İvme–zaman yatay ve düşey grafikleri Şekil 2.73'te verilmiştir. Koyna deprem ivmelerinin yatay ve düşey bileşenleri temelin tabanına uygulanmaktadır. Çatlakların içindeki sismik su basınç (hidrodinamik) etkilerinin analizde dikkate alınmamıştır. İki boyutlu Koyna barajının sonlu eleman modellemesinde kullanılan malzeme miktarları Tablo 2.26'da verilmiştir.



(a) Baraj model geometrisi (b) Mesh sonrası baraj şekli

Şekil 2.72. Koyna barajının modeli



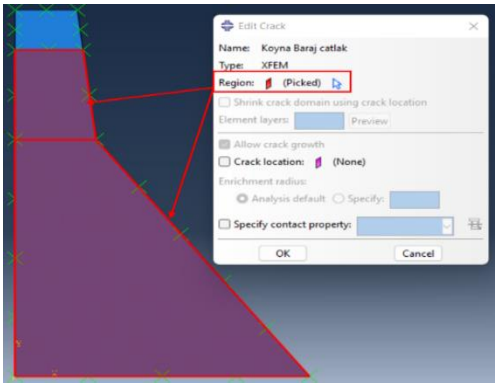
(a) Yatay bileşen (b) Düşey bileşen

Şekil 2.73. 11 Aralık 1967 Koynanagar ivme kayıt ivmeleri

Tablo 2.26. Koyna baraj modelinde kullanılan malzeme özellikleri (Chopra ve Chakrabarti, 1972).

Malzeme Özellikleri	Değer
Hacim ağırlığı (t/mm^3)	2.643e-3
Young modülü (MPa)	31027
Poisson oranı	0.2
Sönümleme katsayısı	0.05
Basınçlı başlangıç akma gerilmesi (MPa)	12.6
Maksimum Basınç gerilmesi (MPa)	27.11

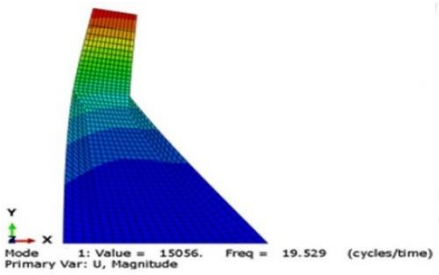
Koyna baraj için basit bir görev olabilecek potansiyel kırılma bölgesi/bölgeleri belirlenmiştir. Öte yandan, büyük yapılarla uğraşmak çok zorlayıcı bir görev haline gelmektedir. Kritik bölge(ler) belirlendikten sonra, bu bölge(ler) Şekil 2.74'te gösterildiği gibi tanımlanır.



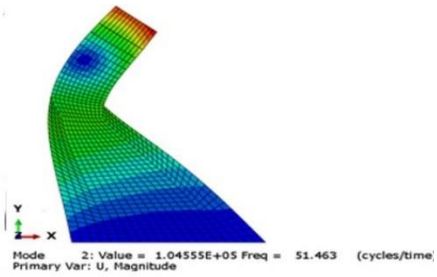
Şekil 2.74. Koyna barajının üzerinde kritik bölge tanımlanması

2.1.7.2. Modal Analiz Sonuçları

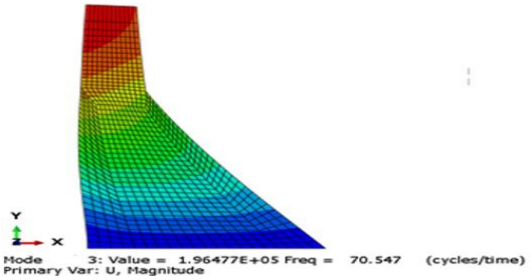
Barajın dinamik karakteristikleri, ABAQUS yazılımında Lanczos yineleme yöntemi uygulanarak belirlenmiştir. Koyna barajının ilk üç doğal frekans değerleri 19Hz -71Hz aralığında elde edilmiştir. Baraj modelin ilk üç doğal titreşim frekans değerleri 19.53 Hz, 51.46 Hz, 70.55 Hz'dir ve bunlara karşılık gelen mod şekilleri Şekil 2.75'da göstermektedir. Koyna barajının doğrusal olmayan tepki analizini incelemek için, Rayleigh rijitliği orantılı sönümünün elde edilmesi gereklidir. Koyna barajın doğal frekans değerleri analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 2.27'de özetlenmiştir.



1. Mod



2. Mod



3. Mod

Şekil 2.75. ABAQUS yazılımına göre elde edilen mod şekilleri

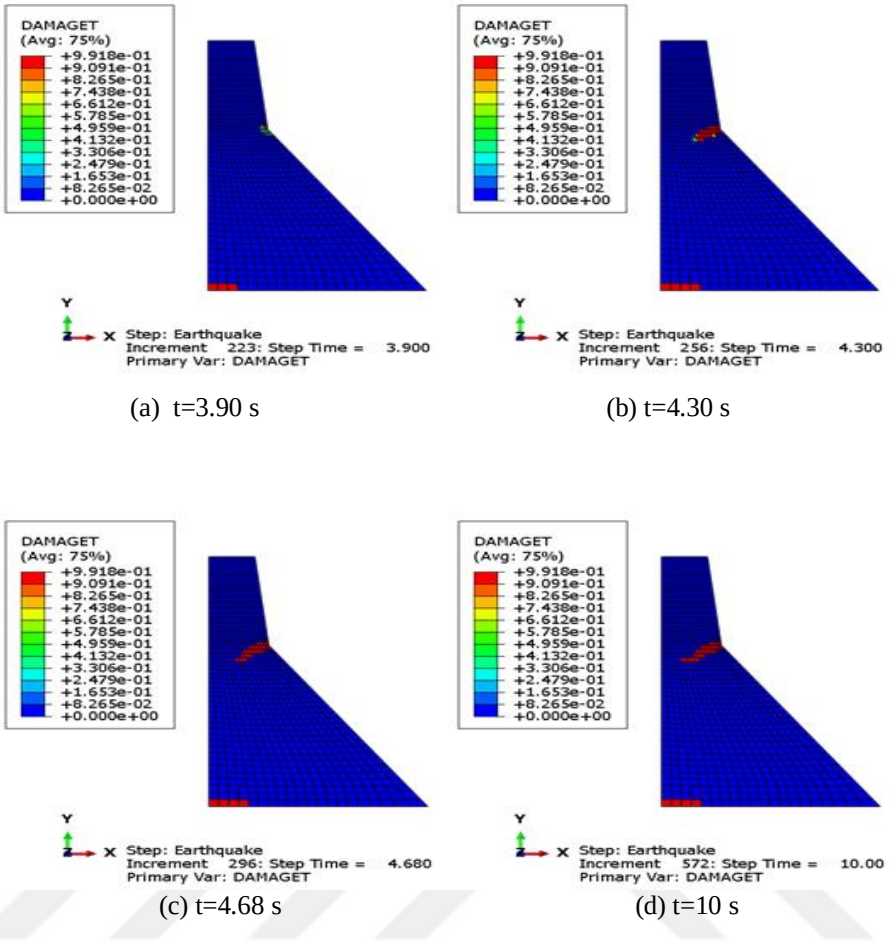
Tablo 2.27. Koyna barajının doğal titreşim frekans değerleri

Mod	Sayısal (Hz)	Chopra ve Chakrabarti (1973) (Hz)	Hata oranı (%)	Mridha ve Maity (2014) (Hz)	Hata oranı (%)
1	19.53	19.27	1.33	18.70	4.25
2	51.46	51.50	0.08	50.50	1.87
3	70.55	67.56	4.24	69.50	1.49

ABAQUS modelinin ilk üç doğal titreşim frekansı Chopra ve Chakrabarti (1973) ve Mridha ve Maity (2014) tarafından bildirilen değerlerle makul bir uyum göstermiştir. Burada α ve β, sönüm oranı değerinden ve doğal titreşim frekansları birinci ve üçüncü modlarından tahmin edilen orantılı sönüm katsayıları sırasıyla 9.60 ve 0.000177 olarak elde edilmiştir.

2.1.7.3. Dinamik Hasarın Sayısal Olarak Elde Edilmesi

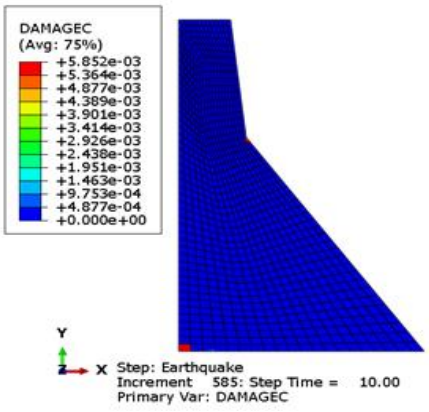
Bu bölümde, Koyna depremi sırasında ağırlık barajın farklı zamanlarda meydana gelen çatlak ilelermesi gösterilmektedir. Şekil 2.76'da görüldüğü gibi çekme (DAMAGET) hasar limitleri kontur diyagramlarında kırmızı ve mavi renkler baraj modellerindeki sırasıyla hasarlı ve hasarsız bölgeleri göstermektedir. Şekil 2.76 (a) incelendiğinde çatlak ilerlemesi barajın taban ve üst kısımlarında olmak üzere iki ana hasar bölgesinden oluşmuştur. Şekil 2.76 (b)'de çatlak baraj gövdesi yönünde hareket ederek tabanda hasarlı elemanlardan oluşan bir bant gibi lokalize bir çatlak oluşmuştur. Bu çatlaklar topukta başlar ve daha sonra memba yüzünden mansaba doğru ilerlemektedir. Barajın üst kısmındaki çatlak ilerlemesi mansap yüzündeki şev süreksizliği noktasında başlmış, ondan sonra çatlak barajın içinde daha derine dağılmıştır. Şekil 2.76 (c)'de tabanda oluşan çatlak ilerlemesinde pek bir değişiklik gözlenmemiştir. Barajın üst kısmındaki çatlak yörüngesi, üst bloğun sallanmasından kaynaklanan basınç gerilmeleri nedeniyle aşağı doğru dağılmıştır. Şekil 2.76 (d) incelendiğinde, çatlak yukarı akış yüzüne doğru yatay olarak ilerlmiştir. Hasarların ilgili Kırmızı renkli bölgelerinde bir rijitlik azalmasına sebep olması yer almaktadır. Bu çatlak dağılımı ve hasar modeli literatürde mevcut sonuçlar ile örtüşmektedir (Bhattacharjee ve Leger, 1993; Feltrin vd., 1992). Şekil 2.77'da gösterilen basınç hasarında (DAMAGEC) çok düşük basınç hasarı gözlemlenmiştir.



(a) t=3.90 s (b) t=4.30 s

(c) t=4.68 s (d) t=10 s

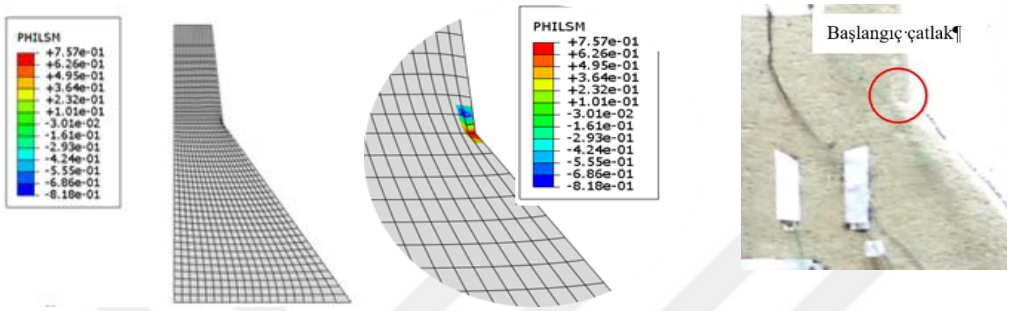
Şekil 2.76. Seçilen dört zamanda barajdaki öekme hasarın olasılık dağılımının zamanla değişimi



Şekil 2.77. Basınç hasarının gelişimi

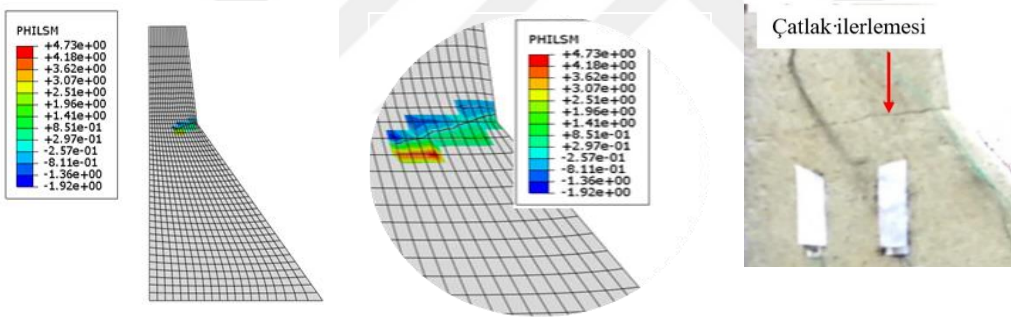
ABAQUS yazılımında çatlak ucu koordinatlarını doğrudan sonuç dosyasından okumak mümkün değildir. Bu nedenle çatlak dağılımıları algoritmasının işleyişi sunulmadan

önce PHILSM adlı ABAQUS yazılımından elde edilen veriler açıklanmalıdır. PHILSM, yalnızca çatlamış sonlu elemanlarda oluşan bir sonuçtur. Seviye seti yönteminin (PHILSM) değerlerinde bir tarafında pozitif vardır; diğer yandan negatif değerlere sahiptir. XFEM yöntemi kullanılarak çatlak ilerlemesi literatürde bulunan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması Şekil 2.78, Şekil 2.79, Şekil 2.80'da verilmekteditr.



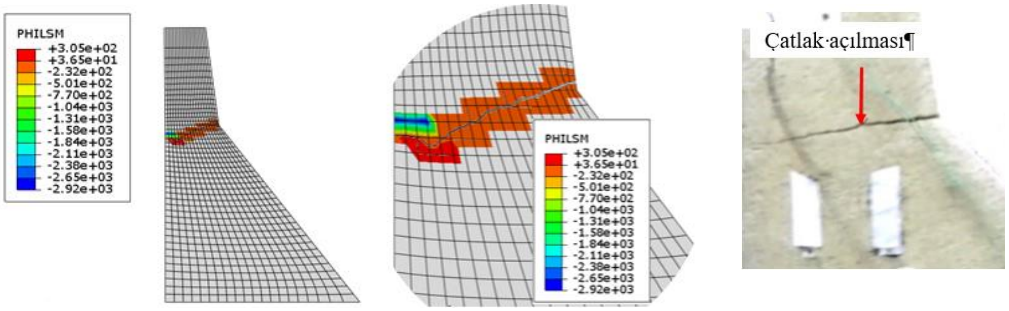
(a) Sayısal (b) Deneysel

Şekil 2.78. Çatlak başlangıcı



(a) Sayısal (b) Deneysel

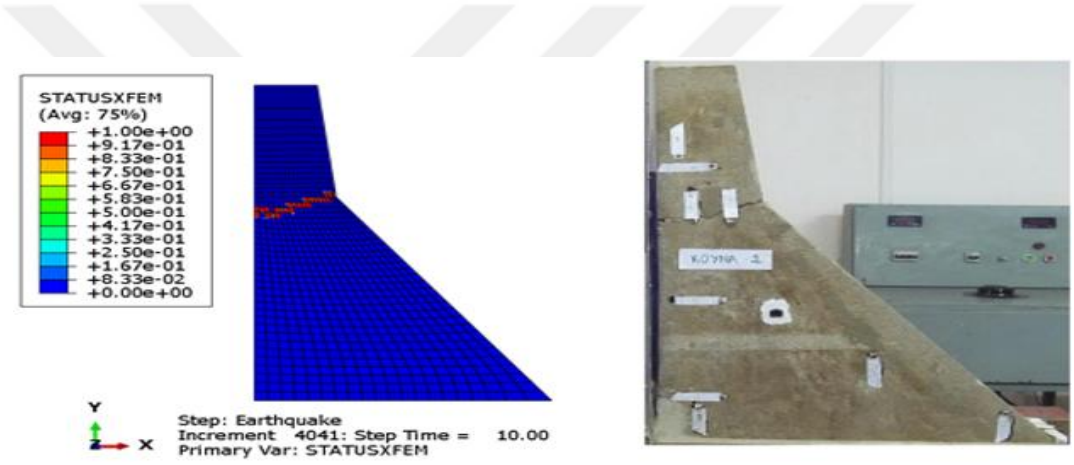
Şekil 2.79. Çatlak ilerlemesi



(a) Sayısal (b) Deneysel

Şekil 2.80. Çatlak açılması

Barajda ilk çatlak başlangıcı olarak 3.87 saniyesinde mansap yüzünün eğimindeki değişimlerin yakınında gözlenmiştir (Şekil 3.78 (b)). Bu konumda çekme gerilme değerleri oldukça büyük ve barajın derinlerine kadar ilerlemiştir. Çatlak başlangıcı, ilerlemesi ve büyümesi betonun çekme dayan ımı ile doğrudan alakalıdır (Zhang ve Ohmachi, 2000). Şekil 2.79 (b)'de görülebildiği gibi az bir süreden sonra, yani t = 4.27s, çatlak açılmış ve baraj gövdesinin derinlerine kadar gelişmiştir. Son olarak Şekil 2.80 (b) incelendiğinde t = 4.48s zaman anından sonra, çatlak tamamen memba yüzüne kadar ulaşmıştır. Şekil 2.78, Şekil 2.79 ve Şekil 2.80'da, sayısal ve deneysel çalışmalar arasında mükemmel bir uyum görülmektedir. Şekil 2.81'de görüldüğü gibi 1967 deprem altında deneyde baraj modelindeki hasar biçimleri, ABAQUS modelinde meydana gelen çekme hasarı ile karşılaştırılmıştır.



(a) Sayısal (XFEM) (b) Deneysel (Mridha ve Maity (2014)

Şekil 2.81. Koyna Barajı'nın 1967 depremi altındaki son çatlak biçimleri.

Bu çalışmada 1967 Koyna depreminin beton ağırlık barajlar üzerindeki etkileri ve sayısal analiz yöntemleri sunulmuştur. Şekil 2.81 incelendiğinde, meydana gelen çatlak biçimleri XFEM modelindene elde edilen deneysel sonuçlar birbiriyle oldukça benzer olduğu anlaşılmaktadır. Yer alan önceki deneysel çalışmaların sonuçları (Mridha ve Maity ,2014; Chopra ve Chakrabarti, 1973) ABAQUS analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. XFEM yönteminin deprem koşulları altında baraj modellerinde çatlak ilerleme sürecini etkili bir şekilde tahmin edebileceği sonucuna varılmaktadır. Barajın çatlaksız ve çatlaklı durumları sırasıyla XFEM yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu iki çalışmanın ana amacı, deprem altında çatlak ilerlemesinin sürecini tahmin etmek için sunulmaktadır. Birinci durum, yayılı (smeared) çatlak analizini (başlangıç çatlak ile) ilerletmek için kritik bölgede

başlangıç bir gömülü çatlak oluşturmasıdır, ikinci durumda ise ayrık (başlangıç çatlak olmadan) kritik hasar bölgelerinin tanımlanmasıdır. Daha sonra literatürdeki çalışmaları simüle etmek için XFEM gerçekleştirilmiştir. Çatlak ve büyümesi, yeniden ağ (Mesh) oluşturma ihtiyacını ortadan kaldırmak için seviye seti (Level Set) yöntemi aracılığıyla karakterize edilmiştir. Çatlak ilerlemesi, çatlak büyümesi ve son çatlak biçimleri için XFEM tahminlerinin iki farklı çatlak durumu (çatlaksız ve çatlaklı) elde edilenler ile tatmin edici bir şekilde karşılaştırılabilir olduğu bulunmuştur. İki boyutlu baraj XFEM modelindeki çatlaksız durumu, çatlaklı durumuna göre çok hesaplamalı ve uzun süreli analize sahip gerçekleşmiştir. Çatlaksız durumu için hem üç boyutlu hem de büyük modeller çok zor bir hale getirmektedir. Bu nedenle bu tezde sadece yayılı (smeared) çatlak analizi (başlangıç çatlak ile) durumu incelenmektedir.

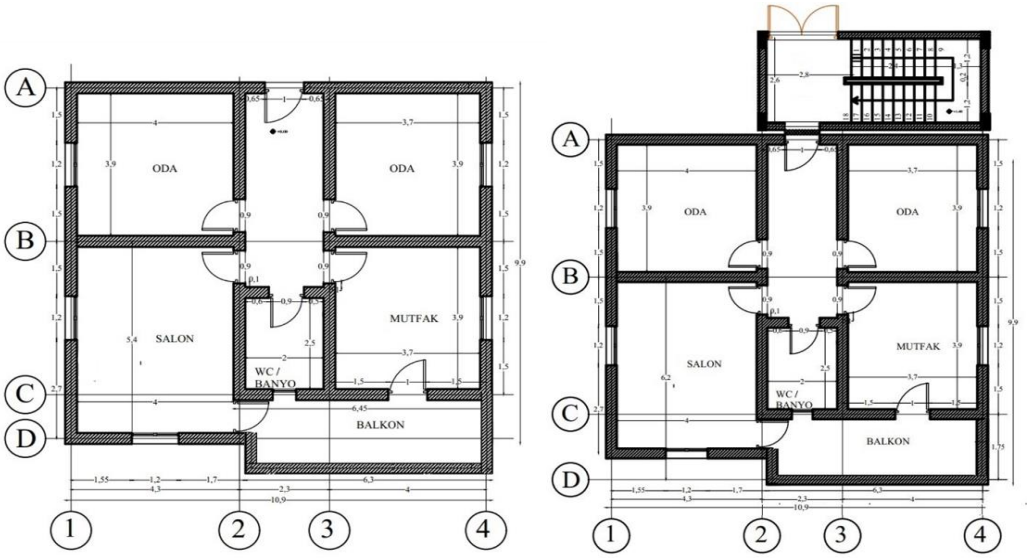
2.2. Farklı Kat Adetlerine Sahip Yığma Yapı Modellerinin Sayısal Analizleri

Bu bölümde, farklı haller altında hasarsız, hasarlı, onarılmış ve tekstil takviyeli harç (TRM) malzemelerle güçlendirilmiş yığma binanın dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişimlerin ve yapısal davranışları sayısal yöntem kullanılarak belirlenmesi amaçlanmaktadır. Yapılar solid eleman olarak iki katlı ve üç katlı olarak modellenmiştir. Delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim olmak üzere dört farklı malzeme açısından doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Farklı teknik uygulanarak (yeniden başlatma, içe aktarması, Adaptif eleman) yığma modellerin dinamik karakteristikleri sayısal olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların en büyük yerdeğiştirme değerlerinin görüldüğü depreme ait gerilme değerleri elde edilmiştir.

2.2.1. Yapıların Özellikleri

2.2.1.1. Geometrik Özellikler

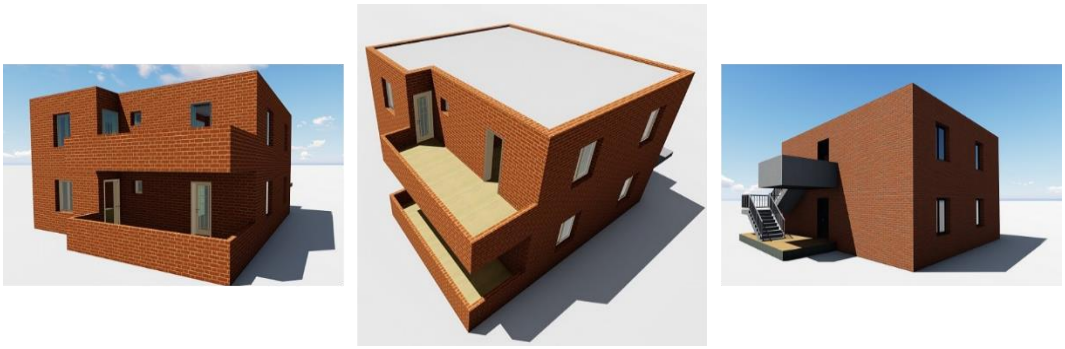
Düzgün bir plan anlayışına sahip yapıda iç içe kullanım ve bir mekandan diğerine geçiş kolaylığı dikkat çekmektedir. Her bina katı iki normal oda, salon, mutfak, balkon, tuvalet ve banyodan oluşmaktadır. Binanın kat planı Şekil 2.82'de verilmiştir.



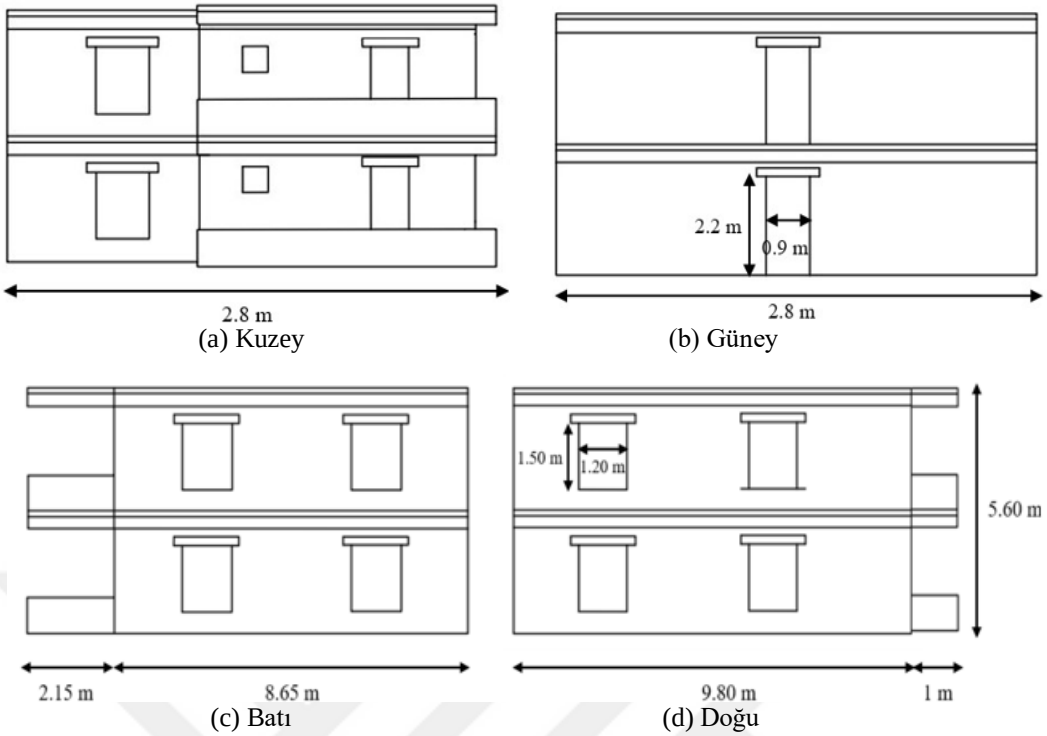
(a) Zemin kat (b) Normal kat

Şekil 2.82. Katların planı

Tüm katlarda yığma duvarlar ve betonarme yatay hatıllar, lentolar ve döşemeler bulunmaktadır. Bina X yönünde 10.80m, Y yönünde ise 9.80m ve 10.80m uzunluğunda olduğu görülmüştür. Bina katlarının kuzey cephelerinde bir balkon bulunmaktadır. Kat yüksekliği 2.80m'dir. Binanın planından elde edilen bilgilere göre tek katlı, iki katlı ve üç katlı modeller sırasıyla 2.80m, 5.60m ve 8.40m yükseklikte olup, 250 mm kalınlıkta farklı yığma malzeme duvarlardan meydana gelmiştir. Autocad programıyla yapılmış farklı cephe iki boyutlu iki katlı bir yığma bina Şekil 2.83'te verilmiştir. Üç boyutlu iki katlı binanın ARCHİCAD yazalımından tasarlanmış modeli Şekil 2.84'te gösterilmiştir.



Şekil 2.83. ARCHİCAD yazılımıyla modellenmiş üç boyutlu iki katlı bina



Şekil 2.84. İki katlı bina için farklı cephe görünümleri

Model, Türkiye bina deprem yönetmeliğinin koşullarına göre oluşturulmuştur. Farklı yığma duvar malzeme durumlarından (delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim) oluşmaktadır. Binalar aynı asimetrik plan düzenine sahiptir. Yığma yapıların doğrusal olmayan analizi için detaylandırma seviyeleri kabaca detay, bileşen veya yapısal seviye olarak dinamik davranış analizi ve dinamik çatlak analizi olarak iki kısma ayrılabilir. Modeldeki detaylandırma düzeyi, modelin hangi davranışları tanımlayabilmesi gerektiğine bağlıdır. Servis koşulları altında gerilme ve hasar dağılımını, deformasyonları yakalamak yeterli mi? Hangi hasar türleri yansıtılması gerekiyor?. Yapılan analizin gerçekten gereksinimlerini karşılayabilmesi için bu tür sorular tez açıklığa kavuşturulmalıdır. Modellemede yapılan seçimler, analizin amacına uygun olmalıdır. Burada dinamik karakteristikleri ve dinamik kırılımları için yapı davranışına odaklanılmıştır.

2.2.1.2. Malzeme Özellikleri ve Yapı Birleşim Detayları

Bu çalışmada, sonlu eleman paketi (ABAQUS, 2019) kullanılarak TRM ile güçlendirilmiş yığma binaların dinamik davranışına ve dinamik kırılımlarını simüle etmek

için üç boyutlu sonlu eleman modelleri geliştirilmiştir. Lee ve Fenves (1998) tarafından hasar parametreleri. Hasar parametreleri hasarsız eleman için sıfır, tamamen hasarlı eleman için bire eşittir.

ABAQUS yazılımında betonun davranışını simüle etmek için mevcut yaklaşımlar arasındaCDP modeli kullanılmıştır. CDP malzeme modellerinde betonun basınç ve çekme dayanımdaki değişim konusunda Coşgun, (2014) çalışmasından yararlanılmıştır. Betonun modellenmesi için kullanılan malzeme özelliklerini, akma gerilmesi ve elastik olmayan şekildeğiştirmesi Tablo 2.28 ve Tablo 2.29'da gösterilmektedir. Bu çalışmada kullanılan donatılara ait detaylar Tablo 2.30'da görülmektedir.

Tablo 2.28. Döşeme, hatıl ve lento elemanları mekanik özellikleri (Coşğun, 2014).

Parametreler		Değeri
Birim Hacim Ağırlık, (t/mm^3)		2.4 E-9
Elastik Özelikleri	Elastisite Modülü, E (MPa)	32000
	Poisson Oranı, ν	0.2
Plastik Özelikleri	Dilatasyon Açısı, Ψ	36
	Dışmerkezlik, e	0.1
	f_{bo}/f_{co}	1.16
	K_c	0.667
	Viskozite, μ	0.001

Tablo 2.29. Döşeme, hatıl ve lento elemanları için CDP model parametreleri (Coşğun, 2014).

	Akma Gerilmesi (MPa)	Elastik Olmayan Şekildeğiştirmesi	BasınçHasar Parametresi, d_c Çekme Hasar Parametresi, d_t
Eksenel Basınç Altında Plastik Davranışı	13.5	0	0
	19.5	0.0006	0
	30	0.002	0
	22	0.0034	0.5
	17.5	0.005	0.7
	13	0.007	0.8
	7	0.01	0.9
Eksenel Çekme Altında Plastik Davranışı	1.9	0	0
	1.46	0.0002	0.2
	0.96	0.0004	0.4
	0.78	0.0005	0.5
	0.54	0.0008	0.6
	0.36	0.001	0.7
	0.17	0.002	0.8
	0.017	0.003	0.9

Tablo 2.30. Analizlerinde kullanılan çelik özellikleri (Kayaalp, 2017).

Donatı Kalınlığı	Özellikler	Birim	Değeri
	Birim Hacim Ağırlık	t/mm^3	7.80 E-9
Ø 8	Elastisite Modülü,	MPa	210577
	Poisson Oranı	—	0.3
Ø 12	Elastisite Modülü	MPa	208261
	Poisson Oranı	—	0.3

Delikli tuğla duvarlar için sayısal analizlerde kullanılan kilitli yığma birim mekanik özellikleri ve CDP modeli literatür referansına dayanmıştır (Dauda vd. 2018). Tablo 2.31 ve Tablo 2.32'de verilmektedir.

Tablo 2.31. Deliki tuğla mekanik özelliklerinin özeti (Dauda vd. 2018).

Parametreler		Değeri
Birim Hacim Ağırlık, (t/mm^3)		2E-9
Elastik Özelikleri	Elastisite modülü, E (MPa)	3500
	Poisson oranı, ν	0.26
Plastik Özelikleri	Dilatasyon açısı, Ψ	30
	Dışmerkezlik, e	0.1
	f_{bo}/f_{co}	1.16
	K_c	0.67
	Viskozite, μ	0.001

Tablo 2.32. Deliki tuğla için CDP model parametreleri (Dauda vd. 2018).

Eksenel Gerilmesi	Akma Gerilmesi (MPa)	Elastik Olmayan Şekildeğiştirme	Basınç Hasar Parametresi, d_c Çekme Hasar Parametresi, d_t
Eksenel Basınç Altında Plastik Davranışı	1.79	0	0
	4.93	0.0003	0
	7.50	0.00119	0
	4.92	0.00277	0.29
	3.48	0.0034	0.5
Eksenel Çekme Altında Plastik Davranışı	0.69	0.0000	0
	0.54	0.00006	0.34
	0.36	0.000012	0.55
	0.25	0.000023	0.75
	0.14	0.000044	0.80

Yığma duvarları üzerinde kullanılan gazbeton malzemesine ait CDP özellikleri, Bayrak (2020) kapsamında gerçekleştirilen deneylerden elde edilmiştir. Gazbeton mekanik özellikleri ve CDP model parametreleri Tablo 2.33 ve Tablo 2.34'te sırasıyla gösterilmektedir.

Tablo 2.33. Gazbeton mekanik özelliklerinin özeti (Bayrak 2020).

Parametreler		Değeri
Birim Hacim Ağırlık, (t/mm^3)		2.2 E-9
Elastik Özelikleri	Elastisite Modülü, E (MPa)	1612
	Poisson oranı, ν	0.2
Plastik Özelikleri	Dilatasyon açısı, Ψ	31
	Dışmerkezlik, e	0.1
	f_{bo}/f_{co}	1.16
	K_c	0.67
	Viskozite, μ	0.001

Tablo 2.34. Gazbeton için CDP model parametreleri (Bayrak, 2020).

Plastik Davranışı	Akma Gerilmesi (MPa)	Elastik Olmayan Şekildeğiştirme	Basınç Hasar Parametresi, d_c Çekme Hasar Parametresi, d_t
Eksenel Basınç Altında Plastik Davranışı	1	0.00034	0
	2.01	0.00104	0
	4.15	0.00450	0.15
	3.69	0.00749	0.33
	0.86	0.0021	0.66
Eksenel Çekme Altında Plastik Davranışı	0.17	0	0
	0.048	0,000013	0.52
	0.020	0,00011	0.80
	0,014	0,0002	0.86
	0,0050	0,0003	0.95

Bu çalışmada, Abdelmoneim vd. (2016) tarafından ele alınan modellere uygulanan dolu briket mekanik özellikleri kullsnılmış vr Tablo 2.35'te gösterilmektedir. CDP model parametreleri Tablo 2.36'da özetlenmektedir.

Tablo 2.35 . Dolu briket mekanik özelliklerinin özeti (Abdelmoneim vd. 2016)

Parametreler		Değeri
Birim Hacim Ağırlık, (t/mm^3)		1.4 E-9
Elastik Özelikleri	Elastisite Modülü, E (MPa)	2006
	Poisson Oranı, ν	0.2
Plastik Özelikleri	Dilatasyon Açısı, Ψ	34
	Dışmerkezlik, e	0.1
	f_{bo}/f_{co}	1.16
	K_c	0.67
	Viskozite, μ	0.001

Tablo 2.36. Dolu Briket için CDP model parametreleri (Abdelmoneim vd. 2016).

Eksenel Gerilmesi	Akma Gerilmesi (MPa)	Elastik Olmayan Şekildeğiştirmesi	Basınç Hasar Parametresi, d_c Çekme Hasar Parametresi, d_t
Eksenel Basınç Altında Plastik Davranışı	1	0	0
	2	0.001	0
	4.70	0.002	0.06
	5.95	0.0025	0.44
	2.4	0.005	0.68
Eksenel çekme altında plastik davranışı	0.225	0.00005	0
	0.15	0.0001	0.55
	0.09675	0.0002	0.80
	0.045	0.0003	0.85
	0.03375	0.0004	0.90

Kilitli yığma birim duvarlar için sayısal analizlerde kullanılan mekanik özellikler ve CDP modeli literatür referansına dayanmıştır (Kayaalp, 2017). Tablo 2.37 ve Tablo 2.38'da özetlenmektedir. Kireç harcının elastik modülü 9000 N/mm^2 ve poisson oranları 0,15 olarak tahmin edilmiştir (Gulinelli vd. 2019).

Tablo 2.37. Kilitli yığma birim için CDP model parametreleri (Kayaalp, 2017).

Eksenel Gerilmesi	Akma Gerilmesi (MPa)	Elastik Olmayan Şekildeğiştirme	Basınç Hasar Parametresi, d_c Çekme Hasar Parametresi, d_t
Eksenel Basınç Altında plastic Davranışı	0.18	0	0
	6.90	0.000219	0.18
	8.40	0.00024	0.36
	3.02	0.00077	0.68
	1.10	0.0022	0.84
	0.37	0.0045	0.91
Eksenel Çekme Altinda Plastik Davranışı	0.54	0	0
	0.76	0.00005	0
	0.59	0.000127	0.22
	0.39	0.000275	0.49
	0.23	0.000637	0.70
	0.11	0.00233	0.85

Tablo 2.38. Kilitli yığma birim mekanik özelliklerinin özeti (Kayaalp, 2017).

Parametreler		Değeri
Birim hacim ağırlık, (t/mm^3)		1.35 E-9
Elastik Özelikler	Elastisite modülü, E (MPa)	4270
	Poisson oranı, ν	0.2
Plastik Özelikler	Dilatasyon açısı, Ψ	32
	Dışmerkezlik, e	0.1
	f_{bo}/f_{co}	1.16
	K_c	0.667
	Viskozite, μ	0.001

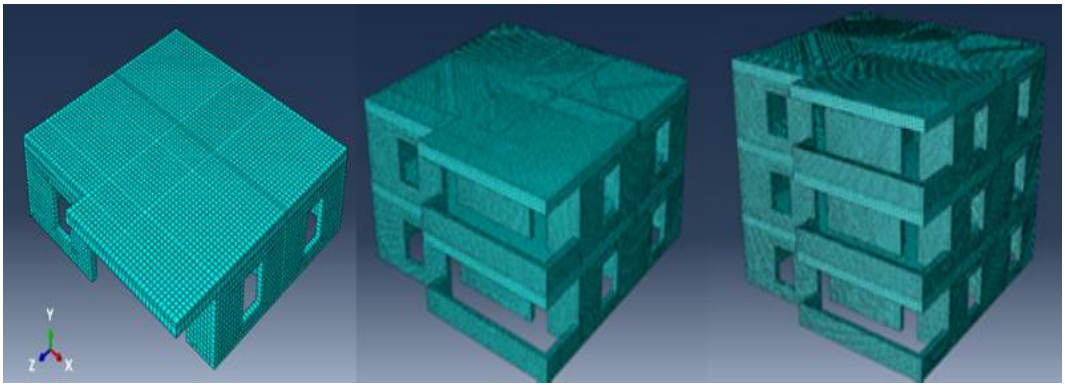
TRM kompozitinin esas olarak lif yönünde gerildiği gevrek kırılmaya kadar lineer elastik bir davranış olarak modellenmiştir. Elastik davranış, ABAQUS yazılımında bir lamina tipi olarak modellenmiştir. TRM ortalama fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2.39'da sunulmuştur (Alhaddad vd. 2012).

Tablo 2.39. TRM-kompozit için malzeme özelliklerini özeti (Alhaddad vd. 2012).

	Özellikler	Birim	Sembol	Değeri
Birim Hacim Ağırlık	-	t/mm^3	ρ	1.58 e-9
Elastik özelikler	X ekseni	MPa	Ex	82500
	Y ekseni	MPa	Ey	4600
	Z ekseni	MPa	Ez	4600
Poisson Oranı	XY ekseni	-		0.22
	XZ ekseni	-	υ_{xz}	0.22
	YZ ekseni	-		0.3
Kayma Modüller	XY ekseni	MPa	Gxy	1500
	XZ ekseni	MPa	Gxy	1000
	YZ ekseni	MPa	Gyz	1000
	Çekme Dayanımı	MPa	t_{ckf}	777
	Kalınlık	mm	t_f	0.147*

* Harçsız tekstil donatılı harç tabakasının kalınlığı

Üç boyutlu tek katlı, iki katlı ve üç katlı ağ yapısının görünümü Şekil 2.85'te verilmiştir.



Şekil 2.85. Tek katlı, iki katlı ve üç katlı ağ yapısının görünümü

2.2.2. Analiz Ayarları

2.2.2.1. Yığma Yapıların XFEM Hasar Parametreleri

Yığma malzemenin tanımlanması için gereken mekanik özellikler arasında kırılma enerjileri yer almakta olup, sayısal modellerin kalibre edilmesi için çeşitli basitleştirilmiş kriterler önerilmiştir. Duvarın çekme (G_t) ve basınçta (G_c) kırılma enerjileri deneysel olarak değerlendirilmemiştir, ancak süreklilik modelleri tarafından ihtiyaç duyulmaktadır (da (Porto vd., 2010). Basınçtaki kırılma enerjileri ve çekme gerilmesindeki kırılma enerjileri, başlangıçta (Lourenço vd., 2010) içinde sağlanan aşağıdaki denklemlerin uygulanmasıyla değerlendirilmiştir. Buna göre denklem (2.30) ve (2.31),

$$G_c = \left(2.8\text{-}0.1 f_c\right) f_c \tag{2.1}$$

$$G_t = 0.25\left(2\, f_t\right)^{0.7} \tag{2.2}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, f_c, yığmanın basınç ve f_t, çekme dayanımıdır.

ABAQUS yazılımında XFEM metodu tanımlamak için kullanılan yığma duvarların malzemesinin parametreleri şunlardır: Young modülü, Poisson oranı, mod 1'in kırılma enerjisi, çekme dayanımı ve yoğunluğu. Sayısal modellerde kullanılan farklı yığma duvar parametreleri (özellikleri) Bölüm 2.2'de verilmiştir. Bu çalışma için kullanılan hasar başlatma kriteri, Maksimum ana gerilim kriteridir (MAXPS). Çatlak başlayana kadar, malzeme elastik özellikleri benimser. Malzeme dayanımı, malzeme sınırına ulaştığında, çekme-ayırma yasasına göre davranacaktır. Çatlak başlangıcı, maksimum ana gerilim kritik değere ulaştığında gerçekleşir. Arayüz özelliği tanımlanmış komşu iki yüzeyin maksimum hasar modunu simüle etmek için hasar parametreleri tanımlanmıştır. Modelde çatlak yayılmasını modellemek için hem hasarın başlangıcı hem de hasar gelişiminin hesaba katılması gerekir. Hasar başlangıcı için farklı kriterler mevcuttur, bu durumda maksimum gerilme kriteri kullanılacaktır. Gerilmeler deneysel çalışmalar olan literatürden alınmıştır. Farklı malzemelerinin çekmedeki kırılma enerjileri denklem (2.31)'e göre hesaplanmıştır. Farklı malzeme birimleri olan duvar malzeme özelilkleri Tablo 2.40'da verilmiştir.

Tablo 2.40. XFEM bölgesi için farklı hasar parametreleri

Malzeme	Maksimum Gerilme (MPa)	Kırılma Enerjisi (N/mm)	Hasar Kontrolü
Delikli Tuğla	0.69	0.031	Tip: Enerji
Gazbeton	0.10	0.008	Yumuşatma: Doğrusal olmayan
Dolu Briket	0.22	0.014	Bozulma: Maksimum
Kilitli Yığma Birim	0.76	0.033	Mod karışım oranı: Bağımsız mod

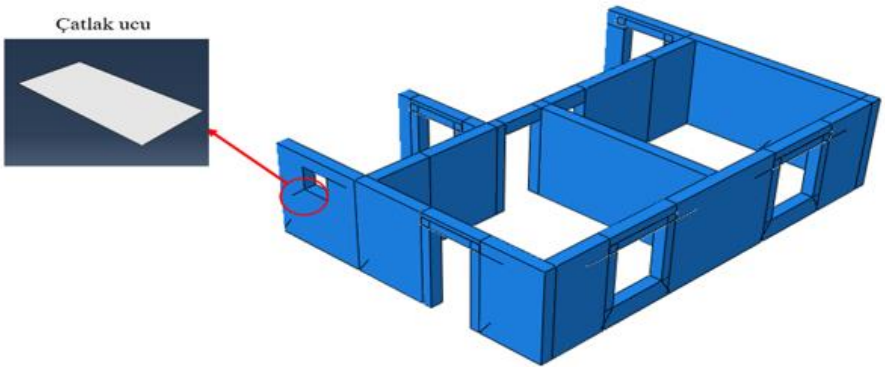
Hasar başlangıcı, çekme Ayırma (**Traction Separation**) yasaları => Maxps Hasarı için hasar kullanılarak malzeme özelliklerinin bir parçası olarak tanımlanır. Genişletilmiş sonlu elemanlar metodunda hasar kontrolü tanımlamak için hasarın yer değiştirmesi veya kırılma enerjisi gibi değişik bilgileri kullanır. Kilitli yığma birim özelliklerince maksimum çekme dayanımı için f_{ct}=0.76 MPa, hasarın yer değiştirmesi için u=1.4 mm, kırılma enerjisi G_t=0.033 N/mm olarak tanımlanmıştır. Bu çalışamda kilitli yığma birim malzeme için kırılma enerjisi G_f= 0.033 N/mm olarak tanımlanmıştır. Bu seçenek ile maksimum çekme verilen değeri aştığında hasar başlamakadır.

2.2.2.2. Çatlak Elemanının Tanımlanması

Griffith'in enerji yöntemine göre; gevrek bir malzemede a uzunluğunda bir çatlağı ilerletmek veya a uzunluğunda yeni bir çatlak yüzeyi yaratmak gerilme gereklidir. Böylece kritik çatlak uzunluğunun denklemi,

$$a=\left(\frac{G\,E}{\pi\,\sigma_f^2}\right) \tag{2.3}$$

eşitliği ile elde edilmektedir (Abacı, 2012). Burada, σ_f kırılma gerilmesi, G kritik birim uzama enerji bırakma hızı, E elastisite modülü. Hasar özellikleri gazbeton malzeme kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışmadaki çatlak genişliği duvar kalınlığı gibi alınmıştır. Bu çalışmadaki çatlak boyutları 250x410 mm olarak tanımlanmıştır. Farklı başlangınç çatlak duvarlar üzerinde modellenmiştir (Şekil 2.86).



Şekil 2.86. Çatlak içeren duvarların SE modeli ve çatlak ucunun yakın görünümü

2.2.2.3. Eleman Silme Metodu (ESM)

Eleman silme metodu, modeldeki elemanlar önceden ayarlanmış hasar kriterlerini karşıladığında yazılımın ilgili elemanları ve düğümleri otomatik olarak sileceği anlamına gelmektedir. Bir dizi eleman ve düğüm silindiğinde, görünür bir çatlak yolu oluşmaktadır. En yaygın yöntemlerden biri, maksimum gerilmeleri, maksimum birim şekil değiştirmeler veya maksimum çekme gerilmesi gibi hasar kriterleri eklemektir. Hasar kriterlerinden herhangi birinin karşılanması, yükleme işlemi sırasında malzemenin hasar görmesine neden olmaktadır. Bu çalışma, beton hasar plastisite malzeme Modelini, çekme içinde fiziksel olarak anlamlı eleman silme kriterleri ile birleştiğinde çekmedeki şekil değiştirme hızı bağımlılığını içerecek şekilde genişletmektedir. Bu çalışmada, çekme gerilme-şekil değiştirme-çatlama ve kırılma anındaki inelastik şekil değiştirmesine dayalı olarak tanımlanan çekme gerilme-şekil değiştirme kullanılmıştır.

2.2.2.4. Malzeme Tipleri için Kabul Edilen Emniyet Gerilmeleri

Basınç deneylerinden hesaplanan duvar mukavemetinin 0.25'i duvar basınç emniyet gerilmesi olarak alınabilir. Kullanılan malzeme düşey delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim olduğu tespit edildiği için Bölüm 2.2'de bulunan serbest basınç dayanımı sırasıyla tablolar kullanılarak basınç emniyet gerilme değerleri hesaplanmıştır. Duvar narinliği hesabı; Narinlik= h_{duvar}/b = 2.40/0.25 = 9.60, narinlik azaltma katsayısı. Narinlik oranına göre emniyet gerilmeleri için azaltma katsayısı 0,97 olarak bulunmuştur. Bu çalışmada düşey delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim duvarların basınç

emniyet gerilmesi değerleri sırasıyla 1.72 MPa, 1.45 MPa, 1.21MPa ve 2.04 MPa olarak belirlenmiştir. Çekme emniyet gerilme değerleri ise sırasıyla 0.43 MPa, 0.35 MPa, 0.27 MPa ve 0.29 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu kısımda farklı yığma modellerde oluşan en büyük kayma gerilmeleri hesap edilecek ve kayma emniyet gerilmesi ile karşılaştırılacaktır. Bu nedenle ilk olarak kayma emniyet gerilmesinin (τ_{em}) belirlenmesi gerekmektedir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği kullanılarak duvarın kayma emniyet gerilmesi denklem 1.21'deki gibi hesaplanmaktadır. Burada, τ_{em} Duvarın kayma emniyet gerilmesi, τ_0 duvarın kayma emniyet gerilmesi, σ düşey gerilme değeridir ve μ sürtünme katsayısı olup değeri 0.5 alınmaktadır (Batur, 2006).

$$\tau_{em} = \tau_0 + \mu\sigma \tag{2.5}$$

şeklinde ifade edilmektedir. τ_0 değeri delikli tuğla, gazbeton ve briket malzemeler için sırasıyla 0.25, 0.2, 0.15 TBDY-2018'te verilmiştir (Tablo 2.76). Kilitli yığma birim olarak ise Eurocode-6 standardına uygun özel üretim beton bloklar kullanılmıştır (Kayaalp, 2017). Bunun için τ_0 değeri 0.12 olarak alınabilir. Düşey gerilme değeri kritik kesitler için denklem 1.22 kullanımıştır.

$$\sigma = \frac{W}{A} \tag{2.6}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burda σ Düşey emniyet gerilmesi W kat ağırlıkları ve A toplam duvar alanıdır. Yapının iki ve üç katlarında bulunan toplam duvar alanı sırasıyla 32 m^2 ve 48 m^2 hesaplanmıştır. kayma emniyet gerilmelerinin değerleri sırasıyla 0.26 MPa, 0.17 MPa, 0.15 MPa ve 0.25 MPa. elde edilmektedir. Deliki tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim malzemeleri ile ilgili emniyet gerilmeleri Tablo 2.41'de verilmiştir.

Tablo 2.41. Farklı malzeme tipleri için kabul edilen emniyet gerilmeleri

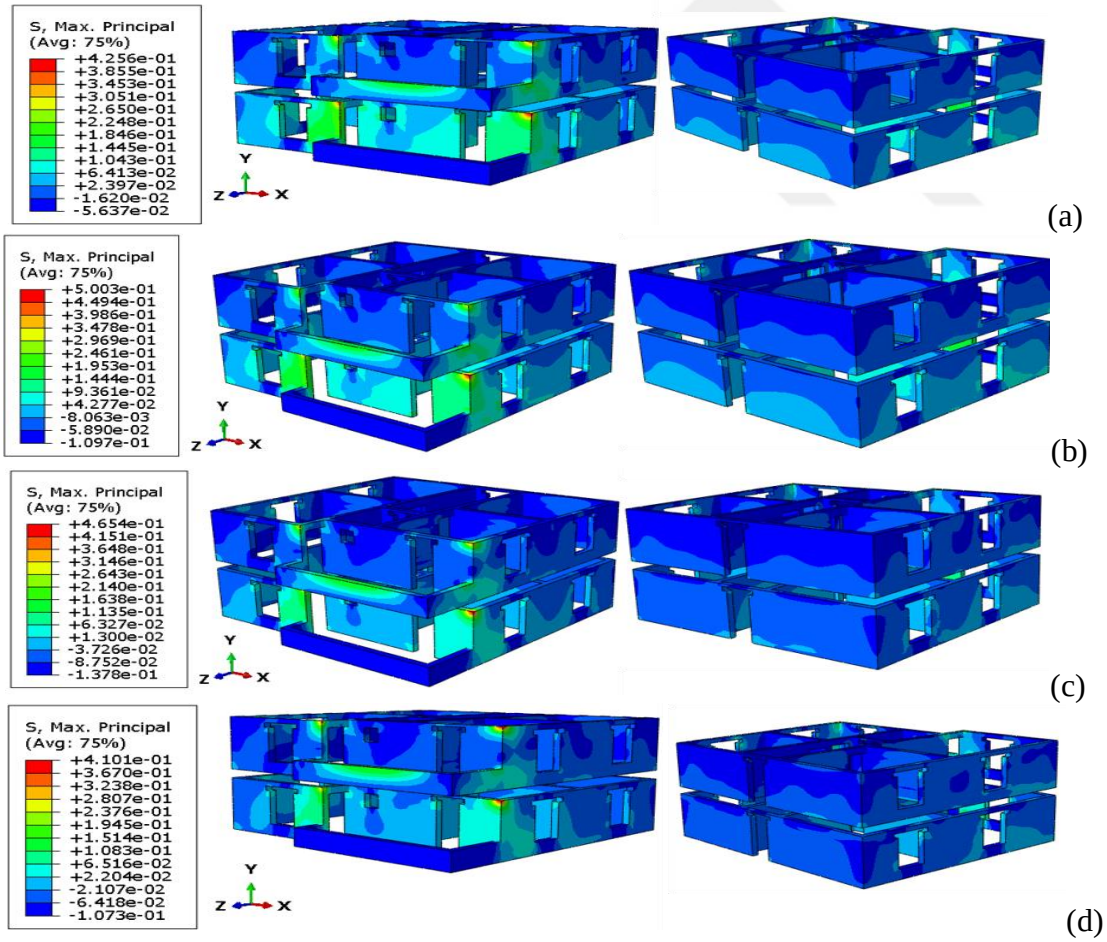
Mazleme Tipi	Farklı Emniyet Gerilmeleri (MPa)		
	Kayma	Basınç	Çekme
Delikli Tuğla	0.72	1.70	0.43
Dolu Briket	0.58	1.45	0.35
Gazbeton	0.46	1.21	0.27
Kilitli Yığma Birim	0.49	2.04	0.29

2.3. Sayısal Analizler

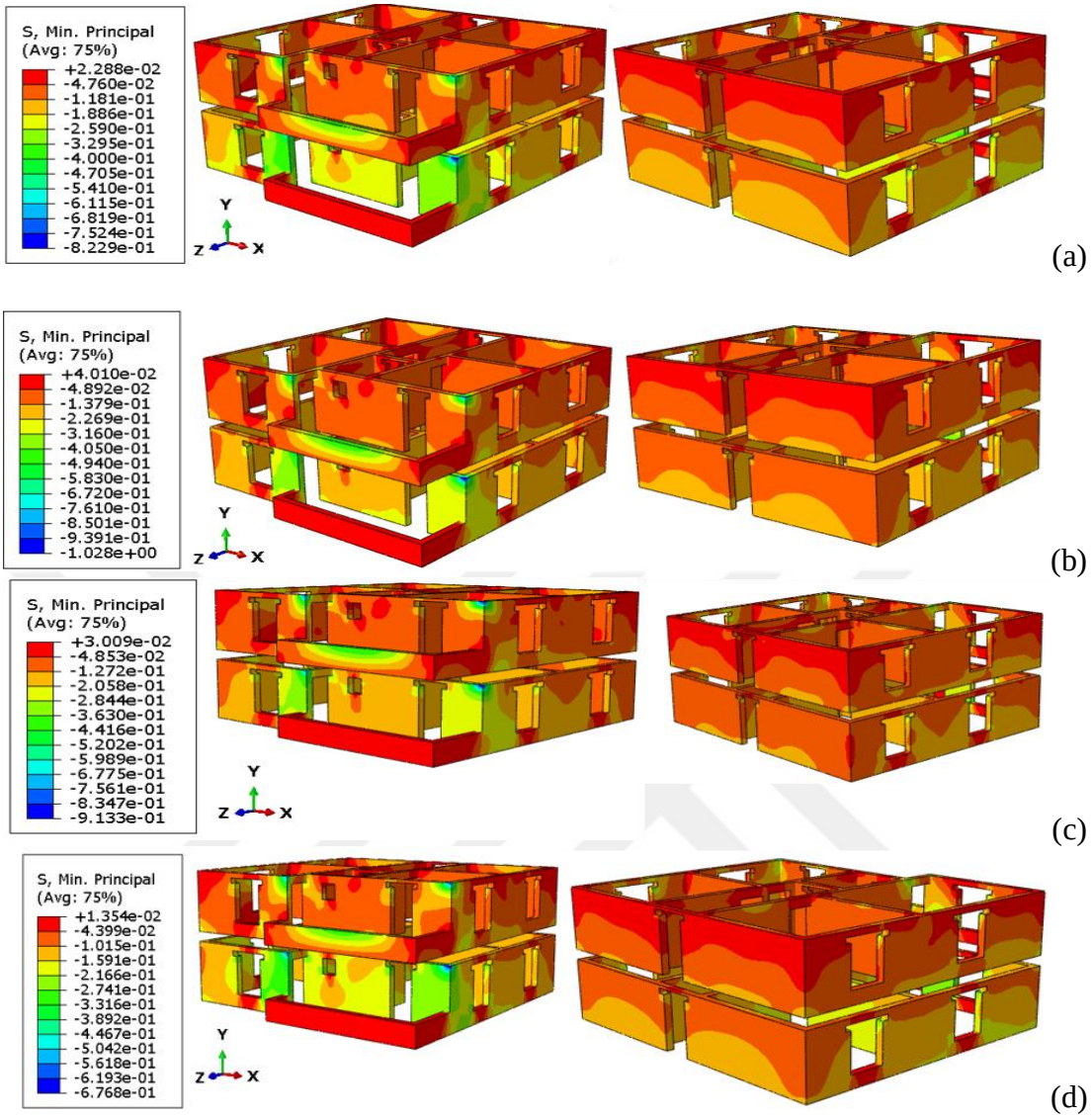
2.3.1. İki Katlı Yığma Bina Modelleri

2.3.1.1. Statik Analizleri

Çalışma kapsamında yığma binaların zati yükleri altında yapılan statik analizleri sonucunda meydana gelen gerilmeler de elde edilmiştir. İki katlı yığma binaların doğrusal olmayan gerilme analizinden elde edilen çekme gerilme değerleri delikli tuğla, gazbeton, dolu briket ve kilitli yığma birim ayrı ayrı olmak üzere kontur diyagramları Şekil 2.87'de verilmektedir. Basınç gerilme değerleri ise Şekil 2.88'de gösterilmektedir. İki katlı yığma duvarlarda çekme ve basınç gerilme yoğunlaşmasının oluştuğunu konturlar göstermektedir.



Şekil 2.87. İki katlı binaların gerilme analizinden elde edilen maksimum gerilme kontur diyagramları



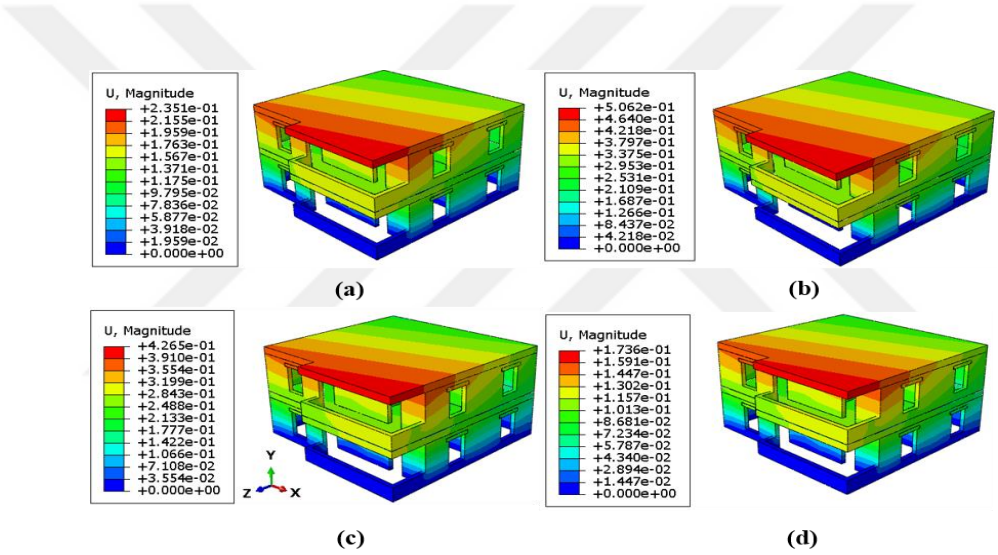
Şekil 2.88. İki katlı binaların gerilme analizinden elde edilen minimum gerilme konturları

Şekil 2.87 ve Şekil 2.88 incelendiğinde dört faklı malzeme durumu için basınç ve çekme gerilme değerleri birinci kat kuzey duvarlarında gözlenmiştir. Gazbeton malzeme durumu için en büyük gerilme değerleri, basınç gerilmesinde 1.02 MPa ve çekmede 0.50 ile kuzey ve batı duvarları arasındaki birleşim yerinin üst bölgesinde gözlenmiştir. Öte yandan, en küçük gerilme değerleri basınçta 0.68 MPa ve çekmede 0.41 ile kilitli yığma birim malzeme durumunda olştuğu görülmüştür. Delikli tuğla, gazbeton, dolu briket ve kilitli yığma birim kullanılarak iki katlı binaların analizler sonucunda en düşük ve en büyük gerilme değerleri elde edilmiştir. Bu gerilmeler deprem esnasında duvarlarda önemli çatlaklara sebep olabilecektir. Elde edilen gerilme değerleri Tablo 2.42'de görülmektedir.

Tablo 2.42. Farklı malzeme modelleri hasarsız hali için gerilme analizinden elde edilen basınç ve çekme gerilme değerlerinin karşılaştırılması

Gerilme Tipi	Farklı Malzeme Durumları (MPa)			
	Delikli Tuğla	Dolu Briket	Gazbeton	Kilitli Yığma Birim
Basınç Gerilmesi (MPa)	0.82	0.91	1.03	0.68
Çekme Gerilmesi (MPa)	0.43	0.46	0.50	0.41

Şekil 2.89'da görüldüğü gibi delikli tuğla, gazbeton, dolu briket ve kilitli yığma birim malzeme durumu için maksimum yerdeğiştirme sırasıyla 0.23 mm, 0.51 mm, 0.43 mm ve 0.17 mm'dir. Dört malzeme için maksimum yer değiştirme iki katlı yığma binalarında benzer bölgede gözlemlenmiştir.



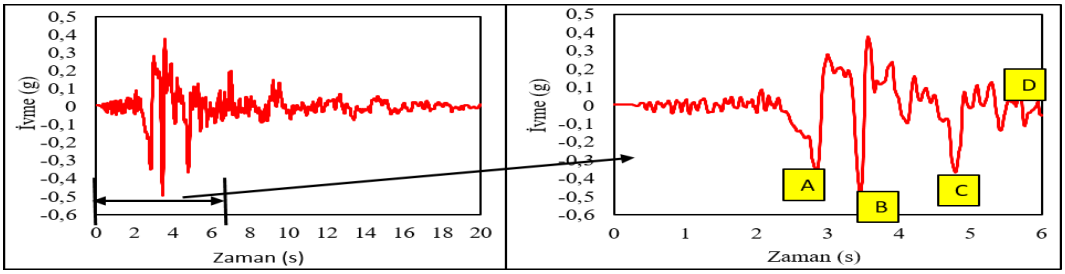
Şekil 2.89. Farklı malzeme iki katlı binaların için yerdeğiştirme değerleri

2.3.1.1.1. Dinamik Analizleri

Böyle bir yapının detaylı bir şekilde incelenmesinin doğrusal olmayan analizler gerektirdiği yaygın olarak anlaşılmaktadır. Sarsma masalarında deprem verileri kullanılarak yığma modeller üzerinde gerçekleştirilen bazı önemli sismik analizler, daha önce Bölüm 1.11'de ele alınmıştır. Hesaplamalı modeller üzerinde benzer testler yapmak için, doğruluğu ve yanıttaki ayrıntı nedeniyle doğrusal olmayan analizlerin kullanılması kaçınılmazdır. Bu da doğal olarak yapının sismik davranışını daha iyi anlamamıza yardımcı olacaktır. Buna göre, ivme zamanına ilişkin bir deprem kaydı, tabanın istenen yer hareketlerini kullanılarak girilip sonuçları incelenir. Bu bağlamda, zaman tanım alanı verileri yapının x yönlü eksenine

paralel olarak uygulanır. Bu nedenle, birinci mod şekil yönünün birinci doğal frekanstaki titreşime karşılık geldiği modal analiz sonucuna göre x yönü boyunca temel uyarım girilir. Genel olarak, birinci titreşim modu birincil ilgi alanıdır ve birinci mod genellikle yapının performansına en büyük hareket katkısını sağlar, birinci mod tipik olarak tasarım ve analiz amaçları için en önemlisidir (Mehmood, 2015).

Deprem analizi için Trabzon şehrine en yakın olan en büyük deprem olan 1992 Erzincan depremi seçilmiştir. Yapı tipleri incelendiğinde en yaygın yapı tipinin %55 ile yığma olduğu belirlenmiştir (Çelik vd.,2019). Farklı katlı modellerde doğrusal olmayan deprem analizlerinde (Mw=6.9) büyüklüğündeki Erzincan depreminin 13 Mart 1992 tarih ivme kaydının doğu-batı bileşeni kullanılmıştır (Şekil 2.90 (a)). Maksimum değeri 4.49m/s^2 olan ivme bileşeni binaya yatay (x) yönünde uygulanmıştır. İlgili literatürde, çok sayıda araştırmacı, sınırlı hesaplama kapasiteleri ve uzun dinamik analiz periyotları nedeniyle tam bir kayıt yerine ivme kayıtları içindeki etkin kısmı kullanmıştır. Aşağıda belirtilen çalışmalarda araştırmacılar, analizleri sırasında ivme kayıtlarının etkin kısmını kullanmışlardır (Fathi vd., 2020; Elyamani vd., 2022; Aşıkoğlu vd., 2019: Abbas ve Saeed, 2019; Öztürk vd., 2019; Altunişik vd., 2017). Bu nedenle analizler sırasında 25 saniyelik ivme kaydının 6 saniyelik etkin kısmını kullandık. Analiz sonuçlarının doğal frekansların değerlendirilmesinde Şekil 2.90 (b)'de gösterilen A, B, C ve D noktaları sırasıyla 2.85 s, 3.46 s, 4.79 s ve 6 s kullanılmıştır.



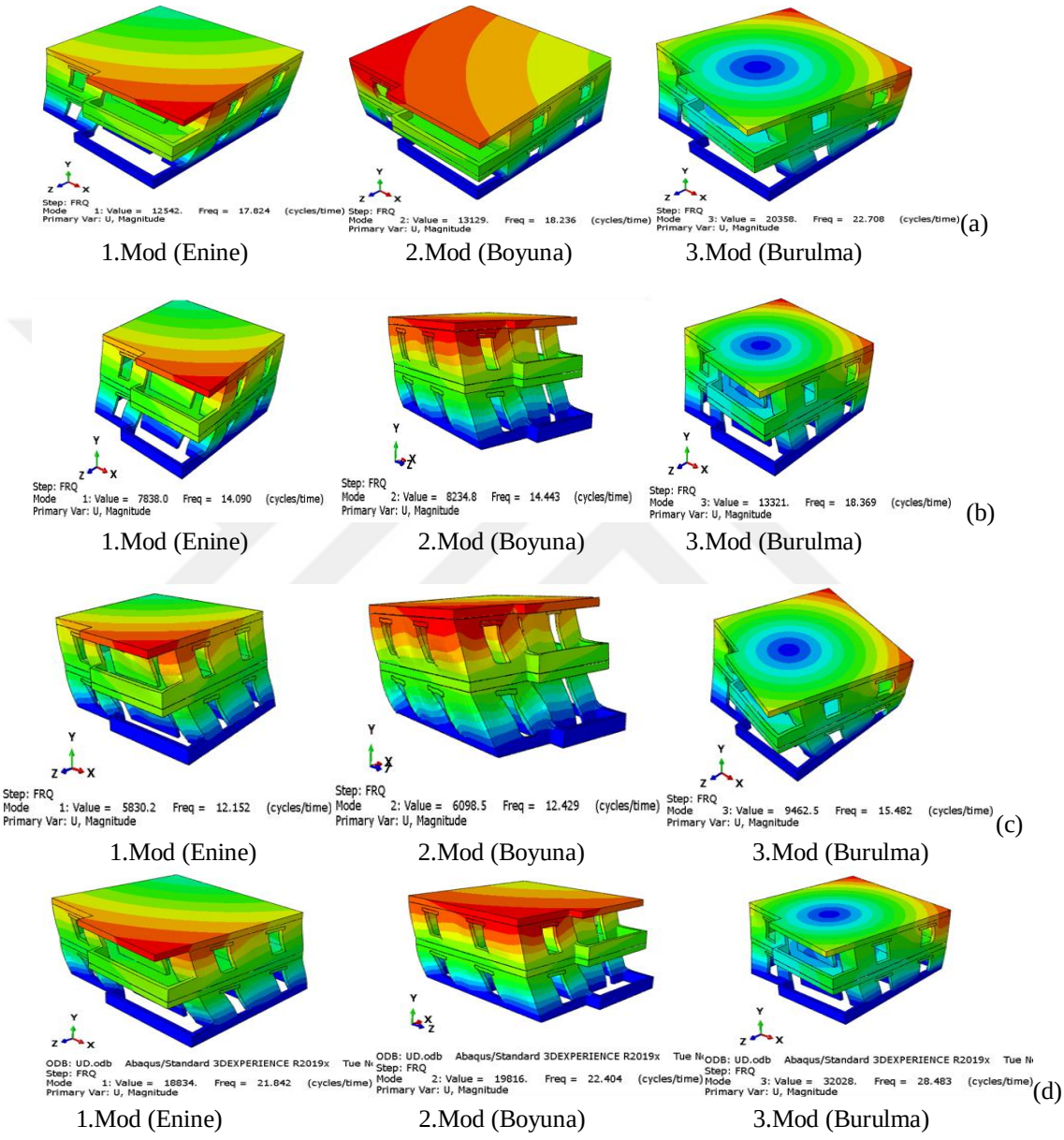
(a) Tamamen zaman (b) Etkili zaman

Şekil 2.90. Erzincan depremi ivme-zaman grafiği

2.3.1.1.2. Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Hasarsız, hasarlı, onarım ve güçlendirme durumları için delikli tuğla, gaz beton, dolu briket ve kilitli yığma birimli iki katlı bina modelleri üzerinde yapılan modal analiz

sonuçlarından elde edilen ilk üç doğal frekans değerleri sırasıyla Tablo 2.43, Tablo 2.44 Tablo 2.45 ve Tablo 2.46'da sunulmuştur. İlk üç mod şekli sırasıyla Şekil 2.91, Şekil 2.92, Şekil 2.93 ve Şekil 2.94'te gösterilmiştir.



Şekil 2.91. Hasarsız durumu için iki katlı binalarında ait mod şekilleri

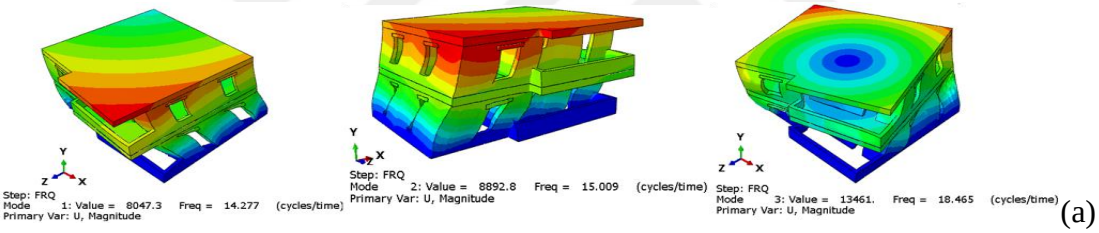
Tablo 2.43. Hasarsız durumu iki katlı bina doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)			
	Tuğla	Delikli Briket	Gazbeton	Kilitli Yığma Birim
1	17.82	14.09	12.15	21.84
2	18.24	14.44	12.43	22.40
3	22.71	18.37	15.48	28.48

Şekil 2.91 incelendiğinde, delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim modelleri sırasıyla birinci ve ikinci mod şekilerinde enine ve boyuna ötelenme, üçüncü mod şeklinde burulma modunun elde edildiği görülmektedir. Analiz edilen tüm yığma binalar için birinci mod şekli, boyuna ötelemeyi göstermektedir. Analiz sonuçlarına göre x-yönündeki yüksek sayıda boşluğa verilebilen kat seviyelerinde önemli deformasyon taleplerinin bir yoğulaşması ortaya çıkmaktadır. Tüm modeller, duvarların düzlem dışı harekete karşı yüksek hassasiyete sahip olduğunu analiz sonuçlarıyla kanıtlamıştır.

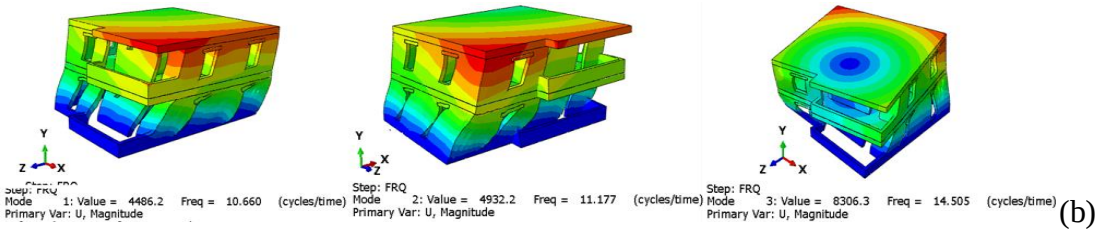
Tablo 2.44. Hasarlı durumu iki katlı bina frekans değerlerinin karşılaştırılması

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)			
	Delikli Tuğla	Dolu Briket	Gazbeton	Kilitli Yığma Birim
1	14.28	10.66	8.66	17.80
2	15.01	11.18	9.20	18.43
3	18.46	14.56	11.27	23.10



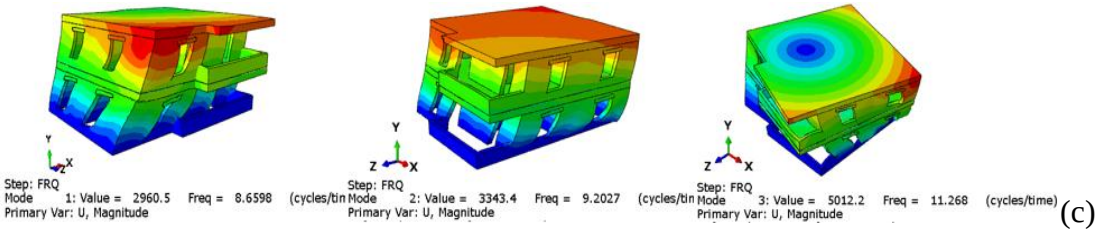
(a)

1.Mod (Boyuna) 2.Mod (Enine) 3.Mod (Burulma)



(b)

1.Mod (Boyuna) 2.Mod (Enine) 3.Mod (Burulma)

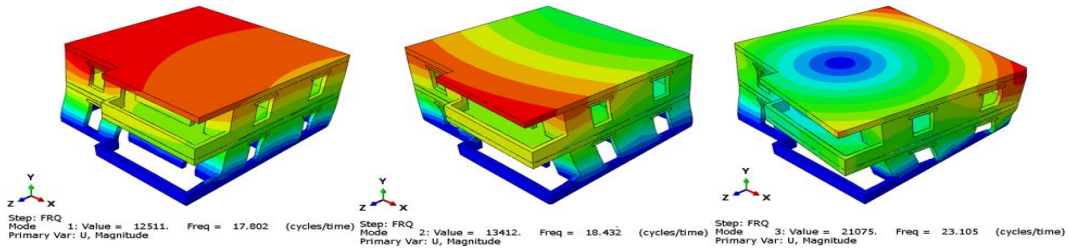


(c)

1.Mod (Enine) 2.Mod (Boyuna) 3.Mod (Burulma)

Şekil 2.92. Hasarlı durumu için iki katlı modellerine ait mod şekilleri

Şekil 2.92'nin devamı,



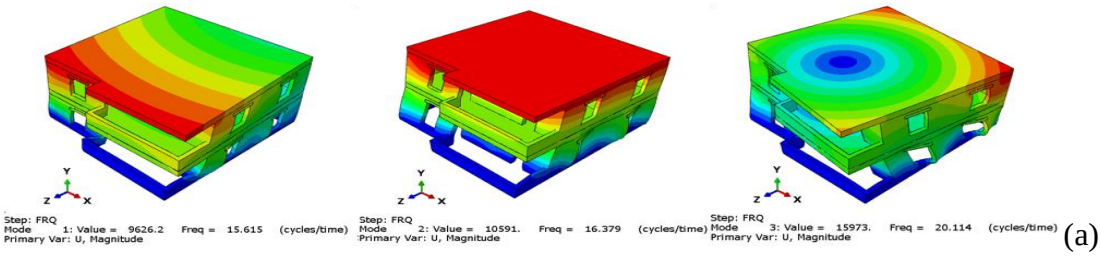
(d)

1.Mod (Enine) 2.Mod (Boyuna) 3.Mod (Burulma)

Şekil 2.92 incelendiğinde, gazbeton ve kilitli yığma birim modelleri sırasıyla birinci ve ikinci modda bina rijitliğine bağlı olarak enine ve boyuna doğrultuda öteleme ve üçüncü modda ise burulma elde edildiği görülmektedir. Binanın enine ve boyuna doğrultudaki rijitlikleri değerlendirildiğinde ise enine doğrultudaki rijitliğin daha az olduğu görülmektedir. Ancak deliki tuğla ve dolu briket modelleri ilk iki modun şekilleri sırasıyla boyuna ve enine doğrultuda ötelenme, son modda burulma modu olduğu tespit edilmektedir. Binanın enine ve boyuna doğrultudaki rijitlikleri değerlendirildiğinde ise boyuna doğrultudaki rijitliğin daha az olduğu görülmektedir. Analizden elde edilen sonuçlarına göre ilk üç doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması Tablo 2.45'te verilmektedir. Onarılmış durumu için deliki tuğla, gazbeton, dolu briket ve kilitli yığma birim modelinin ilk üç mod şekli için mod şekilleri 2.93'ta elde edilmiştir.

Tablo 2.45. Onarılmış durumu iki katlı bina frekans değerlerinin karşılaştırılması

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)			
	Tuğla	Dolu Briket	Gazbeton	Kilitli Yığma Birim
1	15.61	11.51	9.27	19.06
2	16.38	11.92	11.11	19.25
3	20.11	14.38	13.78	25.23

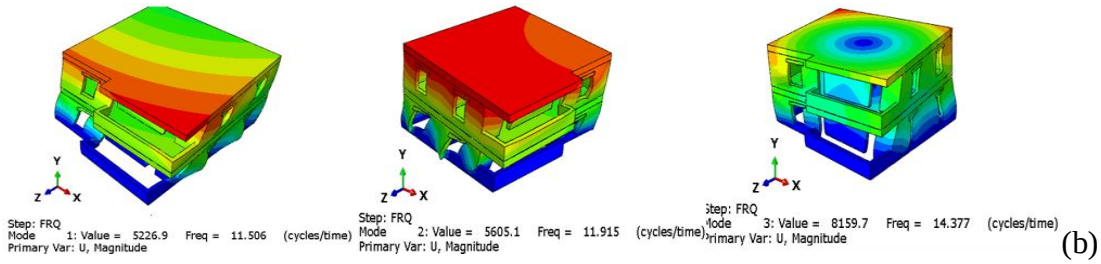


(a)

1.Mod (Enine) 2.Mod (Boyuna) 3.Mod (Burulma)

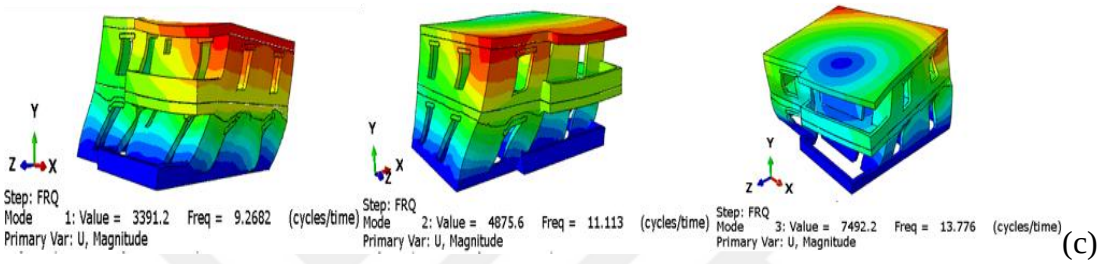
Şekil 2.93. Onarılmış durumu için iki katlı bina modeline ait mod şekilleri

Şekil 2.93'nün devamı,



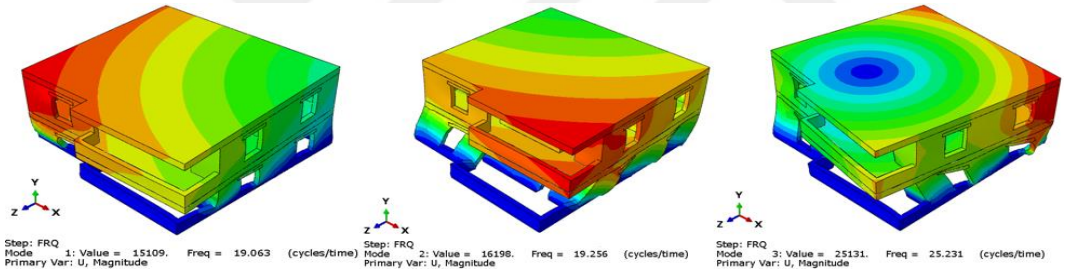
(b)

1.Mod (Enine) 2.Mod (Boyuna) 3.Mod (Burulma)



(c)

1.Mod (Boyuna) 2.Mod (Enine) 3.Mod (Burulma)



(d)

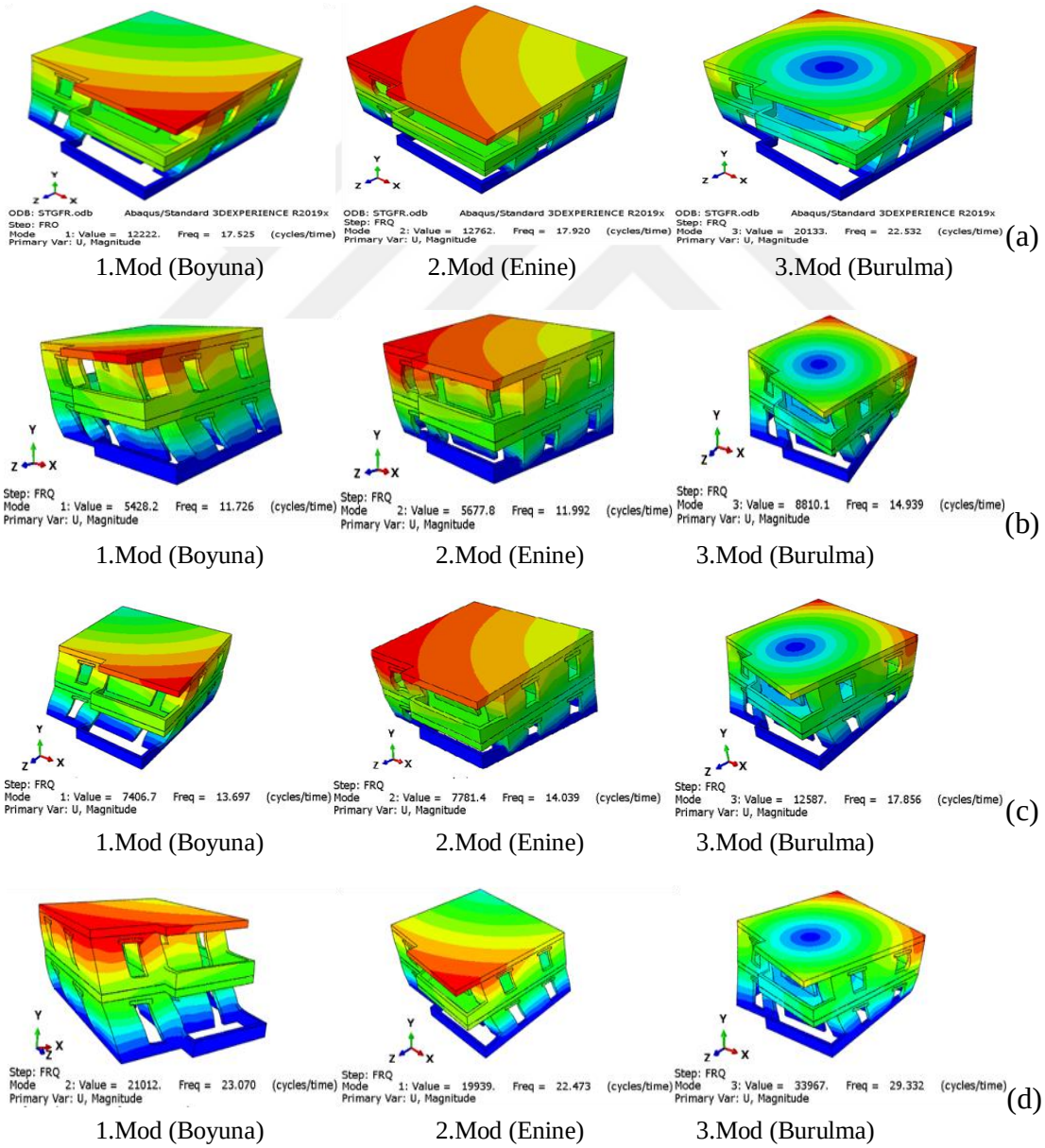
1.Mod (Boyuna) 2.Mod (Enine) 3.Mod (Burulma)

Şekil 2.93 incelendiğinde, gazbeton ve kilitli yığma durumlar sırasıyla birinci ve ikinci mod durumlarında enine ve boyuna doğrultuda öteleme, üçüncü modda ise burulma modu elde edildiği görülmektedir. Gazbeton ve kilitli yığma birim kullanımıyla binanın enine ve boyuna doğrultudaki rijitlikleri değerlendirildiğinde ise, binanın birinci modunun enine doğrultuda olması bu doğrultudaki rijitliğin daha az olduğunun bir göstergesidir. Ancak tuğla bina ve dolu briket binaları için ilk iki modunun sırasıyla boyuna doğrultuda öteleme ve enine doğrultuda öteleme, üçüncü modun ise burulma modu olduğu tespit edilmektedir. Boyuna öteleme modunun çapraz doğrultusuna kaymış olması binada bir dışmerkezlilik güçlü asimetrisi olabileceğini işaret etmektedir. Hasarsız ve onarım durumları için farklı malzeme için ötelenme modunda farklılık göstermemektedir. Aksine onarım malzemesi uygulaması sonrasında doğal frekans değerlerinin %7-10 arasında artığı görülebilmektedir. Analizden elde edilen sonuçlara göre ilk üç doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması Tablo

2.46’da verilmektedir. Güçlendirilmiş durumu için deliki tuğla, gazbeton, dolu briket ve kilitli yığma birim modelinin ilk üç mod şekli için mod şekilleri Şekil 2.94'te gösterilmektedir.

Tablo 2.46. Güçlendirilmiş durumu için iki katlı bina frekans değerlerinin karşılaştırılması

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)			
	Delikli Tuğla	Dolu Briket	Gazbeton	Kilitli Yığma Birim
1	17.53	13.68	11.73	23.07
2	17.92	14.04	11.99	22.47
3	22.53	17.86	14.94	29.33



Şekil 2.94. Güçlendirmiş durumu için iki katlı binalarına ait mod şekilleri

Şekil 2.94 incelendiğinde, delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim malzeme durumları sırasıyla birinci ve ikinci mod şekillerinde boyuna ve enine ötelenme, üçüncü mod şeklinde burulma ötelenme elde edildiği görülmektedir. Tüm malzeme durumları için modellerin mod şekilleri, hasarsız durunundaki mod şekillerinden birbiri ile tutarlılık gösterdiği anlaşılmaktadır. Güçlendirlmiş gazbeton binanın frekanslarını önemli ölçüde etkilediğini ve titreşim modlarını değiştirdiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, deliki tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim iki katlı modellerin doğal frekans değerlerinin sırasıyla Tablo 2.47'da karşılaştırılması verilmektedir. Hasar gömüş ile birlikte doğal titreşim frekansların belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Rijitlik değişimi ile yapının doğal frekanslarındaki azalma arasında deterministik bir ilişki vardır. Farklı model malzemelerin ilk doğal frekansları, çeşitli halleri altında tanımlanmıştır.

Tablo 2.47. Farklı malzeme için iki katlı modeli rijitlik oranı sonuçlarının karşılaştırılması

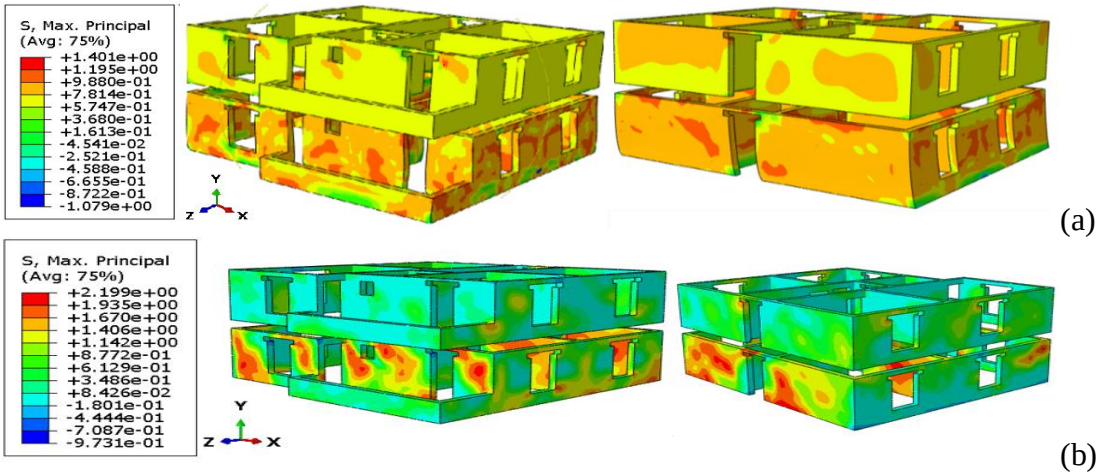
Malzeme	Mod Numarası	Modellerin Rijtlik Değişimi (%)						
		Hasarsız	Fark(%)	Hasarlı	Fark(%)	Onarım	Fark(%)	Güçlendirme
Delikli tuğla	1	17.82	- 19.86	14.28	9.31	15.61	12.30	17.53
	2	18.24	- 17.70	15.01	9.13	16.38	9.40	17.92
	3	22.71	- 18.71	18.46	8.94	20.11	12.03	22.53
	Ortalama	19.59	-18.70	15.92	9.10	17.37	11.28	19.33
Dolu briket	1	14.09	-24.34	10.66	7.97	11.51	18.85	13.68
	2	14.44	-22.58	11.18	6.62	11.92	17.78	14.04
	3	18.37	-20.74	14.56	1.99	14.38	24.20	17.86
	Ortalama	15.63	-22.54	12.13	5.53	12.60	20.28	15.19
Gazbeton	1	-28.72	8.66	07.04	9.27	26.54	11.73	12.15
	2	- 25.99	9.20	20.76	11.11	7.90	11.99	12.43
	3	-27.20	11.27	22.17	13.78	8.42	14.94	15.48
	Ortalama	-27.30	9.71	17.30	11.39	13.17	12.89	13.35
Kilitli yığma birim	1	-18.50	17.80	7.08	19.06	21.04	23.07	21.84
	2	- 17.72	18.43	4.45	19.25	16.72	22.47	22.40
	3	-18.89	23.10	9.22	25.23	16.25	29.33	28.48
	Ortalama	-18.40	19.78	7.08	21.18	17.85	24.96	24.24

Tablo 2.47 incelendiğinde, deliki tuğla modeli için hasarsız ve hasarlı arasındaki rijitlik farkı %18.70, dolu briket model için %22.54, gazbeton için % 9.71 ve kilitli yığma birim model için %19.78 doğal frekans eksi değerlerinin azalttığını göstermektedir. Onarım uygulamasından sonra deliki tuğla modeli için %9.10, dolu briket model için %5.53, gazbeton için %11.39 ve kilitli yığma birim model için %21.18 doğal frekansı değerleri artırdığını göstermektedir. Burada onarımın önemli bir etkisinin olmadığı düşünülmektedir. Ayrıca, onarılmış ve güçlendirilmiş hallerin doğal titreşim frekans değerleri arasındaki maksimum farklar sırasıyla %11.28, %20.28, %13.14 ve %17.85'tir. Son olarak hasarsız ve

güçlendirmiş halleri delikli tuğla, dolu briket ve gazbeton malzemeli modeli için doğal frekans eksi değerleri olarak maksimum fark sırasıyla %1.33, %2.82 ve %3.34 ayrıca, kilitli yığma birim malzemeli model için doğal frekansları pozitif değerleri olarak maksimum fark % 2.97 olarak hesaplanmıştır. Güçlendirlmiş ve hasarlı arasındaki deliki tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim odelleri için %23-%35 arasında doğal frekans değerlerinin artırdığı görülmektedir. Güçlendirlmiş duvar binalarının tüm incelenen doğal frekanslarını arttırdığını göstermektedir. Yığma binaların düzlem içi ve dışı rijitliğini artırarak duvarların deformasyon taleplerini azaltmaktadır. Hasarsız ve güçlendirilmiş duvar binalarının doğal frekansları neredeyse aynıdır. TRM katmanı hasar görmüş yığma duvarların dayanımını geri kazanmak ve yığma binaların yapısal davranışlarını iyileştirmek için başarıyla kullanılabilir. TRM'nin güçlendirmedeki başarısının bir işareti olduğu düşünülmektedir.

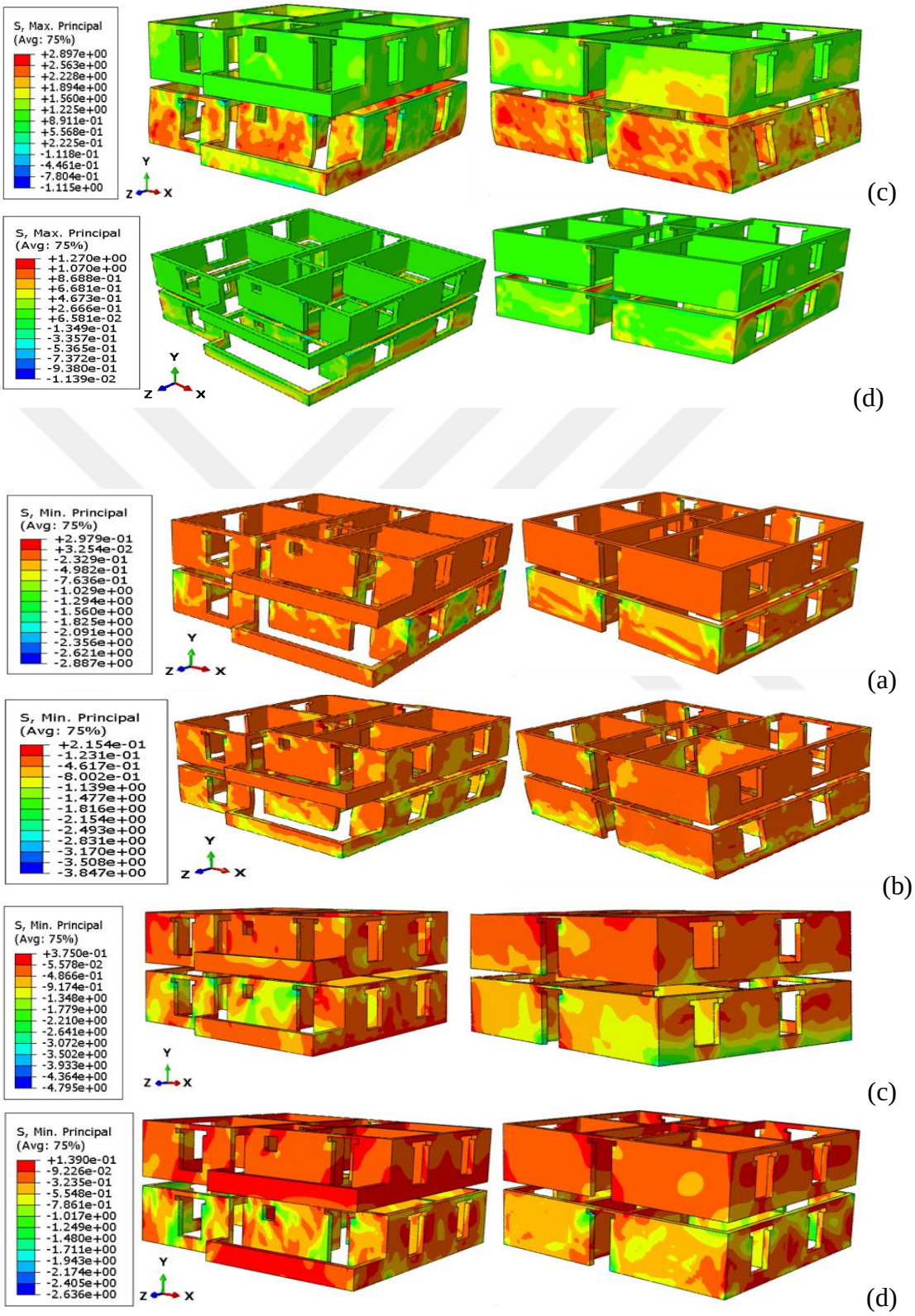
2.3.1.2. Hasarlı, Onarılmış ve Güçlendirilmiş Durumlar İçin Gerilme Değişimlerinin Değerlendirilmesi

Dört farklı malzeme durumu için iki katlı yığma bina olası gerilme yığılmalarının bölgelerini belirlemek için doğrusal olmayan dinamik analiz ile davranışları elde edilmiştir. Delikli tuğla, gazbeton, dolu briket ve kilitli yığma birim iki katlı modellerin hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumları dinamik davranışından elde edilen çekme gerilme dağılımının kontur diyagramları sırasıyla Şekil 2.95, Şekil 2.97 ve Şekil 2.99'da, basınç gerilme dağılımının kontur diyagramları ise sırasıyla Şekil 2.96 ve Şekil 2.98 ve Şekil 2.100'de verilmektedir.



Şekil 2.95. İki katlı bina hasarlı durumundan elde edilen çekme gerilme konturkarı

Şekil 2.95'in devamı,



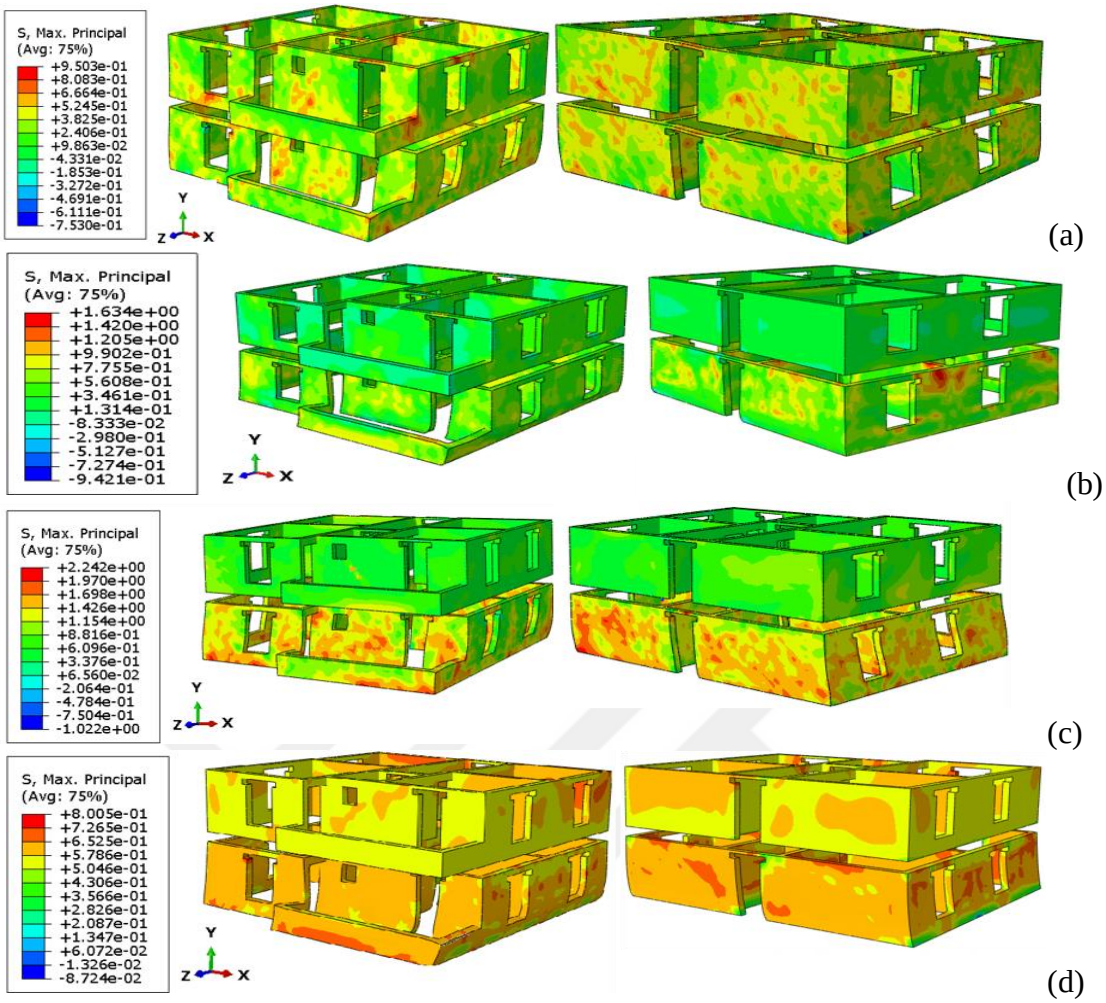
Şekil 2.96. İki katlı bina hasarlı durumundan elde edilen basınç gerilmesi konturları

Hasarlı durumu için farklı malzeme kullanarak iki katlı bina duvarlarında en büyük çekme ve basınç gerilmenin oluştuğu andaki gerilme dağılımını göstermektedir. Şekil 2.95 ve Şekil 2.96'da görüldüğü gibi, her modelde çekme ve basınç gerilme değerleri farklı bölgelerde oluşmaktadır. Delikli tuğla, dolu briket, gazbeton, briket ve kilitli yığma birim malzeme durum modelleri için çekme gerilme değerleri iki katlı binanın üzerindeki bütün duvarlarını sırasıyla 0.89MPa-1.64MPa, 0.98MPa -2.20MPa, 1.12MPa-2.90MPa ve 0.97 MPa-1.41MPa aralığında gerilmeler tespit edilmiştir. Bu değerler duvar çekme emniyet gerilme değerlerine aşmaktadır. En yüksek çekme gerilme değerlerinin açısından hemen hemen tüm alt kat duvarlarında oluşmaktadır. Birinci katlarında duvarlarında, özellikle kapı ve pencere boşlukları çevresi, duvar ve hatıl arasındaki dolu duvar kısımları, duvar kesişim ve birleşim bölgelerinde gerilmelere rastlanmaktadır. Bu bölgelerde meydana gelen maksimum basınç gerilme değerleri sırasıyla 2.89MPa, 3.85MPa, 4.80MPa ve 2.64MPa aralığında gerilmelere rastlanmaktadır. Bu değerler duvar basınç emniyet gerilme değerlerine aşmaktadır. Bu durumda minarelerin oldukça riskli olduğu söylenebilir. Bu bölgelerde ciddi hasarlar oluşabilir. Hasarlı durumundan elde edilen maksimum basınç gerilme ve çekme gerilme değerlerini Tablo 2.48'de görülmektedir.

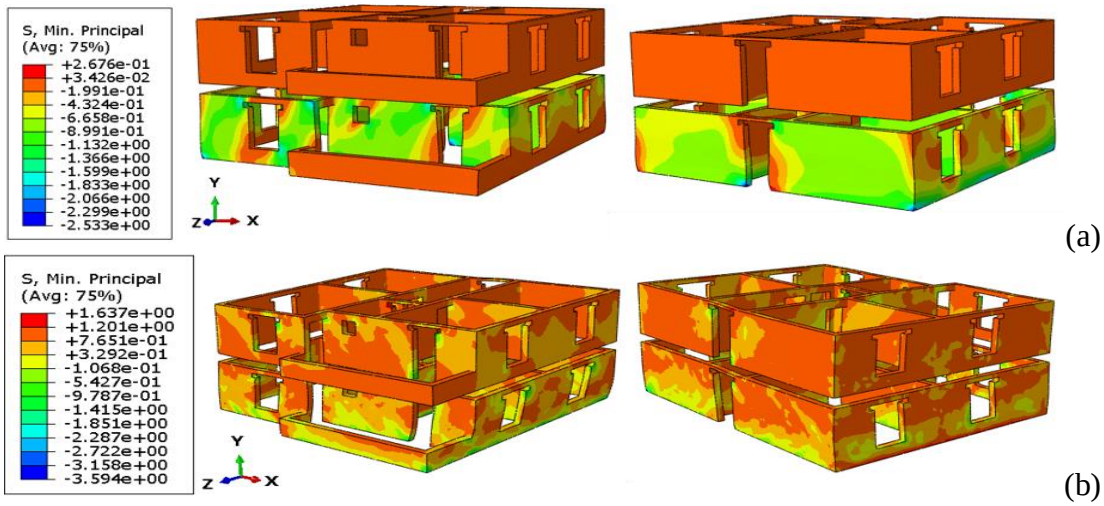
Tablo 2.48. Hasar durumlarının doğrusal olmayan dinamik davranışlarından elde edilen çekme ve basınç gerilme değerlerinin karşılaştırılması

Gerilme Tipi	Farklı Malzeme Durumları (MPa)			
	Delikli Tuğla	Dolu Briket	Gazbeton	Kilitli yığma birim
Çekme Gerilmesi	1.64	2.20	2.90	1.41
Basınç Gerilmesi	2.89	3.85	4.80	2.64

Tablo 2.48'da incelendiğinde hasarlı yığma binalara uygulanan deprem sonucu elde edilen gerilme değerlerinin çekme emniyet gerilmesi değerinden büyük olmasından dolayı yapının güvenilir değil ve çok riskli olduğu sonucuna varılmaktadır. Tüm modellerde meydana gelen maksimum çekme gerilmeleri duvar emniyet gerilme değerini aşmaktadır. Bu durumda tüm malzeme modellerin oldukça güvensiz olduğu söylenebilir. Bu yüzden duvarların onarılması gerekmektedir. Onarılmış durumu doğrusal olmayan zaman-tanım alanında analizlerinden elde edilen çekme ve basınç gerilme kontur diyagramları Şekil 2.97 ve Şekil 2.98'de verilmiştir.

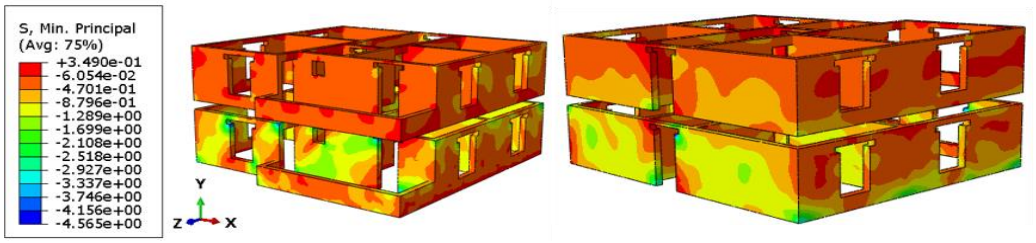


Şekil 2.97. İki katlı onarılmış durumundan elde edilen çekme gerilme konturları

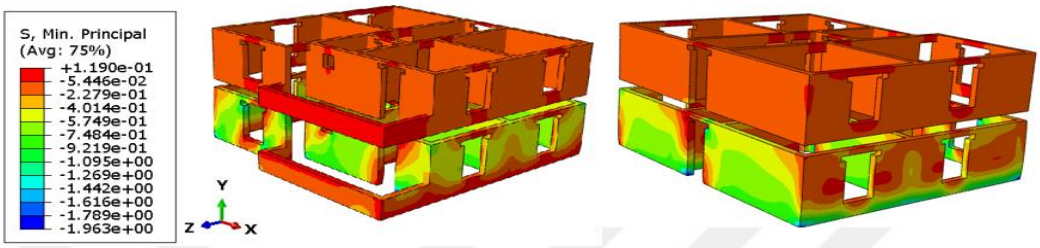


Şekil 2.98. İki katlı onarılmış durumundan elde edilen basınç gerilme konturları

Şekil 2.98'nin devamı,



(c)



(d)

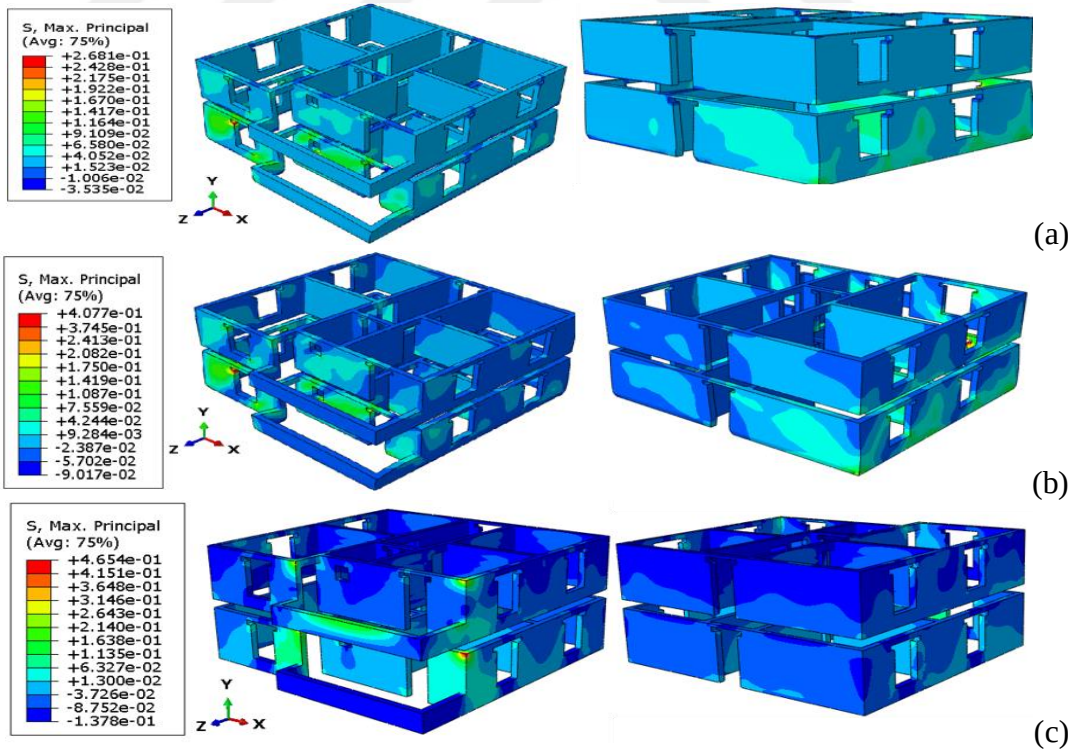
Şekil 2.97 ve Şekil 2.98'de görüldüğü gibi, onarılmış durum için farklı malzeme tiplerine göre model duvarlarda en büyük çekme ve basınç gerilmesi değerleri her modelde farklı bölgelerde oluşmaktadır. Delikli tuğla, dolu briket, gazbeton, briket ve kilitli yığma birim malzemeli modelleri için çekme gerilme de iki katlı binanın üzerindeki bütün duvarlarını sırasıyla 0.71-0.95 MPa, 0.94-1.63 MPa, 1.02-2.42 MPa ve 0.1-0.80 MPa aralığında zorlamaktadır. Onarım öncesi duvarlarda elde edilen en büyük çekme gerilmesi değeleri, onarım sonrası sırasıyla 1.64 MPa'dan 0.95 MPa, 2.20 MPa'dan 1.63 MPa, 2.90 MPa'dan 2.34 MPa and 1.41 MPa'dan 0.80 MPa'ya düşmüştür. Onarım sonrası en büyük çekme gerilmesi değerinde ortalama %36 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Çekme gerilme değerlerine göz atıldığında (Şekil 2.97 (c)) iki katlı gazbeton binanın duvarında 0.24 MPa'dan büyük çekme gerilmeleri görülmektedir. Bunun yanında kapı ve pencere boşlukları çevresi uzanan kuzey ve güney duvarlarında, özellikle duvarlar birleşim bölgelerinde 1.10-1.70 MPa aralığında gerilmelere rastlanmaktadır. Batı duvarda pencerelerinin arasındaki bulunan kısmıda 1.42-1.63 MPa aralığında çekme gerilmeleri görülmüştür. Bu bölgelerde çatlaklar ve hasarlar oluşabilir. Basınç gerilmeler ise kuzey ve güney dış duvarlar cephelerinde kapı ve pencere boşlukları çevresinde 1.30-.4.57 MPa olarak ortaya çıkmıştır. Çekme ve basınç gerilme değerleri açısından en kritik bölgeler hasarlı durumu gibi birinci katların dış duvarlarında oluşmaktadır. Onarım sonrası çekme ve basınç gerilmesi yoğulaşmalarının seviyesisini azaltılmaktadır. Fakat bu bölgelerde meydana gelen maksimum çekme gerilmesinin değerlerini duvar çekme emniyet gerilme değerlerini

aşmaktadır. Bu gerilmeler deprem esnasında duvarlarda ciddi çatlaklara sebep olabilir bu yüzden güçlendirme yöntemi mutlaka kullanılmaktadır. TRM ile güçlendirme malzemesi, yığma yapının süneklik gereksinimlerini karşılayan ve çekme gerilme değerlerine dayanabilen bir eleman geliştirmek için karşılanabilir. Onarılmış durumundan elde edilen basınç ve çekme gerilmesi değerleri Tablo 2.49'da görülmektedir.

Tablo 2.49. Onarılmış durumlarının doğrusal olmayan dinamikm davranışlarından elde edilen çekme ve basınç gerilme değerlerinin karşılaştırılması.

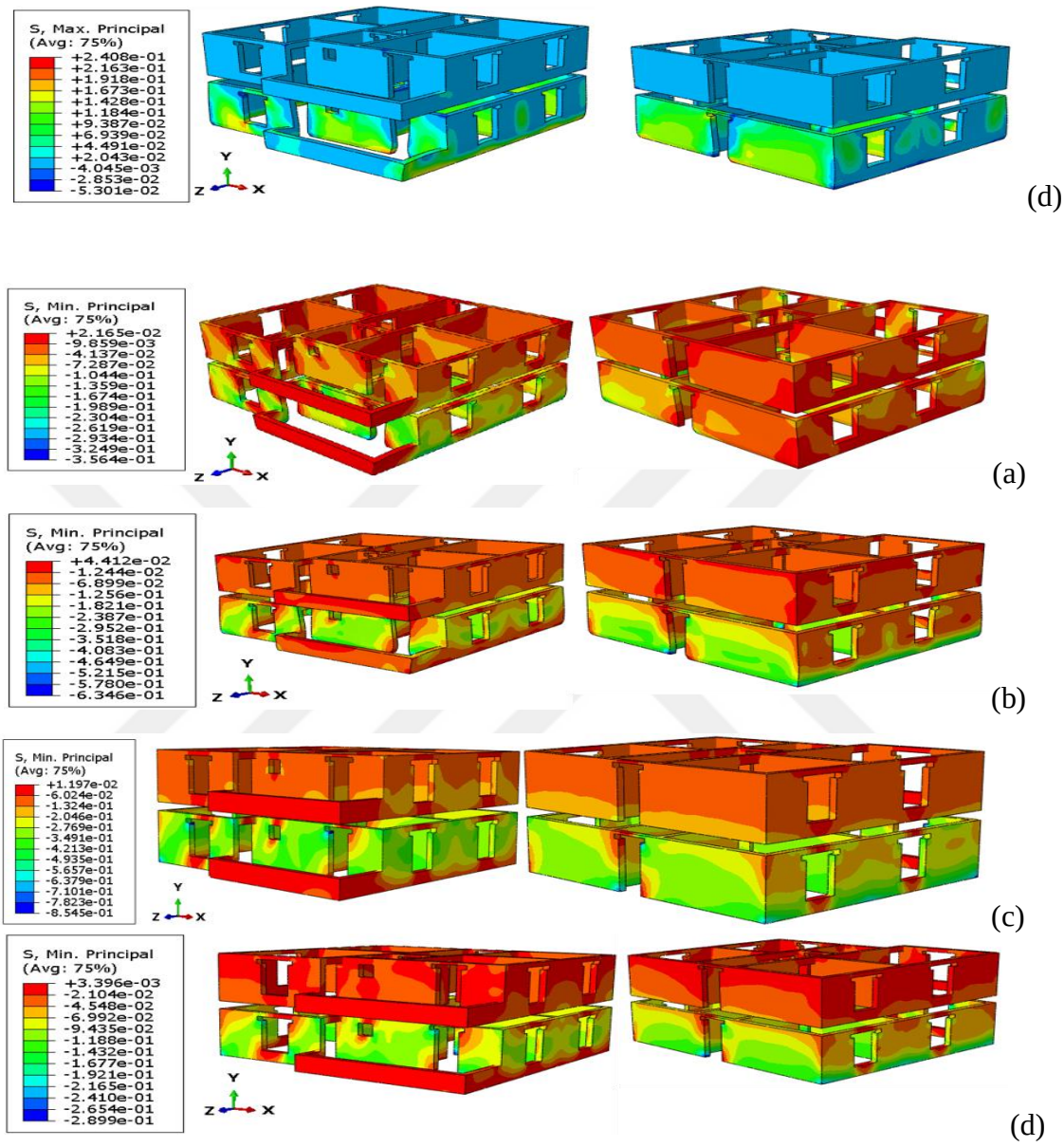
Gerilme Tipi	Farklı Malzeme Durumları (MPa)			
	Delikli Tuğla	Dolu Briket	Gazbeton	Kilitli yığma birim
Çekme Gerilmesi	0.95	1.63	2.34	0.80
Basınç Gerilmesi	2.53	3.60	4.56	1.96

Güçlendirilmiş durumu doğrusal olmayan dinamik analizlerinden elde edilen çekme ve basınç gerilme kontur diyagramları Şekil 2.99 ve Şekil 2.100'da verilmiştir.



Şekil 2.99. İki katlı yığma bina güçlendirilmiş durumundan elde edilen çekme gerilme kontur diyagramı

Şekil 2.99'un devamı,



Şekil 2.100. İki katlı yığma bina güçlendirilmiş durumundan elde edilen basınç gerilme kontur diyagramı

Şekil 2.99 ve Şekil 2.100'da görüldüğü gibi, güçlendirilmiş hali için farklı malzeme durumlarına göre duvarlarda en büyük çekme ve basınç gerilme değerleri her bir modelde farklı bölgelerde oluşmaktadır. Delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim malzeme durum modelleri için birinci kat duvarlarının üzerinde sırasıyla 0.27 MPa, 0.30 MPa ,0.32 MPa ve 0.24 MPa değerlerine ulaşan çekme gerilmelere rastlanmaktadır. Çekme gerilmeleri açısından en kritik bölge kuzey duvarlardaki boşlukları kapı ve pencere çevresi

ve duvar birleşim bölgelerinde görülmektedir. Dolu briket malzemeli model gerilmelerin, bulunduğu çekme gerilme seviyesine ait emniyet gerilmesi (0.29 MPa) sınırında olduğu görülmektedir. Kuzey ve batı duvar birleşim bölgelerindeki elemanların çekme emniyetini biraz aştığı görülmektedir. Ancak diğer duvarlarını 0.12-0.25 MPa aralığında zorlamaktadır. Çekme gerilmelerini gösteren diyagramda bu emniyet aralığının aşılmadığı görülmektedir. Gazbeton malzemeli model için çekme gerilmeleri açısından en kritik bölge kuzey duvarlardaki pencere boşlukları çevresinde yoğunlaştığı görülmüştür. Çekme gerilmesinin bu noktada 0.24 MPa (çekme emniyeti) değerini aştığı görülmektedir. Bu bölgede çatlakların oluşması beklenmektedir. Ancak çekme gerilmeleri yapının birinci kat seviyesindeki bütün duvarlarını 0.15-0.2 MPa aralığında zorlamaktadır. Bu durumda gazbeton modeli riskli olmadığı söylenebilir. Basınç gerilmeleri ise kapı pencere boşluklarına sahip bölgelerinde sırasıyla 0.36 MPa, 0.64 MPa, 0.85 MPa ve 0.29 MPa görülmektedir. Bu gerilmelerin, bulunduğu basınç gerilme seviyesine ait emniyet gerilmesi aşılmadığı görülmektedir. Dört farklı malzeme için güçlendirilmiş durumda elde edilen çekme ve basınç gerilmesi değerleri ise hem hasarlı hem de onarılmış durumda elde edilenlerden daha küçüktür. TRM ile güçlendirilmesinden sonra çekme ve basınç gerilme değerleri ve bölgelerin yoğunlaşması çok önemli azalma meydana gelmiştir. Dört farklı malzeme için güçlendirilmiş durumundan elde edilen çekme ve basınç gerilmesi değerleri ise hem hasarlı hem de onarılmış durumda elde edilenlerden daha küçüktür. TRM ile güçlendirilmesinden sonra çekme ve basınç gerilme değerleri ve yoğunlaşmasında çok önemli azalma meydana gelmiştir. Güçlendirme öncesi duvarlarda elde edilen en büyük çekme gerilme değerleri, güçlendirme sonrası sırasıyla 0.95 MPa'dan 0.27 MPa'a, 1.63 MPa'dan 0.30 MPa'a, 2.34 MPa'dan 0.32 MPa'a and 0.80 MPa'dan 0.24 MPa'a düşmüştür. En büyük çekme gerilmesi değerinde ortalama 5 katı bir azalma meydana gelmiştir. TRM-güçlendirme yönteminin ana amacı, hasarlı ve güvenli olmayan yığma duvarların rijitliği ve mekanik dayanımı eski haline getirmektedir. Güçlendirilmiş durumdan elde edilen basınç ve çekme gerilmesi değerleri Tablo 2.50'de görülmektedir.

Tablo 2.50. Güçlendirilmiş durumunun doğrusal olmayan dinamik davranışlarından elde edilen çekme ve basınç gerilmesi değerlerinin karşılaştırılması

Gerilme Tipi	Farklı Malzeme Durumları (MPa)			
	Delikli Tuğla	Dolu Briket	Gazbeton	Kilitli Yığma Birim
Çekme Gerilmesi	0.27	0.40	0.46	0.24
Basınç Gerilmesi	0.36	0.64	0.85	0.29

Alt kat duvarlar gerilme yoğulaşmaları fark edilirken, ikinci kat duvarlarını çoğunluğunun emniyet gerilmesi değerlerine ulaşmadığı görülmüştür. Hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumları için iki ve üç katlı yığma duvarlarında oluşan çekme gerilmesi değerlerinin çekme eminiyet değerleri ile karşılaştırılması Tablo 2.51 ve Tablo 2.52'te sırasıyla verilmektedir.

Tablo 2.51. Hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumları için ki katlı modellerinde oluşan çekme gerilmesi değerlerinin çekme eminiyet ile karşılaştırılması

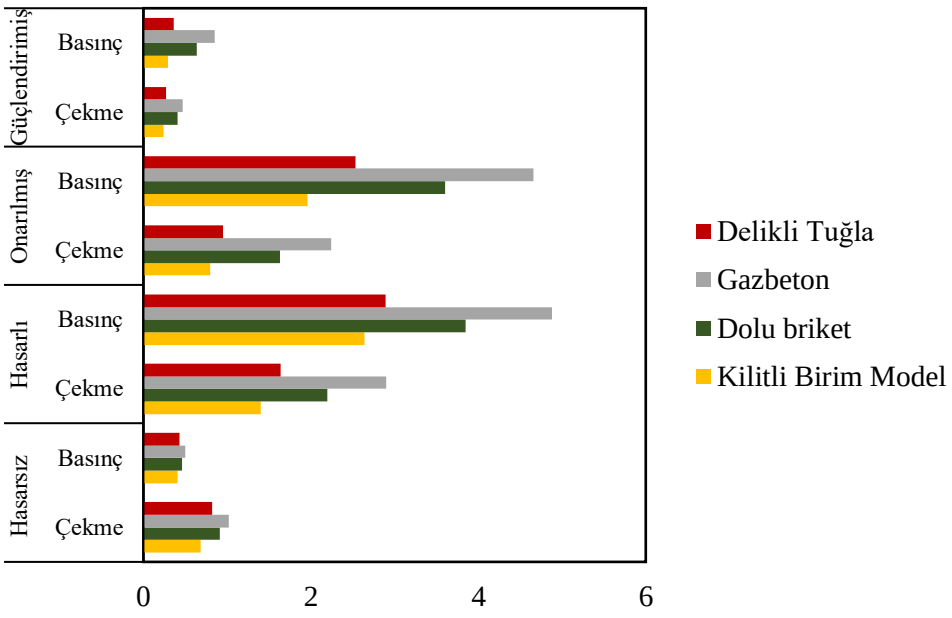
Durumlar	Gerilmeler	Delikli Tuğla	Dolu Briket	Gazbeton	Kilitli Yığma Birim
Hasarlı	Maks Çekme	1.64	2.20	2.90	1.40
	Çekme Emniyeti	0.49	0.35	0.28	0.30
	Değerlendirme	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILIYOR
Onarılmış	Maks Çekme	0.95	1.63	2.24	0.80
	Çekme Emniyeti	0.49	0.35	0.28	0.30
	Değerlendirme	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILIYOR
Güçlendirlmiş	Maks Çekme	0.27	0.40	0.46	0.24
	Çekme Emniyeti	0.49	0.35	0.28	0.30
	Değerlendirme	AŞILMIYOR	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILMIYOR

Tablo 2.52. Hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumları için üç katlı modellerinde oluşan basınç gerilmesi basınç eminiyet değerleri ile karşılaştırılması

Durumlar	Gerilmeler	Delikli Tuğla	Dolu Briket	Gazbeton	Kilitli Yığma Birim
Hasarlı	Maks Basınç	2.89	3.85	4.80	2.64
	Basınç Emniyeti	1.70	1.45	1.21	2.04
	Değerlendirme	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILIYOR
Onarılmış	Maks Basınç	2.53	3.60	4.56	1.96
	Basınç Emniyeti	1.70	1.45	1.21	2.04
	Değerlendirme	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILMIYOR
Güçlendirlmiş	Basınç Basınç	0.36	0.63	0.85	0.30
	Basınç Emniyeti	1.70	1.45	1.21	2.04
	Değerlendirme	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR

Tüm şekiller dikkatlice incelendiğinde, en büyük gerilmelerin birinci kattaki bölgelerde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Genellikle duvar birleşim yerleri, kapı ve pencere gibi boşluklarda büyük gerilmelerin meydana geldiği görülmüştür. Aynı zamanda her bir modelin gerilme değerinin birinci kattan ikinci kata doğru kademeli olarak düşerek yığma duvarın hasar derecesinin alt kattan üst kata doğru kademeli olarak azaldığını göstermektedir. Benzer sonuçlar önceki deneysel çalışmalarda güçlendirilmemiş tuğla yapılar için bildirilmiştir (Xin vd., 2021: Ismail vd., 2016). Gazbeton malzeme durumu için

çekme gerilmesinin değerleri, diğer malzemelere göre daha yüksek ve modellerde daha belirgin hasarlar gözlemlenmiştir. En küçük basınç ve çekme gerilme değerlerinin elastisite modülü en büyük olan kilitli yığma birim malzeme durumu meydana gelmiştir. Elastiste modülündeki azalma ile gerilme değerlerinin arttığı ve dış duvarında oluşan gerilme dağılımı gözlemlenebilir.Güçlendirmesinden sonra elde edilen maximum gerilmesi minimum değerlerinde hasarsız durumuna göre %10-%14 oranında çok önemli bir yüksekleme meydana gelmiştir. Tüm malzemeler için güçlendirilmiş modellerinin basınç gerilme ve çekme değerleri hasarsız modellere göre düşük olmuştur. Literatürde benzer sonuçlar elde edilmiş yığma duvarların sismik güçlendirmesinde çok önemli olan deforme olabilirlik durumunda tek katmanlı ile çok etkili olmuş, dayanımı ve deforme olabilirlik etkinliği yaklaşık 3.5 katı (Papanicolaou vd., 2008) ve 1.75 ila 3 katı (Catherine vd., 2006) artmıştır.



Şekil 2.101. Hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumlarından elde edilen çekme ve basınç gerilmelerinin değerlerini karşılaştırılması

Şekil 2.101 incelendiğinde modellerin onarılmasından sonra elde edilen çekme gerilmesi değerlerinde hasarlı duruma göre %25-%40 oranında bir azalma meydana gelmiştir. TRM kompozit malzemeyle güçlendirilmiş bina modellerin çekme gerilmelerinin değerlerinde ortalama 4 kat, çekme gerilmesi değerleri ise 4.5 kat arasında oranında önemli bir azalma meydana gelmiştir.

2.3.1.2.1. Hasarlı, Onarılmış ve Güçlendirilmiş Durumlar İçin Yerdeğiştirme Değişimlerinin Değerlendirilmesi

Dört farklı malzeme durumları Erzincan deprem ivme kaydı altında x yönlü etkimesi ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler yöntemi geliştirilmiştir. Analiz sonuçlarında elde edilen, iki katlı olarak ve her bir katına karşı gelen tüm modellerde yer değiştirme değerleri Tablo 2.53'te gösterilmektedir.

Tablo 2.53. Hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumları doğrusal olmayan dinamik davranışlarından elde edilen yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılması

Durumlar	Kat	Malzemeler Durumları (mm)			
		Delikli Tuğla	Dolu briket	Gazbeton	Kilitli Yığma Birim
Hasarlı	1. Kat	1.43	1.74	2.59	1.34
	2. Kat	2.34	2.76	4.37	2.17
Onarılmış	1. Kat	0.96	1.20	1.84	0.88
	2. Kat	1.57	1.91	3.08	1.42
Güçlendirilmiş	1. Kat	0.68	0.83	1.23	0.64
	2. Kat	1.05	1.32	2.03	1.06

Bu analiz sonucunda oluşan yer değiştirme değerlerleri iki katı yığma bina modellerinin x-yönünden alınmıştır. Tablo 2.53 incelendiğinde hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumları için iki katlı yapının analiz sonuçları verilmiş ve en büyük yer değiştirme değerleri sırasıyla 2.59 mm, 1.84 mm ve 1.23 mm olan gazbeton modelinde görüldüğü gözlenmiş en küçük yer değiştirme değerleri ise sırasıyla 2.17 mm, 1.42 mm ve 0.64 mm olarak belirlenmiş ve en küçük değerler de kilitli yığma birim modelinde görülmüştür. Hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş modelin durumları için Tarihi Yapılar Kılavuzu (2017)'ya göre değerlendirilmesi verilen performans düzeyleri için öteleme oranları karşılaştırılmıştır. Sınırlı hasar (SH), kontrollü hasar (KH) ve göçme öncesi (GÖ) durumuları azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranları sırasıyla %0.3, %0.7 ve %1 olarak verilmiştir. İki katlı yığma modelin x doğrultusu için bu kontroller yapılmış, bu sınırların aşıldığı durumlarda ''AŞILIYOR'', aşılmadığı durumlarda ise ''AŞILMIYOR'' olarak elde edilmiştir. Deprem yükü azaltma katsayı (Ra) Tarihi Yapılar Kılavuzu'nda binalar için 2 olarak tanımlanmıştır (Tablo 2.54).

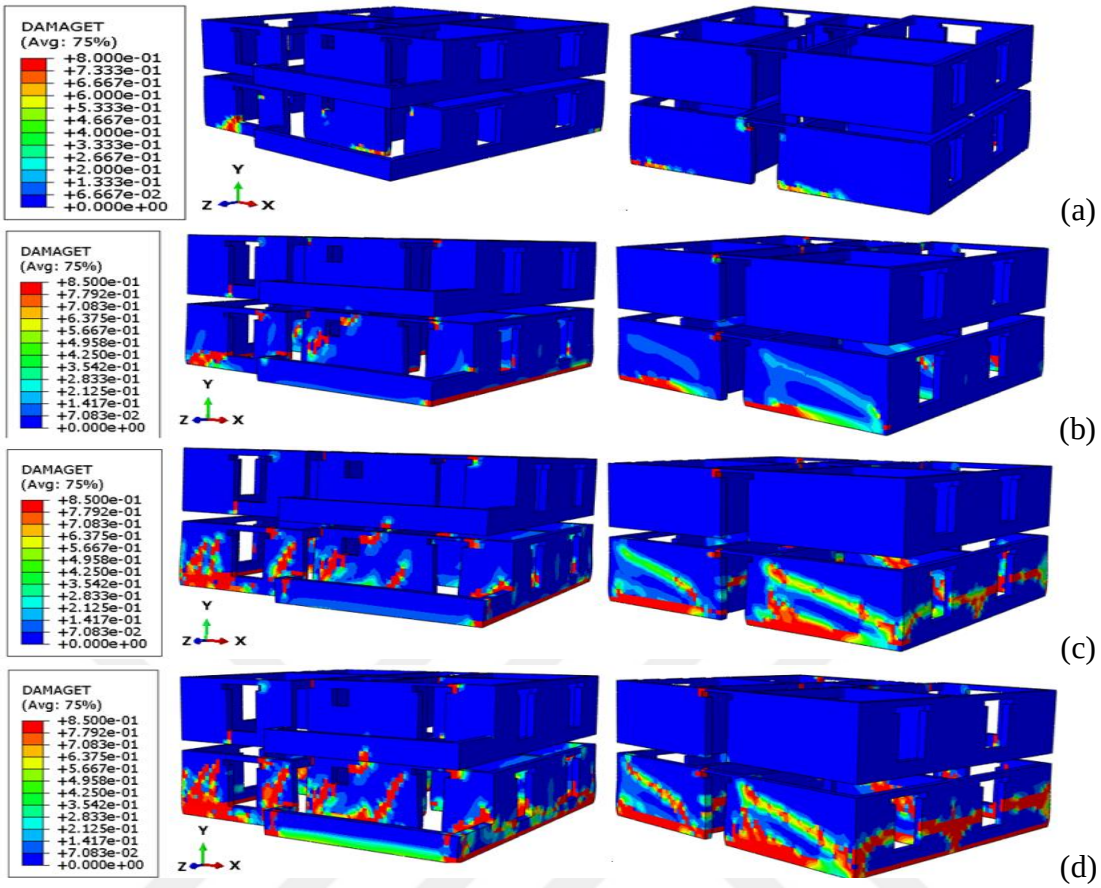
Tablo 2.54. Farklı malzemeler kullanırak hasarlı, onarılmış ve güçlendirmiş durumlarına göre hasarlı üç katlı modelleri öteleme oranı kontrolü

Malzemeler	Hasar Durumu		
	(SH)	(KH)	(GÖ)
Delikli Tuğla	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR
Dolu briket	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR
Gazbeton	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR
Kilitli Yığma Birim	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR

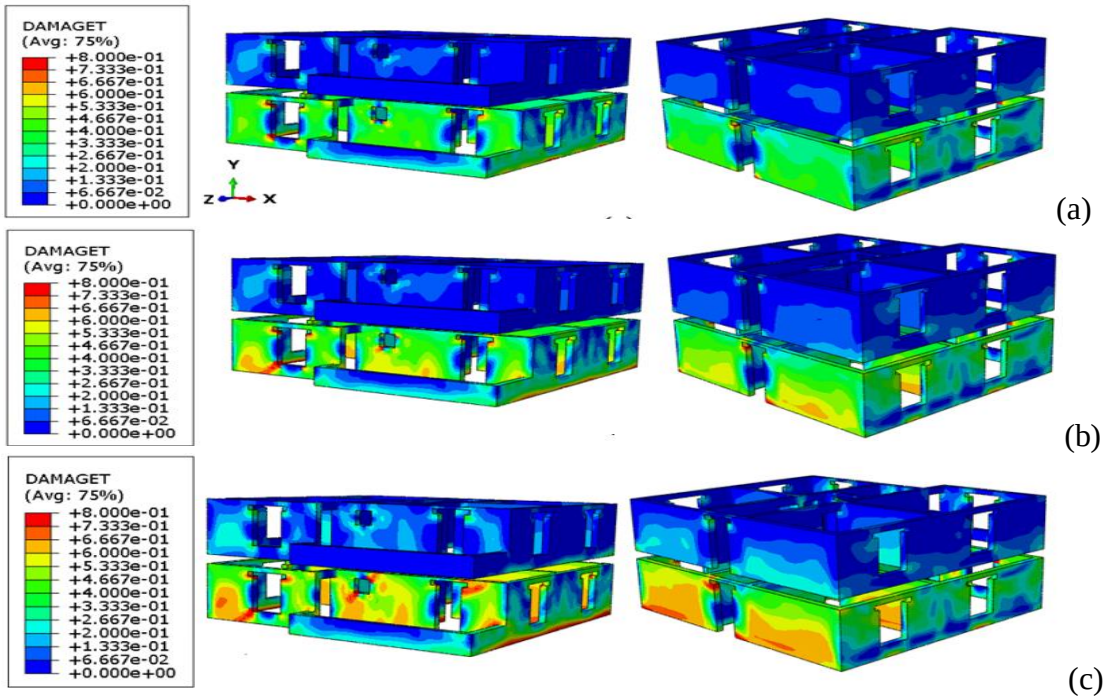
Hasarlı ve onarılmş durumlar için iki katlı yığma bina olarak dolu briket ve gazbeton ile modellenmesinden alınan analiz sonuçlarına bakıldığında SH durumunda sağlanması istenilen öteleme sınır değerlerinin aşıldığı belirlenmiştir. Ancak KH ve GÖ sınır durumlarında tüm durumlarda öteleme sınır koşullarının sağlandığı görülmüştür. Güçlendilmiş modelleri, yer değiştirmelerdeki oranı değerlerinin önemli ölçüde ortalama iki kat azaldığını göstermiştir. Tek katmanlı Tekstil donatılı harç (TRM) kullanılarak güçlendirme nedeniyle yer değiştirme yüzdeleri azalmaktadır. Güçlendilmiş hali için SH, KH ve GÖ sınır durumlarında tüm öteleme sınır koşullarının sağlandığı görülmüştür.

2.3.1.3. Hasarlı, Onarılmış ve Güçlendirilmiş Durumlar için Hasar Limitleri Dağılımlarının Değerlendirilmesi

Her malzeme durumu için iki katlı binaların dinamik davranışlarından elde edilen çekme gerilmelerinden oluşan hasar limit dağılımları verilmektedir. Oluşturulan hasar konturlarının elde edilmesinin ardından, yığma duvarlarda hasar dağılımları belirlenmesi için normalleştirilmiş renk çıkarımına dayalı tamamen görsel bir yaklaşımı benimsemeye çalışılmaktadır. Hasar dağılımları, değişen derecelerde potansiyel hasar bölgelerini belirtmek için yazılımında kullanılan farklı renklere benzetilerek dört renge ayrılmaktadır. Dört renk kırmızı (yüksek potansiyel hasar bölgesi), mavi (sıfır hasar bölgesi), sarı ve yeşil (orta potansiyel hasar bölgesi) çekme çatlaklarının beklendiği potansiyel hasar bölgeleridir. Hasarlı durumu için farklı malzeme durumlarına göre duvarlarda oluşan hasar limitleri dağılımı oluşmaktadır. Farklı zaman noktalarındaki gelişimi sırasıyla 2,85 saniye, 3,46 saniye, 4,79 saniye ve 6 saniye analiz edilmişir. Delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim malzemeli iki katlı binalar sırasıyla Şekil 2.102, Şekil 2.103, Şekil 2.104 ve Şekil 2.105'te verilmektedir.

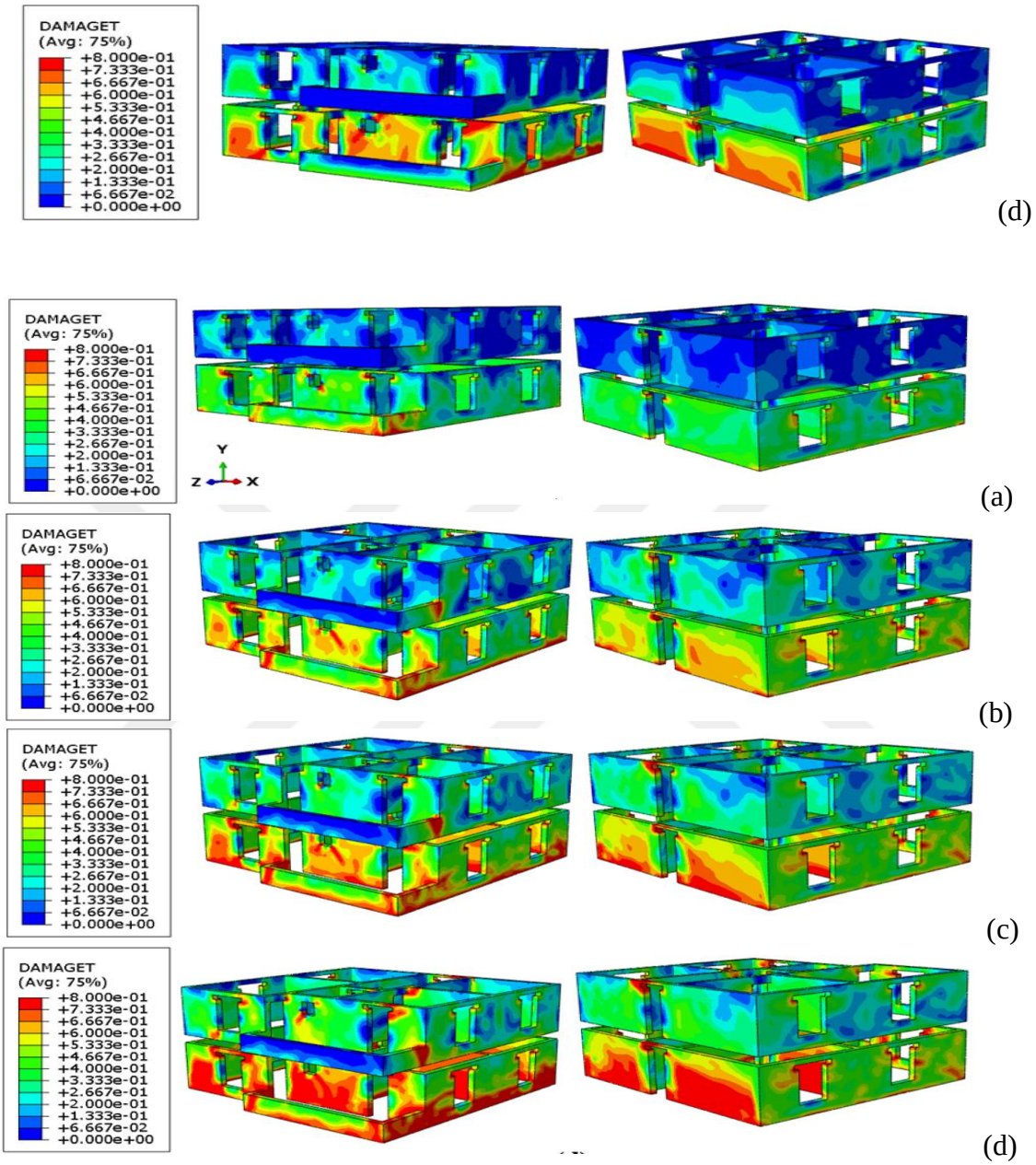


Şekil 2.102. Hasarlı iki katlı delikli tuğla modeli çekme hasar limit dağılımları

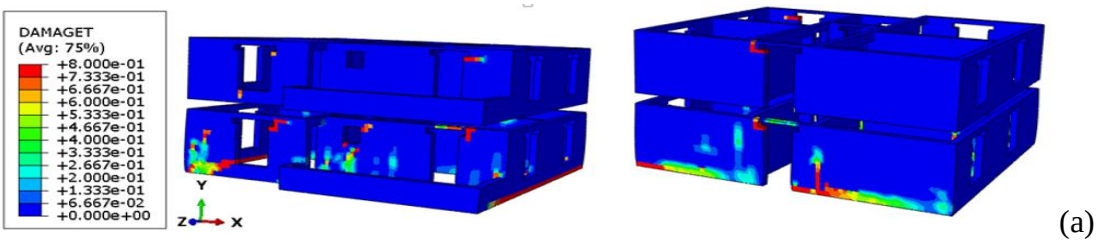


Şekil 2.103. Hasarlı iki katlı dolu briket modeli çekme hasar limit dağılımları

Şekil 2.103'ün devamı,

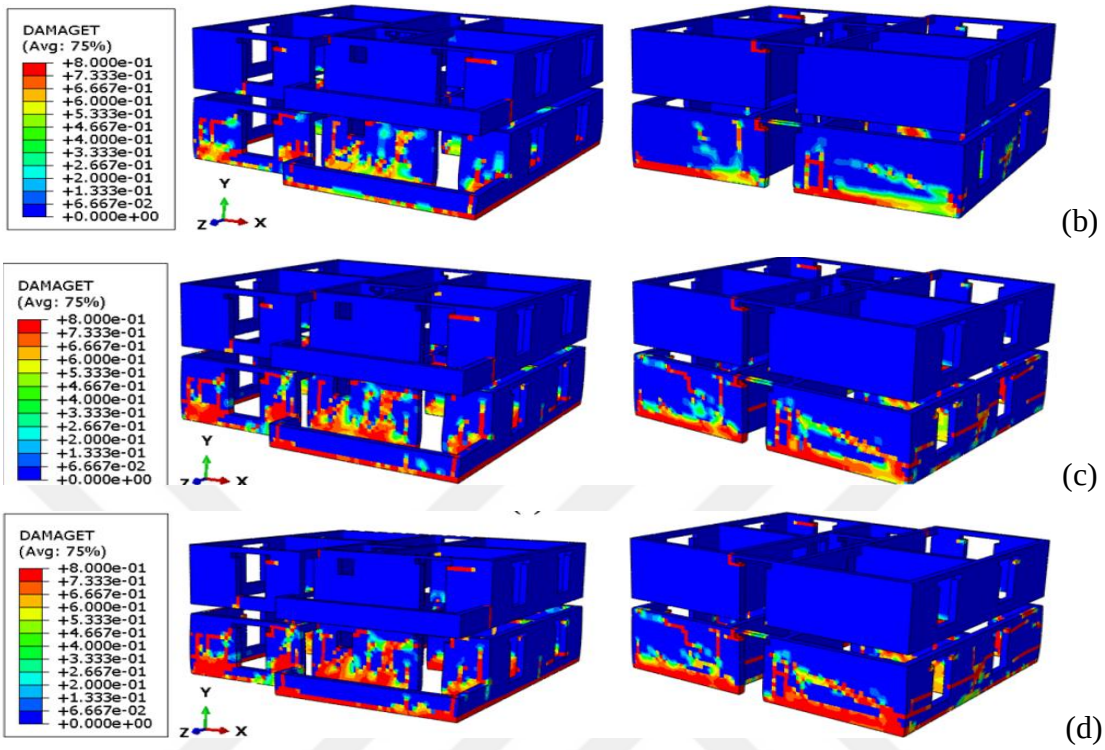


Şekil 2.104. Hasarlı iki katlı gazbeton modeli çekme hasar limit dağılımları

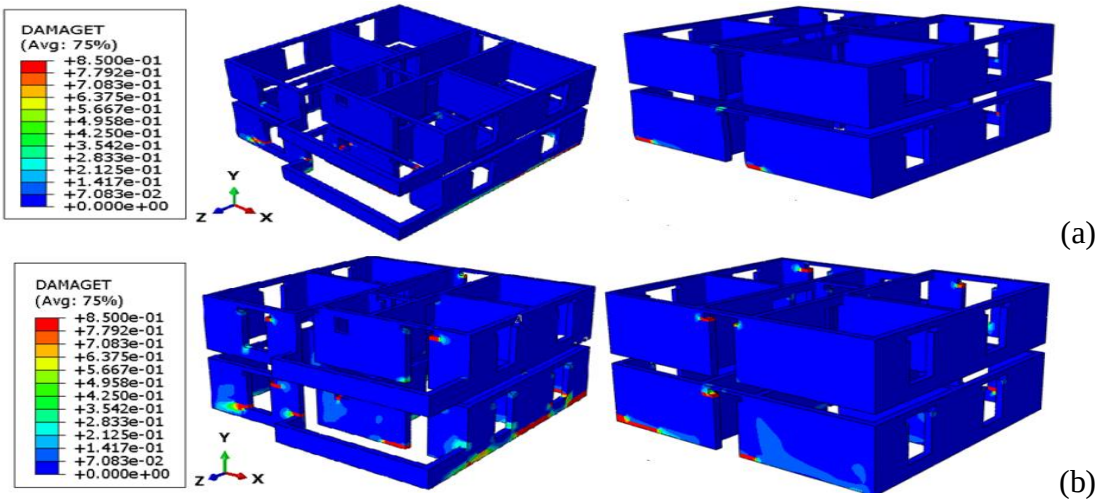


Şekil 2.105. Hasarlı iki katlı kilitli yığma birim modeli çekme hasar limit dağılımları

Şekil 105'in devamı,

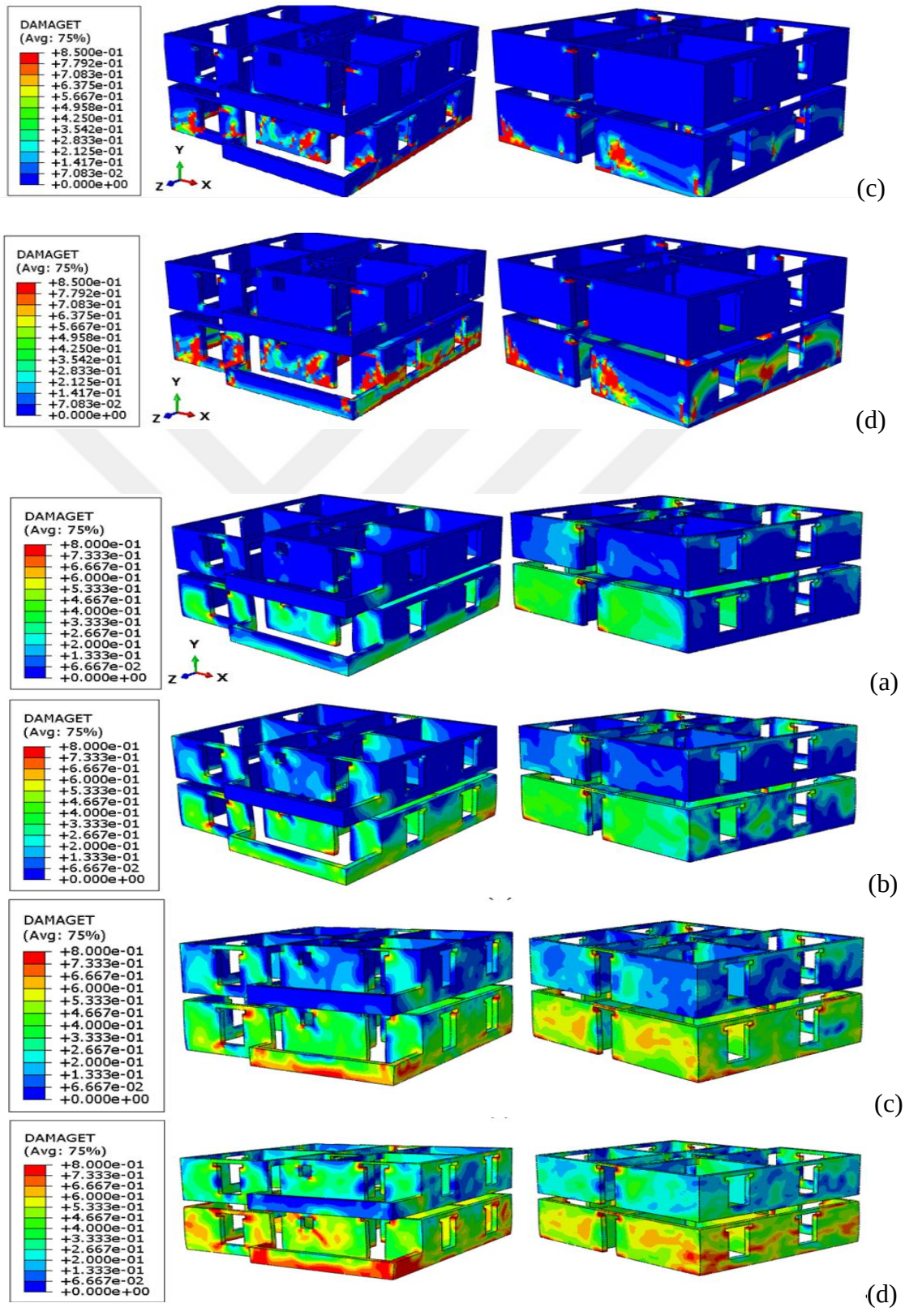


Onarılmış hali için farklı yığma yapı malzemesinin durumlarına göre delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim iki katlı binalar altında çekmeden oluşan hasar limitleri dağılımı sırasıyla Şekil 2.106, Şekil 2.107, Şekil 2.108 ve Şekil 2.109'da verilmiştir.

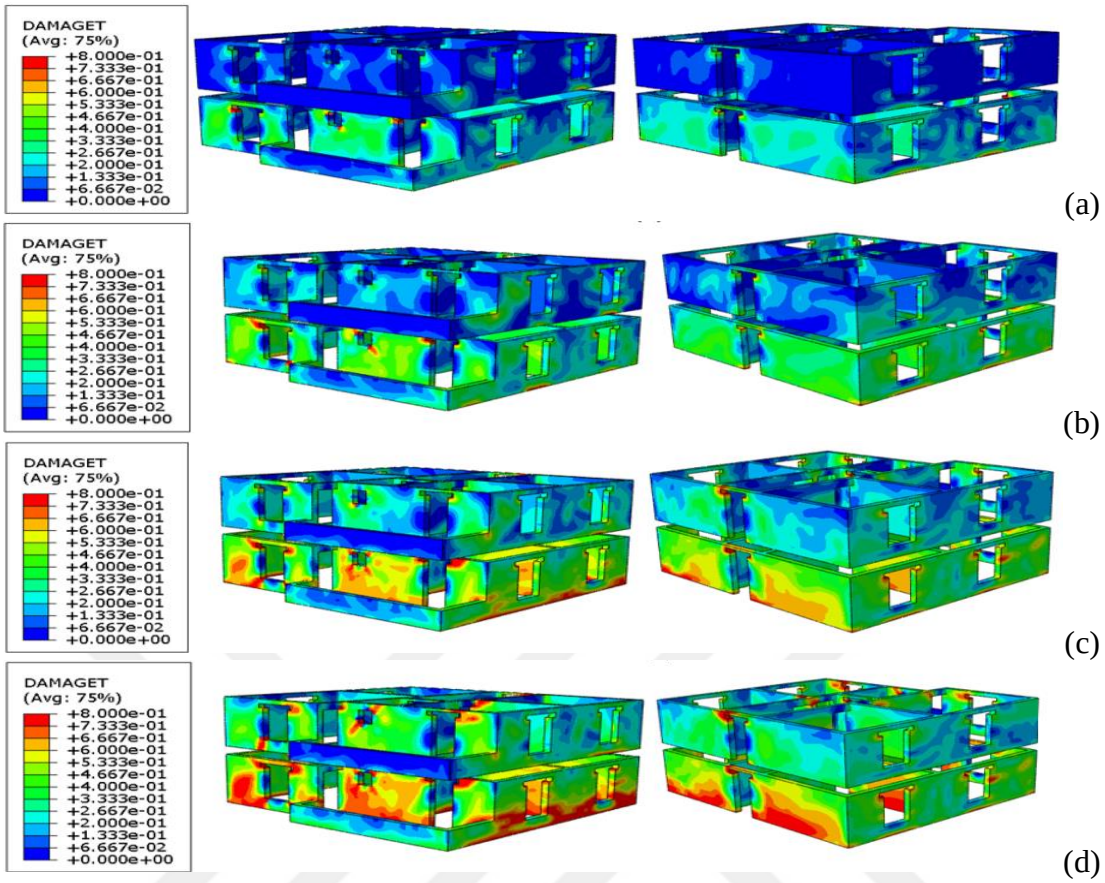


Şekil 2.106. Onarılmış iki katlı deliki tuğla modeli çekme hasar limit dağılımları

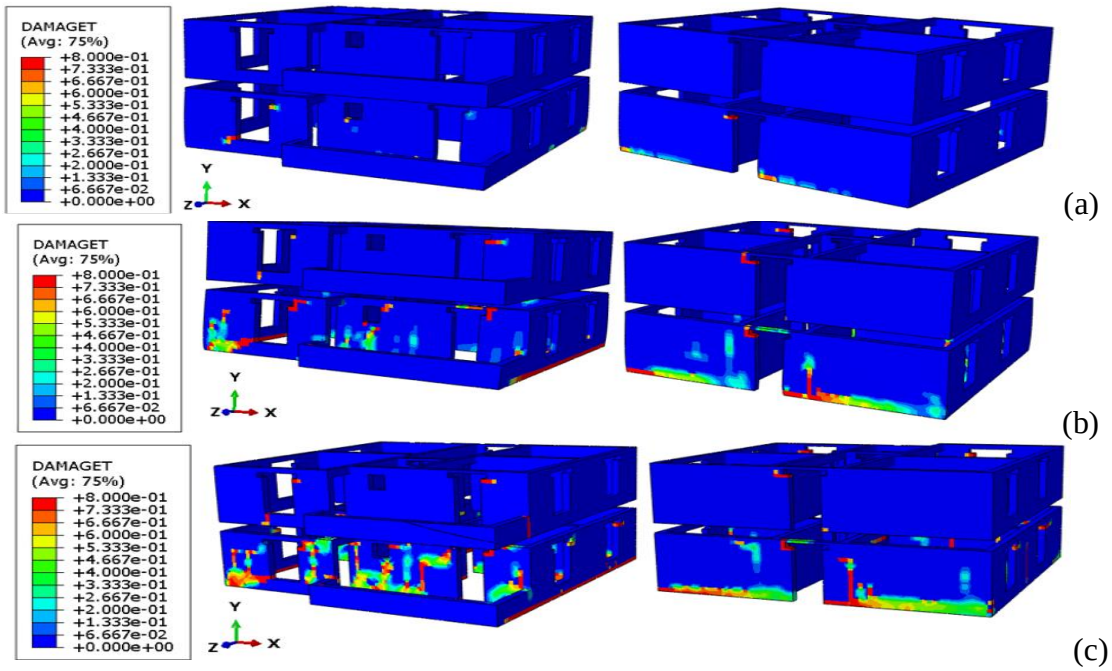
Şekil 2.106'nın devamı,



Şekil 2.107. Onarılmış iki katlı deliki tuğla modeli çekme hasar limit dağılımları

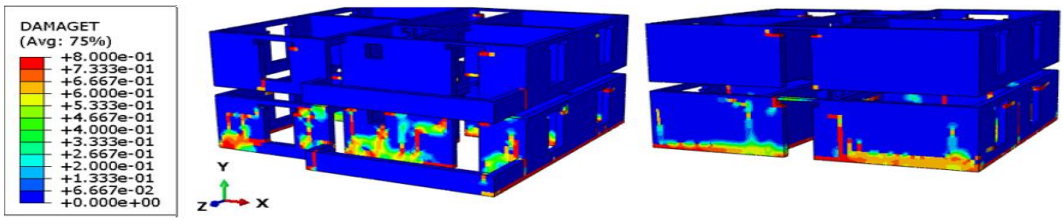


Şekil 2.108. Onarılmış iki katlı gazbeton modeli çekme hasar limit dağılımları



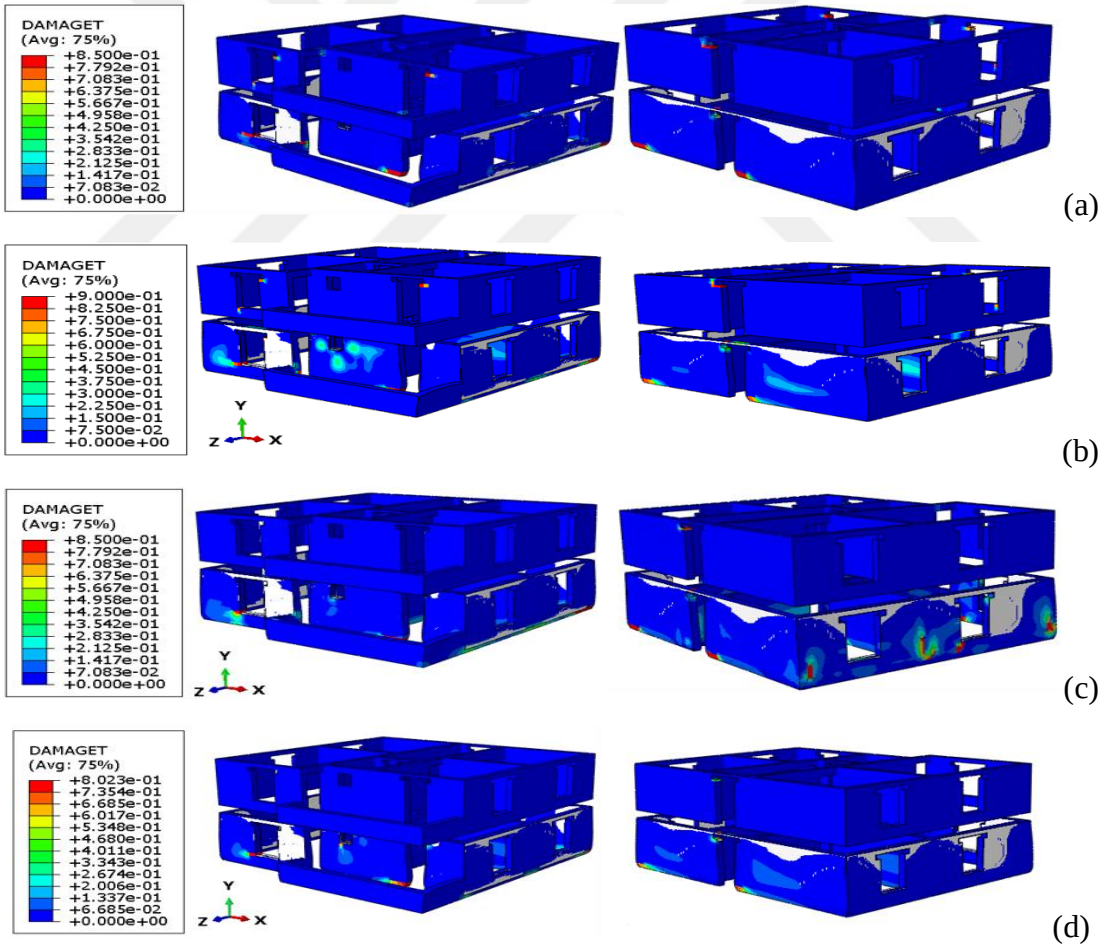
Şekil 2.109. Onarılmış iki katlı kilitli yığma modeli çekme hasar limit dağılımları

Şekil 2.109'un devamı,



(d)

Güçlendirilmiş hali için farklı yığma yapı malzemesinin durumlarına göre delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim iki katlı binalar altında çekme gerilmden oluşan hasar limitleri dağılımı her bir model için sırasıyla Şekil 2.110'da verilmiştir. iki katlı binaların birinci kat dış yüzeyleri TRM ile güçlendirilmiştir.



(a)

(b)

(c)

(d)

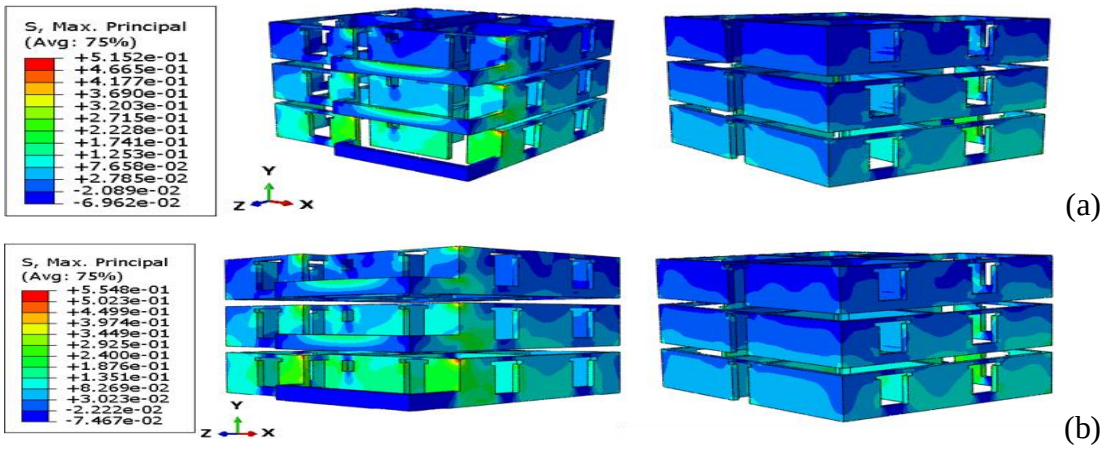
Şekil 2.110. Güçlendirilmiş iki katlı için çekme hasar limit dağılım diyagramları

Şekil 2.110 incelendiğinde, hasar dağılımları alt katta üst kata göre daha büyük olmasına rağmen, güçlendirilmiş duvarlardaki dayanım gerilmelerin daha yüksek olması nedeniyle alt katlarda duvarların çekme kaynaklı göçmeye karşı dayanımı daha yüksektir. TRM ile güçlendilmiş nedeniyle farklı malzeme durum duvarlarında çok az hasar dağımları elde edilmektedir. Gazbeton modeli diğer modellerine göre hasar biçimleri, sismik harekete paralel olarak birinci kat altında daha fazla oluşmaktadır. Düzlem dışı doğu cephenin orta duvar kısmında düşey çatlaklar ve duvarın sol alt ve sağ alt köşelerinde diyagonal hasarı gözlenmektedir. Bunun yanında kilitli yığma birim model duvarlarda oluşan hasar biçimlerinin oranı diğer malzeme durum modellerine daha azdır. Sonuç olarak doğal frekansları, çekme gerilmesi ve yerdegiştirme açısından çok daha düşük iyileştirmelere ulaşan onarım yöntemi açısından ve güçlendirme tekniğinin faydalarını doğrulamıştır.

2.3.2. Üç Katlı Yığma Bina Modelleri

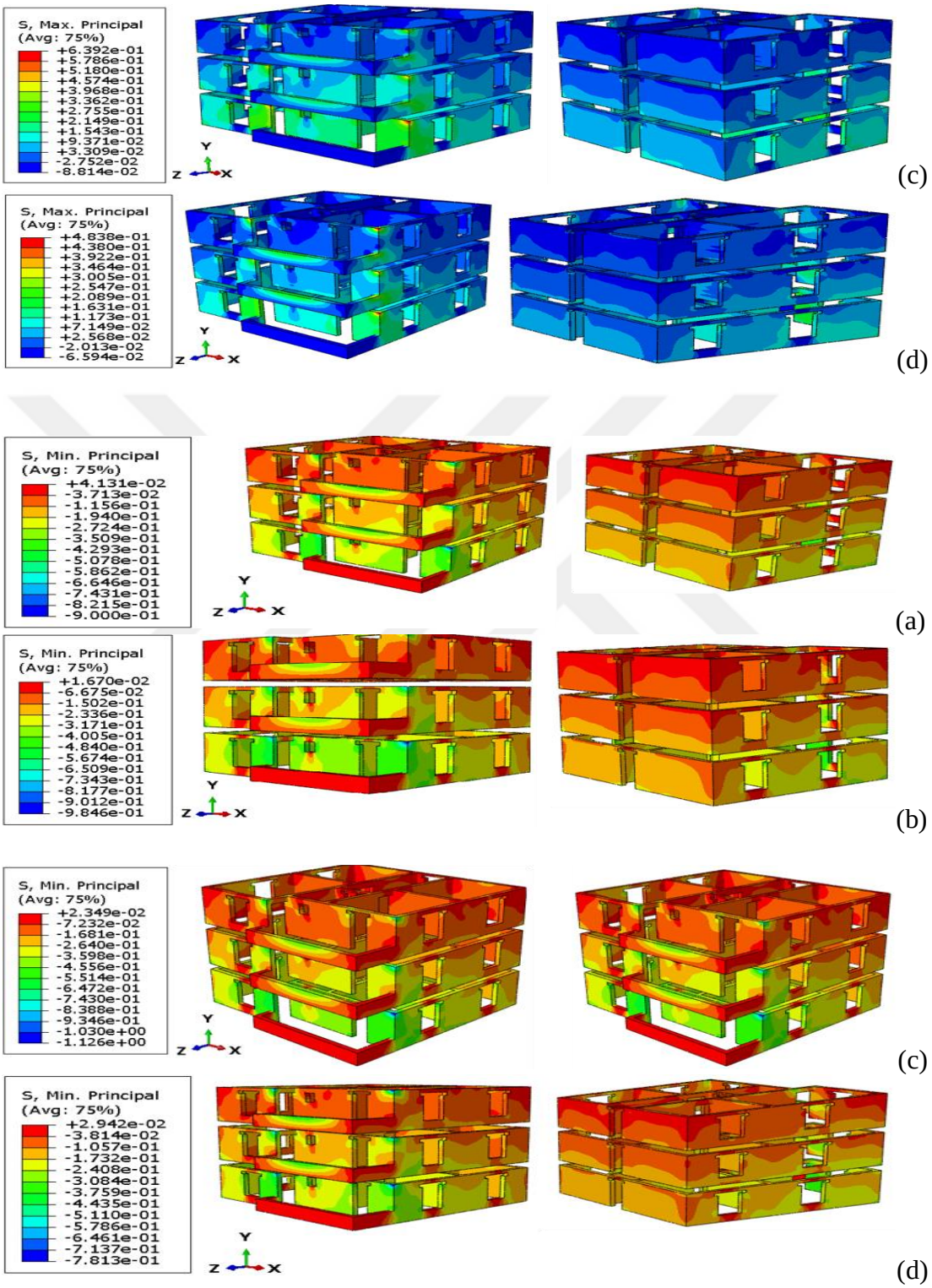
2.3.2.1. Statik Analizi

Çalışma kapsamında üç katlı yığma bina meydana gelen gerilmeler de elde edilmiştir. Üç katlı yığma binaların doğrusal olmayan gerilme analizden elde edilen çekme gerilme değerleri delikli tuğla, gazbeton, dolu briket ve kilitli yığma birim ayrı ayrı olmak üzere kontur diyagramları sırasıyla Şekil 2.111'de verilmektedir. Basınç gerilme değerleri ise sırasıyla Şekil 2.112'de gösterilmektedir. Üç katlı yığma binalarda en düşük ve en büyük gerilmenin oluştuğu andaki gerilme dağılım konturları göstermektedir.



Şekil 2.111. Üç katlı binaların statik analizinden elde edilen basınç gerilme konturları

Şekil 2.111'in devamı,



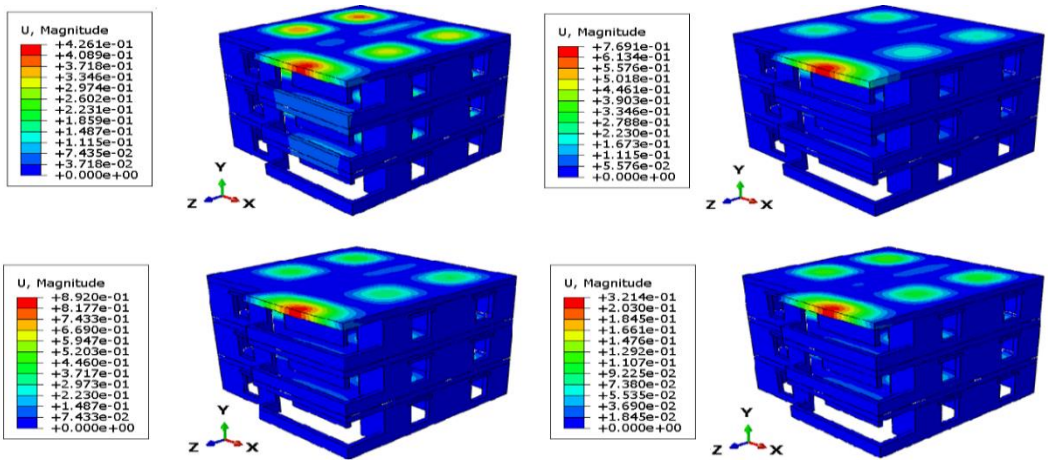
Şekil 2.112. Üç katlı binaların statik analizinden elde edilen basınç gerilme konturları

Şekil 2.111 ve Şekil 2.112 incelendiğinde tüm malzeme durumları için çekme ve basınç gerilme değerleri binanın birinci katının kuzey duvarlarında gözlenmiştir. Gazbeton malzeme durumu için en büyük gerilme değerleri, çekmede 0.64MPa ve basınç gerilmesinde 1.13MPa ile e kuzey duvar kesişim ve birleşim bölgelerinde bölgesinde gözlenmiştir. Öte yandan, en küçük gerilme değerleri çekmede 0.48MPa ve basınçta 0.78MPa ile kilitli yığma birim malzeme durumunda oluştuğu görülmüştür. Delikli tuğla, dolu briket, gazbeton, ve kilitli yığma birim kullanılarak üç katlı binaların analizler sonucunda en düşük ve en büyük gerilme değerleri elde edilmiştir. Bu gerilmeler deprem esnasında duvarlarda ciddi çatlakların oluşmasına neden oluşabilir. Elde edilen gerilme değerleri Tablo 2.55'te görülmektedir.

Tablo 2.55. Farklı malzeme modelleri hasarsız durumundan elde edilen basınç ve çekme gerilme değerlerinin karşılaştırılması

Gerilme Tipi	Farklı Malzeme Durumları (MPa)			
	Delikli Tuğla	Dolu Briket	Gazbeton	Kilitli Yığma Birim
Çekme Gerilmesi	0.52	0.55	0.64	0.48
Basınç Gerilmesi	0.69	0.98	1.13	0.78

Şekil 2.113'te görüldüğü gibi delikli tuğla, dolu briket gazbeton ve kilitli yığma birim malzeme durumu için maksimum yer değiştirme değerleri sırasıyla 0.43mm, 0.77mm, 0.89 mm ve 0.32mm'dir. Tüm malzeme durumları için üç katlı yığma yapıların üçüncü katında maksimum yer değiştirme benzer bölgede görülmektedir.



Şekil 2.113. Üç katlı bina için yerdeğiştirme değerleri (a) delikli tuğla (b) dolu briket (c) gazbeton ve (d) kilitli yığma birim

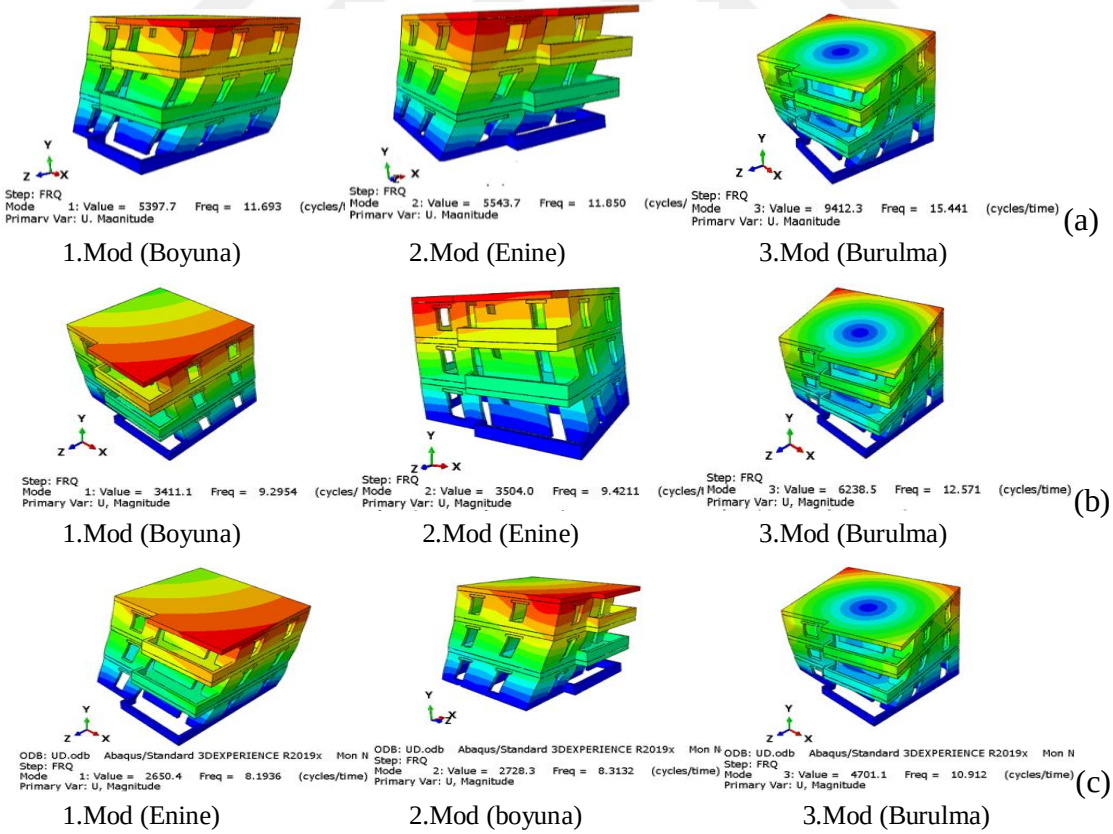
2.3.2.2. Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Hasarsız durumu için delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim modellerine ait üç katlı olarak analiz sonuçlarından elde edilen ilk üç doğal frekans değerinin karşılaştırılması Tablo 2.56'da verilmektedir.

Tablo 2.56. Üç katlı bina hasarsız durumu için frekans değerlerinin karşılaştırılması

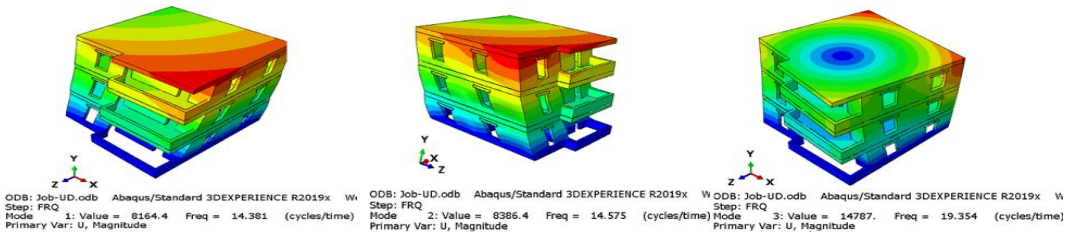
Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)			
	DelikliTuğla	Dolu Briket	Gazbeton	Kilitli Yığma Birim
1	11.69	9.29	8.19	14.38
2	11.85	9.42	8.31	14.58
3	15.44	12.57	10.91	19.35

Hasarsız durumu için delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim üç katlı modelinin ilk üç mod şekli sırasıyla Şekil 2.114'te gösterilmektedir.



Şekil 2.114. Hasarsız durumu için üç katlı modellerine ait mod şekilleri

Şekil 2.114'ün devamı,

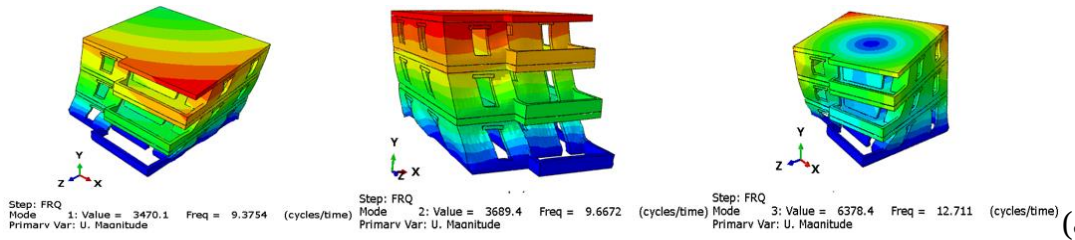


1.mod (enine) 2.mod (boyuna) 3.mod (burulma) (d)

Şekil 2.114 (a) ve Şekil 2.114 (b) incelendiğinde, delikli tuğla ve dolu briket modelleri için sırasıyla birinci ve ikinci mod şekilerinde boyuna ve enine ötelenme, üçüncü mod şeklinde burulma modu elde edildiği görülmektedir. Gazbeton ve kilitli yığma birim modelleri için sırasıyla birinci ve ikinci mod şekilerinde enine ve boyuna ötelenme, üçüncü mod şeklinde burulma modu Şekil 2.114 (c) ve Şekil 2.114 (d)'de verilmektedir. Hasarlı durum için deliki tuğla, gazbeton, dolu briket ve kilitli yığma birim modellerine ait üç katlı olarak analiz sonuçlarından elde edilen ilk üç doğal frekans değerinin karşılaştırılması Tablo 2.57'da verilmektedir. Hasarlı durumu için delikli tuğla, gazbeton, dolu briket ve kilitli yığma birim modellerin ilk üç mod şekli için mod şekilleri sırasıyla Şekil 2.115'te gösterilmektedir.

Tablo 2.57. Hasarlı durumu için üç katlı olarak elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması

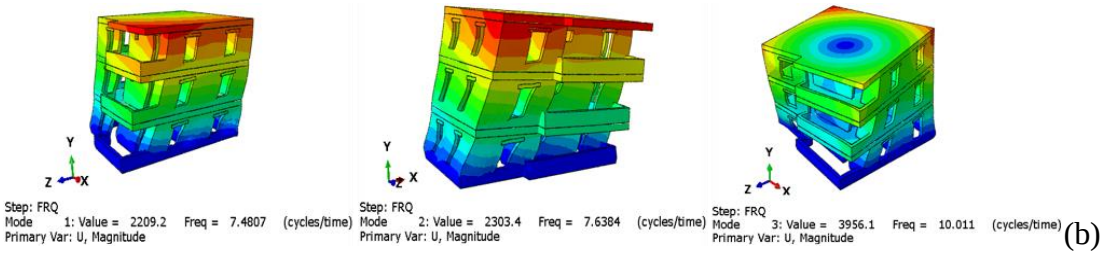
Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)			
	Delikli Tuğla	Dolu Briket	Gazbeton	Kilitli Yığma Birim
1	9.38	7.48	6.91	11.89
2	9.67	7.64	7.13	12.30
3	12.71	10.01	9.07	16.45



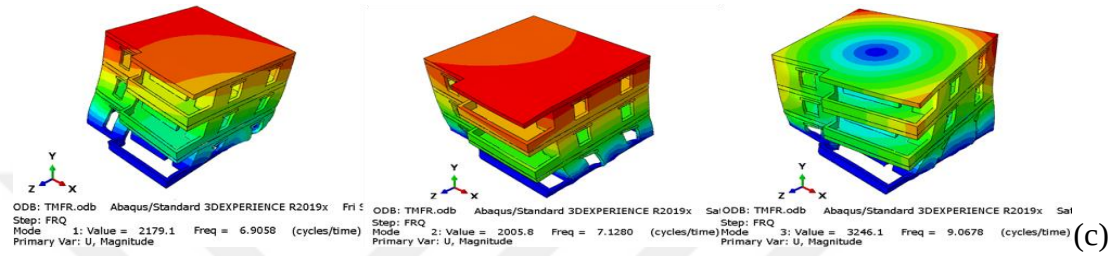
1.Mod (Boyuna) 2.Mod (Enine) 3.Mod (Burulma) (a)

Şekil 2.115. Hasarlı durumu için üç katlı bina modellerine ait mod şekilleri

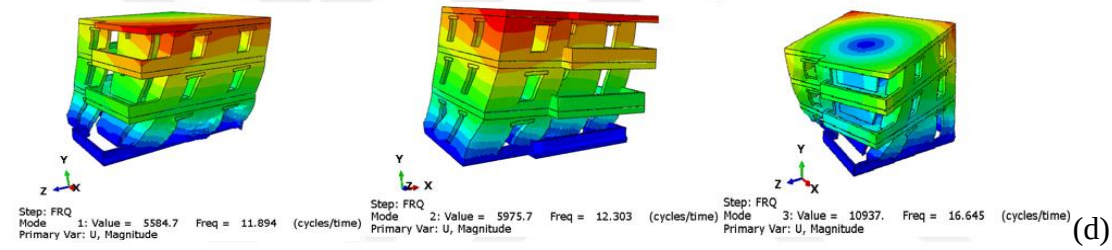
Şekil 2.115'in devamı,



1.Mod (Boyuna) 2.Mod (Enine) 3.Mod (Burulma) (b)



1.Mod (Boyuna) 2.Mod (Enine) 3.Mod (Burulma) (c)

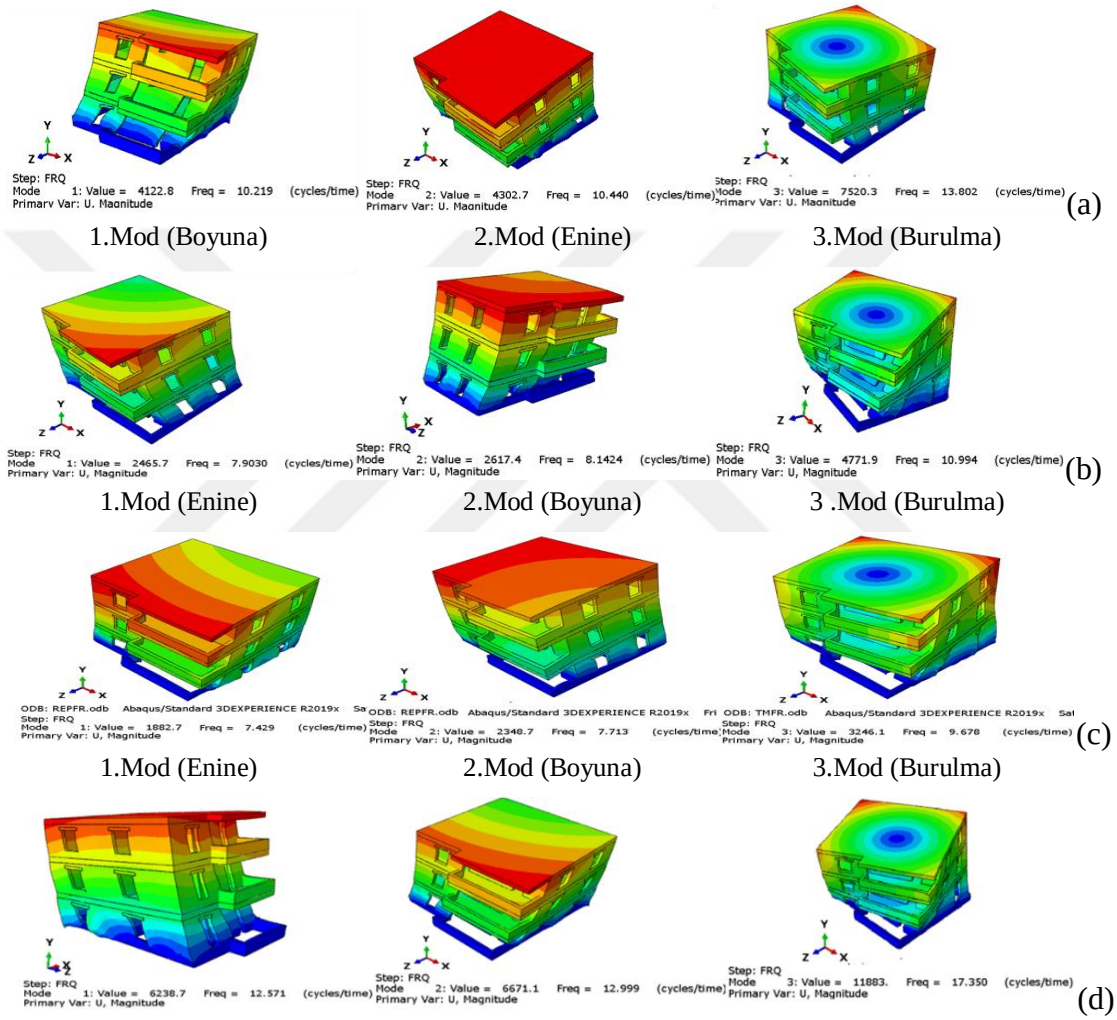


1.Mod (Enine) 2.Mod (Boyuna) 3.Mod (Burulma) (d)

Şekil 2.115 incelendiğinde, delikli tuğla, dolu briket ve gazbeton modelleri sırasıyla birinci ve ikinci modda bina rijitliğine bağlı olarak boyuna ve enine doğrultuda ötelenme ve üçüncü modda ise burulma elde edildiği görülmektedir. Binanın boyuna ve enine doğrultudaki rijitlikleri değerlendirildiğinde ise boyuna doğrultudaki rijitliğin daha az olduğu görülmektedir. Ancak kilitli yığma birim modelleri ilk iki modun şekilleri sırasıyla enine ve boyuna doğrultuda ötelenme, son modda burulma modu olduğu tespit edilmektedir. Binanın enine ve boyuna doğrultudaki rijitlikleri değerlendirildiğinde ise enine doğrultudaki rijitliğin daha az olduğu görülmektedir. Farklı yığma yapılardaki çatlaklar ve diğer bölgesel hasar biçimleri rijitlikte bir azalma sağlayabilir. Rijitlikte lokalize değişiklikler, yığma binalarında lokalize değişikliklerle birlikte mod şekilleriyle sonuçlanır (mod şeklilerindeki değişiklikler, duvarlar boyunca rijitlikteki değişiklikleri yansıtabilir). Analizden elde edilen sonuçlarına göre ilk üç doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması Tablo 2.58'da verilmektedir. Onarılmış durumu için deliki tuğla, gazbeton, dolu briket ve kilitli yığma birim modelinin ilk üç mod şekli için mod şekilleri Şekil 2.116'da elde gösterilmiştir.

Tablo 2.58. Onarılmış durumu için üç katlı olarak elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)			
	Delikli Tuğla	Dolu Briket	Gazbeton	Kilitli Yığma Birim
1	10.22	7.90	7.43	12.57
2	10.44	8.14	7.71	13.00
3	13.80	11.00	9.70	17.35



Şekil 2.116. Onarılmış durumu için üç katlı binalarına ait mod şekilleri

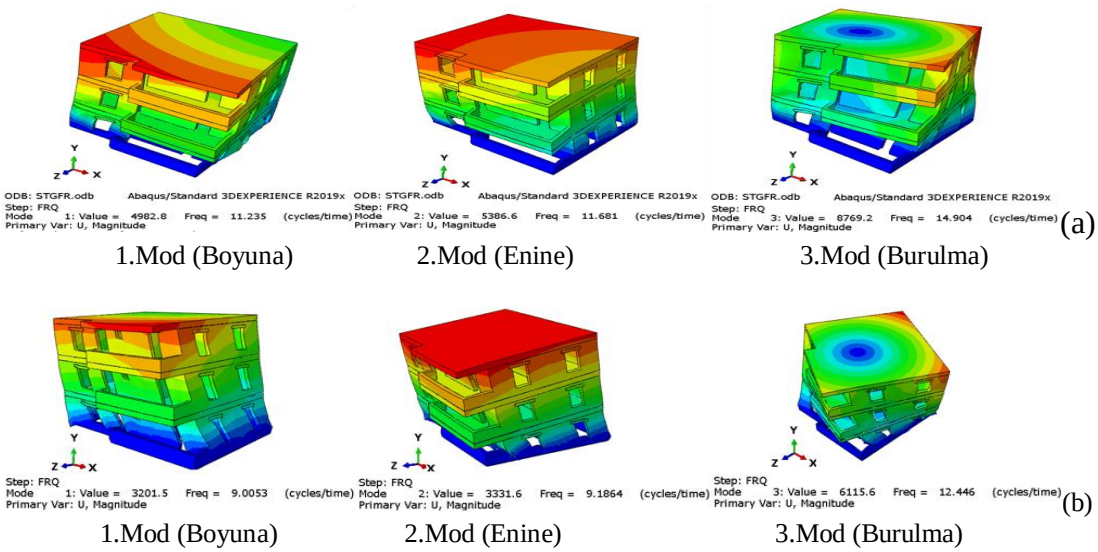
Şekil 2.116 incelendiğinde, delikli tuğla ve kilitli yığma birim malzeme durumları sırasıyla birinci ve ikinci mod şekillerinde boyuna ve enine doğrultuda öteleme, üçüncü modda ise burulma modu elde edildiği görülmektedir. Delikli tuğla ve kilitli yığma birim kullanımıyla binanın boyuna ve enine doğrultudaki rijitlikleri değerlendirildiğinde ise, binanın birinci modunun boyuna doğrultuda olması bu doğrultudaki rijitliğin daha az

olduğunun bir göstergesidir. Boyuna öteleme modunun çapraz doğrultusuna kaymış olması binada bir dış merkezlilik güçlü asimetrisi olabileceğini işaret etmektedir. Ancak dolu briket ve gazbeton modelleri için ilk iki modunun sırasıyla enine doğrultuda öteleme ve boyuna doğrultuda öteleme, üçüncü modun ise burulma modu olduğu tespit edilmektedir.

Hasarlı ve onarım durumları için delikli tuğla modeli için ötelenme modunda farklılık göstermemekte iken dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim modeli için enine doğrultuda öteleme, boyuna doğrultuda öteleme ve burulma modları şeklinde sıralama değişmiştir. Onarım malzemesinin uygulaması sonrasında doğal frekans değerlerini %7-%10 arasında artığı görülebilmektedir. Yığma duvarların elastisite modülünün artması, yığma yapı doğal frekans değerlerinin ciddi şekilde artmasına neden olmuş ve aynı mod şeklin tipini etkilemiştir. Güçlendirilmiş durum için modellerine ait üç katlı olarak analiz sonuçlarından elde edilen ilk üç frekans değerinin karşılaştırılması Tablo 2.59'da verilmektedir. Güçlendirmiş durumu için delikli tuğla, gazbeton, dolu briket ve kilitli yığma birim modelinin ilk üç mod şekli için mod şekilleri 2.117'de elde edilmiştir.

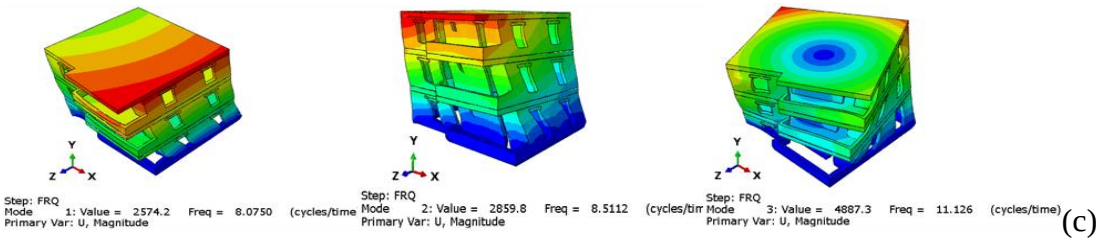
Tablo 2.59. Güçlendirmiş durumu için ait üç katlı olarak elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)			
	Tuğla	Briket	Gazbeton	Kilitli yığma birim
1	11.24	9.01	8.08	14.75
2	11.68	9.18	8.51	15.26
3	14.90	12.45	11.13	20.44



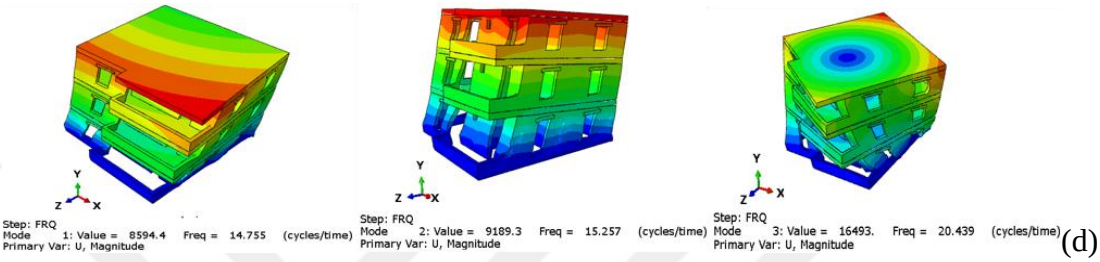
Şekil 2.117. Güçlendirme durumu için üç katlı bina modellerine ait mod şekilleri

Şekil 2.117'nin devamı,



(c)

1.Mod (Boyuna) 2.Mod (Enine) 3.Mod (Burulma)



(d)

1.Mod (Enine) 2.Mod (Boyuna) 3.Mod (Burulma)

Şekil 2.117 incelendiğinde, tuğla, dolu briket ve kilitli yığma birim malzeme durumları sırasıyla birinci ve ikinci mod şekillerinde boyuna ve enine ötelenme, üçüncü mod şeklinde burulma modu elde edildiği görülmektedir. Binaların birinci modunun boyuna doğrultuda olması bu doğrultudaki rijitliğin daha az olduğunun bir göstergesidir. Boyuna öteleme modunun çapraz doğrultusuna kaymış olması binada bir dış merkezlilik güçlü asimetrisi olabileceğini işaret etmektedir. Gazbeton model ise sırasıyla birinci ve ikinci mod şekillerinde enine ve boyuna ötelenme, üçüncü mod şeklinde burulma ötelenme modu Şekil 2.117(c)'te verilmektedir. Elastisite modülü en küçük olan gazbeton ve dolu briket güçlendirilmiş binaların mod şeklinde sıralama değiştirdiğini göstermektedir. Her malzeme frekansları değişimi göstermek için üç katlı binaların hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 2.60, Tablo 2.61, Tablo 2.62 ve Tablo 2.63'ta özetlenmitir.

Tablo 2.60. Delikli tuğla üç katlı bina rijitlik değişimi sonuçlar karşılaştırılması

Mod Numarası	Delikli Tuğla Modelin Rijitlik Değişimi (%)						
	Hasarsız	Fark(%)	Hasarlı	Fark(%)	Onarım	Fark(%)	Güçlendirme
1	11.69	- 19.76	9.38	8.90	10.22	9.98	11.24
2	11.85	- 18.40	9.67	7.96	10.44	11.88	11.68
3	15.44	- 17.68	12.71	8.58	13.80	7.97	14.90
Ortalama	12.99	-18.50	10.59	8.48	11.49	9.95	12.61

Tablo 2.61. Dolu briket üç katlı bina rijitlik değişimi sonuçlarının karşılaştırılması

Mod Numarası	Dolu Briket Modelin Rijitlik Değişimi (%)						
	Hasarsız	Fark(%)	Hasarlı	Fark(%)	Onarım	Fark(%)	Güçlendirme
1	9.29	- 19.48	7.48	5.61	7.90	14.05	9.01
2	9.42	- 18.89	7.64	6.54	8.14	12.78	9.18
3	12.57	- 19.57	10.11	8.80	11.00	13.18	12.45
Ortalama	10.43	-19.36	8.41	7.13	9.01	13.32	10.21

Tablo 2.62. Gazbeton üç katlı bina rijitlik değişimi sonuçlarının karşılaştırılması

Mod Numarası	Gazbeton Modelin Rijitlik Değişimi (%)						
	Hasarsız	Fark(%)	Hasarlı	Fark(%)	Onarım	Fark(%)	Güçlendirme
1	8.19	- 15.63	6.91	7.53	7.43	8.74	8.08
2	8.31	- 14.20	7.13	8.13	7.71	10.38	8.51
3	10.91	- 16.86	9.07	6.95	9.70	14.74	11.13
Ortalma	9.14	-15.75	7.70	7.53	8.28	11.59	9.24

Tablo 2.63. Yğma birim üç katlı bina rijitlik değişimi sonuçlarının karşılaştırılması

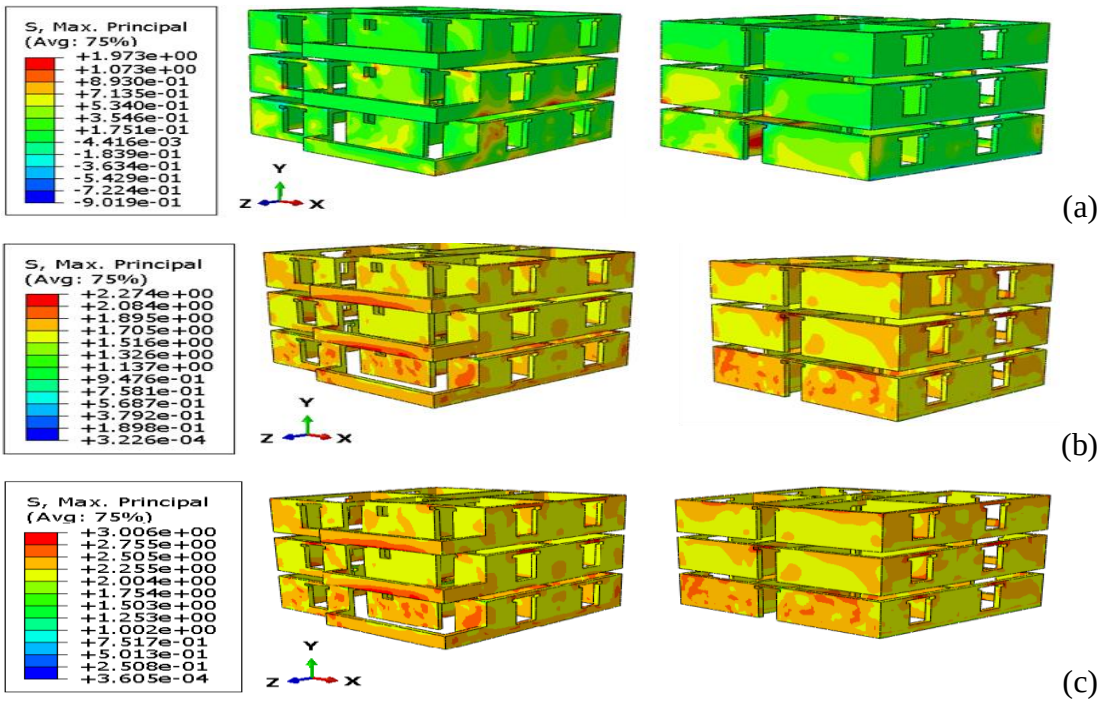
Mod Numarası	Kilitli Yğma Birim Modelin Rijitlik Değişimi(%)						
	Hasarsız	Fark (%)	Hasarlı	Fark (%)	Onarım	Fark (%)	Güçlendirme
1	14.38	- 17.32	11.89	5.72	12.57	17.34	14.75
2	14.58	- 15.64	12.30	5.70	13.00	17.38	15.26
3	19.35	- 15.00	16.45	5.47	17.35	17.80	20.44
Ortalma	16.10	-15.83	13.55	5.60	14.31	17.52	16.82

Verilen tablolarına göre, incelenen modellerde hasarsız ve hasarlı durumlarının doğal frekansları arasındaki farklar sırasıyla şu şekildedir: %18.50, %19.36, %15.76 ve %15.83. Onarım uygulamasından sonra deliki tuğla modeli için %8.48, dolu briket model için 7.13%, gazbeton için %7.53 ve kilitli yığma birim model için %5.60 frekans değerlerini artırdığını göstermektedir. Bunun için onarım önemli başarısının bir işareti olmadığı düşünülmektedir. Binalara güçlendirme yöntemi uygulanmalıdır. Ayrıca, onarılmış ve güçlendirilmiş frekans değerleri arasındaki fark sırasıyla %9.95 %13.32, %11.59 ve %17.52'tür. Güçlendirilmiş ve hasarsız durumlarının arasında delikli tuğla ve dolu briket malzemeli modeli için doğal frekans eksi değerleri olarak fark sırasıyla %2.92 ve %2.01 ayrıca, gazbeton ve kilitli yığma birim malzemeli modeli için doğal frekans pozitif değerleri olarak maksimum fark sırasıyla %1.20 % 4.35 olarak hesaplanmıştır. Son olarak güçlendirilmiş durumunun rijitliğin hasarlı durumu rijitliğine göre %19 ile %25 arttığı gözlenmektedir. Hasarlı durumlarında yapıların rijitliğini değerlerin belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Rijitlik değişimi ile yapının

doğal frekanslarındaki azalma arasında deterministik bir ilişki vardır. Onarılmış ve güçlendirilmiş uygulamalarının, rijitlik fazla değiştirmediği görülmektedir. İlerleyen doğal frekans değerlerinde onarılmış modellere göre, TRM güçlendirilmiş modellerin yaşadığı dayanım kazandığını daha yüksek olduğu görülmektedir. TRM, hasarlı yığma duvarların dayanımını geri kazanmak ve binaların davranışlarını iyileştirmek için başarıyla kullanılabilir.

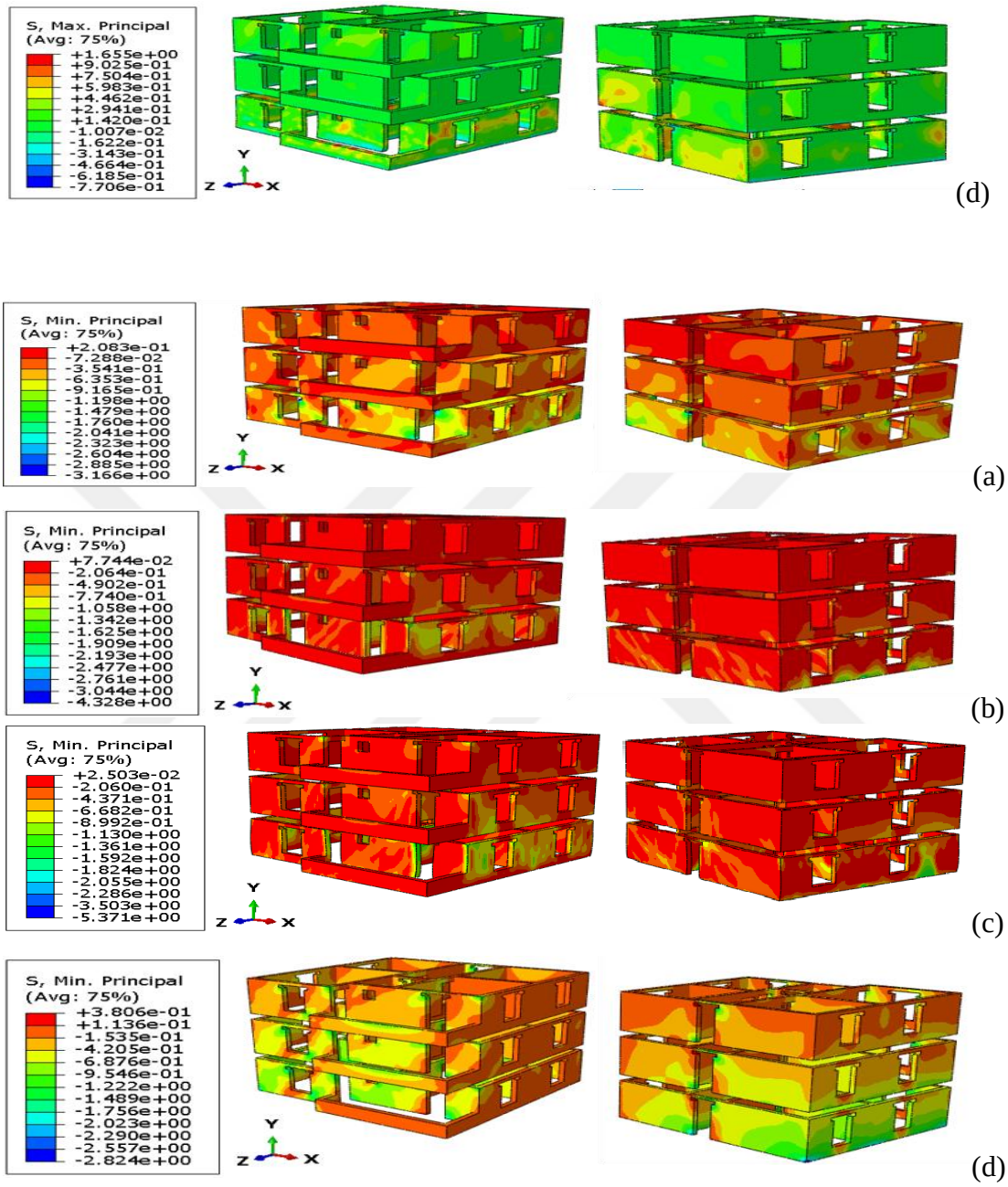
2.3.2.3. Hasarlı, Onarılmış ve Güçlendirilmiş Durumlar İçin Gerilme Değişimlerinin Değerlendirilmesi

Dört farklı malzeme durumlarına göre üç katlı yığma bina olası gerilme yığılmalarının bölgelerini belirlemek için doğrusal olmayan dinamik davranışlarından analiz elde edilmiştir. Delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim üç katlı modellerin hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumları dinamik davranışından elde edilen çekme gerilme dağılımını kontur diyagramları sırasıyla Şekil 2.118, Şekil 2.120, Şekil 2.122'de, basınç gerilme dağılımını kontur diyagramları ise sırasıyla Şekil 2.119, Şekil 2.121, Şekil 2.123'te verilmektedir.



Şekil 2.118. Hasarlı üç katlı bina için dinamik davranışından elde edilen çekme gerilmesi kontur diyagramları

Şekil 2.118'un devamı,



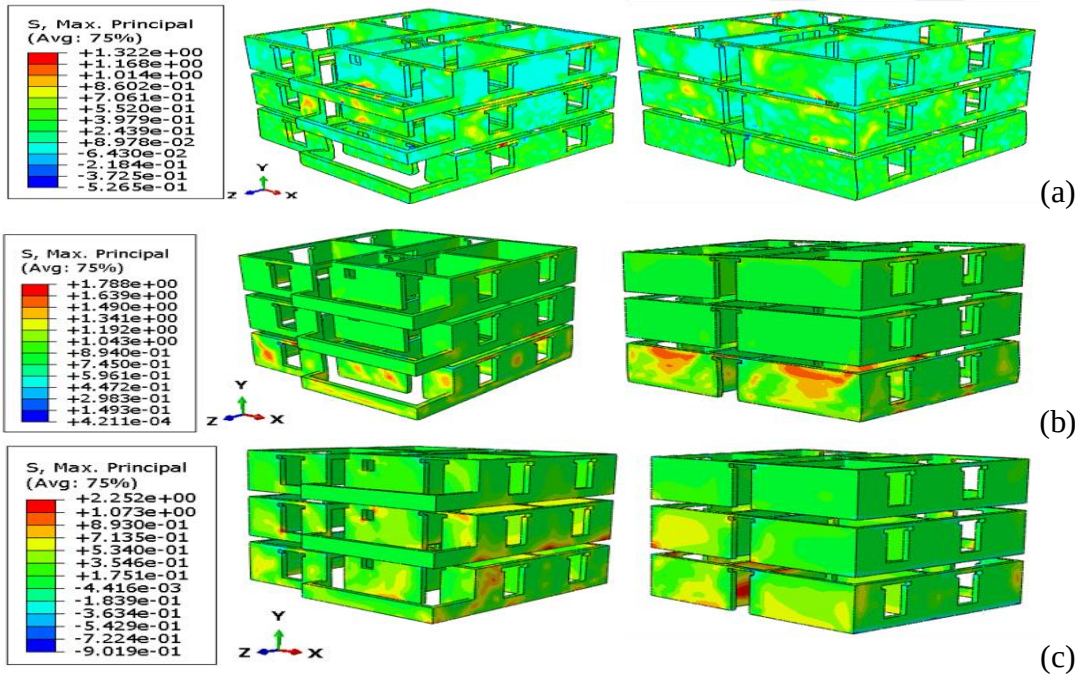
Şekil 2.119. Hasarlı üç katlı bina için dinamik davranışından elde edilen basınç gerilmesi kontur diyagramları

Farklı malzeme kullanılması durumunda hasarlı hali için yığma bina duvarlarında en büyük çekme gerilmesi (Smax) ve basınç gerilmesinin (Smin) oluştuğu andaki gerilme dağılımı belirlenmiştir. Şekil 2.118 ve 2.119'da görüldüğü gibi, çekme ve basınç gerilmesinin değerleri her modelde farklı bölgelerde dağılımlarını göstermektedir. Delikli

tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim malzeme durumlarında göre çekme gerilme değerleri üç katlı binanın üzerindeki duvarlarını sırasıyla 1.97MPa, 2.27MPa, 3.01 MPa ve 1.66MPa olarak elde edilmiştir. Çekme gerilme değerlerinin açısından en kritik bölge duvarların birinci ve ikinci katlarında oluşmaktadır. Bunun yanında birinci katlarında duvarlarında, kapı ve pencere boşlukları çevresi, duvar ve hatıl birleşimleri, duvar kesişim ve birleşim bölgelerinde gerilmelere rastlanmaktadır. Bu bölgede meydana gelen maksimum basınç gerilme değerlerini sırasıyla 3.17MPa, 4.33MPa, 5.37MPa ve 2.82MPa olarak elde edilmiştir. Çekme ve basınç gerilme değerleri farklı duvarlar çekme ve basınç emniyet gerilmesi değerleri aşmaktadır. Bu bölgelerde oldukça önemli hasarlar oluşmaktadır. Hasarlı durumundan elde edilen çekme ve basınç gerilme değerlerini Tablo 2.64'da görülmektedir.

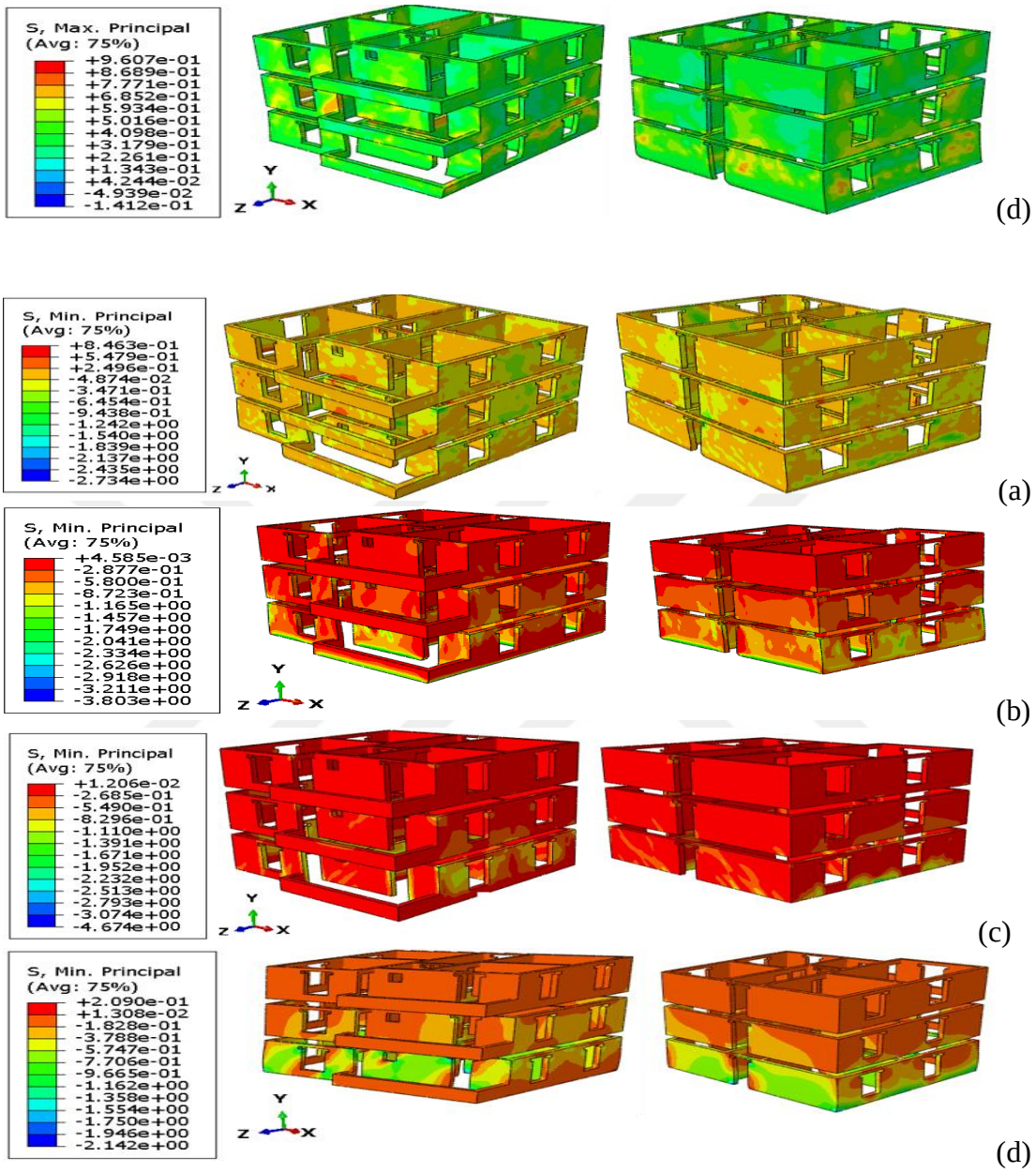
Tablo 2.64. Hasarlı durumunun doğrusal olmayan dinamik davranışlarından elde edilen çekme ve basınç gerilmesi değerlerinin karşılaştırılması

Gerilme Tipi	Farklı Malzeme Durumları (MPa)			
	Delikli Tuğla	Dolu Briket	Gazbeton	Kilitli Yığma Birim
Çekme Gerilmesi	1.97	2.27	3.01	1.66
Basınç Gerilmesi	3.17	4.33	5.37	2.82



Şekil 2.120. Onarılmış üç katlı bina için dinamik davranışından elde edilen çekme gerilmesi kontur diyagramları

Şekil 2.120'ın devamı,



Şekil 2.121. Onarılmış üç katlı bina için dinamik davranışından elde edilen basınç gerilmesi kontur diyagramları

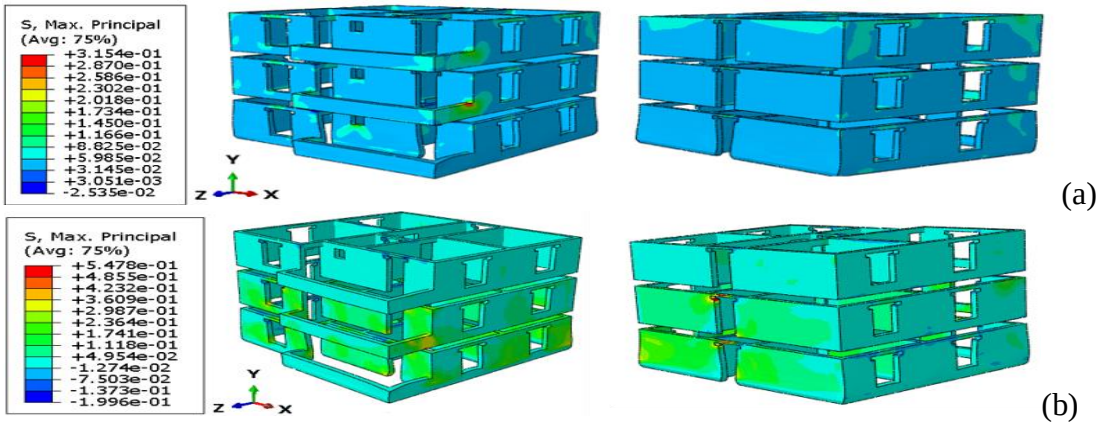
Şekil 2.120 ve 2.121'de görüldüğü gibi, onarılmış hali için farklı malzeme tiplerine göre bina duvarlarında en büyük çekme ve basınç gerilmesi her bir modelde farklı bölgelerde oluşmaktadır. Farklı malzeme durumlarına göre onarılmış hali için bina dış duvarlarında en büyük çekme ve basınç değerlerilerinin oluştuğu andaki gerilme dağılımını göstermektedir. Delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim malzeme durumlarına göre çekme

gerilmelerinin değerleri sırasıyla 1.32MPa,1.79MPa, 2.25MPa ve 0.96MPa olarak elde edilmiştir. Çekme gerilme değerlerinin açısından en kritik bölge duvarların birinci ve ikinci katlarında oluşmaktadır. Bunun yanında en yoğun gerilme dağılımları birinci ve ikinci katlarında, batı duvarda bulunan pencere üst kısımda (delikli tuğla ve kilitli yığma birim), kuzey ve güney duvarlarında bulunan kapı ve pencere boşlukları çevresi (dolu briket), iç ve dış duvarlarında, kapı ve pencere boşlukları çevresi ve duvar kesişim ve birleşim bölgelerinde(gaz beton) gerilmelere rastlanmaktadır. Bu bölgede meydana gelen maksimum basınç gerilmesi değerlerini sırasıyla 2.73MPa, 3.80MPa, 4.67MPa ve 2.14MPa olarak elde edilmiştir. Kapılar ve pencerelerin çevresindeki boşlukları, duvar ve hatıl birleşimleri, duvar kesişim ve birleşim bölgelerinde onarımla birlikte gerilme yığılmalarının derecesini bir miktar azaltmaktadır.

Çekme ve basınç gerilmelerinin değerleri farklı duvarlar çekme ve basınç emniyet değerlerlerinin aşmaktadır. Bu durumda binanın riskli olduğu söylenebilmektedir. Yığma binalar için bu kadar yüksek riskleri ortadan kaldırmak için, çekme gerilmeleri altındaki yığma malzeme eksikliği TRM güçlendirmesi ile telafi edilebilir. Onarılmış durumdan elde edilen çekme ve basınç gerilmesi değerlerini Tablo 2.65'te görülmektedir.

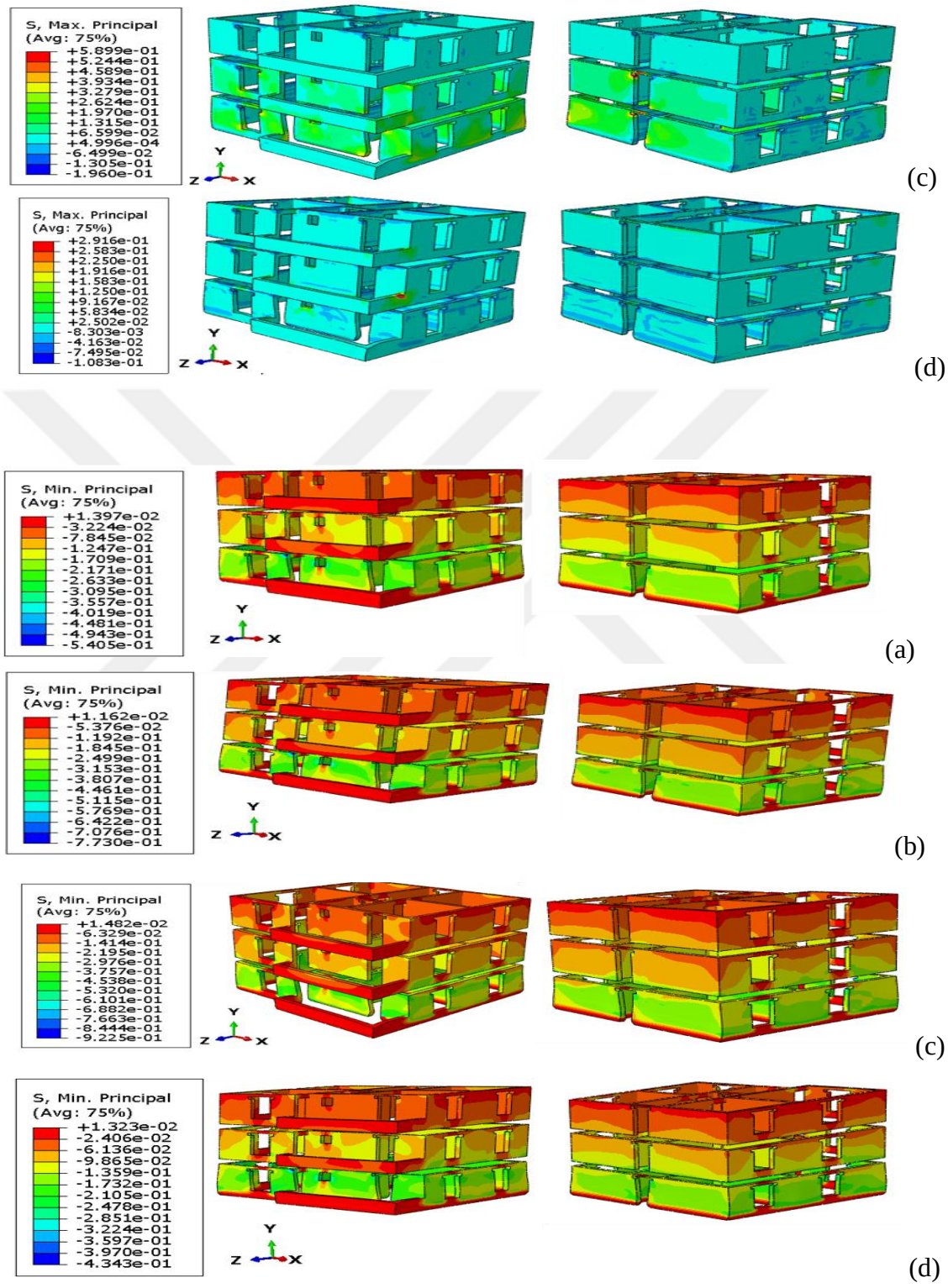
Tablo 2.65. Onarılmış durumunun doğrusal olmayan dinamik davranışlarından elde edilen çekme ve basınç gerilmesi değerlerinin karşılaştırılması

Gerilme Tipi	Farklı Malzeme Durumları (MPa)			
	Delikli Tuğla	Dolu Briket	Gazbeton	Kilitli Yığma Birim
Çekme Gerilmesi	1.32	1.79	2.25	0.96
Basınç Gerilmesi	2.73	3.80	4.67	2.14



Şekil 2.122. Güçlendirilmiş üç katlı bina için dinamik davranışından elde edilen çekme gerilmesi kontur diyagramları

Şekil 2.122'nin devamı,



Şekil 2.123. Güçlendirilmiş üç katlı bina için dinamik davranışından elde edilen basınç gerilmesi kontur diyagramları

Şekil 2.122 (a) ve 2.122 (d) incelendiğinde güçlendirilmiş hali için delikli tuğla malzeme durumunda 0.43MPa çekme emniyeti elde edilir. Çekme gerilmeleri değerlerini 0.31MPa gösteren diyagramlarda bu emniyet aralığının aşılmadığı görülmektedir. Şekil 2.122 (b) ve 2.122 (c)'de görüldüğü gibi, güçlendirilmiş hali için dolu briket ve gazbeton malzeme durumlarına göre en büyük çekme gerilmesi değerleri birinci ve ikinci katlarda farklı duvar bölgelerinde oluşmaktadır.

Dolu briket ve gazbeton malzeme durumları için çekme gerilmeleri değerleri kuzey-batı ve güney dış duvarlarında bulunan kapılar ve pencerelerin çevresindeki duvar kısımlarında yoğunlaşmıştır. Analiz sonucunda gazbeton malzeme durumu için 0.18MPa-0.23MPa aralığında çekme gerilmeleri görülmüştür. Gazbeton malzeme durumu için çekme emniyet değeri 0.26MPa olduğu, bu durumda çekme gerilme değerlerinin aşılmadığı görülmektedir. Ancak gazbeton modelin birinci ve ikinci katlarında dış duvarlar kapı boşluğuyla zayıflamış ve 0.30MPa-0.36MPa aralığında gerilmeler tespit edilmiştir. Bu gerilmeler deprem esnasında noktalarda ciddi çatlaklara sebep olabilir. Dolu briket modelde çekme emniyeti açısından ikinci kat seviyesindeki duvarlar emniyet gerilmesine yakın bir gerilme seviyesindedir, bu durum için bina duvarların az tehlikeli olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 2.119'dan anlaşılacağı üzere, çekme gerilme değerleri sonlu eleman model güçlendirme sonrası 1.32MPa'dan; delikli tuğla modelinde 0.31MPa- 1.79MPa; dolu briket modelinde 0.34MPa- 2.25MPa; gazbeton modelinde 0.36 MPa-2.14 MPa ve kilitli yığma birim modelinde 0.29MPa'a azalmaktadır. Şekil 2.123 incelendiğinde, en büyük basınç gerilme değerleri ise 2.73MPa'dan; delikli tuğla modelinde 0.54MPa-3.80 MPa; dolu briket modelinde 0.77MPa-4.67MPa; gazbeton modelinde 0.92MPa-2.14MPa ve kilitli yığma birim modelinde 0.4MPa'a düşmektedir. Çekme gerilmeleri açısından en kritik bölge birinci kat duvarlarındaki kapı ve pencere çevresi ve duvar birleşim bölgelerinde görülmektedir. Birinci ve ikinci dış duvarlara TRM ile güçlendirilmesinden sonra çekme ve basınç gerilme değerleri ve yoğunlaşma dağılımlarında önemli azalma meydana gelmiştir. Kuzey üst sağ duvarların köşe noktalarında bulunan pencere boşluğu olan duvarlarda sırasıyla 0.54MPa, 0.77MPa, 0.92MPa ve 0.43MPa basınç gerilmelerine rastlanmaktadır.

Bu gerilmelerin, bulunduğu basınç gerilme seviyesine ait emniyet gerilmesi aşılmadığı görülmektedir. Dört farklı malzeme için güçlendirilmiş durumda elde edilen çekme ve basınç gerilmesi değerleri, hem hasarlı hem de onarılmış durumda elde edilen değerlerden daha küçüktür. TRM ile güçlendirilmesinden sonra, hem çekme hem de basınç gerilme değerlerinde ve bölgelerin yoğunluğunda önemli bir azalma meydana gelmiştir.

Güçlendirilmiş durumdan elde edilen çekme ve basınç gerilme değerleri Tablo 2.66'de görülmektedir.

Tablo 2.66. Güçlendirilmiş durum için doğrusal olmayan dinamik davranışlardan elde edilen çekme ve basınç gerilmesi değerlerinin karşılaştırılması

Gerilme Tipi	Farklı Malzeme Durumları (MPa)			
	Delikli Tuğla	Dolu Briket	Gazbeton	Kilitli Yığma Birim
Çekme Gerilmesi	0.31	0.55	0.59	0.29
Basınç Gerilmesi	0.54	0.77	0.92	0.43

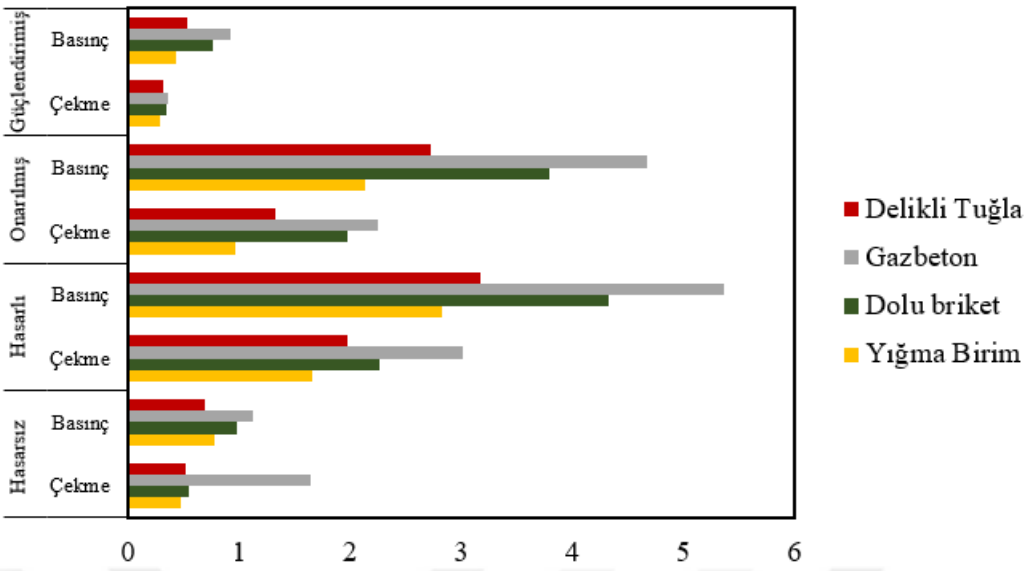
Farklı malzeme durumları için göre hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş halleri üç katlı doğrusal olmayan dinamik davranışlardan elde edilen maksimum çekme ve basınç değerlerinin karşılaştırılması sırasıyla Tablo 2.67 ve Tablo 2.68'da verilmektedir.

Tablo 2.67. Hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumlar için üç katlı modellerde oluşan çekme gerilme değerlerinin çekme eminiyet değerleri ile karşılaştırılması

Durumlar	Gerilmeler	Delikli Tuğla	Dolu Briket	Gazbeton	Kilitli Yığma Birim
Hasarlı	Maks Çekme	1.97	2.27	3.01	1.66
	Çekme Emniyeti	0.49	0.35	0.28	0.30
	Değerlendirme	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILIYOR
Onarılmış	Maks Çekme	1.32	1.79	2.25	0.96
	Çekme Emniyeti	0.49	0.35	0.28	0.30
	Değerlendirme	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILIYOR
Güçlendirilmiş	Maks Çekme	0.31	0.54	0.59	0.29
	Çekme Emniyeti	0.31	0.34	0.36	0.29
	Değerlendirme	AŞILMIYOR	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILMIYOR

Tablo 2.68. Hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumlar için üç katlı yığma modellerde oluşan basınç gerilme değerlerinin basınç eminiyet değerleri ile karşılaştırılması

Durumlar	Gerilmeler	Delikli Tuğla	Dolu Briket	Gazbeton	Kilitli yığma birim
Hasarlı	Maks Basınç	3.17	4.33	5.37	2.82
	Basınç Emniyeti	1.70	1.45	1.21	2.04
	Değerlendirme	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILIYOR
Onarılmış	Maks Basınç	2.73	3.80	4.67	2.14
	Basınç Emniyeti	1.70	1.45	1.21	2.04
	Değerlendirme	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILIYOR	AŞILMIYOR
Güçlendirlmiş	Basınç Basınç	0.54	0.77	0.92	0.43
	Basınç Emniyeti	1.70	1.45	1.21	2.04
	Değerlendirme	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR



Şekil 2.124. Hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumlar için üç katlı dinamik davranışlardan elde edilen basınç ve çekme gerilme değerlerinin karşılaştırılması

Delikli tuğla, gazbeton, dolu briket ve kilitli yığma birim modellerinin hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumları için doğrusal olmayan dinamik davranışlarından elde edilen çekme ve basınç gerilme değerlerinin karşılaştırılması Şekil 2.124'te verilmektedir. Modellerin onarılmasından sonra elde edilen çekme ve basınç gerilme değerlerinde hasarlı durumda ortalama sırasıyla %50 ve %15 oranında bir azalma meydana gelmiştir. TRM malzemeyle birinci ve ikinci katların tüm güçlendirilmiş duvarlarının çekme gerilme değerlerinde ortlama 4 kat, basınç gerilme değerleri ise 3.5 ila 5 kat arasında önemli bir azalma meydana gelmiştir.

2.3.2.4. Hasarlı, Onarılmış ve Güçlendirilmiş Durumlar İçin Yerdeğiştirme Değişimlerinin Değerlendirilmesi

Yığma binalarda kullanılan dört farklı malzeme durumlarına göre doğrusal olmayan analizler yöntemi geliştirilmiştir. Analiz sonuçlarında elde edilen, üç katlı modelin her bir katına karşılık gelen yerdeğiştirme değerleri tüm modeller için Tablo 2.69'da gösterilmektedir.

Tablo 2.69. Hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumları için üç katlı doğrusal olmayan dinamik davranışlarından elde edilen çekme ve basınç gerilme değerlerinin karşılaştırılması

Durumlar	Kat Seviyesi	Malzemeler Durumları (MPa)			
		Delikli Tuğla	Dolu Briket	Gazbeton	Kilitli Yığma Birim
Hasarlı	1. Kat	2.72	3.98	4.61	1.82
	2. Kat	5.34	7.59	7.90	3.71
	3. Kat	6.83	9.20	9.90	4.93
Onarılmış	1. Kat	2.40	3.49	4.21	1.47
	2. Kat	4.59	6.52	7.15	2.95
	3. Kat	5.90	8.07	8.81	3.97
Güçlendirilmiş	1. Kat	1.03	1.60	1.97	0.69
	2. Kat	2.15	2.85	3.35	1.31
	3. Kat	2.60	3.62	4.02	1.75

Delikli Tuğla, dolu Briket, gazbeton ve kilitli yığma birim modellerin hasarsız, onarılmış ve güçlendirilmiş hallerinin doğrusal olmayan dinamik davranışından elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri ile karşılaştırılması verilmiştir. Maksimum yer değiştirme değerlerinde onarım ile bir miktar azalma, güçlendirme ile ise önemli derecede bir azalma olduğu görülmektedir. Görüldüğü gibi güçlendirme sonrası elde edilen maksimum yer değiştirme değerinde hasarlı duruma göre %62, %60, %59 ve %64'lik azalma meydana gelmiştir Tablo 2.69 incelendiğinde en büyük yer değiştirme değeri 4.02 mm olan gazbeton modelinde görüldüğü gözlenmektedir.

En küçük yer değiştirme değerleri ise 1.75 mm olarak belirlenmektedir. Bu en küçük değerleri kilitli yığma birim modelinde görülmektedir. Hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumların Tarihi Yapılar Kılavuzu (2017)'ye göre Tablo 2.70, Tablo 2.71 ve Tablo 2.72'de verilen performans düzeyleri için öteleme oranları karşılaştırılmaktadır.

Tablo 2.70. Hasarlı durumuna göre üç katlı modelleri öteleme oranı kontrolü

Malzemeler Durumları	Öteleme Oranı (%)	Sınırlı Hasar Sınır Durumu (SH)	Kontrollü Hasar Sınır Durumu (KH)	Göçme Öncesi Sınır Durumu (GÖ)
Delikli Tuğla	0.20	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR
Dolu briket	0.30	AŞILIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR
Gazbeton	0.40	AŞILIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR
Kilitli Yığma Birim	0.20	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR

Tablo 2.71. Onarılmış durumuna göre üç katlı modelleri öteleme oranı kontrolü

Malzemeler Durumları	Öteleme Oranı (%)	Sınırlı Hasar Sınır Durumu (SH)	Kontrollü Hasar Sınır Durumu (KH)	Göçme Öncesi Sınır Durumu (GÖ)
Delikli Tuğla	0.20	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR
Dolu Briket	0.27	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR
Gazbeton	0.27	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR
Kilitli Yığma Birim	0.10	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR

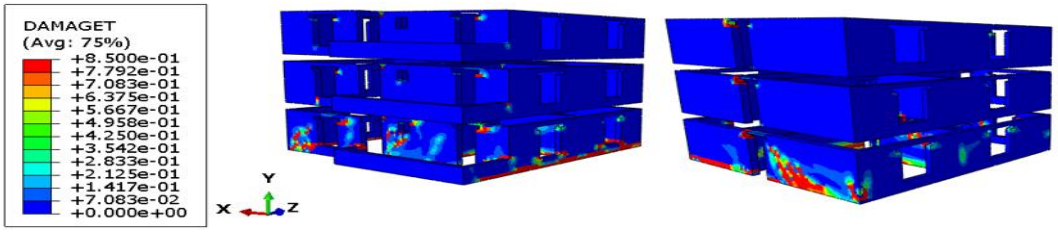
Tablo 2.72. Güçlendirilmiş durumuna göre üç katlı modelleri öteleme oranı kontrolü

Malzemeler Durumları	Öteleme Oranı (%)	Sınırlı Hasar Sınır Durumu (SH)	Kontrollü Hasar Sınır Durumu (KH)	Göçme Öncesi Sınır Durumu (GÖ)
Delikli Tuğla	0.06	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR
Dolu Briket	0.09	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR
Gazbeton	0.11	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR
Kilitli Yığma Birim	0.07	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR	AŞILMIYOR

Tablo 2.72 incelendiğinde güçlendirilmiş iki katlı yığma modeller, yer değiştirmelerdeki iyileşmenin önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. TRM kullanılarak güçlendirme nedeniyle yer değiştirmelerde yüzdeler azalmaktadır.

2.3.2.5. Hasarlı, Onarılmış ve Güçlendirilmiş Durumlar için Hasar Limitleri Dağılımlarının Değerlendirilmesi

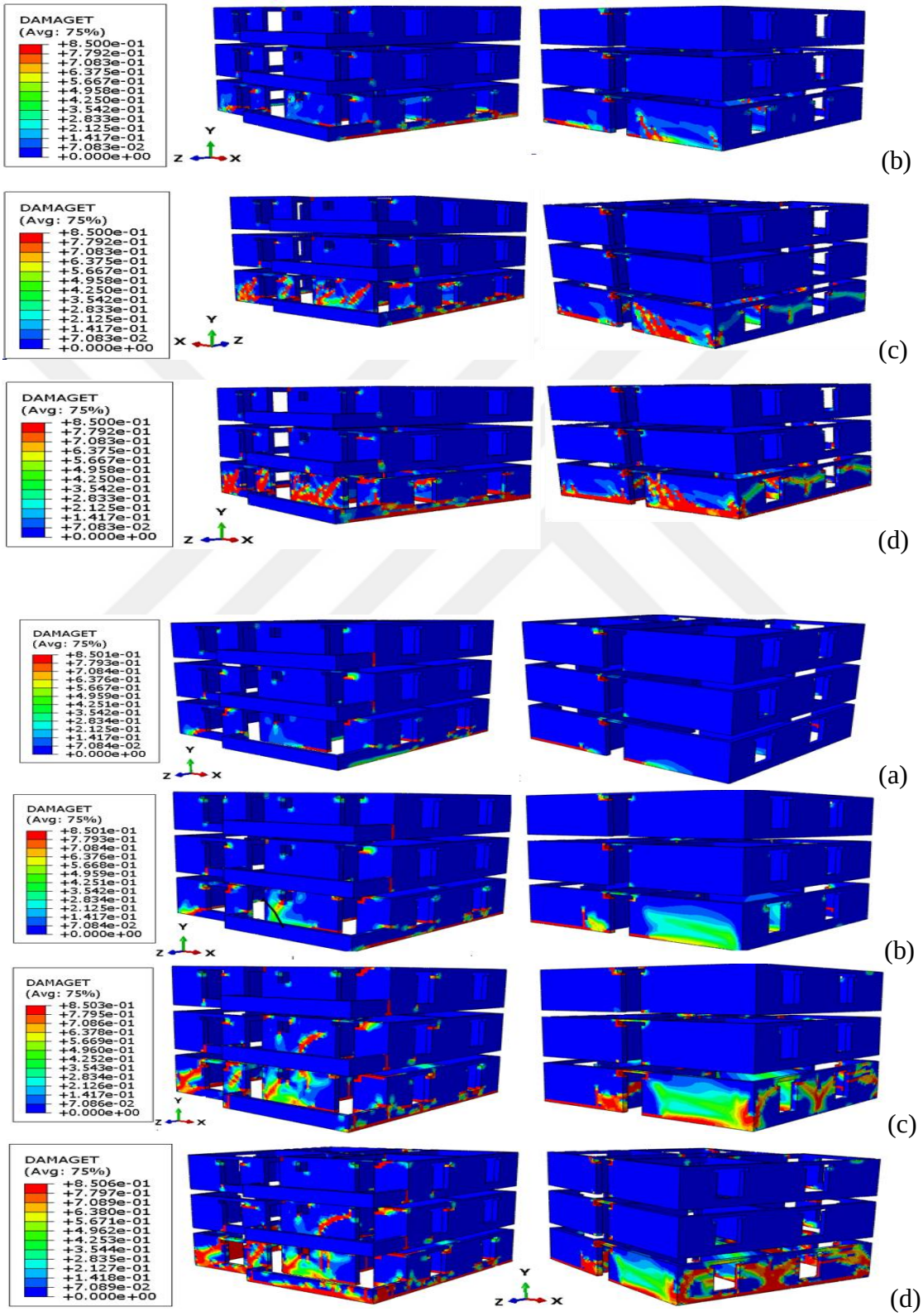
Hasarlı durum için delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birimlerin üç katlı modelleri için çekmeden oluşan hasar limitleri dağılımı her model için sırasıyla Şekil 2.125, Şekil 2.126, Şekil 2.127 ve Şekil 2.128'te verilmiştir.



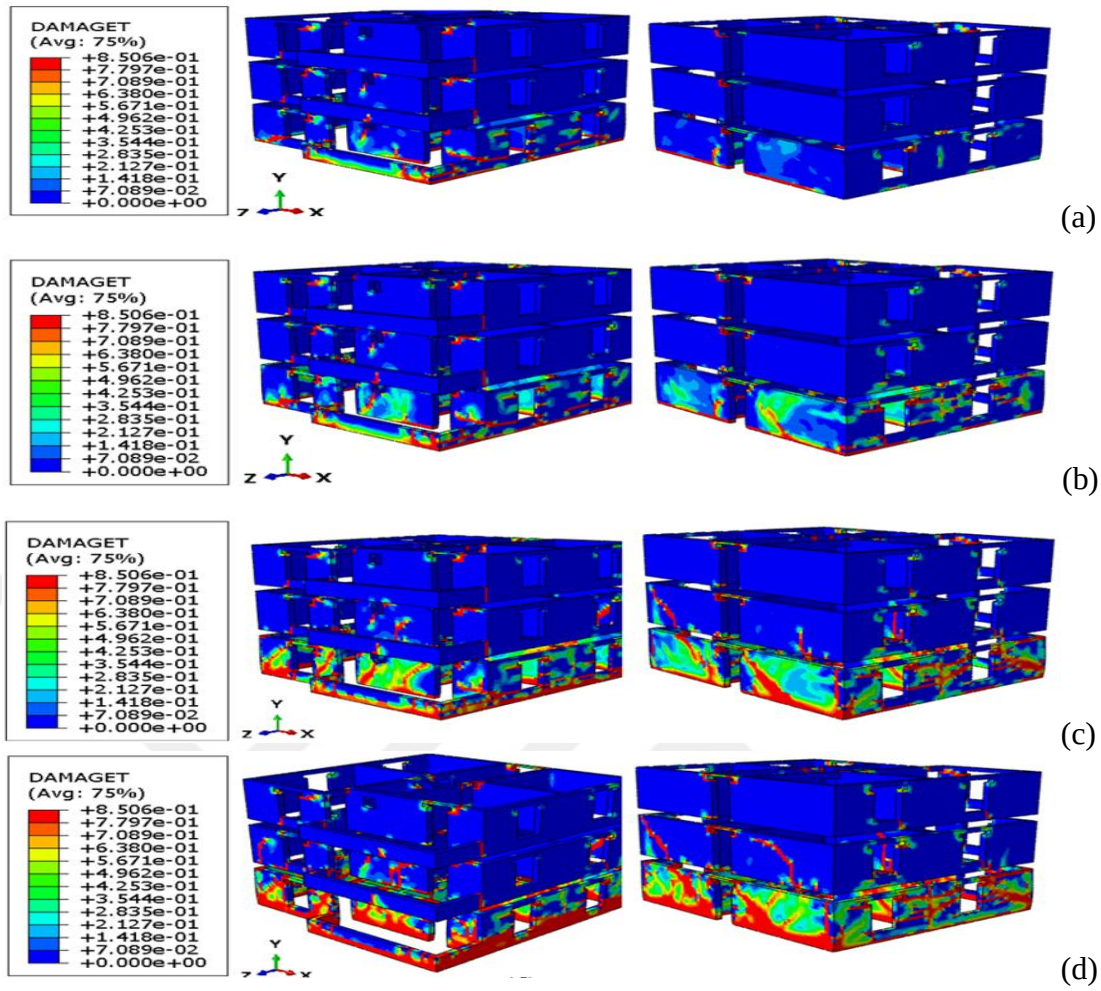
(a)

Şekil 2.125. Hasarlı durum için dört zamanda üç katlı delikli tuğla bina hasar limitleri

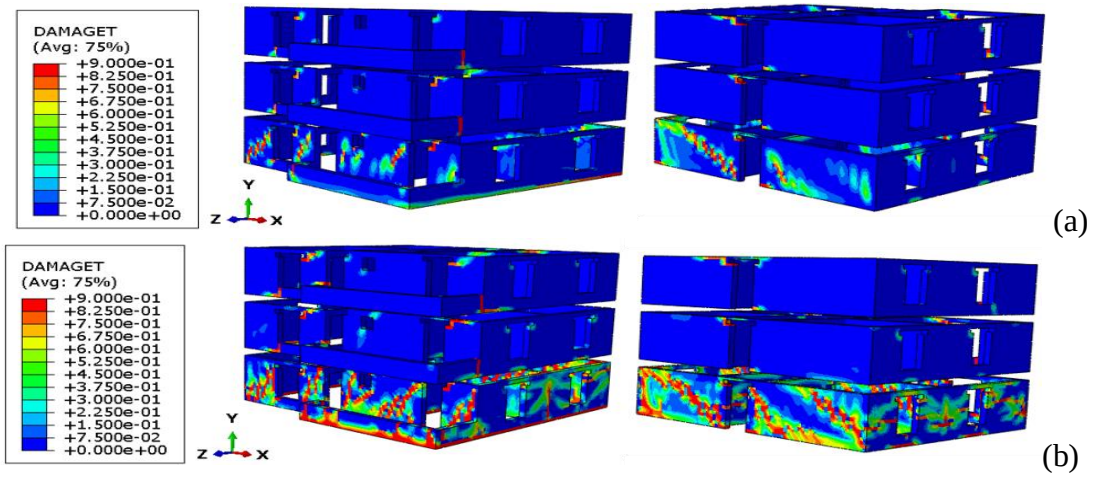
Şekil 2.125'nin devamı,



Şekil 2.126. Hasarlı durum için dört zamanda üç katlı dolu briket bina hasar limitleri

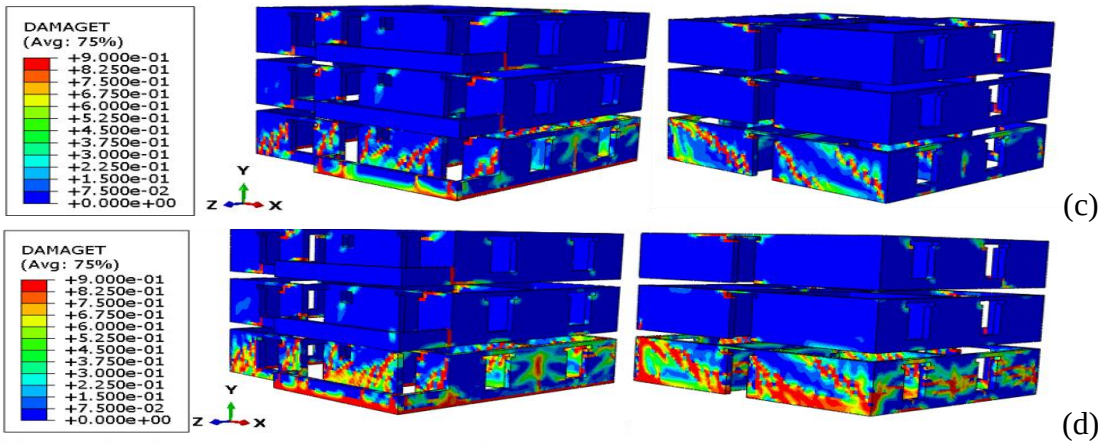


Şekil 2.127. Hasarlı durum için dört zamanda üç katlı gazbeton bina hasar limitleri

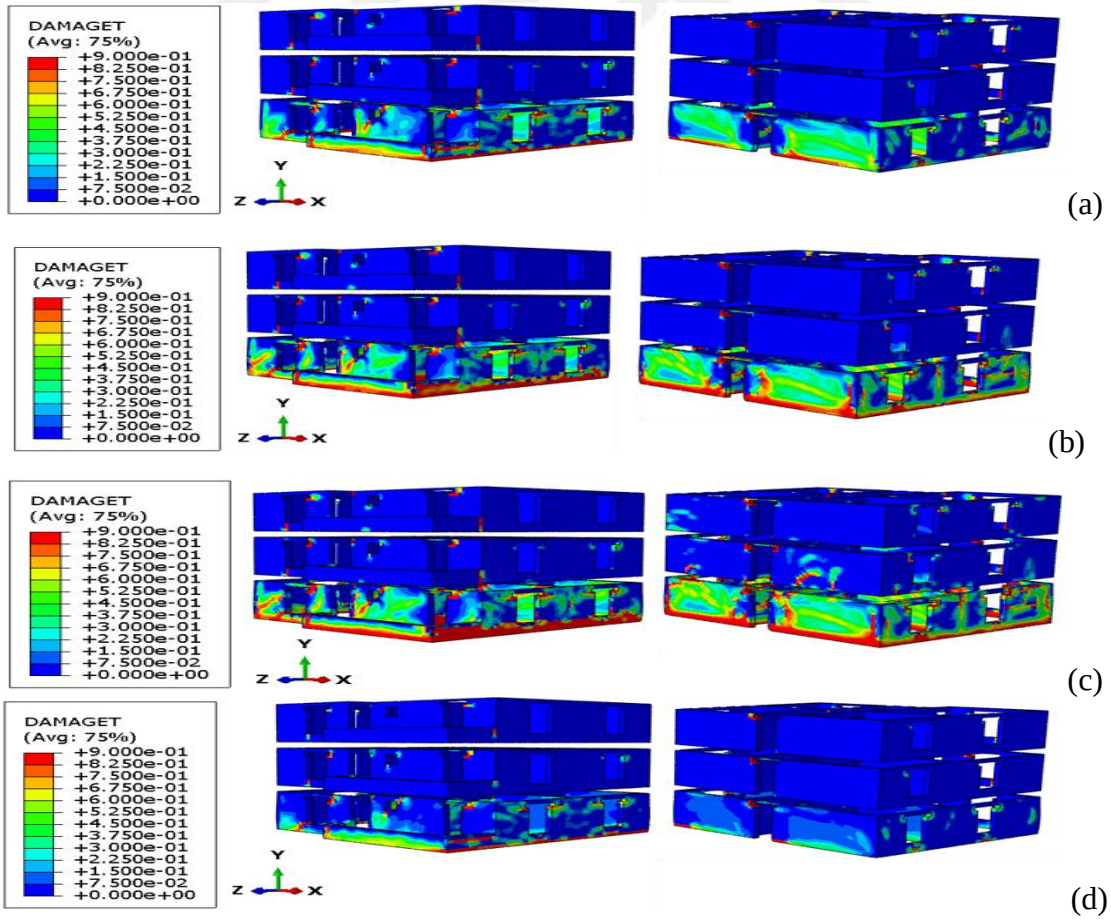


Şekil 2.128. Hasarlı durum için dört zamanda üç katlı kilitli yığma modelin çekme hasar limitleri

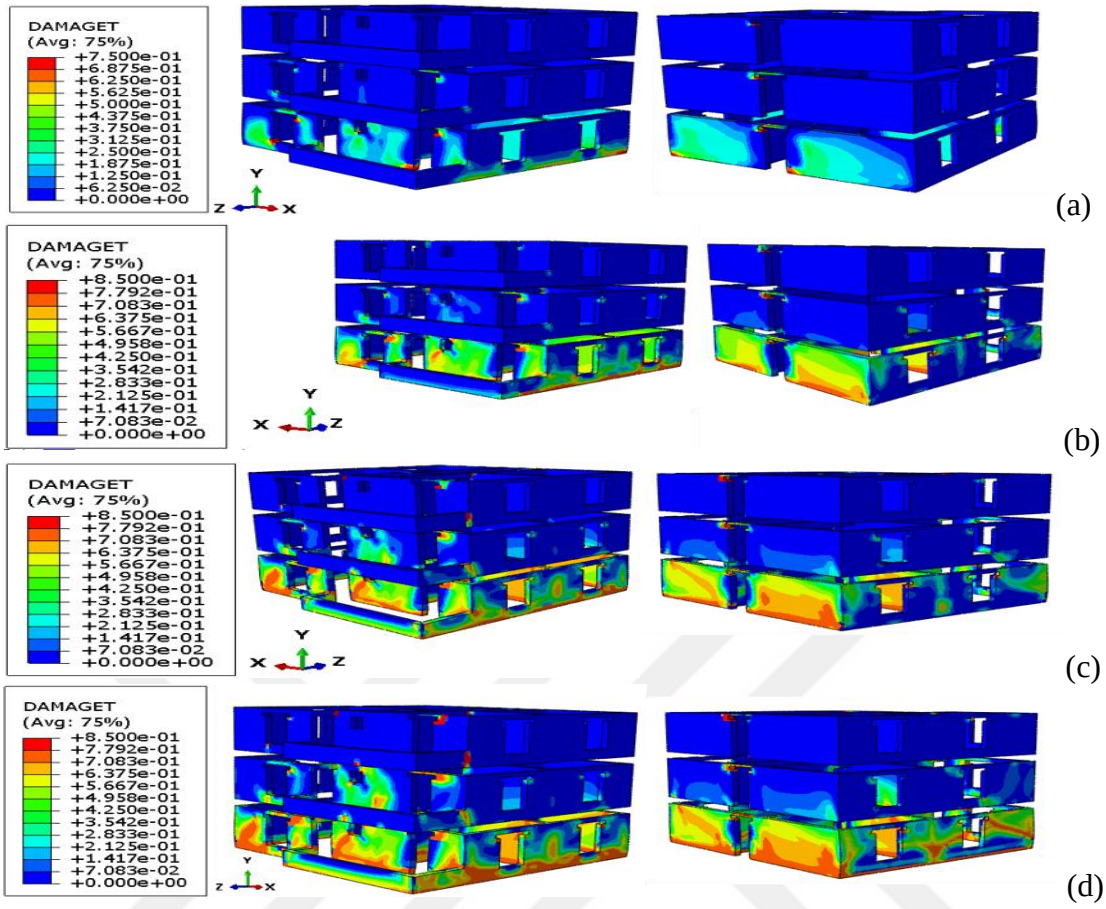
Şekil 2.128'in devamı,



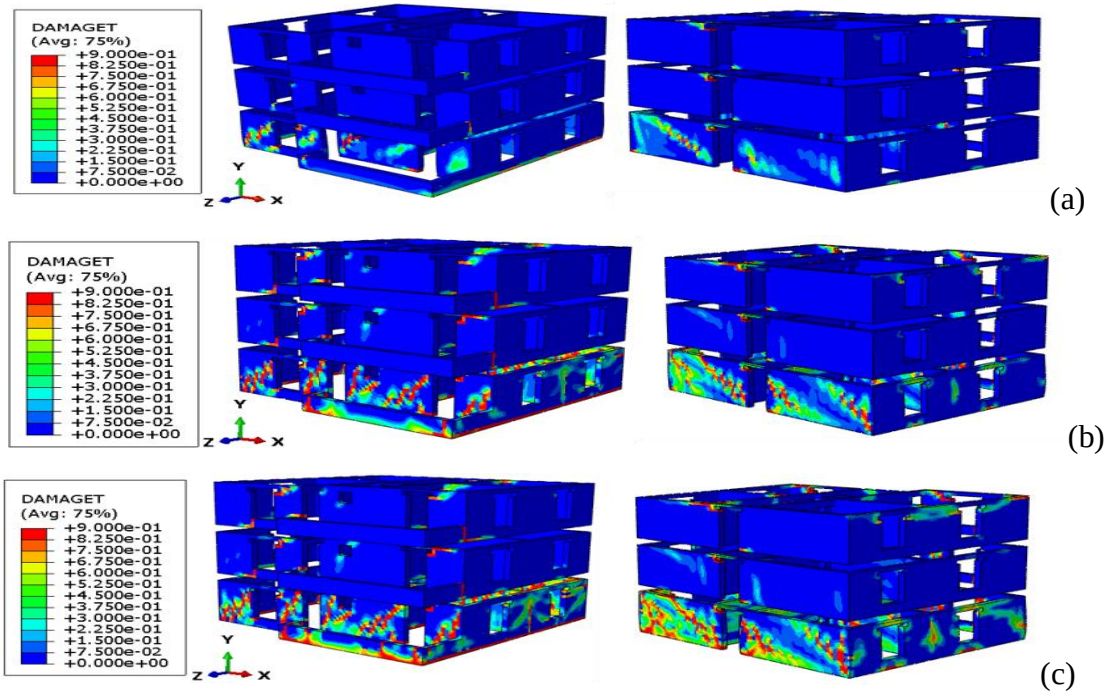
Onarılmış durum için üç katlı modellerinin çekmeden oluşan hasar limitleri dağılımı her model için sırasıyla Şekil 2.129, Şekil 2.130, Şekil 2.131 ve Şekil 2.132'da verilmiştir.



Şekil 2.129. Onarılmış durum için üç katlı delikli tuğla model hasar limitleri

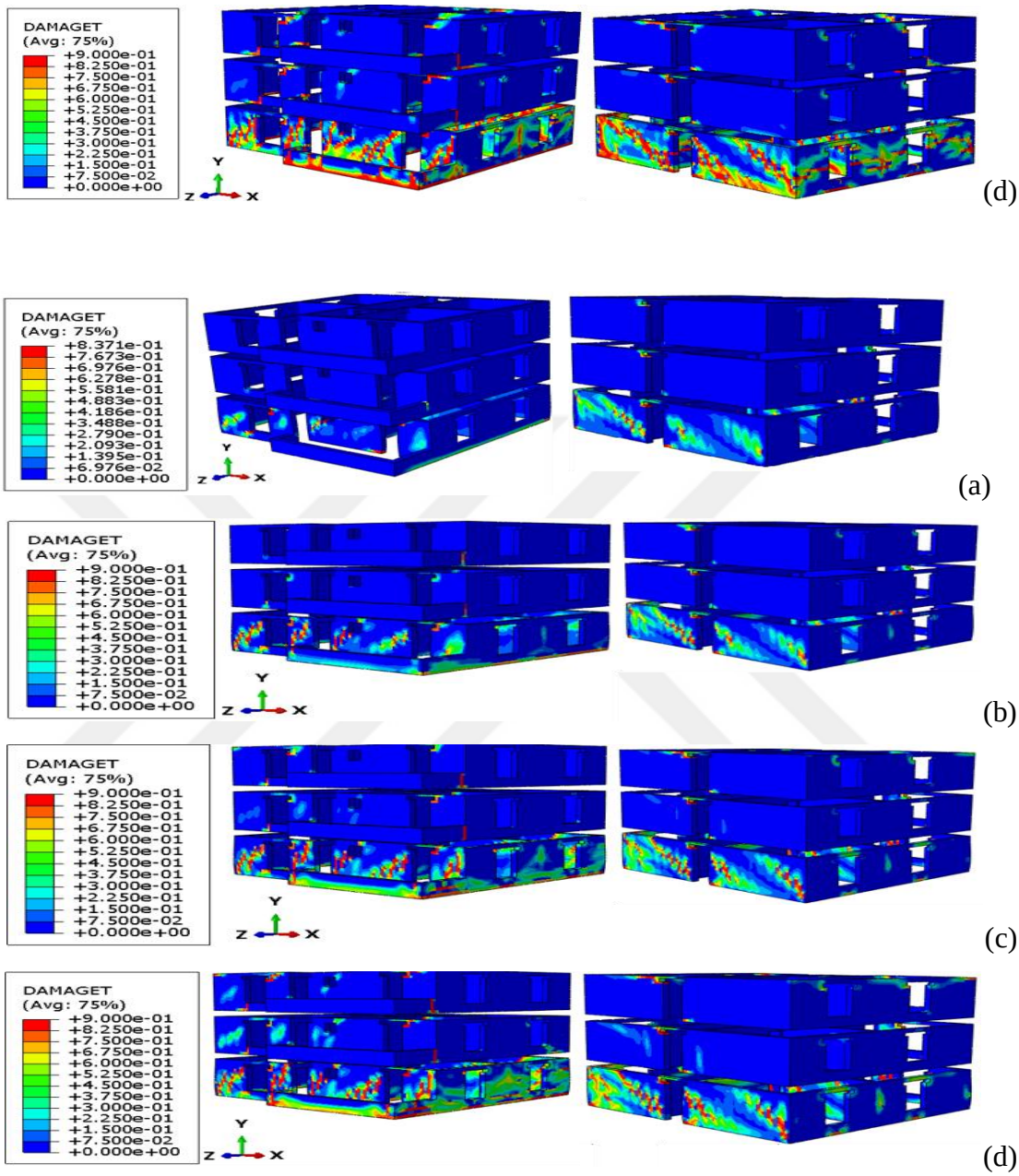


Şekil 2.130. Onarılmış durum için üç katlı dolu briket model hasar limitleri



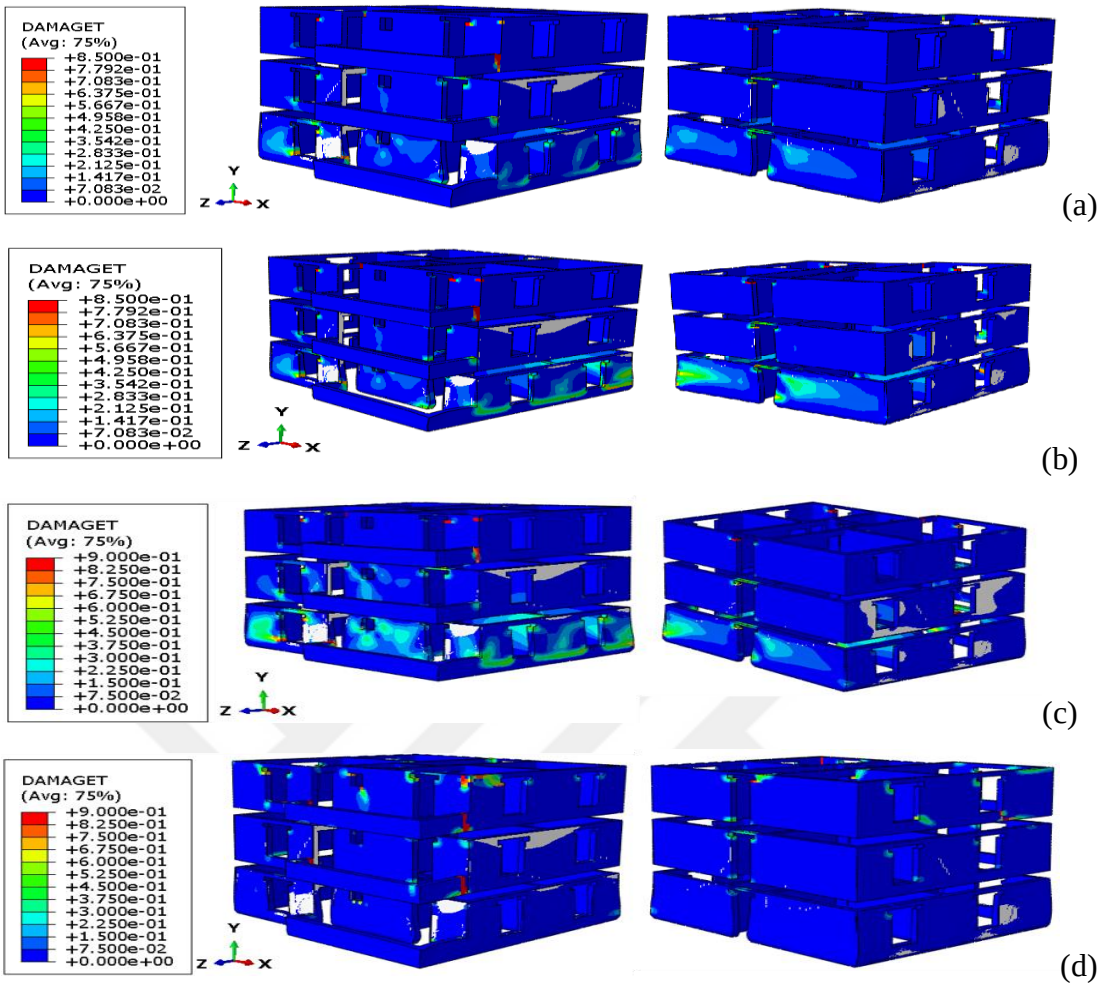
Şekil 2.131. Onarılmış durum için üç katlı gazbeton model hasar limitleri

Şekil 2.131'in devamı,



Şekil 2.132. Onarılmış durum için üç katlı kilitli yığma birim model hasar limitleri

Güçlendirilmiş hali için delikli tuğla, dolu briket, gazbeton vekilitli yığma birim üç katlı modellerin çekmeden oluşan hasar limit dağılımları için Şekil 2.133'ta verilmiştir.



Şekil 2.133. Güçlendirilmiş durum için farklı malzemeler üç katlı hasar limitleri

Farklı duvar malzemelerine sahip tek katlı yığma binaların ilk olarak model yazılımı kullanılarak sismik etüdü yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara dayanarak, duvarların çekme dayanımının izin verilen sınırları aştığı kritik bölgelerde belirlenir. Bu bölgelerde üç çatlak açısı yönelimi başlatılmıştır ve XFEM kullanılarak modellenmiştir. Sonlu Eleman analizi iki katlı ve üç katlı farklı haller için çatlak şekilleri ve dağılımları, literatür çalışmalarında kaydedilen çatlakların çoğuyla kayda değer bir uyum içindedir. Üç katlı model için birinci kat ve ikinci kat depremde hasar göreceği için bu dış kısımlar TRM ile güçlendirilebilir. Esas olarak duvarların düzlem içi ve düzlem dışı rijitliğini arttırmayı amaçlamaktadır. Böylece duvarlar çok büyük yatay ve düşey yüklere dayanabilir.

2.3.3. Tek Katlı Binanın Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

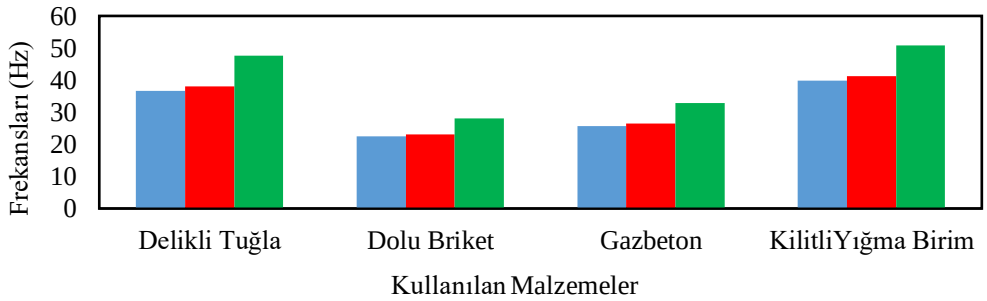
2.3.3.1. Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Oluşturulan modellerde yapısal malzemenin delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim olması durumları dikkate alınarak modal analizi incelenmiştir. Tek katlı yapının modal analizi gerçekleştirilmiş ve mod şekilleri ile doğal frekans değerlerini elde edilmiştir. Delikli tuğla, dolu briket, gazbeton, ve kilitli yığma birim modellerine ait üç katlı olarak analiz sonuçların elde edilen ilk üç doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması Tablo 2.73'te verilmektedir. Farklı tipte malzemeler kullanılarak tasarlanmış yığma yapıların alfa ve Beta katsayıları hesaplanmış.

Tablo 2.73. Analizler sonucu elde edilen frekans değerleri

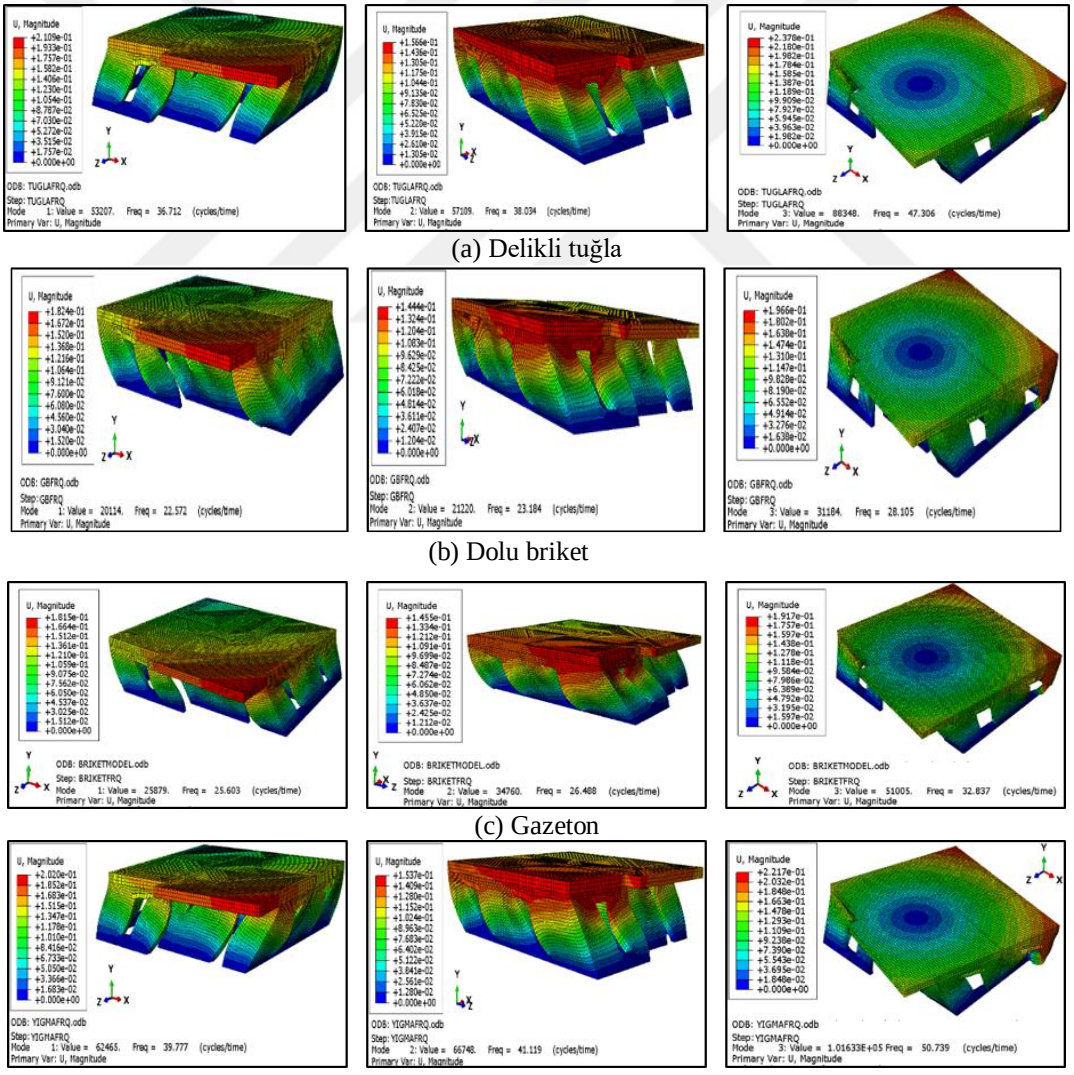
Malzemeler	Doğal Frekansları (Hz)			Rayleigh Sönüm Oranı	
	1. Mode	2. Mode	3. Mode	Alfa	Beta
Delikli tuğla	36.71	38.03	47.71	13.029	0.000189
Dolu Blok Briket	22.57	23.18	28.11	7.860	0.000314
Gazbeton	25.60	26.49	32.84	9.034	0.000272
Kilitli yığma birim	39.81	41.15	50.80	14.02	0.000176

Sonlu Elemanlar Analizinden, tek katlı yapının malzemesindeki değişimle doğal frekans modlarının değiştiği gözlemlenmiştir. Malzeme olarak delikli tuğla olan modelin ilk modu 36.71Hz'de elde edilmiştir. Malzemesi gazbeton olan modelin ilk modu 25.60Hz'de elde edilmiş. Malzeme olarak dolu brikete sahip modelin ilk modu 22.57Hz'de elde edilmiş ve kilitli yığma birim olan modelin ilk modu 39.81Hz'de elde edilmiştir. İlk üç doğal frekans değişimi Şekil 2.134 verilmektedir.



Şekil 2.134. Tek katlı binanın ilk üç doğal frekansının değişimi (Hz)

Sayısal analizden elde edilen ilk üç doğal frekansları incelendiğinde, farkli malzeme için ilk iki doğal frekans değerinin birbirine yakın değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Bu da aynı geometrik modellere sahip yapıların doğal frekans değerlerinin birbirine yakın olduğunu göstermektedir. Üçüncü doğal frekans değeri dikkate alındığında ise birinci doğal frekans değerinin yaklaşık 1.30 katı değerde olduğu görülmüştür. Şekil 2.133'teki grafikler incelendiğinde en yüksek doğal frekans değerinin elastisite modülü en büyük olan yığma birim malzemesi, en düsük doğal frekans değerinin ise gazbeton malzemesinde meydana geldiği görülmektedir. Elastisite modülü arttıkça doğal frekansların arttığı görülmektedir. Tek katlı modelin kullanılarak gerçekleştirilen modal analizlerinden elde edilen ilk üç moda ait mod şekilleri Şekil 2.135'te verilmektedir.



(a) Delikli tuğla

(b) Dolu briket

(c) Gazeton

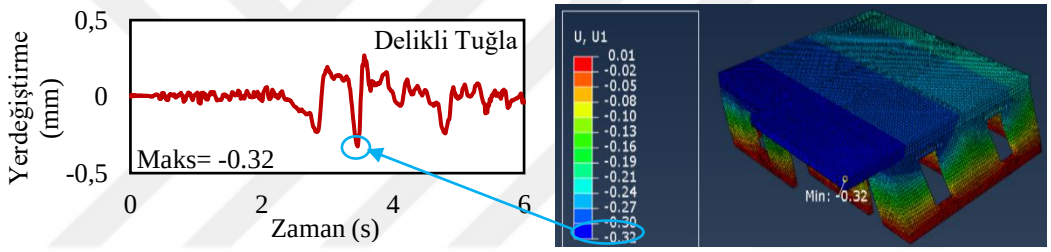
(d) Kilitli yığma birim

2.135. Hasarsız durumu için tek katlı modellerine ait mod şekilleri

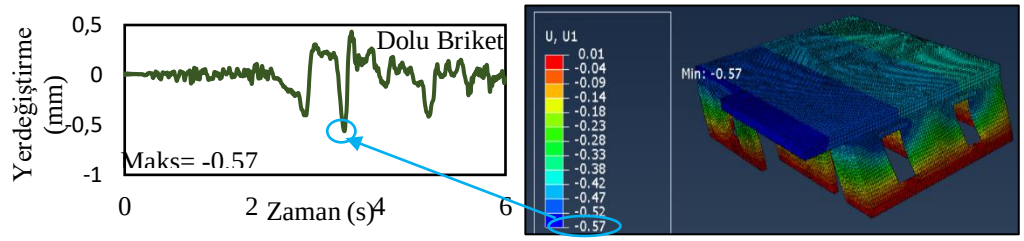
Şekil 2.136(a) ve Şekil 2.136(d) incelendiğinde, delikli tuğla ve kilitli yığma birim modelleri için sırasıyla birinci ve ikinci mod şekilerinde boyuna ve enine ötelenme, üçüncü mod şeklinde burulma modunun elde edildiği görülmektedir. Dolu briket ve gazbeton modelleri için sırasıyla birinci ve ikinci mod şekilerinde enine ve boyuna ötelenme, üçüncü mod şeklinde burulma modu Şekil 2.136 (b) ve Şekil 2.136 (c)'de verilmektedir.

2.3.3.2. Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi

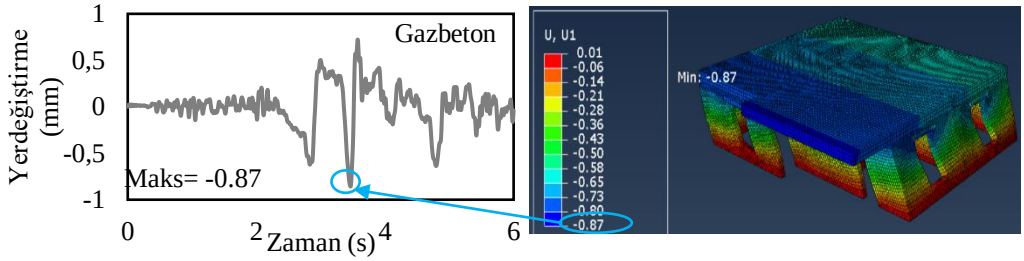
Delikli tuğla, dolu briket, gaz beton ve kilitli yığma birim modellerinin yapılan analiz sonucunda göreli kat ötelemesinin değerlerleri elde edilmiştir. Elde edilen yerdeğiştirme değerleri her malzeme için Şekil 2.135'te sunulmuştur.



(a) Delikli tuğla



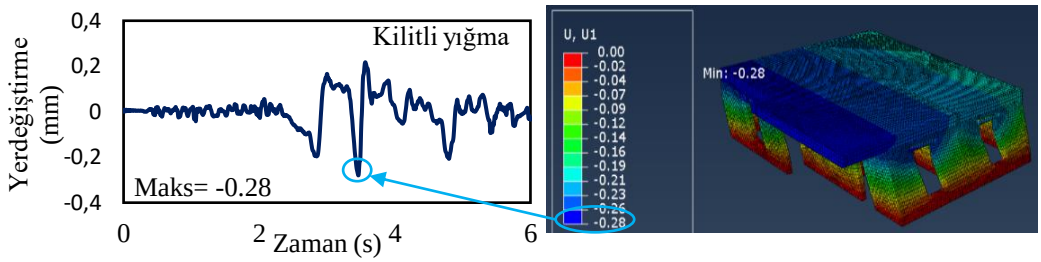
(b) Dolu briket



(c) Gazbeton

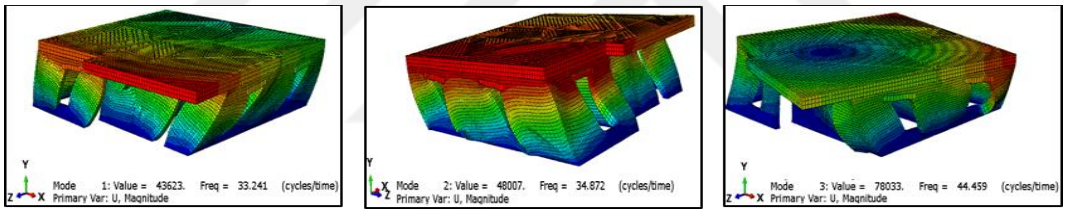
Şekil 2.136. U1 doğrultusunda göreli kat ötelemeleri

Şekil 2.136'nın devamı,



(d) Kilitli yığma birim

Farklı durumlar için A, B, C ve D adımlarında meydana gelen frekanslar karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli ise Şekil 2.137, Şekil 2.138, Şekil 2.139 ve Şekil 2.140'da sunulmuştur. Frekans değerleri zamanla değişmi ise sırasıyla Tablo 2.74, Tablo 2.75, Tablo 2.76 ve Tablo 2.77'da gösterilmiştir.

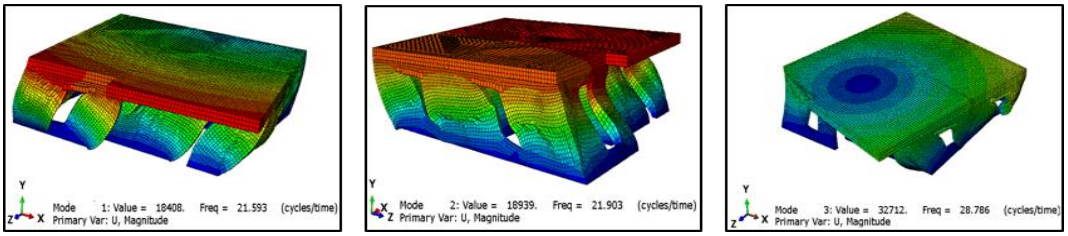


Şekil 2.137. Hasarlı delikli tuğla modelin mod şekilleri

Tablo 2.74. Delikli tuğla modelinin frekanslarının değerleri

Durumlar	Zaman (s)	Delikli tuğla Frekansları (Hz)		
		1. Mod	2. Mod	3. Mod
H	0	36.71	38.03	47.31
A	2.85	35.18	37.38	46.17
B	3.46	34.92	35.86	45.41
C	4.79	33.71	35.38	44.75
D	6	33.24	34.87	44.46

Analizden elde edilen ilk üç doğal frekans değelerlerinin 33Hz-45Hz arasında olduğu belirlenmiştir. Şekil 2.137 incelendiğinde, delikli tuğla modeli sırasıyla birinci ve ikinci mod şekilerinde boyuna ve enine ötelenme, üçüncü mod şeklinde burulma modu elde edildiği görülmektedir. Delikli tuğla modelin hasarından kaynaklanan rijitlik kaybı nedeniyle hasarsız tuğla modu 1'in frekansı 36.71Hz'den 33.24Hz'e düşürülmüştür.

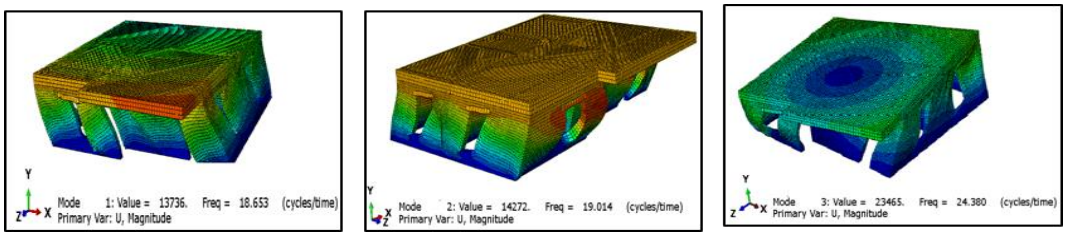


Şekil 2.138. Hasarlı dolu briket modelin mod şekilleri

Tablo 2.75. Dolu briket modelin frekanslarının değerleri

Durumlar	Zaman (s)	Dolu Briket Frekansları (Hz)		
		1. Mod	2. Mod	3. Mod
H	0	25.60	26.49	32.84
A	2.85	24.15	25.58	31.78
B	3.46	23.74	24.66	30.95
C	4.79	22.87	23.48	29.97
D	6	21.59	21.90	28.79

Analizden elde edilen ilk üç frekans değlerlerinin 21Hz-29Hz arasında olduğu belirlenmiştir. Şekil 2.138 incelendiğinde, hasarlı model sırasıyla birinci ve ikinci mod şekilerinde boyuna ve enine ötelenme, üçüncü mod şeklinde burulma modu elde edildiği görülmektedir. Dolu briket modelin hasarından kaynaklanan rijitlik kaybı nedeniyle hasarsız tuğla modu 1'in frekansı 25.60Hz'den 21.59Hz'e düşürülmüştür.

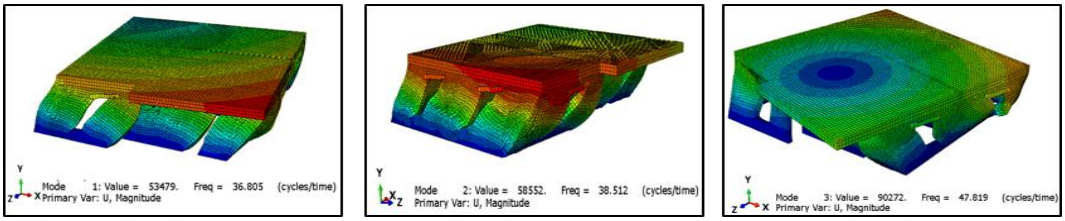


Şekil 2.139. Hasarlı gazbeton modelin mod şekilleri

Tablo 2.76. Gazbeton modelin doğal frekanslarının değerleri

Durumlar	Zaman (s)	Gazbeton Frekansları (Hz)		
		1. Mod	2. Mod	3. Mod
H	0	22.57	23.18	28.11
A	2.85	21.42	22.42	26.94
B	3.46	19.27	20.46	25.38
C	4.79	18.90	19.80	24.89
D	6	18.65	19.01	24.38

Analizden elde edilen ilk üç doğal frekans değerlerinin 19Hz-24Hz arasında belirlenmiştir. Şekil 2.139 incelendiğinde, gazbeton modeli sırasıyla birinci ve ikinci mod şekilerinde enine ve boyuna ötelenme, üçüncü mod şeklinde burulma ötelenme modu elde edildiği görülmektedir. Gazbeton modelin hasarından kaynaklanan rijitlik kaybı nedeniyle hasarsız tuğla modu 1'in frekansı 22.57Hz'den 18.65Hz'e düşürülmüştür.



Şekil 2.140. Hasarlı kilitli yığma biri modelin mod şekilleri

Tablo 2.77. Kilitli yığma birim modelin doğal frekanslarının değerleri

Durumlar	Zaman (s)	Kilitli yığma birim Frekansları (Hz)		
		1. Mod	2. Mod	3. Mod
H	0	39.81	41.15	50.80
A	2.85	39.77	40.72	50.54
B	3.46	37.89	39.11	48.90
C	4.79	37.15	38.68	48.03
D	6	36.81	38.52	47.82

Analizden elde edilen ilk üç doğal titreşim frekans değerlerinin 36 Hz -48 Hz arasında olduğu belirlenmiştir. Şekil 2.140 incelendiğinde, delikli tuğla modeli sırasıyla birinci ve ikinci mod şekilerinde Enine ve boyuna ötelenme, üçüncü mod şeklinde burulma modu elde edildiği görülmektedir. Kilitli yığma birim modelin hasarından kaynaklanan rijitlik kaybı nedeniyle hasarsız tuğla modu 1'in frekansı 39.81 Hz'den 36.81Hz'e düşürülmüştür. Farklı modellerine ait hasarsız ve hasarlı durumlar için lk frekans değerlerini karşılaştırılması Tablo 2.78'da verilmektedir.

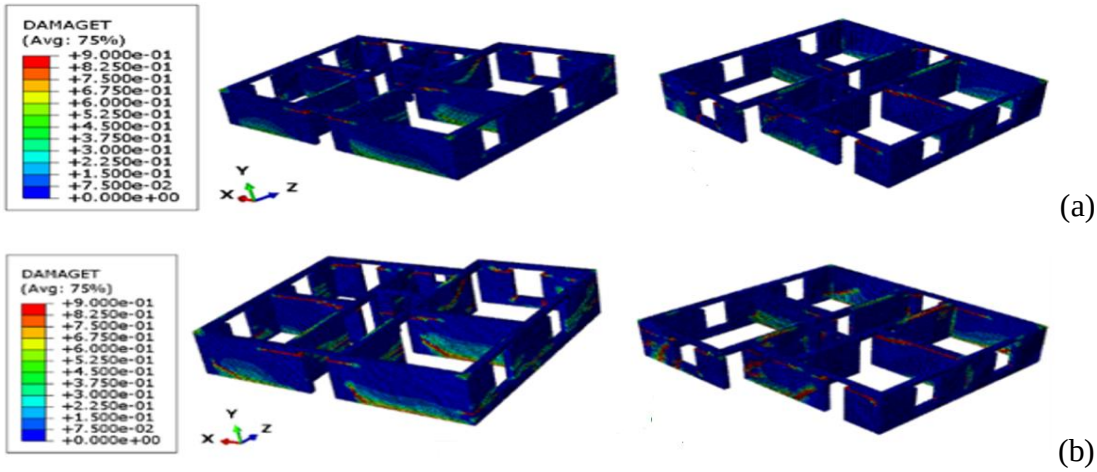
Tablo 2.78. Farklı modellerine ait hasarsız ve hasarlı durumlar için sayısal olarak elde edilen birinci frekansların karşılaştırılması

Kullanın Malzeme	Hasarsız	Hasarlı	Fark(%)
Delikli tuğla	36.71	33.24	9.45
Dolu blok briket	25.60	21.59	15.66
Gazbeton	22.57	18.65	17.34
Kilitli yığma birim	39.81	36.81	7.53

Hasarsız ve hasarlı durumlarına göre elde edilen frekans değerleri arasındaki delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim kullanarak modellenen 4 adet sayısal model birinci mod en büyük fark sırasıyla %9.45, %15.66 %17.34 ve %7.53 olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak hasarlı duvar rijitliğin azalmasına neden olup frekans değerleri hasarsız duruma göre azalmıştır.

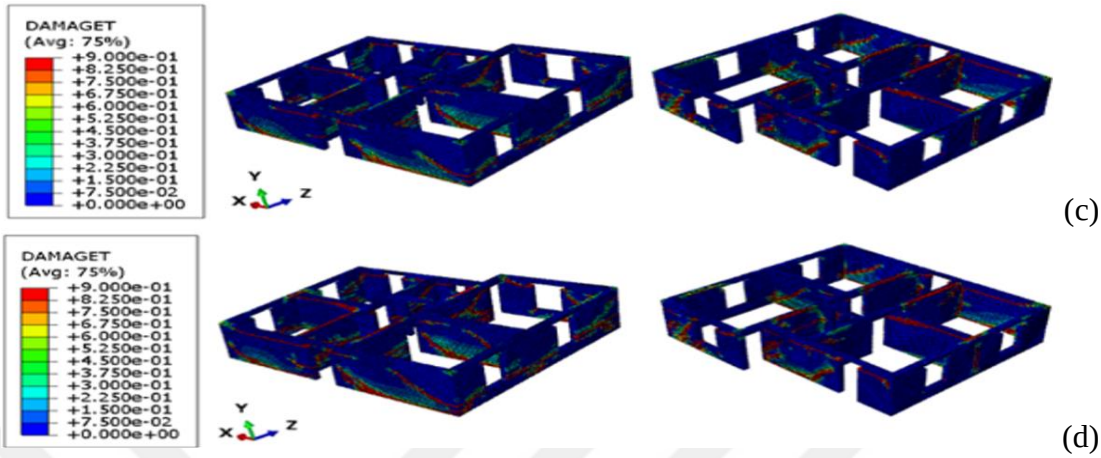
2.3.3.3. Hasar Analizi

Analizlerin sonuçları, çekme hasarı dt'nin kontur haritaları açısından burada rapor edilmektedir. Sayısal sonuçlar, Erzincan depremine maruz kalan, delikli tuğla (Şekil 2.141), dolu blok briket (Şekil 2.142), gazbeton (Şekil 2.143) ve kilitli yığma birim (Şekil 2.144) modellerinin üzerinde gözlenen hasar elde edilmiştir. Delikli tuğla, dolu briket, gaz beton ve kilitli yığma birim olması durumları her bir model için CDP malzeme tanımında çekme hasar limit sınırları %90 olarak tanımlanmıştır. Erzincan deprem verisi altında çekmeden oluşan hasar limitleri dağılımı her bir model için gösterilmiştir. Ayrıca, duvarın farklı malzemelerindeki hasar oranlarının karşılaştırılması için tüm yığma modelleri incelenmiştir. Gerilimdeki hasar parametresi dt'nin renk kısımları da ifade edilir: mavi renk sıfır hasara (dt = 0), diğer yandan kırmızı renk tam hasar (dt = 1) ile ilişkilidir. Hasar oranı 0 ile 1 arasında değerler alıp bu oranın 1'e yakın olması hasarın yoğun olduğunu gösterir.

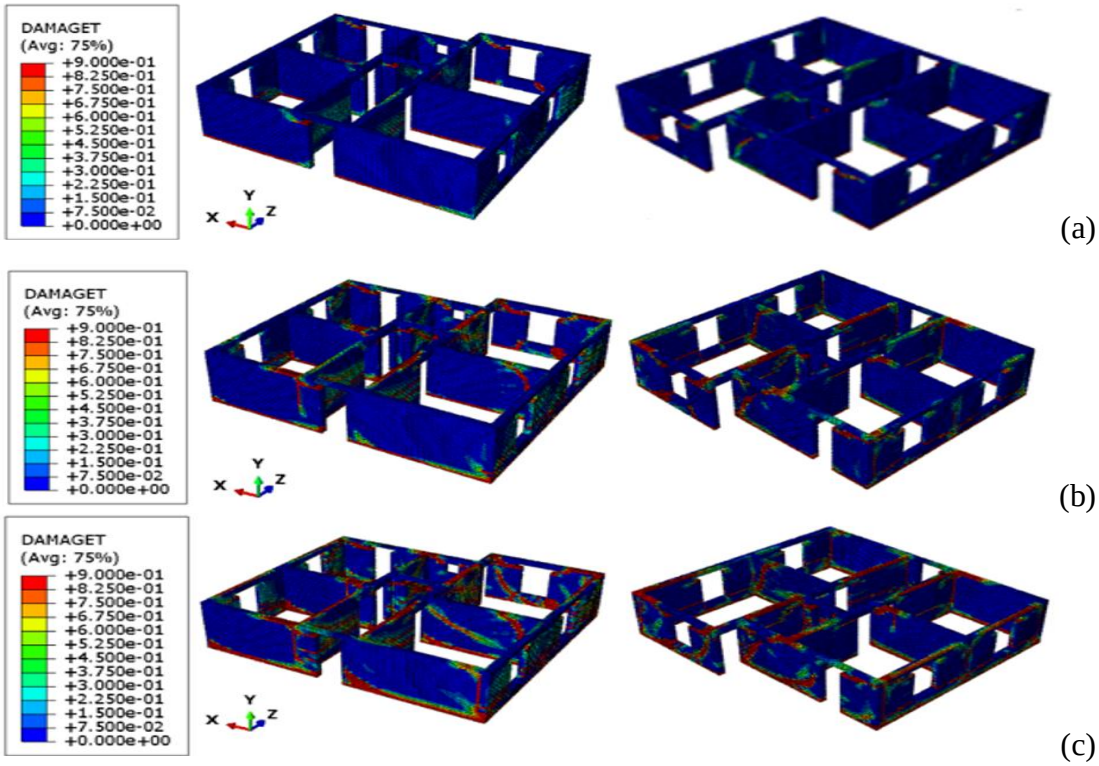


Şekil 2.141. Delikli tuğla modelinin farklı zamanları için hasar kontur

Şekil 2.141'nin devamı,

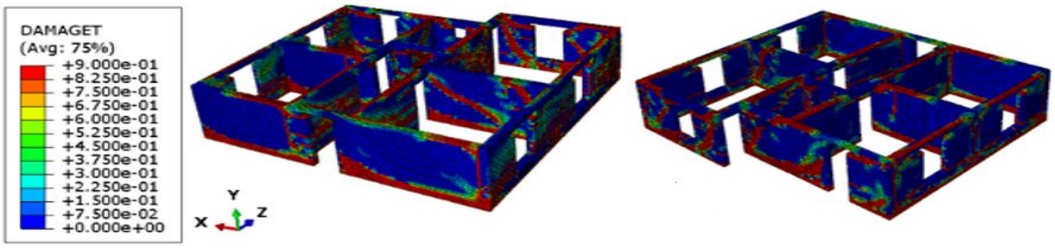


Kuzey ve güney duvarlarda pencere ve kapı boşluklarından kaynaklanan diyagonal ve yatay çatlaklar şeklinde hasarlar oluşmuştur. Duvarların köşelerinde de diyagonal kesme çatlağı gözlenmiştir. Batı yüzeylerinde az hasar vardır, sadece batı duvarının ortasında düşey yönde bir çatlak gözlemlenmiştir. Doğu duvarlarında da yatay çatlaklar görülmüştür.



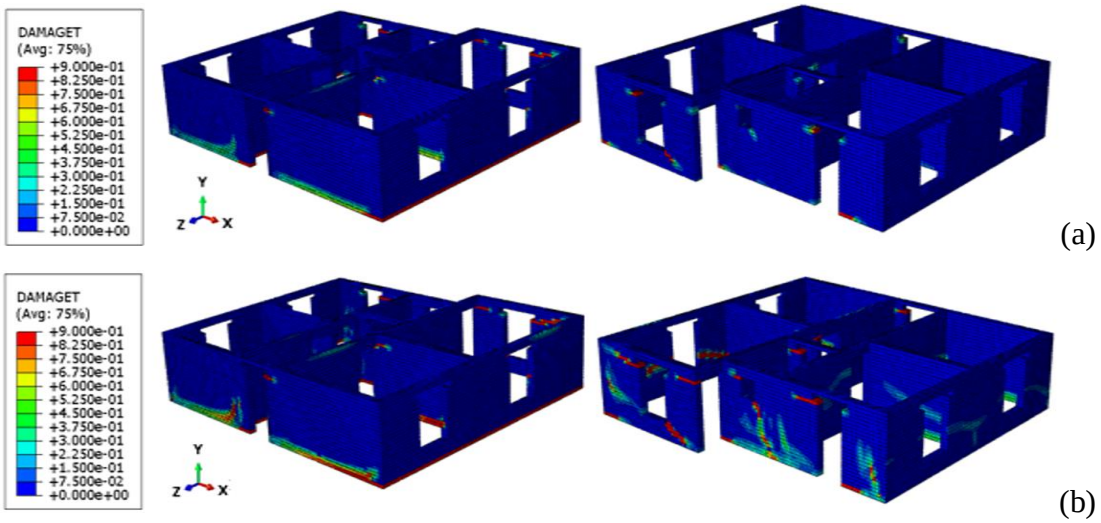
Şekil 2.142. Gazbeton modelinin farklı zamanları için hasar kontur diyagramları

Şekil 2.142'nin devamı,



(d)

Erzincan deprem etkisi altında dolu briket yığma yapıda oluşan çatlak tipleri, duvarların düzlemi dışında batı cephesinde pencere boşlukları arası dolu parçasında ve duvar köşelerinde yatay ve eğik olarak önemli bir miktar çatlaklar oluşmuştur. Duvar tabanlarında oluşan yatay çatlak yoğun bir şekilde gösterilmiştir. Doğu cephede ise, yapının köşelerinde ve duvarların üst üste binme yerlerinde yer alan yeni düşey çatlaklar oluşmuş, ancak batı cephedekine benzer çatlaklar gelişip ancak daha düşük yoğunlukta olduğu görülmüştür. Kuzey cephesinde, pencere bulunan duvarda çapraz çatlağın oluşumu ve kapı boşluğu bulunan duvarda ise sağ köşeye kadar ilerleyen yatay bir çatlak gösterilmiştir. Güney cephesinde ise, kapı boşluğunun üst köşesinden sol üst köşeye kadar ilerleyen yatay bir çatlak oluşumu dikkat çekmiştir. Kapı üstünde hasar yoğunlaşırken genel olarak duvarı kaplayan X çatlakları oluşamamıştır. Düzlem içindeki duvarların tabanındaki yoğun yatay çatlak Şekil 2.142 (d)'de gösterilmiştir.

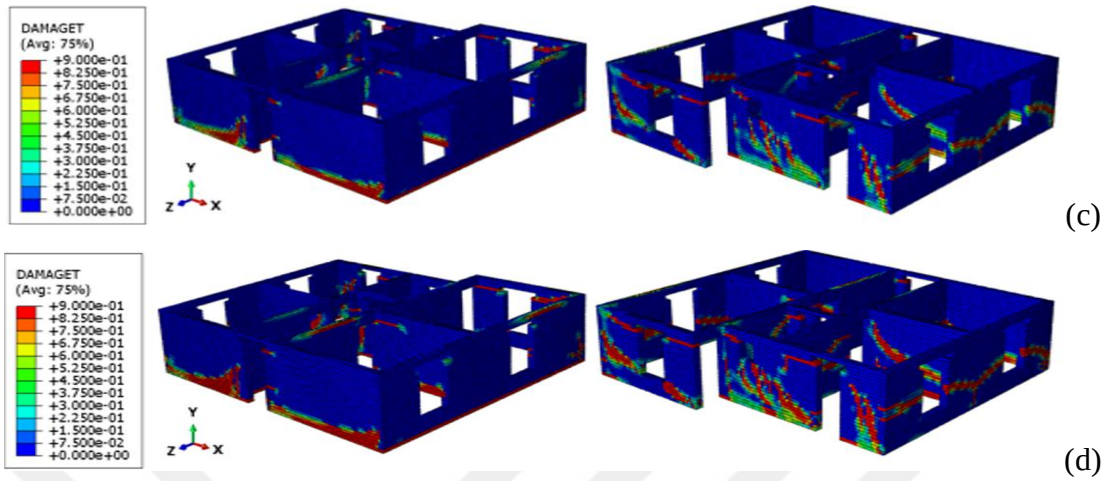


(a)

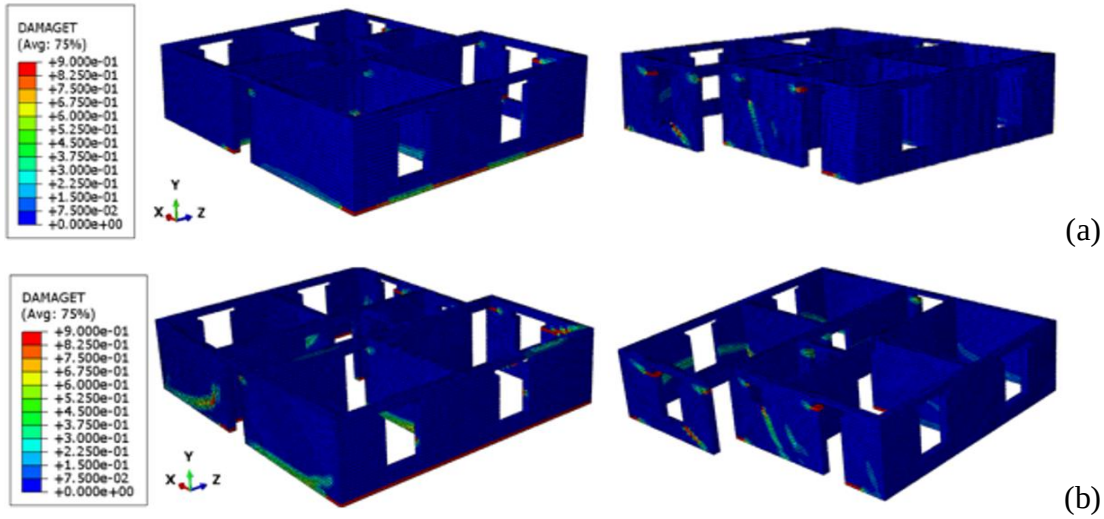
(b)

Şekil 2.143. Dolu briket modelinin farklı zamanları için hasar kontur diyagramları

Şekil 2.143'ün devamı,

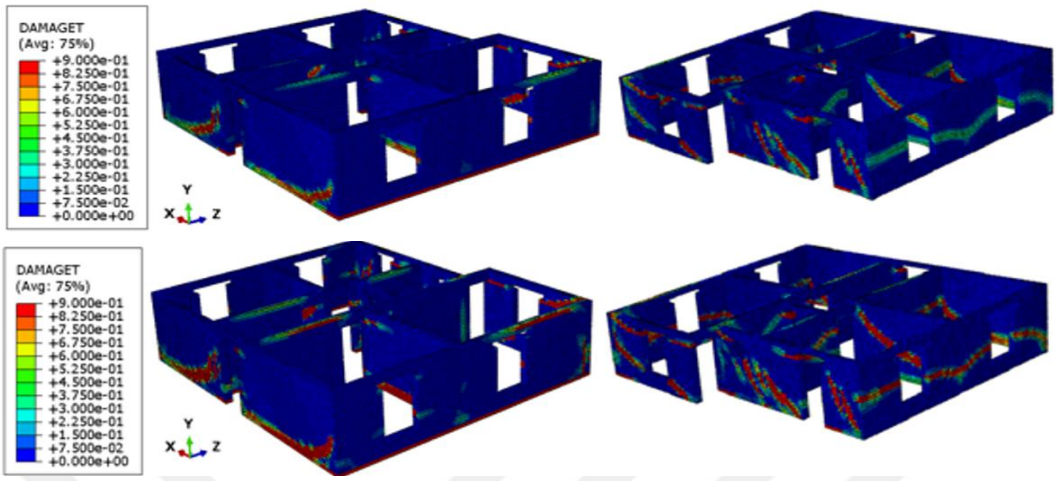


Dolu briket yığma yapıda oluşan çatlak tipleri, duvarların düzlemi dışında hem batı hem de doğru cephelerinde pencere boşlukları arasında ve duvar köşelerinde yatay çatlaklar oluşmuştur. Kuzey cephesinde, pencere ve kapı bulunan duvarın sol alt köşesinde eğik bir çatlak oluşumu ve sağ alt köşesinde eğik çatlak üst duvara düşey bir şekilde giderek azalır. Güney cephesinde ise, kapı boşluğu bulunan duvarda sol ve sağ alt köşelerinde çatlaklar gösterilmiştir. Ancak Düzlem içinde bulunan duvarlarda coğu çekme hasar parametresi %52 ve %68 (yeşil renkli) arasında gösterilmektedir.



Şekil 2.144. Kilitli yığma birim modelinin farklı zamanları için hasar kontur diyagramları

Şekil 2.144'ün devamı,



(c)

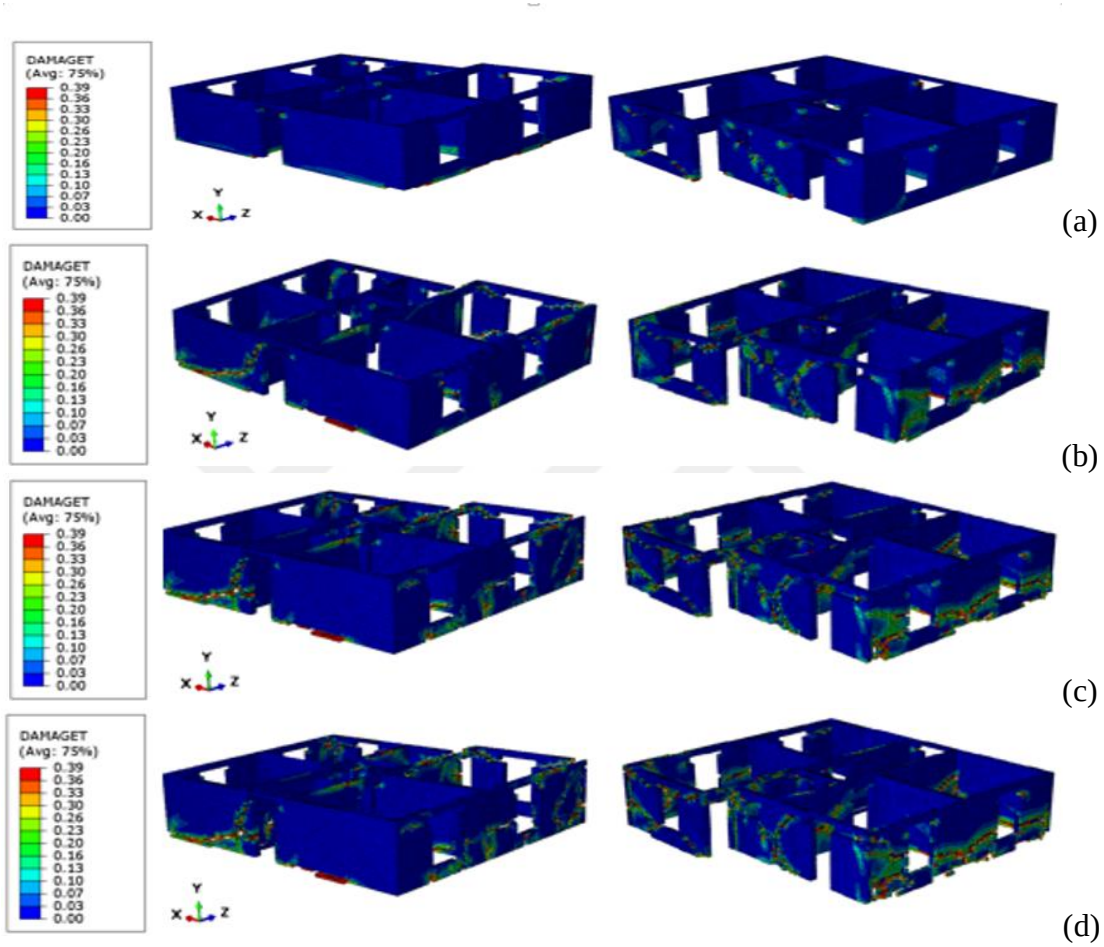
(d)

Kilitli yığma birim modelde meydana gelen hasar tipleri değerlendirildiğinde, uygulanan deprem düzlem dışındaki kuzey cephesinde pencere ve kapı bulunan duvarlarda diyagonal kesme çatlakları gözlenmiştir. Boşlukların üstünde yatay çatlaklar oluşmuştur. Güney cephesinde ise, temel seviyesinde ve kapı açıklığının yanında köşeye kadar ilerleyen çok geniş yatay eğik çatlağı gözlemlenmiştir. Batı cephesinde az hasar vardır. Doğu cephesinde ise duvarda olduğu gibi, pencere boşlukları arasındaki dolu duvar parçasında ve sağ duvar köşesinde yatay bir çatlak oluşmuştur, sol duvar köşesinden pencere boşluğuna kadar eğik çatlak görülmüştür, ayrıca oluşan çatlaklar geniştir. Çatlaklar, 2.85 saniyesinde oluşmaya başlamış ve yeşil renkle gösterilmiştir. Analiz tamamlandığında çatlak oluşumu sona ermiş ve kırmızı renkle gösterilmiştir.

2.3.3.4. Silme Elemanı Analizi

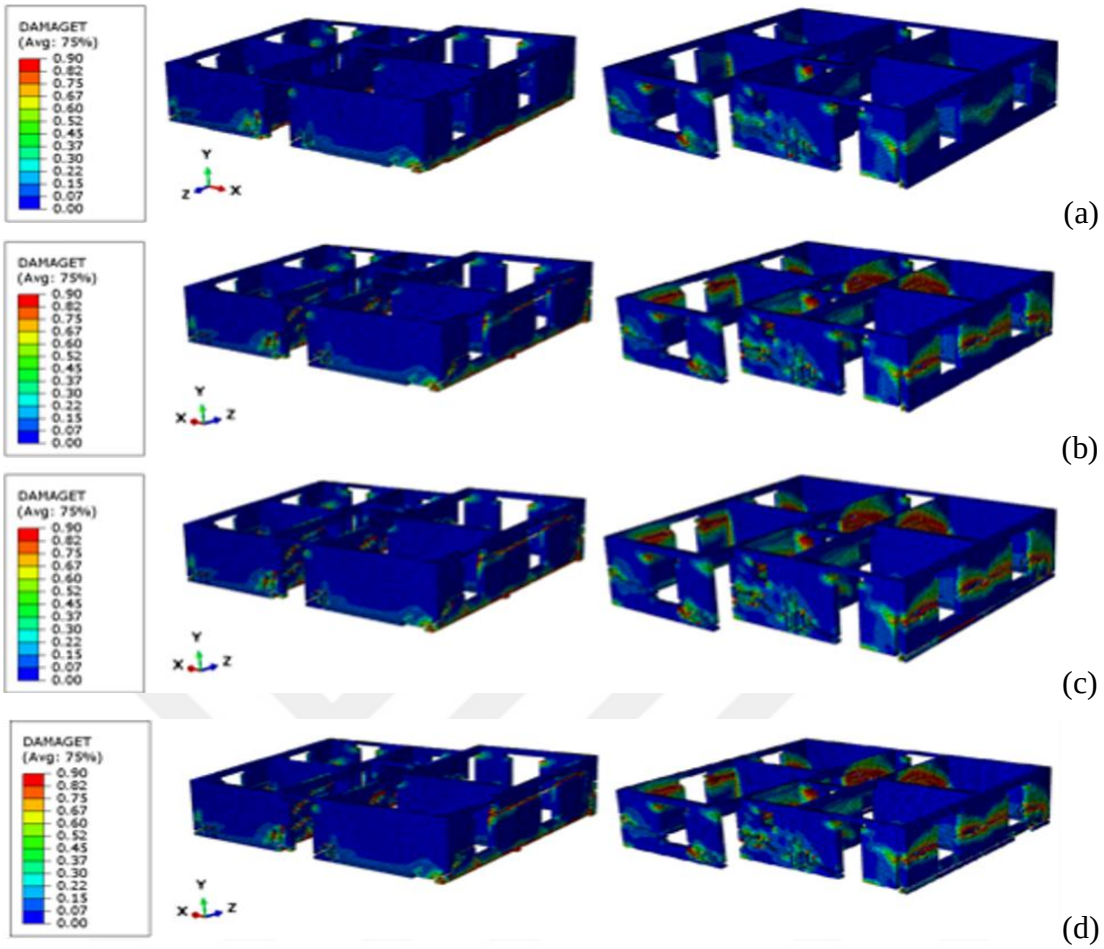
Bu çalışmada tek katlı yığma yapıda farklı malzemeleri kullanılarak dört faklı malzeme durumu için, Abaqus explicit çözüm yöntemiyle eleman silme metodunun çatlak ilerlemesi, hasar yayılması ve duvar parçalarının kırılması karşılaştırılmıştır. Bu çalışma Erzincan deprem yükü altında dinamik yığma binalar için bir sonlu elemanlar analiz yöntemi sunmaktadır. Yığma duvarların modellenmesi için, fiziksel olarak motive edilmiş bir eleman silme kriteri ile değiştirilmiş bir Beton Hasar Plastisite malzeme modeli kullanılmıştır. Bir çatlak analizinde, çatlak yerini ve kırılmaların ilerlemesini tahmin etmek çok önemlidir. Bir eleman silme algoritmasının metodu, kırılma gelişimini görselleştirmek ve simülasyonun

yakınsamasını engelleyen çarpıtılmış elemanlardan kurtulmak için kullanılan güçlü bir araçtır. Farklı zamanlara sahip delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim duvarların simüle edilmiş hasar değişkeni evrimi ve hasar yayılımı Şekil 2.145, Şekil 2.146, Şekil 2.147 ve Şekil 2.148 verilmektedir.



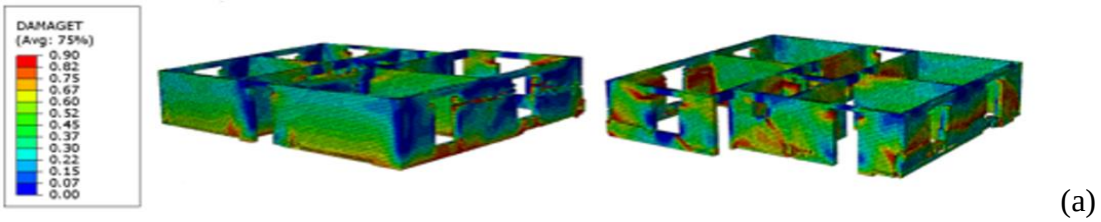
Şekil 2.145. Farklı zamanlara sahip delikli tuğla duvarların simüle edilmiş hasar şekilleri

Şekil 2.145'te delikli tuğla modeli için eleman silme analizinden sonraki hasar dağılımını göstermektedir. Kuzey duvarı, önemli birim kaybı ve daha lokalize diyagonal çatlaklar ile daha ağır hasar almıştır. Batı duvarının pencere açıklıkları nedeniyle Pier ve Spandral bölgeler ağır hasar almıştır, bu sayede silme etkisi yakalamakta ve elemandan boşalan alan göçme olarak değerlendirilmiştir. Aksi takdirde doğu duvarı hafif hasar almıştır. Güney duvarı ise, hasarın duvarların altından, kapının alt ve üst köşelerine doğru eğik yayılmasını göstermiştir. Delikli tuğla duvar için çekme hasar parametresinin aralığı 0,20 ile 0,39 olarak bulunmuştur.



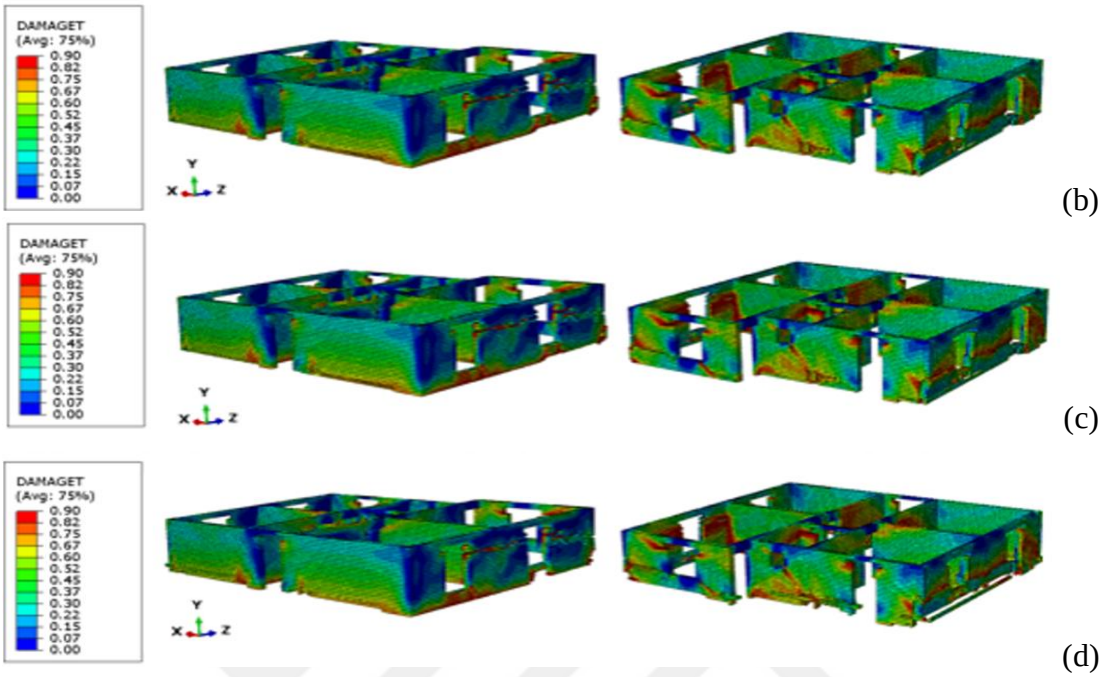
Şekil 2.146. Farklı zamanlara sahip dolu briket duvarların simüle edilmiş hasar şekilleri

Şekil 2.146'da dolu briket modeli için eleman silme analizinden sonraki hasar dağılımı göstermektedir. Güney duvar kapısına yakın iç duvarlarda yüksek, güneydoğu duvarlarında ise neredeyse düşük hasar değerlerine rastlandığı görülmektedir. Dolu briket duvarı için çekme hasarının parametresinin aralığı 0,45 ile 0,90 olarak bulunmuştur.

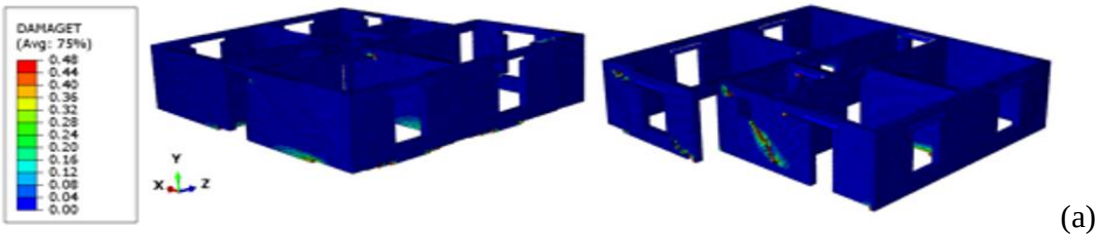


Şekil 2.147. Farklı zamanlara sahip gazbeton duvarların simüle edilmiş hasar şekilleri

Şekil 2.147'nin devamı,

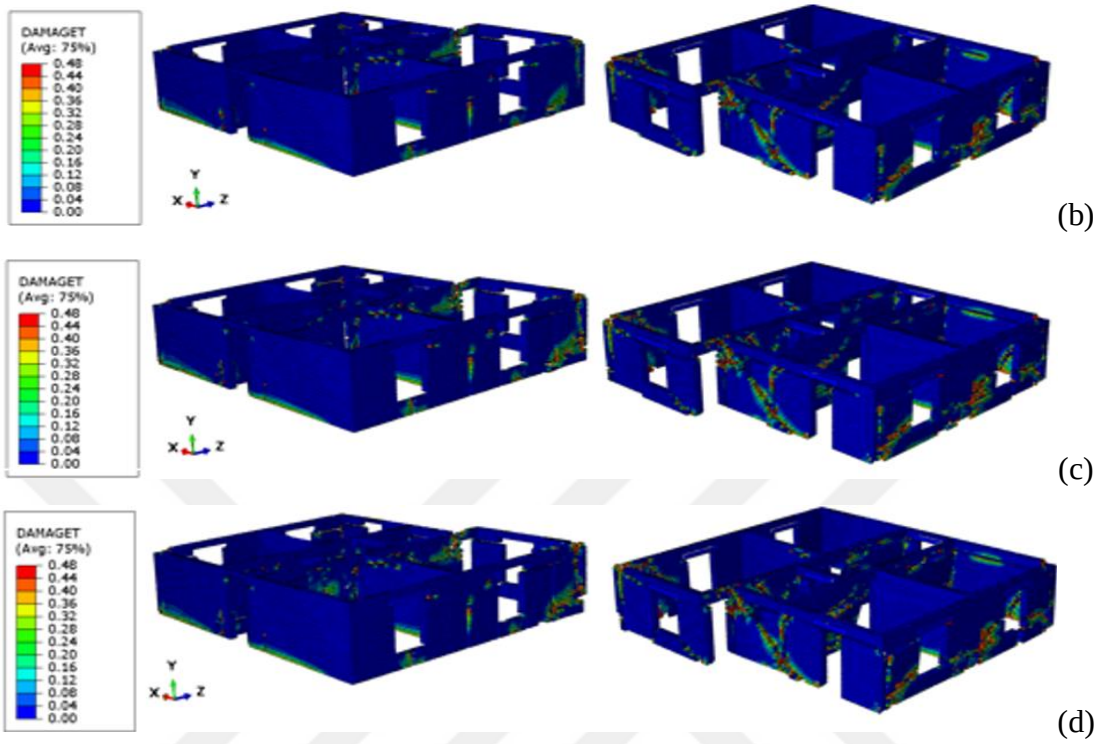


Şekil 2.147'da gazbeton için eleman silme analizinden sonraki hasar dağılımını göstermektedir. Bu modelin hasar şekilleri, farklı duvar kenarlarında ezilme ile ağır hasar ile karakterize edilmiştir. Batı duvarı pencerelerinin alt bulunan duvarın parçası ezilmesinin görünümünde sunulmaktadır. Gazbeton duvarların neredeyse tüm duvarlarda depremden kaynaklanan yatay kuvvetler nedeniyle çatlak meydana gelebilir. Hasar parametresinin aralığı 0.45 ile 0.9 arasında çok önemlidir. Modelinde meydana gelen önemli hasar düzlem dışı doğrultuda gelişmiştir. Gazbeton duvarlarında esas olarak uzun yatay göçme (1 m'den yüksek) olmuşmuştur.



Şekil 2.148. Farklı zamanlara sahip kilitli yığma duvarların simüle edilmiş hasar şekilleri

Şekil 2.148'in devamı,

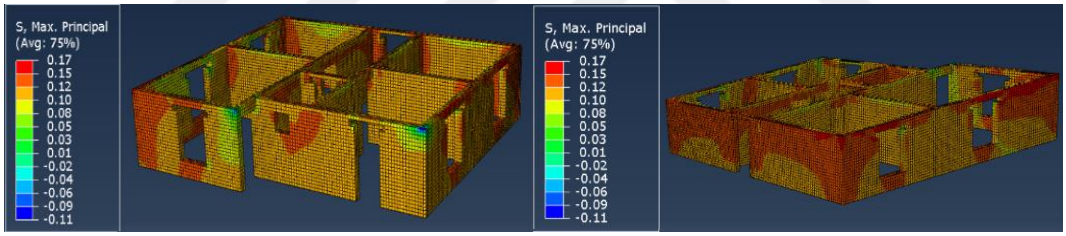


Şekil 2.148, kilitli yığma birim modeli için eleman silme analizinden sonraki hasar dağılımını göstermektedir. Kuzey duvarı için, önemli birim kaybı ve daha lokalize diyagonal çatlaklar ile daha orta göçme sunmuştur. Buna karşılık güney duvarda ise sadece az çatlaklar gelişmiştir. Batı ve doğu duvarları boyunca bazı yatay ve düşey çatlakların geliştiği görülmüştür. Ayrıca kuzey ve batı duvarlarını birbirine bağlayan alt köşede kilitli yığma duvarlarda göçmesi meydana gelmiştir. Modeldeki çekme hasarının parametresinin aralığı 0,28 ile 0,48 olarak bulunmuştur. Özellikle kapı ve pencere kenarlarındaki hasar arttığında, duvarlar diyagonal çatlaklarla birlikte göçme mekanizmasına ulaşma eğilimindedir.

2.3.3.5. Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Yöntemi (XFEM) Analizi

Bu bölümde, düzey seti (Level set) yöntemi ile birlikte XFEM anlatılmaktadır. Başlangıç çatlakları olan farklı yığma malzeme modellerinin deprem koşullarında çatlak ilerlemesi ve kırılma davranışı incelenmiştir. Büyük ölçekli yığma yapıların sonlu eleman modellemesi için makro yaklaşım kullanılmıştır. Daha sonra farklı yığma malzemelerin başlangıç çatlakları ile birlikte sismik çatlama analizleri yapılmıştır. Başlangıç çatlaklara

sahip duvar modellerinin sismik çatlak yayılımını değerlendirmek için aynı çoklu başlangıç çatlaklarına sahip dört duvar modeli incelenmiştir. Olası başlangıç noktaları tahmin etmek için tek katlı yığma yapının doğrusal olmayan statik analizi yapılmıştır. Tüm modeller için, gerilme yoğunlaşmalarının konumu hemen hemen aynıdır, ancak yığma duvarlarda çekme gerilme değerlerinde fark gözlenmiştir. Bu bölgeler yığma duvarlarda kırılmaya neden olabilir. Belirgin gerilme yoğunlaşmasını, önceden var olan çatlakların uçları, dış yüklemeye maruz kalan modeldeki çatlak başlangıcının kaynaklarıdır (Zhou., vd. 2021). Herhangi bir önemli gerilme yoğunlaşmaları, çatlakların var olduğu bilgisini sağlar. Bu analiz için, daha fazla çatlak ilerlemesi elde etmek ve farklı model cephelerinde yeni hasar bölgelerini tahmin etmek için hem en elverişsiz model, hemde literatürde bulunan hasar bölgeleri kullanılmıştır. Maksimum gerilme 0.17 MPa olarak, maksimum çekme gerilmesi konumları ise x, y ve z kartezyen koordinatlarına göre tanımlanmıştır. Bu çalışmada, maksimum gerilme yerleri duvarların dış yüzlerinde çatlaklarının başlangıç noktaları olarak tanımlanmıştır. Tek katlı yığma bina için ortaya çıkan çekme gerilmelerinin Şekil 2.149'da sunulmaktadır



Şekil 2.149. Çatlaksız deprem analiz için maksimum çekme gerilmesi değerleri

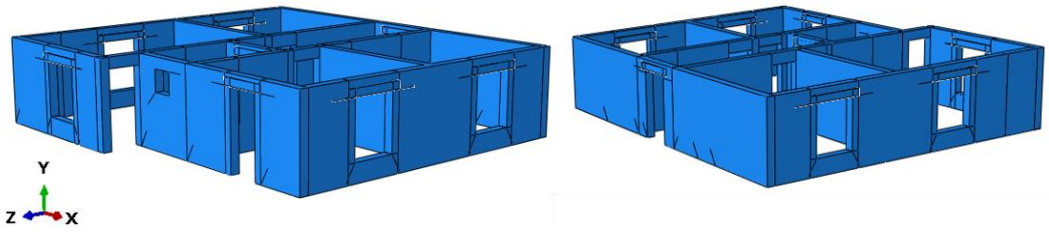
Şekil 3.148'de gösterildiği gibi, tek katlı modellenmiş yığma bina üzerinde bulunan üç farklı uzunlukta arayüz başlangıç çatlakları düğüm noktası ve zenginleştirilmiş sonlu elemanlar ile modellenmiştir. Yığma yapıların farklı yığma malzemelerinden kaynaklanan çatlak yayılımı ve göçme modu, bu yapıların davranışını belirlemek için değerlendirilmesi gereken çok önemli parametrelerdir. Bu çalışmada, farklı yığma duvar malzemelerinin çatlak yayılımını ve göçme modunu değerlendirmek için sayısal bir çalışma yapılmıştır. Yatay çatlaklar (α) için çatlakların açıları değişken değildir, ancak eğimli çatlaklar (β) için çatlakların açıları eksen yataydan saat yönünde ve saat yönünün tersine ölçüldüğünde β= 30, 45, 60'li olarak değişir. Ancak aynı çatlak uzunluğu kullanılmıştır. Bu analiz için, yığma duvarlarda oluşan çekme gerilmeleri incelendiğinde, en büyük çekme gerilmesinin değerinin 0.17 MPa olan gazbeton malzeme durumunda olduğu görülmektedir. Her modelde on iki

çatlak modellenmiştir, karşılık gelen XFEM ayrıklaştırmaları gerçekleşmiştir. Analizde beş hızlanma genlik düzeyi kullanılmaktadır. Deprem şiddetini artırarak yani 0.4g, 0.50g, 0.6g, 0.7g ve 0.8g, Amerika Birleşik Devletleri, Tayvan ve Türkiye'de meydana gelen farklı deprem büyüklüklerine sahip sismik özellikleri Tablo 2.79'da gösterilmiştir.

Tablo 2.79. Kırılma modu analizinde kullanılan depremler.

No	Depremler	Tarih	İstasyonları Konumu	M_w	PGA (g)	Odak Uzaklığı (km)
D1	Northridge-01	1994	PAC175	6,69	0,41	18.20
D2	Erzican	1992	Erzican	6.69	0.49	23
D3	Parkfield-02	2004	Fault Zone1	6.00	0.60	11.67
D4	Cape Mendocino	1992	Petrolia	7,01	0.66	10.5
D5	Düzce	1999	Bolu	7,14	0.8	12

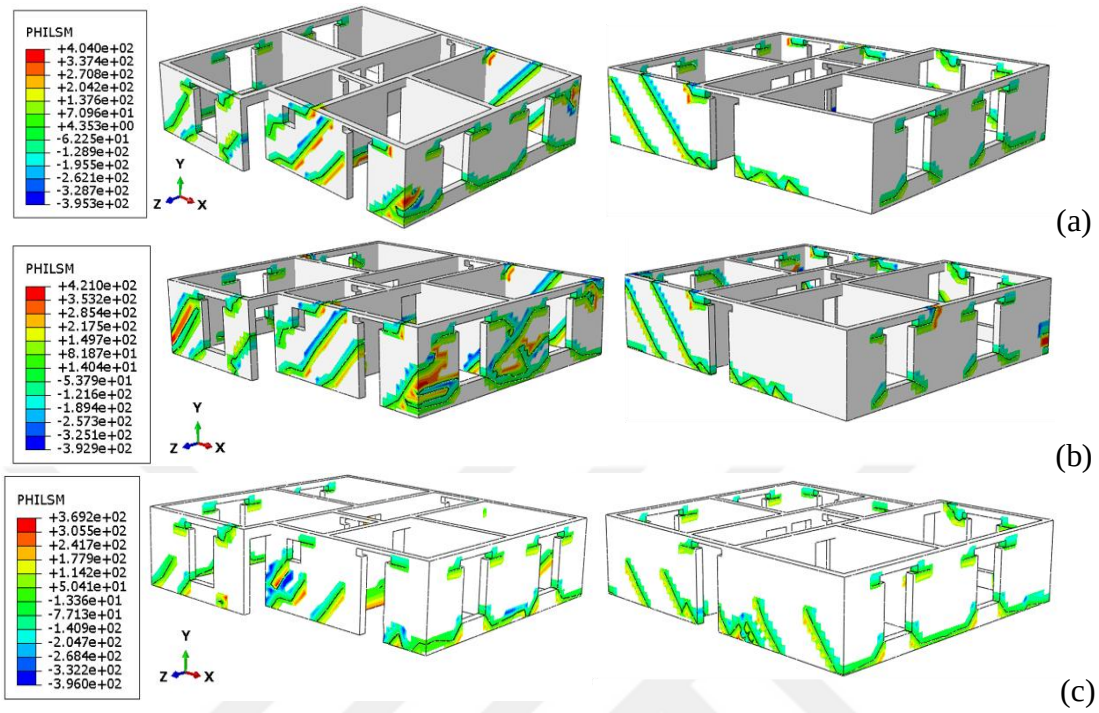
Deprem yer hareketlerine maruz kalan yığma yapıların potansiyel göçme modlarını araştırmak için Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırması veri tabanlarından dört adet yığma yapı malzemesinin potansiyel çatlak ilerlemeleri ve büyümelerini elde etmek için beş adet gerçek deprem kaydı seçilmiştir, üç farklı çatlak eğim açısı (30°,45° ve 60°) sunulmuştur (Şekil 2.150). XFEM yöntemlerini hasar oluşumu, ilerlemesi ve büyümesi karşılaştırmak için tuğlalı model farklı deprem altında analiz edilmiştir. ABAQUS yazılımında izoplane PHILSM değişkenleri seçilmiştir. Zaman tanım alanı analizi altında ABAQUS yazılımında XFEM metodu tarafından simüle edilen deprem şiddeti kullanılarakak hasar ilerlemeleri karşılaştırılmaktadır.



Şekil 2.150. Duvarlardaki çatlakların yeri

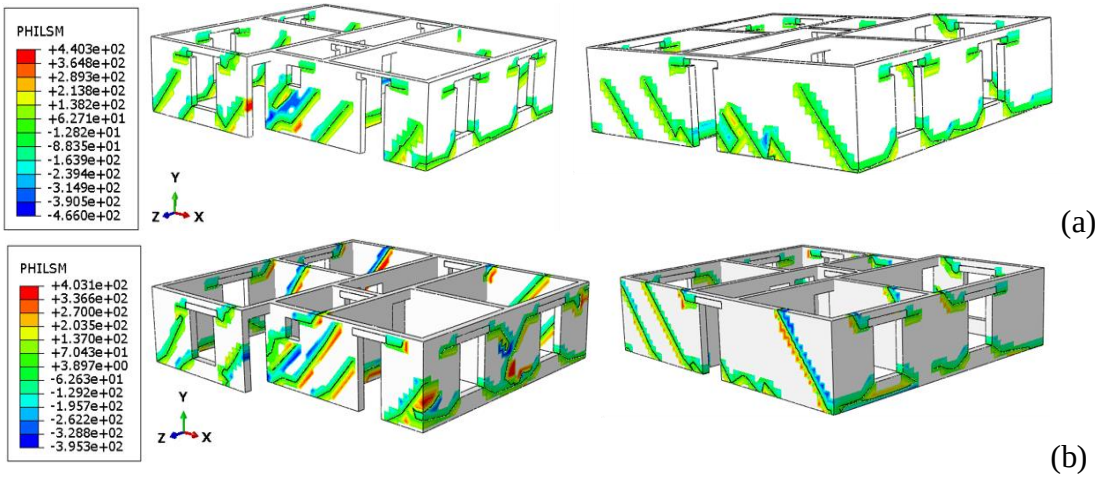
Farklı açılarla ve farklı depremle tuğla duvarların altında çatlak ilerlemesi ve hasar biçimleri sırasıya Şekil 2.151, Şekil 2.152, Şekil 2.153, Şekil 2.154 ve Şekil 2.155'te verilmektedir.

✓ **Northbridge deprem**



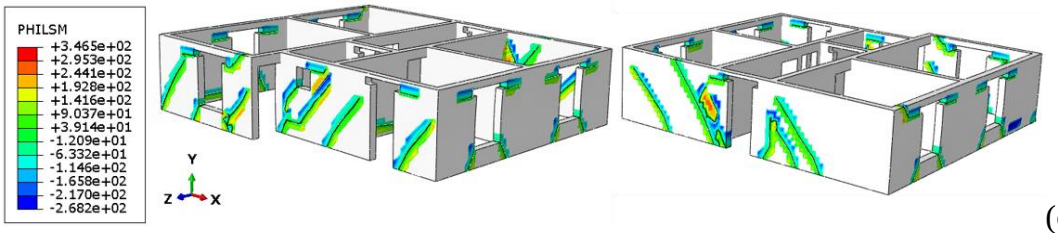
Şekil 2.151. Farklı açılarla sahip tuğla duvarların Northbridge deprem altında çatlak ilerlemesi ve hasar biçimleri

✓ **Erzincan depremi**



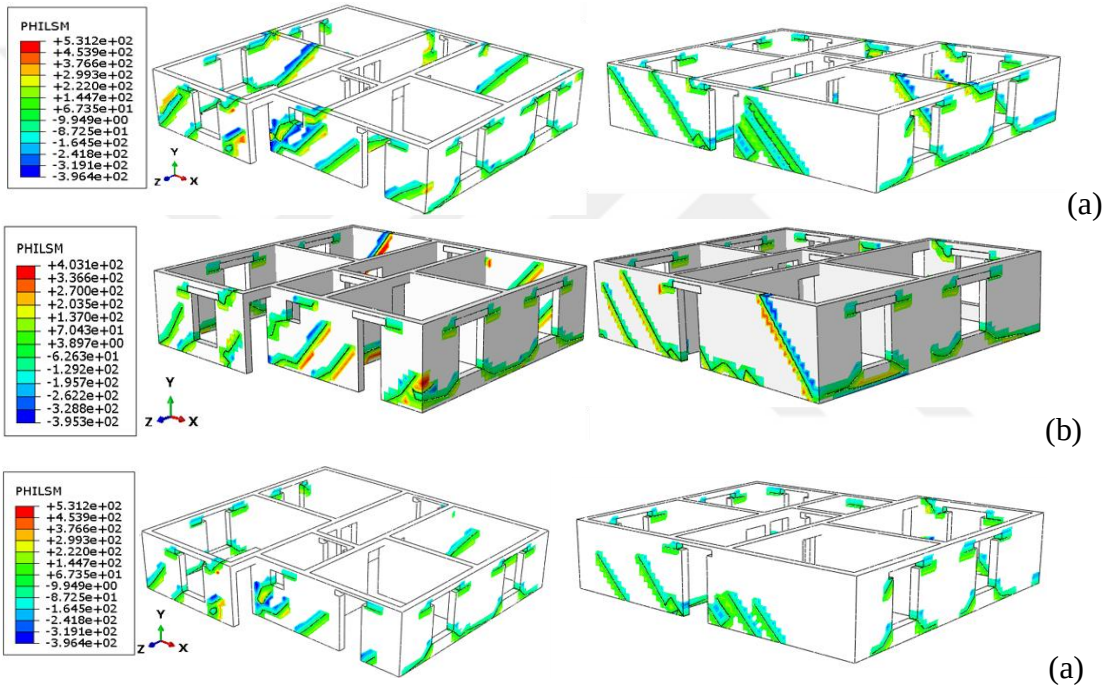
Şekil 2.152. Farklı açılarla sahip tuğla duvarların Erzincan deprem altında çatlak ilerlemesi ve hasar biçimleri

Şekil 2.152'in devamı,



(c)

✓ **Parkfireld depremi**



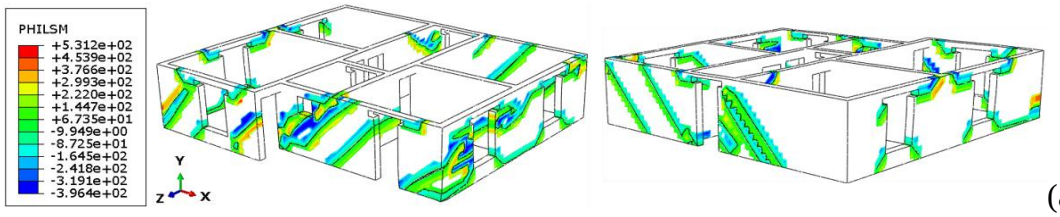
(a)

(b)

(a)

Şekil 2.153. Farklı açılarla sahip tuğla duvarların Parkfireld deprem altında hasar çatlak ilerlemesi ve hasar biçimleri

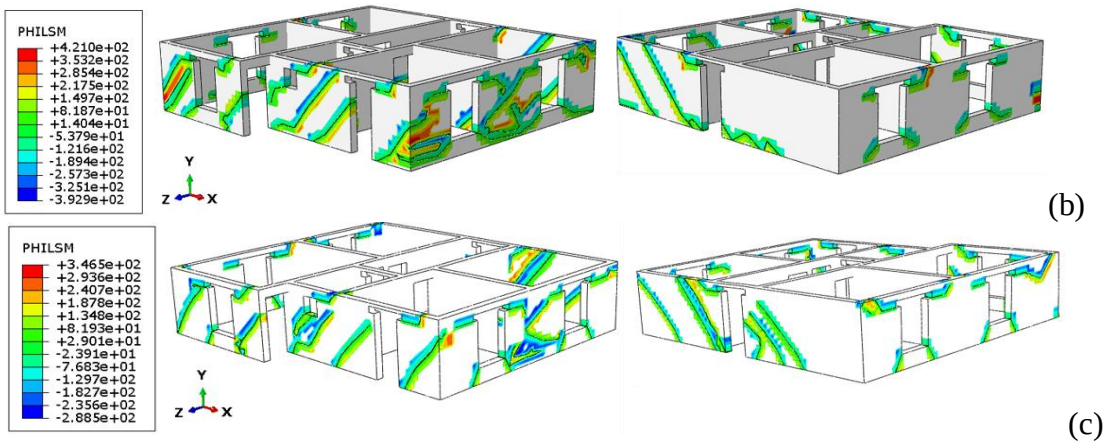
✓ **Cape Mendocino depremi**



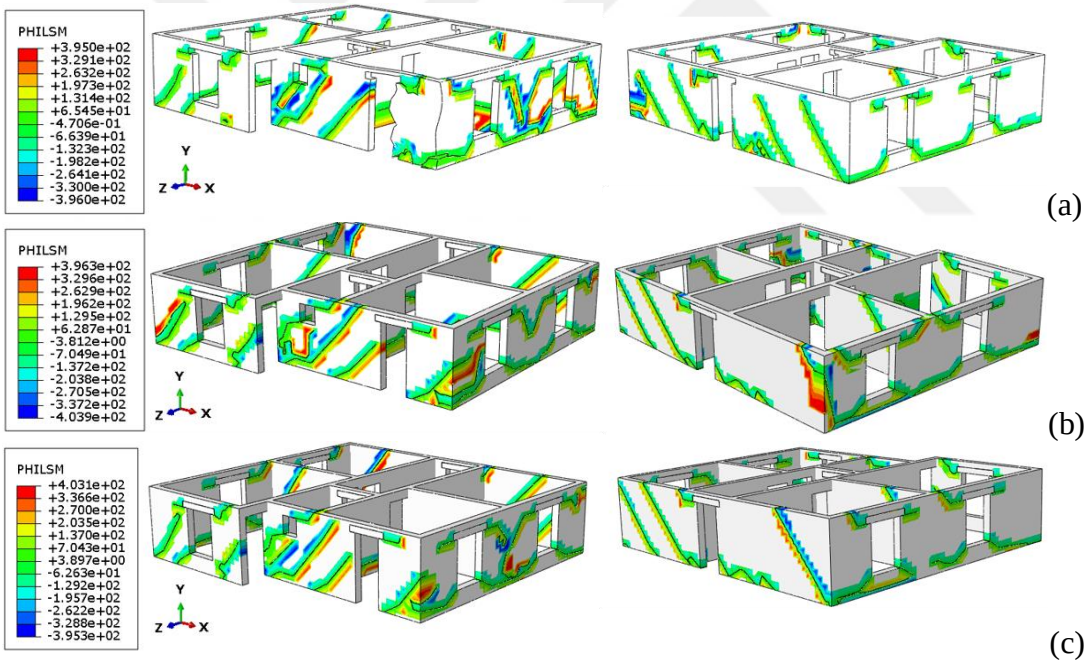
(a)

Şekil 2.154. Farklı açılarla sahip tuğla duvarların Cape Mendocino deprem altında hasar çatlak ilerlemesi ve hasar biçimleri

Şekil 2.154'ün devamı,



✓ **Düzce**



Şekil 2.155. Farklı açılarla sahip tuğla duvarların Düzce deprem altında hasar çatlak ilerlemesi ve hasar biçimleri

Hasarlar incelendiğinde yapılan analizlerde 45 derecelik açıdaki hasarların daha büyük boyutlara ulaştığı görülmüştür. Bu bağlamda açının daha elverişsiz olduğu söylenebilir. Bu analizler dikkate alındığında Düzce yer hareketi diğer depremlere göre daha büyük hasarlara sebep olmaktadır. Literatür araştırıldığında benzer hasarların olduğu görülmüştür.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen bu doktora tez çalışması kapsamında yığma yapıların sayısal olarak modellenmesi amaçlanmış ve tez üç kısma ayrılmıştır.

Tez çalışmalarının ilk kısmında 6 farklı yığma yapıda doğrulama (Benchmark) çalışmaları gerçekleştirilerek sayısal modelin doğruluğu teyit edilmiştir. Doğrulama çalışmalarında uygulanan yöntemler ve uygulamalar aşağıda sunulmaktadır:

- ✓ Doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi, modal analiz ve statik analizler ABAQUS yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Literatürden alınan gerçek mevcut yığma yapılarla doğrulanan, iki boyutlu modelden üç boyutlu binalara kadar artan karmaşıklığa sahip altı doğrulama (Benchmark) çalışması yapılmıştır. Tüm yığma binaların modellenmesiyle ilgili belirli kritik yönleri araştırmak için özel olarak modellemeler gerçekleştirilmiştir.
- ✓ İlk doğrulama analizinde betonarme çerçeve modelinin 5 farklı durumu için (bir, iki, üç katlı dolgusuz, tuğla duvar dolgulu, tuğla duvar+sıvalı) deneysel verileri sayısal olarak elde edilmiştir. Deneysel Modal Analiz testleri sonucunda ilk üç mod için elde edilen frekans ve mod şekilleri sayısal olarak elde edilmeye çalışılmıştır. Modal analizler sonucunda deneysel ve sayısal doğal frekanslar arasındaki farklar %0.04 ile %5.18 arasında elde edilmiştir. Deneysel ve sayısal mod şekilleri birbirleriyle uyumlu olarak elde edilmiştir. Oluşturulan sonlu eleman modellerin malzeme özellikleri, sınır koşulları, ağ yapısı gibi parametreler üzerinde değişiklikler yapılarak hata oranları azaltılabilir.
- ✓ İkinci doğrulama analizinde deneysel çalışmadan elde edilen taş blok numune davranışları sonlu eleman ile modellenmiş ve doğrulanmıştır. Dört noktalı eğme analizi sonucu elde edilen sayısal ve deneysel maksimum kırılma yükleri arasındaki hata oranları, Numune-G0'da %2.85, Numune -G2'de ve %0.52 Numune-G4'te %1.21'dir iken maksimum sehim değerleri ise Numune -G0'da %2.50, Numune -G2'de %1.75 ve Numune-G4'te %1.30'dir.
- ✓ Üçünü doğrulama analizinde aynı geometriye sahip dolgu duvarın hasarsız, hasarlı ve güçlendirilme durumları için elde edilen doğal titreşim frekans değerleri ve mod şekilleri deneylerden elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Yığma duvarların sayısal analizi için seçilen modelleme tekniği, kullanılan malzeme modeli ve kırılma hipotezi tanımlanmış, mikro modelleme tekniği ile doğrusal olmayan üç boyutlu olarak

modellenmiştir. Sayısal model ve deney verilerine ait yük-yerdeğiştirme eğrisinin grafiği oldukça yakın olarak elde edilmiştir. Hasarlı model için sayısal ve deneysel yük taşıma kapasitesi ve yer değiştirme değerleri hata oranları sırasıyla %4 ve %1'in altında elde edilmiştir. Güçlendirilmiş model için sayısal ve deneysel maksimum yer değiştirme ve yük taşıma kapasitesi değerleri arasındaki hata oranı %3'ün altında elde edilmiştir. Deneysel olarak hasarlı ve güçlendirilmiş numunelerin hasar biçimleri sayısal olarak elde edilmiştir.

✓ Dördüncü doğrulama analizinde tek odalı yarım ölçekli bir yığma bina modelinin deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler ve çatlak dağılımlarının verileri sayısal modeller aracılığıyla elde edilmiştir. Farklı depremlerden kaynaklanan sismik hasar modelleri, yeniden başlatma analizi (Restart analysis) kullanılarak belirlenmiştir. Dördüncü doğrulama için yapılan çalışmalar iki aşamaya ayrılmıştır.

- ❖ İlk aşamada sonlu eleman model güncelleme işlemi gerçekleştirilerek deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki fark %4 olarak elde edilmiş ve yapının mod şekilleri arasında çok iyi bir uyum sağlanmıştır. İlk iki mod enine ve boyuna ötelenme, üçüncü mod ise burulma modu olarak elde edilmiştir.
- ❖ İkinci aşamada ABAQUS/Explicit kullanılarak farklı depremler altında çatlak oluşumu ve ilerlemesi sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal sonuçlara dayanarak, doğal frekans değerleri, mod şekilleri, yer değiştirmeler ve çatlak biçimleri ile ilgili deneysel verilere kıyasla oldukça tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Sayısal modelin doğruluğu ve güvenilirliği, beton hasar plastisite (CDP) ve eleman silme yöntemleri ile sağlanmıştır. Ancak Eleman silme metodu için yığma duvarlarda mesh tipinin rafine edilmesi ve ardından yeterince küçük bir mesh elde edilmesi gerekmektedir.

✓ Beşinci doğrulama analizinde level set düğüm tekniğine dayanan XFEM kullanılarak Lagoa Comprida ağırlık barajının memba yüzeyinin üzerinde hasarsız ve başlangıç çatlak uzunluğuna sahip durumlar için doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı başlangıç çatlak uzunlukları karşılaştırılmış ve çatlak biçimleri açısından önemli farklılıklar gözlemlenmiştir. Başlangıç çatlak uzunluğu baraj modellerinde çatlaklar ilerleme davranışında önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Lagoa Comprida barajının sayısal ve deneysel doğal frekanslar arasında hesap edilen en büyük fark %2.81 olarak elde edilmiştir. Dolayısı ile deprem analizleri öncesinde sayısal modelde herhangi bir iyileştirme yapılmasına gerek duyulmamıştır (<%5). Ayrıca, Lagoa Comprida barajı modeli arasında elde edilen sayısal ve deneysel mod şekilleri birbirlerine benzer şekilde elde edilmiştir.

✓ Altıncı doğrulama analizinde 1967 Koyna depreminin ağırlık barajı üzerindeki etkileri sunulmuştur. Koyna barajının ilk üç doğal frekans değerleri 19-71Hz aralığında elde edilmiştir. Sayısal modelinin ilk üç doğal frekansı (Chopra ve Chakrabarti, 1973; Mridha ve Maity, 2014) tarafından bildirilen değerlerle makul bir uyum göstermişlerdir. Barajın çatlaksız ve çatlaklı durumları XFEM yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çatlak ilerlemesi çatlak büyümesi ve son çatlak biçimleri için XFEM tahminlerinin iki farklı çatlak durumu (çatlaksız ve çatlaklı) elde edilenler ile deneysel olarak tahmin edilen çatlak başlangıcı, ilerlemesi ve büyümesi arasında iyi bir uyum elde edilmiştir.

✓ Bu çalışmada oluşturulan sayısal model donatısız yığma yapılardan oluşmakta olup, hem mikro hem de makro modelleme teknikleri kullanılmıştır. Modelleme sürecinde farklı sonlu eleman türleri de kullanılmıştır. ABAQUS 2019 yazılımında CDP ve Drucker-Prager kırılma kriteri akma yüzeyi kullanılarak model üzerinde doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Genel olarak, çalışma donatısız yığma duvarların davranışına ilişkin önemli bilgiler sağlar ve gelecekte bu tür yapıların tasarımını ve inşasını iyileştirmek için kullanılabilir. Sayısal modelleme teknikleri, ABAQUS bir sonlu elemanlar yazılımı ile birleştirilmesi, yığma yapıların davranışını incelemek için güçlü bir araç sağlamaktadır.

Tez çalışmalarının ikinci kısmında farklı yığma malzemeli (delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim) iki ve üç katlı binaların dinamik davranışlarında hasarsız, hasarlı, onarım ve güçlendirme halleri ile meydana gelen değişimler sayısal dinamik karakteristikler üzerinden incelenmiştir. Bu amaçla yeniden başlatma, içe aktarma gibi metotlar kullanılmıştır. Her bir yığma malzemeye ait 7 analiz olmak üzere toplam 28 analizde yapılmış ve her bir modelden elde edilen dinamik davranışlar arasındaki farklılıklar irdelenmiştir. Bu ikinci kısımda gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sayısal sonuçlar aşağıda sunulmaktadır:

✓ Delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim malzemeli iki katlı modellerin hasarlı ve güçlendirilmiş hallerindeki rijitlik orantılı değerleri arasındaki farklar sırasıyla %18.76, %22.54,%27.30 ve %26.20 olarak düşünülmüştür. TRM ile güçlendirilmiş model, güçlendirilmiş model toplam rijitlik değerlerinin %18-%28 arasında artmasına katkıda bulunmuştur. Hasarsız ve hasarlı hallerinden elde rijitlik toplam artışı eksi değerleri arasındaki farklar sırasıyla %19.07 , %21.40, %20 ve %24.24 olarak elde edilmiştir. Hasarlı model ortamının toplam rijitlik değerleri yaklaşık %19-%25 arasında azaltmasına katkıda bulunmuştur. Elde edilen titreşim doğal frekanslarının azalması ile ters orantılı olarak bina

rijitlikleri düşmektedir. Rijitlikle orantılı olarak yapıya etkiyen deprem kuvvetleri de değişmektedir.

✓ Onarım/güçlendirme yöntemi, genel yapısal davranışı desteklemiş ve duvarların sismik performansında önemli bir artışa yol açmıştır.

✓ Elastisite modülü yüksek olan kilitli yığma birim ve delikli tuğla yığma binalar deprem yükü altında dolu briket ve gazbeton yığma binalara göre daha az hasar almıştır.

✓ TRM ile güçlendirilmiş duvarlarda hem düzlem içi hem de düzlem dışı çekme gerilmesi değerleri, çatlak ilerlemesi ve hasarları önemli ölçüde azalmaktadır.

✓ Farklı yığma malzemeli duvarlarda çatlaklar çoğunlukla duvar kesişim ve birleşim bölgelerinde lokalize olup merdiven basamakları gibi çekme çatlakları meydana gelmektedir. Yanal kayma çatlaklar düzlem içi ve daha yoğun düzlem dışı duvarlarda da oluşmaktadır. Erzincan depremi sırasında, kapı ve pencere boşluklarının çevresindeki duvar kısımları hasara karşı savunmasız kalabildiğini göstermiştir, çünkü bunlar tipik olarak yığma binalarındaki zayıf noktalardır. Delikli tuğla ve kilitli yığma birim malzemeli modelleri için çatlaklar çoğunlukla binanın alt katında yoğunlaşmakta (hem düzlem içi hem de düzlem dışı duvar) iken dolu briket ve gazbeton modellerinde ise hem birinci kat hem de ikinci katta hasar meydana gelmektedir. Ancak birinci katta ikinci kata göre daha fazla hasar oluşurken, üç katlı binalarda için son katta daha az hasar yoğunlaşmaktadır. Bu çatlaklar, yığma duvarlarının dayanımını azaltır ve sonunda taşıma kapasitesini düşürür. Bu nedenle, bu yığma yapı elemanlarının onarım ve veya güçlendirilmesi önemlidir.

✓ Güçlendirilmiş durumlar için, en fazla çatlak gazbeton ve dolu briket malzemeli modelin sırasıyla düzlem dışı ve düzlem içi duvarlarında gözlemlenmiştir. Bu nedenle, yığma binaların tasarımına özel dikkat gösterilmelidir. Ancak delikli tuğla ve kilitli yığma birim malzemeli modelleri için, düzlem içi duvardaki az yatay çatlaklar dışında duvarlarda gözle görülür bir çatlak gözlenmedi.

✓ İki katlı ve üç katlı analiz sonuçlarına göre, hasar görmüş binaların onarımı ile rijitlik ve mekanik özellikleri yeniden kazanılmıştır, ancak tamamen hasarlı olmayan duruma geri getirilmesi mümkün değildir.

✓ Analizlerden sonra elde edilen çatlaklar iki yaygın tip olarak sınıflandırılabilir. Birinci tip önemli zarar vermeyen çatlaklar, ikinci tip ise oldukça ciddi çatlaklardır. Çatlaklar duvar boyunca ilerlemiyorsa bu tip çatlaklara zarar vermeyen çatlak denilebilir. Çatlaklar duvar boyunca yayılıyorsa bu tip çatlaklara oldukça ciddi çatlaklar denilebilir. Başlangıç

çatlağın eğiminin ve maksimum çekme değerlerine yakın konumlarının ve potansiyel hasar bölgesinin çatlak ilerlemesi ve büyümesi üzerinde önemli etkisi olduğu gösterilmiştir.

✓ Bu çalışmada farklı yığma modellerde yapısal malzemenin delikli tuğla, dolu briket, gazbeton ve kilitli yığma birim olması durumları dikkate alınarak modellerin kırılma davranışları incelenmiştir. Sayısal çalışmalarında beton hasar plastisitesi (CDP), Silme elemanı (SE), XFEM ile karşılaştırıldığında çatlakların ilerlemesi belirli bir noktaya kadar benzer sonuçlar elde edilmiştir. Doğrulamak ve daha doğru sonuçlar elde etmek için deneysel çalışma yapılmalıdır.

✓ Delikli tuğla, dolu briket ve kilitli yığma birim binaların en çok hasar görmüş kat duvarlarının dış cephesine TRM tabakasının uygulanmasını makul derecede etkili olduğu ve bunların sismik performanslarında önemli bir iyileşme sağladığı bulunmuştur. Ancak elde edilen sonuçlardan, TRM güçlendirmesinin gazbeton binaların tam güvenliğini sağlayamayacağı anlaşılmaktadır. Özellikle TRM tabakası bir duvarın sadece dış kısımlarına uygulandığında duvarda yine de bazı hasarlar oluşmaktadır. Bu sorunun önüne geçmek için harç kalınlığının veya TRM kat sayısının arttırılması ya da duvar iç cephelerinde TRM katmanı uygulama yapılması, bu çözümler bina davranışı açısından faydalı görülebilir.

✓ Sonlu elemanlar yöntemi ABAQUS yazılım ile üç boyutlu olarak modellenen yığma yapıların hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş halleri için frekans değerleri ayrı ayrı sunulmuştur. Elde edilen doğal titreşim frekans değerlerine bakıldığında, yapıların kilitli yığma birim malzemeyle modellenmesi sonucu ortaya çıkan doğal titreşim frekans değerlerinin, delikli tuğla, dolu briket ve gazbeton ile modellenmesi sonucu ortaya çıkan doğal titreşim frekans değerlerinden daha büyük olduğu görülmüştür.

✓ Elde edilen yer değiştirme sonuçlarına gazbeton modelindeki yer değiştirmelerin delikli tuğla, dolu briket ve kilitli yığma birimdeki yer değiştirmelere göre çok daha fazla olduğu görülmüştür.

Tez çalışmalarının üçüncü kısmında tek katlı yığma binada tuğla, dolu briket, gaz beton ve kilitli yığma birim malzemeleri kullanılarak dört faklı malzeme durumu için zaman tanım alanında analiz yöntemi kullanılarak beş deprem ivme kaydı uygulanmış ve elde edilen yer değiştirme, çatlakların dağılımı ve büyümesi karşılaştırılarak yapının deprem etkisi altındaki güvenilirlikleri belirlenmiştir. Bu bağlamda, çalışmanın sayısal üçüncü kısmının amacı XFEM yöntemi ile modellenmiş olan üç farklı başlangıç çatlaklar açı içeren ve farklı deprem yüklere maruz kalan yığma yapıların davranışını modellemeyi amaçlamaktadır.

✓ XFEM, kırılma mekaniği problemleri için birçok avantaj sunsa da ABAQUS yazılımında uygulanması hala bazı dezavantajlara sahiptir. Bu çalışmada yakınsama sorunlarıyla karşılaşıldı. Bu zorlukların ana nedenleri, yapıların karmaşık geometrisi ve karmaşık kırılma davranışlarıyla ilgili olabilir. Yakınsama zorluklarının üstesinden gelmek için çatlak ilerlemesi için çok az zaman artımı uygulanmalıdır. Ancak az zaman artımı, analizlerin simülasyon süresini arttırır.

Mevcut çalışma, ek araştırmaya ihtiyaç duyan bazı bilgi boşluklarının tanımlanmasına izin vermiştir. Daha sonraki bir araştırmaya dâhil edilecek ana konuların bir önerisi aşağıdaki paragraflarda sunulmaktadır:

❖ TRM ile güçlendirilmiş duvarın davranışı için deneysel testler yapmak gerekmektedir, çünkü bu güçlendirme sisteminin etkinliğinin deprem yükleme koşullarına, çeşitli kurulum değişkenlerine veya bileşen malzemelerine bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, bu kompozit malzemeyi anlaşılır bir şekilde karakterize etmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

❖ Yığma yapıların şiddetli bir depreme karşı tepkisini değerlendirmek için, gelecekteki çalışmalarda Türkiye'nin kırsal bölgelerindeki farklı bina plan durumlarına odaklanılmalıdır. Öte yandan zemin-yapı etkileşimi, diğer ölü yükleri, boşluk oranı gibi tipik özelliklerin etkisi bu araştırma için bir gereklilik olmalıdır.

4. KAYNAKLAR

Abacı, D. 2012. Sonlu elemanlar desteği ile kırılma tokluğunun elde edilmesi, Yüksek LisansTezi, Trakya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

ABAQUS, 2014. Dassault SystèmesSimulia Corp.: Providence, RI, USA.

Abbas, A. L., ve Saeed, M. H., 2019. Simulation two storey house of masonry wall under the earthquake load. Dıyala J Eng Scı, 12, 1-2.

Abdelmoneim Elamin Mohamad, A. B., ve Chen, Z., 2016. Experimental and numerical analysis of the compressive and shear behavior for a new type of self-insulating concrete masonry system. Applied Sciences, 6(9), 245.

Abdulla, K. F., Cunningham, L. S., ve Gillie, M., 2017. Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach. Eng Struct 151:349–365.

ACI Committee 318, 2008. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 48331.

Akhundi, F., Vasconcelos, G., ve Lourenço, P., 2018. In-plane behavior of infills using glass fiber shear connectors in textile reinforced mortar (TRM) technique. International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research, 2(1), 1-14.

Akköse, M., 2004. Lagrange yaklaşımı ile kemer baraj-su-zemin sistemlerinin malzeme bakımından lineer ve lineer olmayan dinamik analizi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Aköz, H., 2008. Deprem etkisi altındaki yığma yapıların onarım ve güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Alhaddad, M. S., Siddiqui, N. A., Abadel, A. A., Alsayed, S. H., ve Al-Salloum, Y. A., 2012. Numerical investigations on the seismic behavior of FRP and TRM upgraded RC exterior beam-column joints. Journal of Composites for Construction, 16(3), 308-321.

Aliaari, M., ve Memari, A., M., 2005. Analysis of Masonry Infilled Steel Frames with Seismic Isolator Subframes, Engineering Structures, vol. 27, pp. 487-500.

Al-Lami, K., T. D'Antino., ve P. Colombi. 2020. Durability of fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) composites: A review. Appl. Sci. 10 (5): 1714.

Almeida, J.A., Bordigoni, D., Pereira, E.B., Barros, J.A., ve Aprile, A., 2016. Assessment of the properties to characterise the interface between clay brick substrate ve strengthening mortar. Construction ve Building Materials, 103, pp.47-66.

Altunışık, A. C., Karahasan, O. Ş., Okur, F. Y., Kalkan, E., ve Özgan, K., 2020. Ambient vibration test and modelling of historical timber mosques after restoration. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 173(12), 956-968.

Altunişik., A. C., Karahasan., O. Ş., Genç., A. F., Okur., F. Y., Günaydin., M., Kalkan, E., ve Adanur., S., 2018. Modal parameter identification of RC frame under undamaged, damaged, repaired and. Measurement, 124, 260-276.

Altunsık, A. C., Gunaydin, M., Sevim, B., ve Adanur, S., 2017. System identification of arch dam model strengthened with CFRP composite materials. Steel Compos. Struct, 25(2), 231-244.

ANSYS, 2015. Swanson Analysis System, Pennsylvania, USA.

Argüelles, A., Vina, J., Canteli, A. F., Castrillo, M. A., ve Bonhomme, J., 2008. Interlaminar Crack Initiation and Growth Rate in a CarbonFibre Epoxy Composite under Mode-I Fatigue Loading. Composites Science and Technology, 68, 2325-2331.

Arıcan, Y., 2010. Yığma yapıların deprem etkisi altındaki davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Ascione, L., De Felice, G., ve De Santis, S., 2015. A qualification method for externally bonded Fibre Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) strengthening systems. Composites Part B: Engineering, 78, 497-506.

Asteris, P.G., ve Tzamtzis A.D., 2003. On the Use of a Regular Yield Surface for the Analysis of Unreinforced Masonry Walls, Electronic Journal of Structural Engineering 3:23-42.

Asteris, P. G., 2008. On the structural analysis and seismic protection of historical masonry structures. The Open Construction & Building Technology Journal, 2(1).

Asteris, P. G., Chronopoulos, M. P., Chrysostomou, C. Z., Varum, H., Plevris, V., Kyriakides, N., ve Silva, V., 2014. Seismic vulnerability assessment of historical masonry structural systems. Engineering Structures, 62-63(15), 118–134. doi:10.1016/j.engstruct.2014.01.031.

Asteris, P. G., Skentou, A. D., Moropoulou, A., Apostolopoulou, M., Mohebkhah, A., Cavaleri, L., Rodrigues, H., ve Varum, H., 2019. Stochastic vulnerability assessment of masonry structures: Concepts, modeling and restoration aspects. Applied Sciences (Switzerland), 9(2).

Aşıkoğlu, A., Avşar, Ö., Lourenço, P. B., ve Silva, L. C., 2019. Effectiveness of seismic retrofitting of a historical masonry structure: Kütahya Kurşunlu Mosque, Turkey. Bulletin of Earthquake Engineering, 17(6), 3365-3395.

Babaeidarabad, S., De Caso, F., ve Nanni, A., 2014. URM walls strengthened with fabric-reinforced cementitious matrix composite subjected to diagonal compression. Journal of Composites for Construction, 18(2), p.04013045.

Backes, H., 1985. On the behavior of masonry under tension in the direction of the bed joints, Dissertation, Aachen University of Technology, Aachen, Germany .

Baraldi, D., ve A. Cecchi, 2017. A full 3D rigid block model for the collapse behaviour of masonry walls. European Journal of Mechanics - A/Solids,. 64: p. 11-28.

Baran, B., Bozdoğan, K. B., ve Atabey, İ. İ., 2022. Farklı duvar malzemelerine sahip yığma bir binanın 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre karşılaştırılması. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(3), 1066-1075.

Basili, M., Vestroni, F., ve Marcari, G., 2019. Brick masonry panels strengthened with textile reinforced mortar: experimentation and numerical analysis. Construction and Building Materials, 227, 117061.

Bathe, K. J., 1996. Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, New Jersey, USA

Batur, N., 2006. Yığma yapı tasarımı ve analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Bayrak, O. F., Bikçe, M., Erdem, M., ve Emsen, E., 2020. Dolgu duvarların düzlem içi ve düzlem dışı davranışına esnek derzli bağlantı elemanının etkisi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 3 (1) , 24-28.

Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., ve Sevim, B., 2007. The Determination of Model Updating Effects on Earthquake Behaviour of Masonry Buildings, International Earthquake Symposium, October 22-24, Kocaeli, Bildiriler Kitabı: 381-392.

Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., Sevim, B., 2007. Sayısal model iyileştirmenin yığma binaların deprem davranışına etkisinin belirlenmesi, Kocaeli Sempozyumu.

Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., Sevim, B., Şahin, A. ve Özcan, M., 2010. Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonal Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Teknik Dergi, 21, 4, 5185-5206.

Bayülke, N. 2001. Depremde Hasar Gören Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, İzmir.

Bekir, Ö., A., Y., ve Azak, T., E., 2021. Türkiye'de değişen yapı özel iklerinin karşılaştırmalı incelemesi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, cilt.36, sa.4, ss.1111-1126.

Belarbi, A. ve Hsu, T. T., 1994. Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete. Structural Journal, 91(4), 465-474.

Belytschko, T., ve Black, T., 1999. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing Int. J. Numer. Methods Eng. 45 601-20.

Bernat, E., Gil, L., Roca, P. ve Escrig, C., 2013. Experimental and analytical study of TRM strengthened brickwork walls under eccentric compressive loading. Construction and Building Materials, 44, 35-47.

Bernat-Maso, E., Escrig, C., Aranha, C. A., ve Gil, L., 2014. Experimental assessment of Textile Reinforced Sprayed Mortar strengthening system for brickwork wallettes. Construction and Building Materials, 50, 226-236.

Berndt, E., 1996. Long-term Behaviour of Historic Masonry. Construction and Building Materials, 4(6), 35-49.

Bertolesi, E ve Milani. G., 2015. Diagonal Compressive Tests on Double Wythe Brick Ancient Masonry Panels Unreinforced and Reinforced with Innovative Cement Based Materials: Advanced FE Simulations, RILEM Bookseries, 18, 2019, pp. 1000–1008.

Bertolesi, E., Buitrago, M., Torres, B., Calderón, P. A., Adam, J. M., ve Moragues, J. J., 2019. Experimental and numerical investigation on TRM reinforced masonry vaults subjected to monotonical vertical settlements. Polytechnic School of Alicante 23rd–25th October, 321.

Bhattacharjee, S.S., ve Leger, P., 1993. Seismic Cracking and Energy Dissipation in ConcreteGravity Dams, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 22, No. 11, pp. 991–1007.

Bikçe, M., 2017. 23 Ekim 2011 Van Depreminde Ağır Hasar Alan Yapının Güçlendirme Önce ve Sonrasında Sayısal İncelenmesi.Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29(1), 341-374.

Bilgehan, M., Güneş, M. R., Özay, R., ve Bilgehan, C., 2019. Tarihi Yığma Bir Yapının Deprem Performansının Belirlenmesi. International Science and Engineering Applications Symposium on Hazards 2019 (ISESH)

Bilgin, H., ve Korini, O., 2012. Seismic capacity evaluation of unreinforced masonry residential buildings in Albania, Natural hazards and earth system sciences, 12(12), 3753.

Blanksvärd, T., ve Täljsten, B., 2008. Strengthening of concrete structures with cement based bonded composites. Nordic Concrete Research, (2), 143-163.

Blondet, M., 2006. Construction and Maintenance of Masonry Houses for Masons and Craftsmen, Pontificia Universidad Catolica del Peru, Lima.

Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N., ve Iwaki, C., 2011. Seismic resistant earthen construction: the contemporary experience at the Pontificia Universidad Católica del Perú. Informes de la Construcción, 63(523), 41-50.

Bolhassani M., Hamid A., A., Lau A., C., V., ve Moon F., 2015. Simplified Micro Modeling Of Partially Grouted Masonry Assemblages, Construction and Building Materials, 83, 15, 159–173.

Bretas, E. M., Lemos, J. V., ve Lourenço, P. B., 2016. Seismic analysis of masonry gravity dams using the discrete element method: Implementation and application. Journal of Earthquake Engineering, 20(2), 157-184.

Bui, T. T., 2013. Etude expérimentale et numérique du comportement des voiles en maçonnerie soumis à un chargement hors plan (Doctoral dissertation, Lyon, INSA).

Calio I., Marlett, M., ve Panto B., 2012. A New Discrete Element Model for the Evaluation of the Seismic Behavior of Unreinforced Masonry Buildings. Engineering Structures, 40: 327-338.

Can, H., Kubin, J., Ünay, A., İ., Düzensiz Geometrik Şekile Sahip Tarihi Yığma Binaların Sismik Davranışı, G.Ü. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 2012, 27(3), 679-686.

Casacci, S., Gentilini, C., Di Tommaso, A., ve Oliveira, D.V., 2019. Shear strengthening of masonry wallettes resorting to structural repointing ve FRCM composites. Construction ve Building Materials, 206, pp.19-34.

Carozzi, F. G., Milani, G., ve Poggi, C., 2014. Mechanical properties and numerical modeling of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for strengthening of masonry structures. Composite structures, 107, 711-725.

Celep, Z., 2011. Yapı Dinamiği, Dördüncü Baskı, İstanbul, Beta Dağıtım, Türkiye.

CEN, 2005. Eurocode 6: design of masonry structures part 1-1: common rules for reinforced and unreinforced masonry structures. EN 1996-1-1:2005.

CENAPRED, 2002. Metodos de Refuerzo para la Vivienda Rural de Autoconstruccion (Spanish), Centro Nacional de Prevencion de Desastres, Primera Jornada Nacional De Simulacros Para La revencion de Riesgos, Mexico.

Chamaky, R., Y., 2014. Yığma yapıların deprem analizi ve uygun güçlendirme teknikleri. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Chellappa, S., ve Dubey, R. N., 2018. Performance evaluation of a reinforced masonry model and an unreinforced masonry model using a shake table testing facility. Journal of Performance of Constructed Facilities, 32(1), 04017121.

Chopra, A. K., ve Chakrabarti, P. 1973. The Koyna earthquake and the damage to Koyna dam. Bulletin of the Seismological Society of America; 63(2): 381–97

Chopra, A., K., ve Chakrabarti. P. 1970. A Computer Program for Earthquake Analysis of Dams, Report No. EERC 70 5, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.

Chopra, A., K., 2011. Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering, Fourth Edition, Prentice Hall, USA.

Chopra, A.K., 2006. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Third Edition, Prentice Hall, USA.

Churilov, S., Milkova, K., ve Dumova-Jovanoska, E., 2016. Dynamic identification analysis for the FE model updating of masonry buildings. Brick and Block Masonry – Trends, Innovations and Challenges, 15(1), 129-136.

Coşğun, S.İ., 2014. Betonarme plakların darbe yükü etkisindeki davranışlarının sayısal olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Çakır, F., B.S. Seker, A. Durmus, A. Dogangün., ve H. Uysal., 2015. Seismic assessment of a historical masonry mosque by experimental tests and finite element analyses. KSCE Journal of Civil Engineering 19 (1):158–164.

Çarhoğlu., A. I., Korkmaz., K. A. 2013. Mevcut Yığma Bir Yapının Deprem Davranışının Değerlendirilmesi, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 2(1), 1-11.

Çelik M., Binler Ü., ve Osmanoğlu E., 2019. Trabzon İlinde 2016 Ocak-2019 Ağustos Tarihleri Arasında AFAD tarafından Raporlanan Yangınlar Hakkında Çeşitli İstatistiksel Analizler. International Science and Engineering Applications Symposium on Hazards.

Çöğürcü, M., T., 2007. Yığma yapıların yatay derz güçlendirme yöntemiyle güçlendirilmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya.

Dalalbashi, A., De Santis, S., Ghiassi, B., ve Oliveira, D. V., 2021. Slip rate effects and cyclic behaviour of textile-to-matrix bond in textile reinforced mortar composites. Materials and Structures, 54(3), 108.

Dauda, J., Iuorio, O., ve Paulo, L., 2018. Characterization of brick masonry: study towards retrofitting URM walls with timber-panels. In 10th International Masonry Conference (10thIMC). IMC.

DBYBHY, 2007.Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, ĠnĢaat Mühendisleri Odası EskiĢehir Şubesi, Eskişehir.

De Santis, S., Moretti, G. ve Speranzini, E., 2019. Experimental study on the repair of masonry arches with lime-cement mortars. Construction and Building Materials, 202, 754-764.

De Sensi, B., 2003. Terracruda, la diffusione dell'architettura di terra (Soil, the dissemination of earth architecture).

Demirel., I. O., Erberik., M. A., ve Sucuoğlu., H., 2011. Tuğla yığma yapıların performans esaslı değerlendirilmesi için doğrusal olmayan çerçeve modeli. 1.Türkiye Deprem Mühendisligi ve Sismoloji Konferansı, 11-14 Ekim, Ankara.

DIANA 2010. Finite Element Analysis Software, Delft University, Delft, Netherlands.

DİE, Bina Sayımı, 2000. T.C. Başbakanlık Devlet statistik Enstitüsü, Ankara.

Doğan, H.N.A., 2016. Yığma duvarların mikro ve makro modelleme teknikleri ile lineer olmayan analizi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Doğangün, A., Ural, A., ve Livaoğlu, R., 2008. Seismic performance of masonry buildings during recent earthquakes in Turkey. In The 14thWorld Conference on Earthquake Engineering October (Vol. 12, p. 17).

Drosopoulos, G. A. ve Stavroulakis, G. E., 2018. A computational homogenization approach for the study of localization of masonry structures using the XFEM. Archive of Applied Mechanics, 88(12), 2135-2152.

Du, X., Jin, L., ve Ma, G., 2014. Numerical modeling tensile failure behavior of concrete at mesoscale using extended finite element method. International Journal of Damage Mechanics, 23(7), 872-898.

Dugdale, D.S, 1960. Yielding of steel sheets containing slits. Mech. Phys. Solids, 8, 100–104.0.015.

Durutürk, G. 2012. Yalvaç hamidiye cami deprem analizi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

EC8 (Eurocode 8, NP EN 1998-5), 2010 Design of structures for earthquake resistance, Part 1:General rules, seismic actions and rules for buildings," Instituto Portugês daQualidade, Caparica.

ElGawady, M. A., Lestuzzi, P., ve Badoux, M., 2007. Static cyclic response of masonry walls retrofitted with fiber-reinforced polymers. Journal of composites for Construction, 11(1), 50-61.

Elyamani, A., Roca, P., Caselles, O., ve Clapes, J., 2022. Dynamic Investigation of Cultural Heritage Buildings for Seismic Safety Assessment. In Handbook of Cultural Heritage Analysis (pp. 1187-1220).

EMS-98 (European Macroseismic Scale)., 1998. EMS-98. Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie. Rue Münster, Luxembourg, Belgium.

Erberik, M. A., 2008. Generation of fragility curves for Turkish masonry buildings considering in-plane failure modes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 37, 387–405.

Eurocode 8, 2004. Design of Structures for Earthquake Resistance.

Fathi, A., Sadeghi, A., Emami Azadi, M. R., ve Hoveidaie, N., 2020. Assessing seismic behavior of a masonry historic building considering soil-foundation-structure interaction (Case Study of Arge-Tabriz). International Journal of Architectural Heritage, 14(6), 795-810.

Fayala, I., Limam, O., ve Stefanou, I., 2016. Experimental and numerical analysis of reinforced stone block masonry beams using GFRP reinforcement. Composite Structures, 152, 994-1006.

Feenstra, P. H., ve Rots, J., G., 2001. Comparison of concrete models for cyclic loading. Modelling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, 38-55.

Feltrin, G., Galli, M., ve Bachmann, H., 1992. Influence of Cracking on the Earthquake Response of Concrete Gravity Dams with Reservoir, Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain, Vol. 8, pp. 4627–4632.

FEMA 461, 2007, Federal Emergency Management Agency, Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components, Washington D.C., USA.

Ferretti, D., Michelini, E., ve Rosati, G., 2015. Cracking in autoclaved aerated concrete: Experimental investigation and XFEM modeling. Cement and Concrete Research, 67, 156-167.

Filippou, C. A., Kyriakides, N. C., ve Chrysostomou, C. Z., 2019. Numerical modeling of masonry-infilled RC frame. The Open Construction & Building Technology Journal, 13(1).

Fries, T., ve M. Baydoun., 2012. Crack Propagation with the XFEM and a Hybrid Explicit-Implicit Crack Description, International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol. 89 No. 12, pp. 1527–1558.

Galaso, A., Lagomarsino, S., Penna, A., ve Resemini, S., 2004. Non-linear seismic analysis of masonry structures. Vancouver , 13th World Conference on Earthquake Engineering.

Ganz, H.R., ve Thürlimann, B., 1982. Tests on the biaxial strength of masonry (in German). Report No. 7502-3, Institute of Structural Engineering, ETH Zurich, Zurich, Switzerland.

Gams, M., Tomaževič, M., ve Berset, T., 2017. Seismic strengthening of brick masonry by composite coatings: an experimental study. Bulletin of earthquake engineering, 15, pp.4269-4298.

Garmendia, L., San-José, J. T., García, D., ve Larrinaga, P., 2011. Rehabilitation of masonry arches with coMPatible advanced composite material. Construction and Building Materials, 25(12), 4374-4385.

Garofano, A., Ceroni, F., ve Pecce, M., 2016. Modelling of the in-plane behaviour of masonry walls strengthened with polymeric grids embedded in cementitious mortar layers. Compos. Part B Eng. 85, 243–258.

Gattesco, N., ve Boem, I., 2017. Out-of-plane behavior of reinforced masonry walls: Experimental and numerical study. Composites Part B: Engineering, 128, 39-52.

Gattulli, V., Lampis, G., Marcari, G. ve Paolone, A. 2014. Simulations of FRP reinforcement in masonry panels and application to a historic facade. Engineering Structures, 75, 604-618.

Gedik, N., 2019. Su yapıları ders notu, Balıkesir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü.

Gençer, Ö., 2000. Pomza Katkılı bimsbeton bloklar ile yapılmış yığma yapı üzerinde deprem etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Giordano, A., Mele, E., ve Luca, A., 2002. Modelling of historical masonry structures. Comparison of different approaches through a case study. Engineering Structures, 24(8).

Guggisberg, R., ve Thürlimann, B., 1987. Experimental determination of masonry strength parameters (in German). Report No. 7502-5, Institute of Structural Engineering, ETH Zurich, Zurich, Switzerland.

Gulinelli, P., Aprile, A., Rizzoni, R., Grunevald, Y. H., Lebon, F., Lovisetto, R., ve Tralli, S., 2019. A Fe model for TRM reinforced masonry walls with interface effects. In Key Engineering Materials (Vol. 817, pp. 57-64). Trans Tech Publications Ltd.

Gulinelli, P., Aprile, A., Rizzoni, R., Grunevald, Y. H., ve Lebon, F., 2020. Multiscale numerical analysis of TRM-reinforced masonry under diagonal compression tests. Buildings, 10(11), 196.

Günaydin, M., Atmaca, B., Demir, S., Altunişik, A. C., Hüsem, M., Adanur, S., ve Angin, Z., 2021. Seismic damage assessment of masonry buildings in Elazığ and

Malatya following the 2020 Elazığ-Sivrice earthquake, Turkey. Bulletin of Earthquake Engineering, 19, 2421-2456.

Güneş, S., Anıl, Ö., 2017. Operasyonel Modal Analiz Tekniği İle Yığma Yapıların Dinamik Davranışının Belirlenmesi. 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Eskişehir.

Hadzima-Nyarko, M., Čolak, S., Bulajić, B., Ademović, N., 2021. Assessment of selected Modls for FRP-retrofitted URM walls under in-plane loads. Buildings, 11, 559.

Hafezolghorani, M., Hejazi, F., Vaghei, R., Jaafar, M. S. B. ve Karimzade, K., 2017. Simplified damage plasticity model for concrete. Structural Engineering International, 27(1), 68-78.

Hansbo. A,. ve Hansbo. P., 2004. A finite element method for the simulation of strong and weak discontinuities in solid mechanics. Computer methods in applied mechanics and engineering, 193(33-35):3523–3540.

Harajli, M., ElKhatib, H., ve San-Jose, J. T., 2010. Static and cyclic out-of-plane response of masonry walls strengthened using textile-mortar system. Journal of materials in civil engineering, 22(11), 1171-1180.

Hılsdorf, H. K., 1969. Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression. Designing engineering and constructing with masonry products, 34-41.

Hibbitt, Karlsson., ve Sorensen., 1997. ABAQUS: theory manual (Vol. 2). Hibbitt, Karlsson & Sorensen.

Ibrahim, M., Galal, M., Kohail, M., Rashad, A. ve ElShafie, H., 2022. Behaviour of unreinforced masonry walls retrofitted by using basalt textile reinforced mortar. Engineering Structures, 260, p.114201.

IllaMPas, R., Charmpis, D. C., ve Ioannou, I., 2015. Non-linear dynamic finite element analysis of adobe masonry structures with various roof diaphragm configurations. Seismic Assessment, Behavior and Retrofit of Heritage Buildings and Monuments, 475-487.

Ismail, N., ve Ingham, J. M., 2016. In-plane and out-of-plane testing of unreinforced masonry walls strengthened using polymer textile reinforced mortar. Engineering Structures, 118, 167-177.

Jäger, W., Bakeer, T., ve Schöps, P., 2009. Simulation of masonry in ANSYS and LS-DYNA the features and challenges. In ANSYS Conference & 27th CADFEM Users' Meeting (pp. 1-15).

Kalliontzis.D, and A. Schultz. A,. 2017. Improved estimation of the reverse-cyclic behavior of fully-grouted masonry shear walls with unbonded post- tensioning, Eng. Struct., vol. 145, pp. 83-96.

Kappos, A. J., Penelis, G. G. ve Drakopoulos C. G., 2002. Evaluation of simplified models for lateral load analysis of unreinforced masonry buildings, Journal of Structural Engineering, 128 (7): 890-897.

Karaşın, A. H ve Karaesmen, E., 2005. Bingöl depreminde meydana gelen yapısal hasarların irdelenmesi. Deprem Sempozyumu, 386-396, Kocaeli, Türkiye.

Kariou, F., S. Triantafyllou, D. A., Bournas, ve L. Koutas., 2018. Out-ofplane response of masonry walls strengthened using textile-mortar system. Constr. Build. Mater. 165: 769–781. https://doi.org/10.1016/j .conbuildmat.2018.01.026.

Kaya, A., Adanur, S., Bello, R.A., Genç, A.F., Okur, F.Y., Sunca, F., Günaydin, M., Altunişik, A.C. ve Sevim, B., 2023. Post-earthquake damage assessments of unreinforced masonry (URM) buildings by shake table test and numerical visualization. Engineering Failure Analysis, 143, p.106858.

Kayaalp, F. B., 2017. Kilitli yığma birim elemanlarla üretilen yığma duvarların tekrarlı yatay yük etkisi altındaki davranışları, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon,

Kayırga, O.M., ve Altun, F., 2021. Investigation of earthquake behavior of unreinforced masonry buildings having different opening sizes: Experimental studies and numerical simulation. J. Build. Eng. 2021, 40, 102666.

Korkmaz, K. A., 2014. Farklı Yapısal Malzeme Özelliklerinin Yığma Yapı Davranışına Etkisi. Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi. 3, 69-78.

Kouris, L. A. S., ve Triantafillou, T. C., 2018. State-of-the-art on strengthening of masonry structures with textile reinforced mortar (TRM). Construction and Building Materials, 188, 1221-1233.

Koutas, L. N., ve Bournas, D. A., 2018. Out-of-plane strengthening of masonry-infilled RC frames with textile-reinforced mortar jackets. Journal of Composites for Construction, 23(1), 04018079.

Koutas, L., S. N. Bousias., ve Triantafillou, T. C., 2015. Seismic strengthening of masonry-infilled RC frames with TRM: Experimental study. J. Compos. Constr. 19 (2): 04014048. https://doi.org/10.1061/(ASCE) CC.1943-5614.0000507.

Köksal, E., Köksal, H. O., ve Yıldırım, H., 2004. Eksenel Basınç Altında Beton Briket Yığma Prizmaların Sonlu Eleman Analizi. Teknik Dergi, 15(73).

Kupfer, H., Hilsdorf, H. K., ve Rusch, H., 1969. Beh avior of concrete under biaxial stresses". ACI Journal, 66(52), 656–666.

Kuran, F., 2006. Yığma yapıların çelik şeritlerle rehabilitasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Kuruşçu, A., 2012. Yığma duvar ve temellerde doğrusal olmayan modellem, Doktora Tezi Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kwak H.G., ve Kim D.Y., 2004, Material nonlinear analysis of RC shear walls subject to monotonic loadings, Engineering Structures, Vol. 26, pp. 1517–1533.

Kwak, Y. K., Eberhard, M. O., Kim, W. S. ve Kim, J., 2002. Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups, ACI structural journal, 99(4), 530-538.

Kwiecień, A., ve Kuboń, P., 2012. Dynamic analysis of damaged masonry building repaired with the flexible joint method. Archives of Civil Engineering, 58(1), 39-55.

Laurenço, P., Rots. J., G. ve Blaauwendraad., J., 1995. Two approaches for the analysis of masonry structures: Micro and macro-modeling, Heron 1995, 40, 313–340.

Lee, J., ve Fenves, G. L., 1998. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. Journal of engineering mechanics, 124(8), 892-900.

Li, J., Stewart, M. G., ve Masia, M. J., 2019. Probabilistic modeling of unreinforced masonry walls subjected to lateral out-of-plane loading. In Numerical Modeling of Masonry and Historical Structures (pp. 91-140).

Lie, J., Lysaker, M. ve Tai, X. C., 2006. A binary level set model and some applications to Mumford-Shah image segmentation. IEEE transactions on image processing, 15(5), 1171-1181.

Lin, Y. W., 2013. Strengthening of Unreinforced Masonry Walls using ECC Shotcrete (Doctoral dissertation, ResearchSpace Auckland).

Lotfi, H. R. ve Shing, P. B., 1991. An appraisal of smeared crack models for masonry shear wall analysis. J.Computers and Struct., 41(3), 413-425.

Lourenço, P. B., 2002. Computations on historic masonry structures. Progress in Structural Engineer- ing and Materials, 4(3), 301–319. doi:10.1002/pse.120.

Lourenço, P. B., N. Mendes, L. F. Ramos, D. V. Oliveira., 2010. Analysis of masonry structures without box behavior. International Journal of Architectural Heritage 5 (4–5):369–82. doi:10.1080/15583058.2010.528824.

Lourenço, P. B., Rots, J., G. ve Blaauwendraad, J., 1998. Continuum model for masonry: Parameter estimation and validation. Journal of Structural Engineering, 124(6), 642–652. doi:10.1061/(ASCE)0733- 9445(1998)124:6(642)

Lourenço, P.B., 1996. Computational strategies for masonry structures, PhD Thesis, Delft University of Technology.

Lourenço, P.B., Mendesa, N., Ramosa, L.F. ve Oliveira. D. V., 2011. Analysis of masonry structures without box behavior. Int J Archit Herit Conserv Anal Restor 5(4–5):369–382

Lourenço., P. B., ve Pina-Henriques., J., 2006. Validation of analytical and continuum numerical methods for estimating the compressive strength of masonry. Computers & structures, 84(29-30), 1977-1989.

Lubliner, J., Oliver, J., Ollers, S. ve Onate, E., 1989. A Plastic-Damage Model for Concrete, International Journal of Solid and Structures, 25, 299-326.

Lurati, F. ve Graf, H. ve Thürlimann, B., 1990. Experimental determination of the strength parameters of concrete masonry (Almanca). Report No. 8401-2, Institute of Structural Engineering, ETH Zurich, Zurich, Switzerland

Magenes, G., ve Calvi, G. M., 1997. In-plane seismic response of brick masonry walls. Earthquake engineering & structural dynamics, 26(11), 1091-1112.

Mahini B.B., 2015. Smeared Crack Material Modelling for The Nonlinear Analysis of CFRP-Strengthened Historical Brick Vaults with Adobe Piers, Construction and Building Materials, 74, 201-218.

Mann, W. and Muller, H., 1982. Failure of Shear-Stressed Masonry - An Enlarged Theory, Tests and Application to Shear Walls. Proceedings BCS., Loading-bearing Brickwork, Vol.7, No. 30, pp. 223- 235.

Manual, A. U., 2014. Abaqus theory guide. Version 6.14. USA.: Dassault Systemes Simulia Corp.

Mardani, A., Dehkordi, M. R., Moghadam, A. S ve Yekrangnia, M., 2019. Example of a Two-Story Unreinforced Masonry Building Retrofitted by Shotcrete. Adv. Des. Examples Seism. Retrofit Struct., Elsevier Ltd., Oxford, UK, 13-118.

Marques R., F. P. ve Lourenço P., B., 2008. Benchmarking of commercial software for the seismic assessment of masonry buildings, International seminar on seismic risk and rehabilitation of stone masonry housing. Azores Islands.

Martins, A., Vasconcelos, G., Fangueiro, R. ve Cunha, F., 2015. Experimental assessment of an innovative strengthening material for brick masonry infills. Composites Part B: Engineering, 80, pp.328-342.

Maruccio, C., Basilio, I., Oliveira, D. V., Lourenço, P. B. ve Monti, G., 2014. Numerical modelling and parametric analysis of bond strength of masonry members retrofitted with FRP. Construction and Building Materials, 73, 713-727.

Mehmood, A., 2015. Hareketli yüklere maruz çerçeve yapısının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak titreşim analizi. Uluslararası Makine Mühendisliği ve Robotik Araştırma Dergisi, 4(1), 50-65.

Melenk, J. M. ve Babuska, I., 1996. The partition of unity finite element method: Basic theory and applications. Comp. Methods Appl. Mech. Eng., 139(1–4), 289–314.

Memari, A. M. ve Kauffman, A., 2005. Review of existing seismic retrofit methodologies for adobe dwellings and introduction of a new concept, SismoAdobe2005, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Peru, 15 pp.

Mendes, N. M. ve Lourenço., P.B., 2009. Seismic assessment of masonry ‘‘Gaioleiro’’ buildings in Lisbon, Portugal. J Earthq Eng 14:80–101.

Mendola, L. L., Accardi, M., Cucchiara, C. ve Licata, V., 2014. Nonlinear FE analysis of out-of-plane behaviour of masonry walls with and without CFRP reinforcement. Construction and Building Materials, 54(5), 190-196.

Midas, FEA., 2000. Nonlinear and detail Finite Element Analysis System for Civil Structures Manual: Analysis and Algorithm version 2.9.6.

Milani, G. ve Venturini, G., 2011. Automatic fragility curve evaluation of masonry churches accounting for partial collapses by means of 3D FE homogenized limit analysis. Computers and Structures, 89 (17-18), 1628-1648.

Mininno. G., Ghiassi. B., Oliveira. D.V., 2017. Modelling of the in-plane and out-of-plane performance of TRM-strengthened masonry walls. Key Eng Mater 747:60–68.

Mobarake, A.A. Khanmohammadi, M. ve Mirghaderi, S., 2017. A new discrete macro-element in an analytical platform for seismic assessment of unreinforced masonry buildings, Eng. Struct., vol. 152, pp. 381-396.

Moës N, Dolbow J, Belytschko, T., 1999. A finite element method for crack growth without remeshing. Int J Numer Meth Eng 46:131–150

Mridha, S. ve Maity, D., 2014. Experimental investigation on nonlinear dynamic response of concrete gravity dam-reservoir system. Engineering Structures, 80, 289-297.

Neya, B. ve Ahmadi, M., 2019. Comparative study of various smeared crack models for concrete dams. Građevinar, 71(04.), 305-318.

Nian, W., Subramaniam, K. V. ve Andreopoulos, Y., 2016. Experimental investigation on blast response of cellular concrete. International Journal of Impact Engineering, 96, 105-115.

Obaidat, Y.,Taleb, 2011.Structural retrofitting of reinforced concrete beams using carbon fibre reinforced polymer. Diss. Department of Construction Sciences, Structural Mechanics.

Onar, E., 2011, Yığma yapılarda taşıyıcı tuğla duvarların CFRP ile güçlendirilmesinin deneysel olarak incelenmesi, Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Ortlepp, R., Hampel, U. ve Curbach, M., 2006. A new approach for evaluating bond capacity of TRC strengthening. Cement and Concrete Composites, 28(7), 589-597.

Orulkaya, H. A., 2019. Mevcut yığma yapıların deprem yüklerine karşı güçlendirilmesinde püskürtme beton kullanımı, Yüksek Lisans tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.

Önal M.M. ve Koçak A., 2006. Yapı Hasarları ve Onarım Güçlendirme Yöntemlerinin Ayrıntıları. Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, 91-106.

Öztaş, V., 2009. Yığma yapıların güçlendirilmesi ve bir yığma yapı örneğinde güçlendirme analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Öztürk, Ş., Bayraktar, A., Hökelekli, E. ve Ashour, A., 2019. Int. J. Architectural Heritage, 3058, 1. https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1592265.

Page, A.W., 1983. The strength of brick masonry under biaxial tension– compression. International Journal of masonry constructions; 3(1): 26-31.

Page, A.W., 1981. The biaxial compressive strength of brick masonry. Proc. Inst. Civil Engrs.; 71(2): 893–906.

Pallarés, F.J., Agüero, A. ve Martín, M., 2006. Seismic behaviour of industrial masonry chimneys. International Journal of Solids ve Structures, 43(7-8), pp.2076-2090.

Pan JW, Zhang C. H., Xu YJ Jin F. A., 2011. Comparative study of the different procedures for seismic cracking analysis of concrete dams. Soil Dynamics and Earthquake Engineering; 31(11): 1594–606.

Papa, E., Taliercio, A. ve Mirabella-Roberti, G., 2000. A damage model to predict the behaviour of ma- sonry under sustained load, Proc., 12th Int. Brick/Block Masonry Conf., Madrid, Spain, pp. 1777–1790.

Papadopoulos, G.A., 1987. The stationary value of the third stress invariant as a local fracture parameter (Det.-criterion), Engineering Fracture Mechanics, Volume 27, Issue 6, Pages 643-652, ISSN 0013-7944, https://doi.org/10.1016/0013-7944(87)90156-1.

Papanicolaou, C. G., Triantafillou, T. C., Papathanasiou, M. ve Karlos, K., 2008. Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: out-of-plane cyclic loading. Materials and structures, 41, 143-157.

Papanicolaou, C., Triantafillou, T. ve Lekka, M., 2011 Externally bonded grids as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry panels. Constr. Build. Mater. 2011, 25, 504–514.

Parisi, F., Balestrieri, C. ve Asprone, D., 2016. Nonlinear micromechanical model for tuff stone masonry: Experimental validation and performance limit states. Construction and Building Materials, 105, 165-175.

Park, Y. J. ve Ang, A. H. S., 1985. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. Journal of structural engineering, 111(4), 722-739.

Penna, A., Lagomarsino, S., ve Galasco. A., 2014. A nonlinear macro element model for the seismic analysis of masonry buildings. Earthq.Eng. Struct.Dyn. 2014, 43, 159–179.

Pomonis, A., Gaspari, M., ve Karababa, F. S., 2014. Seismic vulnerability assessment for buildings in Greece based on observed damage data sets. Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata, 55(2), 501 534.

Raoof, S. M., Koutas, L. N. ve Bournas, D. A., 2017. Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams. Construction and Building Materials, 151, 279-291.

Ravi, S., Viswanathan, S., Nagarajan, T., Srinivas, V. ve Narayanan, P., 2014. Experimental and numerical investigations on material behaviour of brick masonry. In 2nd International Conference on Research in Science, Engineering and Technology, Dubai, UAE.

Roudane, B., Süleyman, A. ve Ahmet Can. A., 2019. Numerical modeling of masonry infilled reinforced concrete building during construction stages using ABAQUS software. Buildings 9.8- 181.

Samarasinghe. W. ve Hendry, A.W., 1982. The strength of brickwork under biaxial tensile and compressive stress. Proc Brit Ceram Soc;30:129–39.

Samberou, A., M. S., 2021. Yığma duvarların çevrimsel yükler altında davranışlarının deneysel ve sonlu eleman yöntemiyle belirlenmesi ve FRP malzemesiyle güçlendirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Sayın, E. 2009. Yığma yapıların lineer olmayan statik ve dinamik analiz, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Scacco, J., Milani, G., ve Lourenço, P. B., 2021, March. Numerical validation of a heterogeneous FE approach for the analysis of TRM debonding on curved masonry substrates. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2343, No. 1, p. 080005). AIP Publishing LLC.

Song, J. H., Wang, H. ve Belytschko, T. 2008. A comparative study on finite element methods for dynamic fracture. Computational Mechanics, 42(2), 239-250.

Stavridis, A., ve Shing, P. B., 2010. Finite element modeling of non- linear behavior of masonry-infilled RC frames. J. Struct. Eng., 10.1061 /(ASCE)ST.1943-541X.116, 285–296.

Stolarska, M., Chopp, D.L., Moës, N., ve Belytschko, T., 2001. Modelling crack growth by level sets in the extended finite element method, International Journal for Numerical Methods in Engineerin, 51, 943-960.

Sucuoğlu, H. ve Erberik, A., 1997. Performance evaluation of a three-storey unreinforced masonry building during the 1992 Erzincan earthquake. Earthquake engineering & structural dynamics, 26(3), 319-336.

Sukumar, N., ve Prevost, J. H., 2003. Modeling quasi-static crack growth with the extended finite element method. Part I: Computer implementation. Int. J. Solids Struct., 40(26), 7513–7537.

Sutcliffe, D. J., Yu, H. S., ve Page, A. W., 2001. Lower bound limit analysis of unreinforced masonry shear walls. Computers & Structures, 79(14), 1295-1312.

Szczecina, M., ve Winnicki, A., 2017. Relaxation time in CDP model used for analyses of RC structures. Procedia engineering, 193, 369-376.

Şerbetçigil., K,M., 2021. Yığma bir binada uygulanan deprem güçlendirmesinin doğrusal olmayan sayısal yöntemle incelenmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya.

Tanrıkulu, K., 1991. Models for nonlinear earthquake analysis of brick masonry buildings, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Tarque, N., Camata, G., Spacone, E., Varum, H., ve Blondet, M., 2012. Elastic and inelasticparameters for representing the seismic in-plane behaviour of adobe wall. In: Proceedings ofthe XIth international conference on the study and conservation of earthen architecturalheritage terra 2012, Lima, Peru, 22–27 April.

TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, AFAD Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.

TGÜB, Türkiye Gazbeton Üreticileri Birliği, http://www.tgub.org.tr/Default.asp?L=TR&mid=232, 2014.

Türkmen, Ö.S., De Vries, B.T., Wijte, S.N.M., ve Vermeltfoort, A.T., 2020. In-plane behaviour of clay brick masonry wallettes retrofitted with single-sided fabric-reinforced cementitious matrix ve deep mounted carbon fibre strips. Bulletin of Earthquake Engineering, 18(2), pp.725-765.

Tomazevic, M. 2000. Shaking table tests of small-scale models of masonry buildings: Advantages and disadvantages. Massivbau 2000: Forschung, Entwicklungen, Anwendungen, Springer, Düsseldorf, Germany.

Tomazevic., M. 1999. Earthquake resistant design of masonry buildings. Series on Innovations in Structures and Construction, vol 1. Imperial College Press, London.

Topçu, A., 2015. Sonlu Elemanlar Metodu, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye.

TS 2510, 1977. Kâgir Duvarlar ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 771-1., 2005. Kagir birimler-Özellikler- Bölüm 1: Kil kagir birimler (tuğlalar), Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

Tuhta, S., 2021, Analytical and Experimental Investigation on the Modal Properties of Scaled Concrete Retaining Wall. JournalNX, vol. 7, no. 05, 2021, pp. 179-188, doi:10.17605/OSF.IO/27EJ4.

Turkish Standard Institution,TS-705., 1985. Solid Brick and Vertically Perforated Bricks (the Classification, Properties, Sampling, Testing and Marking of Solid Bricks and Vertically Perforated Bricks); Turkish Standard Institution: Ankara, Turkey.

Türker, T., ve Bayraktar, A., 2016. Vibration based modal testing of a scaled reinforced concrete building for construction stages. Bull. Earthq. Eng, 5, 1–18.

TYİDRYK, 2017. Tarihi yapılar için deprem risklerinin yönetimi kılavuzu, Vakıflar Genel Müdürlüğü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Uğuz, S., 2016. Tarihi yığma bir binanın deprem güvenlik analizi: Tarihi Konya-Gazi Lisesi (Darü'l Muallim örneği), Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Ural, A ve Doğangün, A., 2007. Mikro Modelleme Tekniği Kullanılarak Yığma Yapıların Deprem Performanslarının İncelenmesi. Uluslararası Deprem Sempozyumu, Kocaeli.

Ural, A., 2009. Yığma Yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

URL-1. https://www.bbc.com/turkce/haberler-dunya-37182809.

URL-2, www.blokbims.com.tr (erişim tarihi: 17.03.2019).

URL-3. Deseret News article, http://www.deseretnews.com/article/635199749/Its-2008–and-the-bigone-slams-Utah.html.

USBR (United States Bureau of Reclamation), 1987. Design of Small Dams, Denver, Colorado.

Ürün Broşürü, BASF Yapı Kimyasalları, 2005.

Varol, K. O. Ç., 2016. Depreme maruz kalmış yığma ve kırsal yapı davranışlarının incelenerek yığma yapı yapımında dikkat edilmesi gereken kuralların

derlenmesi. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2(1), 36-57.

Votsis., R. A, Kyriakides., N, Tantele., E., ve Chrysostomou., C. Z., 2013. Effect of damage on the dynamic characteristics of St. Nicholas cathedral in Cyprus. In Proc. of ECCOMAS - Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Kos Island, Greece, 12-14 June.

Wang, C., Sarhosis, V., ve Nikitas, N., 2018. Strengthening/Retrofitting Techniques on Unreinforced Masonry Structure/Element Subjected to Seismic Loads: A Literature Review. The Open Construction and Building Technology Journal, 12(1), 251–268. https://doi.org/10.2174/1874836801812010251.

Wang, J., 2014. Numerical Simulation of Masonry Structures Based on ANSYS Contact Analysis. Industrial Technology Innovation, 1(1), 116-128.

Wang, T., Shang, Q., Chen, X., ve Li, J., 2019. Experiments and fragility analyses of piping systems connected by grooved fit joints with large deformability. Frontiers in Built Environment, 5, 49.

Wang, X., Lam, C. C. ve Iu, V. P., 2019. Comparison of different types of TRM composites for strengthening masonry panels. Construction and Building Materials, 219, 184-194.

Wang, Y., Oyen, D., Guo, W. G., Mehta, A., Scott, C. B., Panda, N., ve Yue, X., 2021. StressNet-Deep learning to predict stress with fracture propagation in brittle materials. Npj Materials Degradation, 5(1), 1-10.

Williams, M., S., Pomonis, A., Booth, E., D., Vaciago, G., ve Ring, S., 1992. The Erzincan Turkey Earthquake, of 13 March 1992: A field report by EEFIT. London, UK: EEIFI.

Wong, C., W. ve Karamanoğlu, M., 1999. Modelling the response of masonry structures to gas explosions. Journal of loss prevention in the process industries, 12(3), 199-205.

Xin, R., ve Ma, P., 2021. Experimental investigation on the in-plane seismic performance of damaged masonry walls repaired with grout-injected ferrocement overlay. Construction and Building Materials, 282, 122565.

Yazdani, M., ve Habibi, H., 2021. Residual capacity evaluation of masonry arch bridges by extended finite element method, Structural Engineering International, 1-12.

Yi, T., Moon, F. L., Leon, R. T., ve Kahn, L. F. 2006. Analyses of a two-story unreinforced masonry building. Journal of structural engineering, 132(5), 653-662.

Zengin, B., ve Kocak, A., 2017. The effect of the bricks used in masonry walls on characteristic properties. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 35(4), 667-677.

Zhai, C., Wang, X., Kong, J., Li, S., ve Xie, L., 2017. Numerical simulation of masonry-inflled rc frames using xfem. J Struct Eng 143(10):04017144.

Zhang, H. ve Ohmachi, T., 2000. Seismic Cracking and Strengthening of Concrete Gravity Dams, 1-8.

Zhao, T., Zhang, C. J., ve Xie, J., 2003. Experimental study on earthquake strengthening of brick walls with continuous carbon fibre sheet. Masonry Int., 16(1), 21-25.

Zhou, X. P, Zhang, J. Z, Yang, S.Q., ve Berto, F., 2021. Compression-induced crack initiation and growth in flawed rocks: A review. Fatigue Fract Eng Mater Struct; 44: 1681– 1707. https://doi.org/10.1111/ffe.13477.

ÖZGEÇMİŞ

Boudjamaa ROUDANE, ilk, orta ve lise öğrenimini 1995-2007 yılları arasında Mostaganem'da tamamladı. 2007 yılında Mostaganem Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde başladığı "Lisans" eğitimini 2010 yılında tamamladı. Aynı yıl Mostaganem Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Anabilim Dalında "Yüksek Lisans" eğitimine başladı ve 2012 yılında tamamladı. 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Anabilim Dalı'nda "Doktora" eğitimine başladı. ROUDANE'a ait bilimsel çalışma listesi aşağıda sunulmaktadır.

Uluslararası makale:

1. Roudane B., Adanur S., Altunişik A.C., Numerical Modeling of Masonry Infilled Reinforced Concrete Building during Construction Stages Using ABAQUS Software, Buildings, 9(8), Article number: 181, 2019.

Uluslararası bildiriler:

1. Roudane B., Adanur S., Altunışık A.C., Dynamic Characteristics of Masonry Buildings Built Using Different Materials, 3. International Conference on Civil and Environmental Engineering, 24 – 27 April 2018, İzmir.

2. Ghzayel O., Roudane B., Adanur S., Altunışık A.C., Span-Skewed Effect on the Response of the I-Girder Prestressed Concrete Bridges, 13th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE2018), 12-14 September 2018, İzmir, Turkey.

3. Roudane B, Kaya A, Adanur S, Numerical Investigation of Corroded Short Steel Piles Repaired using, Grout-Filled FRP Jackets, International Civil Engineering and Architecture Conference 2019, ICEARC'19, 17-20 April 2019, Trabzon, Turkey.

4. Roudane B, Adanur S, CoMParative Analysis of Seismic Codes of Algeria and Turkey for Reinforced Concrete Buildings, International Civil Engineering and Architecture Conference 2019, ICEARC'19, 17-20 April 2019, Trabzon, Turkey.

5. Ali MM, Roudane B, Adanur S, Analytical Study on the Effect of Thermal Stress in Masonry Buildings Built using Different Materials, International Civil Engineering and Architecture Conference 2019, ICEARC'19, 17-20 April 2019, Trabzon, Turkey.

6. Roudane B, Kaya A, Adanur S, Numerical Investigation on Effect of Corrosion on Dynamic Characteristic of Short Piles Using Abaqus Software, International Civil Engineering and Architecture Conference 2019, ICEARC'19, 17-20 April 2019, Trabzon, Turkey.

7. Kaya A., Roudane B., Altunışık A. C., Adanur S. 2022. The effect of earthquake damages created by shaking table tests on dynamic characteristics of masonry structures. The 4th International Conference on Advanced Technologies for Humanity (ICATH'2022), Marrakech, Morocco.