



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



YIĞMA YAPILARIN KAFES ELEMANLARLA İDEALİZE EDİLMESİ VE DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ

Doktora Tezi

Yunus GÜNER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir
2024

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**YIĞMA YAPILARIN KAFES ELEMANLARLA
İDEALİZE EDİLMESİ VE DOĞRUSAL
OLMAYAN ANALİZİ**

Yunus GÜNER

Danışman: Doç. Dr. Ayhan NUHOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Doktora Programı

İzmir
2024

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “Yığılma Yapıların Kafes Elemanlarla İdealize Edilmesi ve Doğrusal Olmayan Analizi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

22 / 08 / 2024

Yunus GÜNER

ÖZET**YIĞMA YAPILARIN KAFES ELEMANLARLA İDEALİZE
EDİLMESİ VE DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ**

GÜNER, Yunus

Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ayhan NUHOĞLU

Ağustos 2024, 108 sayfa

Bu çalışmada yığma yapıların düzlem içi davranışlarının belirlenmesinde sayısal analiz sürecini basitleştiren yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Yapısal analiz modeli sadece eksenel doğrultuda deforme olan çubuk elemanlar kullanılarak dizayn edilmektedir. Dış yükler etkisinde kalan taşıyıcı sisteme ait kapasite eğrisi, kırılma modu ve hasar bölgeleri doğrusal olmayan analiz ile belirlenmektedir.

Kendine has karakteristik özellikleri bulunan yığma sistemlere ait yapısal parametrelerin tespiti ve nümerik ortama aktarılması oldukça karmaşıktır. Bu nedenle çeşitli parametrelerin yapısal davranış üzerindeki etkisinin tekrarlı analizlerle incelenmesi ve sonuçların kabul edilebilir bir güven aralığı içerisinde değerlendirilmesi daha tutarlı bir yaklaşım olmaktadır. Önerilen sayısal hesap prosedürü öngörülen hedeflere hızlı ve pratik bir şekilde ulaşılmasında başarılı sonuçlar ortaya koymaktadır. Bununla birlikte yapıya has güven aralığının tanımlanmasını da oldukça kolaylaştırmaktadır.

Çalışmada yığma yapıların analizi için önerilen kafes model yaklaşımına ait metodoloji detaylı olarak açıklanmıştır. Sonrasında yönteme ait doğrulama literatürden seçilen çeşitli sayısal örnekler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte iki farklı parametrik çalışma ile önerilen yaklaşımda karşılaşılan yapısal belirsizliklerin azaltılabileceği gösterilmiştir. Sayısal çözümler Python programla dili kullanılarak geliştirilen yazılım aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Yığma yapı, kafes model, basitleştirilmiş yaklaşım, sayısal analiz, kapasite eğrisi, hasar oluşumu.

ABSTRACT**IDEALIZATION AND NONLINEAR ANALYSIS OF MASONRY
STRUCTURES USING TRUSS ELEMENTS**

GÜNER, Yunus

PhD in Civil Eng.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ayhan NUHOĞLU

August 2024, 108 pages

In this study, a new approach that simplifies the numerical analysis process for determining the in-plane behavior of masonry structures is presented. The structural analysis model is created using truss elements that deform only in the axial direction. The capacity curve, failure mode, and damage zones of the load-bearing system under external loads are determined using nonlinear analysis.

Determining the structural parameters of masonry buildings, which have unique characteristics, and transferring them to the numerical model is a quite complex task. For this reason, it is a more consistent approach to analyze the effect of various parameters on structural behavior through recursive analyses and evaluate the results based on an acceptable confidence interval. The proposed procedure performs superior in achieving the envisioned targets quickly and practically. Moreover, it significantly facilitates the suggestion of a confidence interval specific to the structure.

In the study, the methodology of the truss model approach proposed for the analysis of masonry structures was presented in detail. Subsequently, the proposed approach was validated using various examples selected from the literature. Furthermore, it was demonstrated through two different parametric studies that structural uncertainties encountered could be reduced. Numerical analyses were conducted using software developed in the Python programming language.

Keywords: Masonry structure, truss model, simplified approach, numerical analysis, capacity curve, damage formation.

ÖNSÖZ

Anadolu coğrafyası başta olmak üzere tüm dünyada yaygın bir şekilde bulunan ve bölgenin kültürel mirası niteliğinde kabul edilen tarihi yapılar, günümüz teknolojisinden farklı olarak daha çok taş veya tuğla elemanların bağlayıcı harç malzemesiyle birlikte kullanılmasıyla yığma türde inşa edilmişlerdir. Görünüş olarak benzer taşıyıcı formlara sahip olsalar da dayanımları ve yapısal davranışları açısından standardize edilmeleri oldukça güçtür. Kullanılan malzeme çeşitliliği, işçilik kalitesi, maruz kaldığı dış etkiler gibi çeşitli hususlar yapısal davranışlarında etkindir. Bu nedenle her yapının kendine has özellikleri ile dikkate alınarak değerlendirilmesi zaruridir.

Sürekli gelişen bilgisayar ve yazılım teknolojisiyle birlikte yeni modelleme yaklaşımları ve fikirler öne sürülmektedir. Burada alternatif bir metot olarak kompleks yapıların daha sade ve basit bir modelleme yaklaşımıyla ele alınmasına odaklanılmıştır. Böylece daha pratik bir yapısal analiz mümkün olabilecektir. Bu kapsamda yeni bir metodoloji ortaya koymak ve geliştirilmesi süresince ortaya çıkan sorunların adım adım çözümlenmesi oldukça zahmetli ve emek isteyen bir süreçtir.

İZMİR

22/ 08/2024

Yunus GÜNER

İÇİNDEKİLERSayfa

İÇ KAPAK	ii
KABUL ONAY SAYFASI	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ.....	xi
İÇİNDEKİLER.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvi
TABLolar DİZİNİ.....	xxii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR	5
3. METODOLOJİ	17
3.1 Geometrinin Belirlenmesi.....	18
3.2 Çubuk Kesit Alanlarının Belirlenmesi.....	20
3.3 Malzeme Davranışı	21
3.4 Analiz.....	24
3.4.1 Yazılım	25

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.4.2 Yükleme	27
3.4.3 Sınır koşulları.....	29
3.4.4 Doğrusal olmayan davranış.....	29
3.4.5 Hata oranı.....	30
3.4.6 Hasarın tanımlanması.....	30
3.4.7 Deprem açısından değerlendirme.....	31
3.4.8 Güven aralığı.....	33
3.5 Parametrik Çalışma I.....	34
3.6 Parametrik Çalışma II	49
3.6.1 Malzeme davranışının sonuca etkisi	50
3.6.2 Farklı eleman boyutlarının sonuca etkisi	53
4. ÖRNEK UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRMELER.....	57
4.1 Uygulama I (PUP3 ve PUP4).....	58
4.2 Uygulama II (JRC Walls: HW ve LW).....	64
4.3 Uygulama III (W-m-1).....	72
4.4 Uygulama IV (Wall Panel)	77

İÇİNDEKİLER (devam)Sayfa

4.5 Uygulama V (Çok Katlı Yapı).....	83
4.6 Eleman Boyutunun Tespiti	93
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	94
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	97
TEŞEKKÜR	107
ÖZGEÇMİŞ.....	108
EKLER	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Yığma duvarın kafes elemanlarla idealize edilmesi.	2
2.1 Hasar mekanizmaları: a) LA, b) FEM/DEM, c) FEM (Pepe et al., 2020).	6
2.2 Eşdeğer Çubuk Yöntemi ile idealize edilmiş bir yığma duvar (Morandi et al., 2020).	7
2.3 Makro Eleman Modeli (3DMacro) (Marques and Lourenço, 2014).	7
2.4 Betonarme kolonun doğrusal olmayan kafes model yaklaşımıyla idealize edilmesi (Girgin et al., 2013).	8
2.5 Kafes elemanların (cutoff bar) gerilme-birim deformasyon davranışı: a) Mükemmel kırılğan, b) Mükemmel sünek (Pingaro and Milani, 2023).	9
2.6 a) Yığma duvar, b) İdealize edilmiş sayısal model (D’Altri and de Miranda, 2022).	9
2.7 Yığma yapının Multi-Pier-Macro yaklaşımı ile idealize edilmesi (Pirsaheb et al., 2021).	10
2.8 Güçlendirilmiş yığma duvarın sayısal model ile idealize edilmesi (Zhao et al., 2022).	11
2.9 Yığma duvarın idealize edilmesi (Pirsaheb et al., 2020b).	11
2.10 Eşdeğer Kafes Modelin karakteristik özelliklerinin tanımlanması (Najafgholipour, 2018).	12
2.11 Mikro modelin temsili gösterimi (Kafkas, 2015).	13
2.12 Kayma etkisinin dikkate alındığı sayısal model (Williams, 2013).	13

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.13 a) Ara bağlantı elemanın tanımlanması, b) Dolgu duvarın idealize edilmesi (Salinas et al., 2022).	14
2.14 Dolgu duvarın idealize edilmesi (Rankawat et al., 2021).	15
2.15 Yığma duvarın (a ve b) Multi-Pier (c ve d) ve Multi-Pier-Macro (e ve f) yaklaşımlarıyla idealize edilişi (Pirsaheb et al., 2022).	16
3.1 Yığma duvarlarda düzlem içi hasar modları.	17
3.2 Kafes modelde düzlem içi hasar modlarının tanımlanması.	18
3.3 a) Modelin geometrisi (Magenes et al., 1995), b) Değişken açılı kafes model, c) Sabit açılı kafes model (m) (Güner ve Nuhoglu, 2022).	19
3.4 Kafes elemanlara ait yüzey kesit alanlarının belirlenmesi (Güner and Nuhoglu, 2024a).	20
3.5 Kafes elemanlar için tanımlanan malzeme davranışları: a) Basınç ve çekme etkisinde (Pirsaheb et al., 2021), b) Kayma etkisinde.	22
3.6 Çözüm algoritması.	24
3.7 Malzemenin çekme ve basınç davranışlarının tanımlanması.	25
3.8 Analizin sonlandırılması için ilk kontrol noktası (hata oranına göre).	27
3.9 Çelik veya betonarme kirişi temsil eden kafes başlık (gri) ve dış yük dağılımı.	28
3.10 Statik itme eğrisi ve sınır durumları (VGM, 2017).	32

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.11 Asal gerilmeler ve yatay düzlemle yaptığı açısı (Güner and Nuhoğlu, 2024b).....	35
3.12 Örnek çalışmaya ait yığma duvar yapıları (m) (Güner and Nuhoğlu, 2024b).....	36
3.13 Taban kesme kuvvetine karşılık yatay tepe deplasman değeri.....	38
3.14 Birim deformasyon dağılımı: a) Maksimum yükteki çekme hasarı, b) Son aşamadaki çekme hasarı (Araujo, 2014).	39
3.15 Kafes model yaklaşımında birim deformasyona bağlı hasar dağılımı.	40
3.16 CT02 örneğinde birim deformasyona bağlı kademeli hasar gelişimi.....	41
3.17 Analiz sonuçları (CS).	42
3.18 Analiz sonuçları (CT).	43
3.19 Kapasite eğrileri (150 mm).....	46
3.20 Kapasite eğrileri (250 mm).....	46
3.21 150 mm eleman boyutuyla tasarlanan CS03 örneğinde açığa bağlı hasar oluşumu.	47
3.22 150 mm eleman boyutuyla tasarlanan CT01 örneğinde açığa bağlı hasar oluşumu.	48
3.23 150 mm eleman boyutuyla tasarlanan CT02 örneğinde açığa bağlı hasar oluşumu.	48

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.24 a) Analiz sonuçları (PUP3), b) Düşey deplasman değerine karşılık yatay deplasman değeri (PUP3), c) Analiz sonuçları (PUP4).	52
3.25 a) Analiz sonuçları (PUP3), b) Düşey deplasman değerine karşılık yatay deplasman değeri (PUP3), c) Analiz sonuçları (PUP4).	56
4.1 a) Kapasite eğrisi (PUP3), b) Düşey deplasman değerine karşılık yatay deplasman değeri (PUP3), c) Kapasite eğrisi (PUP4).	60
4.2 Güven aralığı: a) PUP3, b) PUP4.	61
4.3 Hasar görselleri: Deney a) PUP3 b) PUP4 (Petry and Beyer, 2015a), Birim deformasyona bağlı c) PUP3 d) PUP4, Performans düzeyine bağlı e) PUP3 f) PUP4.	63
4.4 Kapasite eğrileri: a) HW, b) LW.	66
4.5 Güven aralığı: a) HW, b) LW.	68
4.6 Hasar oluşumları ($SS = 0.89$ MPa): a) Kafes model, b) Kafes model kohezif olmayan.	69
4.7 Yüksek duvarda hasar gelişimi: a) Kafes model, b) Sonlu Elemanlar Modeli (üzerinde asal basınç gerilme dağılımı belirtilmiştir (MPa)) (De Castro Oliveira, 2003), c) Deneysel çalışma (Anthoine et al., 1995).	69
4.8 Kısa duvarda hasar gelişimi: a) Kafes model, b) Sonlu Elemanlar Modeli (üzerinde asal basınç gerilme dağılımı belirtilmiştir (MPa)) (De Castro Oliveira, 2003), c) Deneysel çalışma (Anthoine et al., 1995).	70
4.9 Performans düzeyine bağlı hasar oluşumları: a) HW, b) LW.	71

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.10 Kapasite eğrileri (Multi-Pier: Pirsahab et al. (2020b) tarafından geliştirilen yöntem; H-DEM: Heterojen Ayrık Elemanlar Yöntemi; H-FEM: Heterojen Sonlu Elemanlar Yöntemi).	73
4.11 Güven aralığı.	74
4.12 Hasar oluşumları: a) Deney (Xu et al., 2018), b) Multi-Pier (Pirsahab et al., 2020b), c) Kafes model.....	75
4.13 Performans düzeyine bağlı hasar oluşumu.	76
4.14 Geometrik ölçüler (m).	78
4.15 Kapasite eğrileri.....	79
4.16 Güven aralığı.	81
4.17 Hasar oluşumları: a) DEM (Giamundo et al., 2014), b) FEM (Giamundo et al., 2014), c) Kafes model.....	82
4.18 Düşey yük seviyesine bağlı kafes model hasar oluşumları: a) 3 kN, b) 4.5 kN, c) 5.25 kN.	83
4.19 Geometrik ölçüler (m) ve yükleme durumu.	83
4.20 Farklı eleman boyutları ve koşullara ait analiz sonuçları.	85
4.21 Taban kesme kuvvetine karşılık tepe noktadaki deplasman değeri.....	86
4.22 Güven aralığı.	87
4.23 Analiz sonuçları: a) Zati ağırlık dahil, b) Zati ağırlık hariç.....	89

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.24 a) Son aşamadaki plastik mafsall oluşumları, b) Hasar oluşumları (yeşil: diyagonal kesme çatlağı; kırmızı: çekme çatlağı; mor: basınç ezilmesi) (Pirsaheb et al., 2021).....	90
4.25 M500-BK.	91
4.26 M500-DK.....	91
4.27 M500-BK-BHA=0.	92
4.28 M500-DK-BHA=0.	92

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Birim deformasyona bağlı renk skalası.	30
3.2 Performans düzeyine bağlı renk skalası (statik itme eğrisine göre).	33
3.3 Alternatif parametre değerleri.	35
3.4 Malzeme parametreleri (MPa).	36
3.5 Elastisite Modülleri (MPa).	36
3.6 Eksenel gerilmeye bağlı kayma dayanım değerleri (MPa).	37
3.7 Kırılma modları.	39
3.8 Eksenel gerilme seviyesinin 0.50 MPa olduğu analizlerde açığa bağlı doğal periyod değerleri (s) (değişim oranları parantez içerisinde verilmiştir).	44
3.9 Malzeme parametreleri (MPa).	49
3.10 Güven aralığı ve ilgili parametre değerleri.	51
3.11 Başlangıç durumundaki doğal periyod değerleri (s).	54
3.12 Yeni Elastisite Modülü değerleri (ilk 6 sonuç çelik kiriş üst kot, diğer altı sonuç ise duvar üst kot değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir).	54
3.13 Güven aralığı ve ilgili parametre değerleri.	55
4.1 Doğrulama örneklerine ait genel bilgiler.	57
4.2 Güven aralığı ve ilgili parametre değerleri.	60

TABLOLAR DİZİNİ (devam)

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
4.3 Hasar bölgelerindeki kafes eleman sayıları (adet).	64
4.4 Hasar bölgelerindeki kafes eleman sayılarının doğrultularına bağlı olarak yüzdelik dağılımı (%).	64
4.5 Malzeme parametreleri (MPa).	65
4.6 Güven aralığı ve ilgili parametre değerleri.	67
4.7 Hasar bölgelerindeki kafes eleman sayıları (adet).	71
4.8 Hasar bölgelerindeki kafes eleman sayılarının doğrultularına bağlı olarak yüzdelik dağılımı (%).	71
4.9 Malzeme parametreleri (MPa).	72
4.10 Güven aralığı ve ilgili parametre değerleri.	73
4.11 Hasar bölgelerindeki kafes eleman sayıları (adet).	76
4.12 Hasar bölgelerindeki kafes eleman sayılarının doğrultularına bağlı olarak yüzdelik dağılımı (%).	77
4.13 Malzeme parametreleri (MPa).	78
4.14 Güven aralığı ve ilgili parametre değerleri.	80
4.15 Malzeme parametreleri (MPa).	84
4.16 Maksimum kayma dayanım değerleri (MPa).	84
4.17 Eleman boyutlarına bağlı kat yükseklikleri (m).	85

TABLolar DİZİNİ (devam)

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
4.18 Güven aralığı ve ilgili parametre değerleri.....	87
4.19 Birim deformasyona bağlı genişletilmiş renk skalası.....	89
4.20 Duvar özellikleri ve optimum eleman boyutları (kalın karakter olarak vurgulanmıştır).	93



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
c	Kohezyon
D_{eff}	Diyagonal kafes elemanın etkili kesit yüzeyi
E, E_c	Basınç Elastisite Modülü
F	Global dış yük matrisi
f_{cm}	Maksimum basınç dayanımı
f_{tm}	Maksimum çekme dayanımı
G	Kayma Modülü
H	Toplam yapı yüksekliği
K	Global rijitlik matrisi
L	Toplam yapı genişliği
M	Bir kafes eleman modülünün genişliği (eleman boyu)
V	Bir kafes eleman modülünün yüksekliği
γ_{mak}	Maksimum kayma gerinimi
γ_s	Kayma gerinimi
Δ	Global deplasman matrisi
ϵ_{ccr}	Çatlamış basınç gerinimi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
ϵ_{cu}	Maksimum basınç gerinimi
ϵ_{tcr}	Çatlama çekme gerinimi
ϵ_{tu}	Maksimum çekme gerinimi
θ_d	Eğim veya kırılma açısı
θ_p	Asal gerilmenin yatay düzlemle yaptığı açı
μ	Sürtünme katsayısı
σ	Eksenel gerilme
σ_1	Asal gerilme
σ_v	Düşey yükün neden olduğu basınç gerilmesi
τ	Kayma gerilmesi
τ_{res}	Artık kayma dayanımı
τ_u	Maksimum kayma dayanımı
<u>Kısaltmalar</u>	
MSM	Master-Slave Method
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

1. GİRİŞ

Günümüzdeki teknolojik malzemelerin olmadığı dönemlerde daha çok tercih edilen yığma yapım tekniği genel olarak taş, tuğla veya kerpiç gibi taşıyıcı elemanların kireç esaslı harç veya alternatif bir bağlama şekli ile birbirine kenetlenmesiyle oluşturulmuştur. Kırsal bölgelerdeki tercih edilebilirliğini hala sürdürmesine rağmen şehirleşmenin yoğun olduğu yerlerde daha çok tarihi yapı niteliği kazanmış ibadethane, han, hamam, kervansaray, konut, kale, köprü vb. formlarda karşımıza çıkmaktadır.

Yapımında belli bir standarda sahip olmayan ve genellikle mümkün olan en yakın çevreden tedarik edilebilen farklı özelliklerdeki malzemelerin kullanılması, geleneksel bir teknik altyapıya sahip ustanın bilgi ve becerisiyle inşa edilmesi gibi nedenler yığma yapının taşıyıcı sistem davranışını karmaşık hale getirmektedir. Bunun yanı sıra zaman içerisinde başta deprem olmak üzere birçok farklı dış etkiye maruz kalması sonucunda malzeme bozulmalarına ve/veya taşıyıcı sistem hasarlarına uğramış olmaları olağandır. Yığma yapının niteliğine ve konumuna göre farklı düzeylerde söz konusu olacak tüm bu belirsizlikler her bir yapının kendi özelinde değerlendirmeye alınmasını ve yorumlanmasını zorunlu kılar.

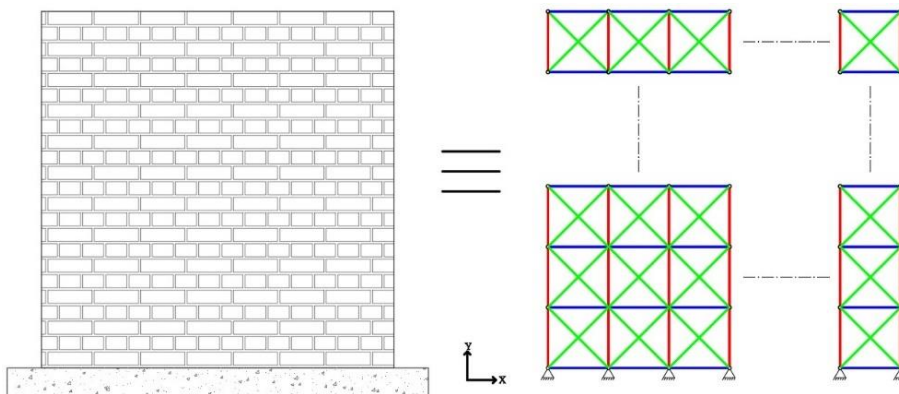
Günümüzdeki teknik bilgi birikimi ve gelişen teknolojik altyapı ile alternatif modelleme ve analiz tekniklerinin önü açılmıştır (D'Altri et al., 2020). Her bir modelleme yaklaşımının uygulanabilmesi için çeşitli kabuller yapılmakta ve analiz sonuçları buna bağlı olarak değişiklikler gösterebilmektedir (Cannizzaro et al., 2022). Mevcut yapının ihtiyacına yönelik uygun yaklaşımın tercih edilmesi daha efektif bir çözüm sunmaktadır.

Genellikle detaylı modelleme yaklaşımlarında malzeme ve yapıya ait daha çok parametrenin yer alması, sonuçların daha gerçekçi olduğu kanısını ortaya çıkarmaktadır. Fakat malzeme parametrelerindeki sayısal değerler ve yapının gerçek taşıyıcı sistemi yeterli doğrulukta belirlenemiyorsa beklenen doğru çözüme ulaşılması zorlaşabilmektedir. Bu durumda, basit yaklaşımlarla yapısal çözümler sağlanmalı ve ihtiyaç duyulan parametre değerlerinin belirlenme hassasiyetleri göz önünde bulundurularak tekrarlı sayısal analizler

gerçekleştirilmelidir. Sonrasında elde edilecek sonuçlar kapsamlı bir şekilde değerlendirilmelidir (VGM, 2017).

Bahsi geçen çalışmanın detaylı yaklaşımlarla gerçekleştirilebilmesi yüksek analiz kapasitesine sahip bilgisayarlara, teorik altyapısı gelişmiş yazılımlara, kapsamlı malzeme bilgisine ve alanında uzman elemanlara ihtiyaç duyması nedeniyle önemli bir zaman ve maliyet yüküne neden olmaktadır. Buna karşılık basitleştirilmiş yaklaşımlar kolay, pratik ve hızlı çözümleme opsiyonu sunmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında yığma yapıların düzlemdeki davranışını temsil edebilen basitleştirilmiş bir modelleme prosedürü geliştirilmiştir. Yatay ve düşey dış yükler etkisinde meydana gelen düzlem içi yer değiştirmelerin, taşıma kapasitesinin, kırılma mekanizmasının ve hasar oluşum bölgelerinin kolaylıkla tespit edilebileceği kafes elemanlardan oluşan basit bir modelleme yaklaşımı önerilmektedir (Güner and Nuhoglu, 2024a). Bir yığma duvarın kafes elemanlar ile idealize edilmiş formu Şekil 1.1’de görülmektedir. Kafes elemanların tek doğrultuda yük taşımaları ve deforme olmalarının yanı sıra moment aktarmayacak şekilde birbirine bağlanmaları analiz eforunu önemli oranda düşürmektedir. Bununla birlikte geometrik sınırların ve doğrusal olmayan davranışın tanımlanması basitleşmekte ve sonuçların yorumlanması oldukça kolaylaşmaktadır. Böylece pratik ve tekrarlı çözümlemeler için de uygun bir yaklaşım olarak ön plana çıkmaktadır.



Şekil 1.1 Yığma duvarın kafes elemanlarla idealize edilmesi.

Önerilen yaklaşımda idealize edilen modelin sayısal çözümleri Python programla dili kullanılarak geliştirilen yazılım aracılığıyla sağlanmaktadır. Geometri ve malzeme parametrelerinin sınır koşullarıyla birlikte programda tanımlanması ile malzeme ve geometrik tabanlı doğrusal olmayan çözümler Sonlu Elemanlar Deplasman Metodu ilkeleri kapsamında gerçekleştirilmektedir. Tek yönlü ve artımsal olarak uygulanan yükleme sonucunda kafes elemanlarda oluşan gerilme ve deformasyonlar, düğüm noktalarında meydana gelen yer değiştirmeler, mesnet reaksiyonları, hasar oluşumları ve yapının taşıma kapasitesi tespit edilebilmektedir. Sonuçlar genel olarak hasar oluşumları ve taban kesme kuvvetine karşılık meydana gelen yatay yer değiştirmeler üzerinden irdelenmiştir.

Geliştirilen prosedür aracılığıyla öncelikle iki farklı parametrik çalışma ele alınmıştır. Birincisinde geometrinin tanımlanmasındaki diyagonal elemanlara ait eğim açısının sonuçlara etkisi araştırılmıştır. Diğerinde ise eleman boyutu ve kabul edilen malzeme parametrelerindeki değişimlerin analiz sonuçlarına etkileri incelenmiştir. Sonrasında literatürden alınan birisi çok katlı boşluklu bir yapı, diğer altısı ise alternatif geometrik sınır koşullarına ve/veya farklı eksenel gerilme seviyelerine sahip duvar yapıları olmak üzere toplamda yedi sayısal çalışma üzerinden önerilen yaklaşımın nümerik doğrulaması ele alınmıştır. Diğerlerinden farklı olarak bahsi geçen duvarlardan bir tanesinin sadece düşey yükleme etkisindeki davranışı araştırılmıştır.

Sunulan kafes model yaklaşımı kısıtlı parametre girdilerine karşın tutarlı bir davranış sergilemekte ve çalışmanın başındaki beklentileri kabul edilebilir doğrulukla karşılamaktadır. Aynı zamanda sayısal analizlerin alternatif parametrelerle tekrarlanmasıyla yapının taşıma kapasitesine ait güven aralığı kolaylıkla oluşturulabilmektedir. Böylece tarihi yapıların analiz ilkelerinde vurgulanan farklı koşullar altında tekrarlı hesaplamaların gerçekleştirilmesi tavsiyesine de imkân sağlamaktadır. Bahsi geçen yöntemin başarılı bir ön değerlendirme aracı olarak kullanılabileceği ve detaylı metotlara kıyasla geometrinin tanımlanmasında, analizin gerçekleştirilmesinde ve elde edilen sonuçların yorumlanmasında önemli derecede sadeleşme sağladığı görülmüştür.

Bu tez çalışması kapsamında sunulan prosedürün literatürden ayrıldığı temel nokta sadece kafes elemanlardan oluşan idealize edilmiş sayısal model ile yığma yapıların düzlem içi yapısal davranışının tespit edilebilmesidir. Literatürde hibrit modelleme yaklaşımlarında kafes elemanların kullanıldığı görülmüş olsa da sadece kafes elemanlarla dizayn edilmiş tasarımların sayısı yok denecek kadar azdır. Literatürdeki bu eksikliğin giderilmesinin yanı sıra gerçekleştirilen parametrik ve doğrulama çalışmalarıyla sayısal modelin oluşturulmasındaki geometrik unsurlar, dış yüklemelerin tanımlanması, analiz prosedüründeki etkenler ve sonuçların yorumlanması detaylıca tartışılmıştır. Okuyucular için çeşitli basitleştirmeler ve tavsiyeler sunulmuştur.



2. LİTERATÜR

Yığma sistemlerde yapısal davranışın belirlenmesi zorlu bir süreç olarak nitelendirilebilir. Tek bir duvarda bile taş/tuğla ve bağlayıcı özellikleri, örgü formu, duvar kalınlığı, işçilik, lokal bozulmalar gibi birçok farklı etken aynı anda bulunabilmektedir. Bu belirsizliklerin tüm yapıya yayıldığı, ek olarak katlarda rijit diyafram olup olmaması, mevcut yapısal hasar durumları gibi çeşitli hususların da dahil olmasıyla süreç daha karmaşık bir hal almaktadır. Hatta bu faktörlerin sayısal modele yansıtılması da ayrı bir problem olmaktadır. Tüm bu zorlukların aşılabilmesi için sayısal modelin tanımlanması ve çözülmesinde çeşitli varsayımların yapılması kaçınılmazdır.

Asteris et al. (2015) yapısal çözümlemede kullanılabilecek nümerik yöntemleri Lourenço (1996) tarafından önerilen modelleme yaklaşımlarını dikkate alarak üç ana grupta kategorize etmiştir.

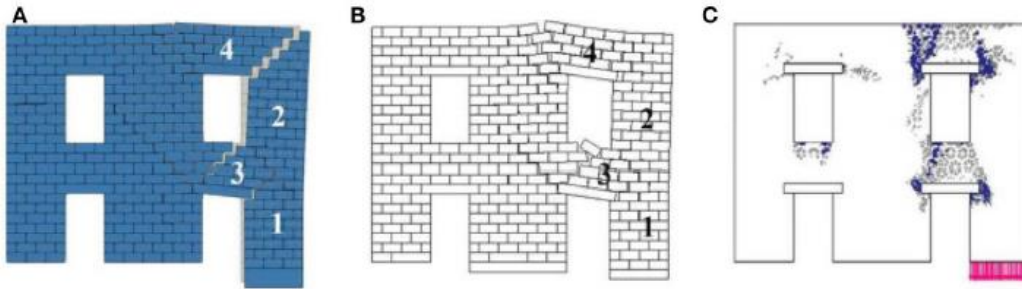
- a) Tüm yapısal elemanların ayrı ayrı tanımlandığı mikro modelleme,
- b) Taşıyıcı birim eleman boyutlarının bağlayıcı malzeme kalınlığı kadar genişletildiği ve bağlayıcı malzeme yerine hasarın oluşması ön görülen kalınlığı olmayan ara yüzey elemanların (zero-thickness interface elements) tanımlandığı basitleştirilmiş mikro modelleme,
- c) Taşıyıcı birim eleman ve bağlayıcı malzemenin homojenize edilerek eşdeğer bir materyale dönüştürüldüğü makro modelleme.

Genel olarak mikro modelleme yaklaşımdan makroya doğru gidildikçe hassasiyetin azaldığı buna karşılık zamandan kazanım olduğu söylenebilir. Doran et al. (2023) tarafından ele alınan duvar örneklerinde detaylı modelin (mikro) analiz eforunun makro modele kıyasla yaklaşık 10 kat daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Analizlerde yaygın olarak Sürekli Sonlu Elemanlar Yöntemi tercih edilmektedir. Yapı boyunca kesintisiz ve homojen bir modelleme olması, daha iri eleman boyutlarına da izin vermektedir. Böylece analiz sürelerinde kayda değer kısaltmalar meydana gelmektedir. Sıklıkla karşılaşılan alternatif bir yaklaşım ise Ayrık Elemanlar Metodudur. Yapının sahip olduğu gerçek doku detaylı bir şekilde

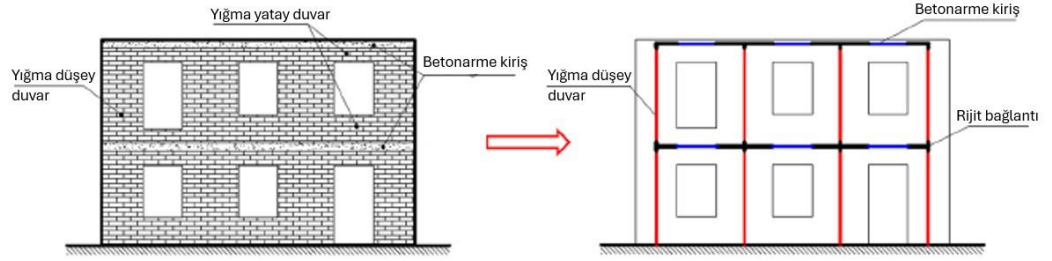
sayısal modele yansıtılabilmektedir. Bu sayede analiz boyunca elemanlar arasında meydana gelen yer değiştirmeler ve dönmeler tespit edilebilmekte ve hesaplamalarda dikkate alınabilmektedir. Her iki yaklaşım da bünyelerinde çeşitli alt başlıklar ve uygulama alanları barındırmaktadır. Sonlu Elemanlar Modelinin (Ahmed et al., 2019; Kahya et al., 2024) ve Ayrık Elemanlar Modelinin (Smoljanovic et al., 2018; Lemos, 2019) ayrı ayrı kullanıldığı veya her iki yaklaşım kıyaslandığı (Erdogan, 2017; Pepe et al., 2020) çalışmalar mevcuttur.

Pepe et al. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada üç farklı modelleme yaklaşımı çeşitli örnekler üzerinden kıyaslanmıştır. Limit Analiz için Rijit Blok (LA), Sonlu Elemanlar ile kombine edilen Ayrık Eleman (FEM/DEM) ve Sürekli Sonlu Elemanlar (FEM) yaklaşımları kullanılarak oluşturulan sayısal modeller mesnet çökmesi etkisinde incelenmiş ve sonuçların birbiriyle uyum içerisinde olduğu belirtilmiştir. İdealize edilmiş modeller ve yükleme etkisinde meydana gelen hasar mekanizmaları Şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1 Hasar mekanizmaları: a) LA, b) FEM/DEM, c) FEM (Pepe et al., 2020).

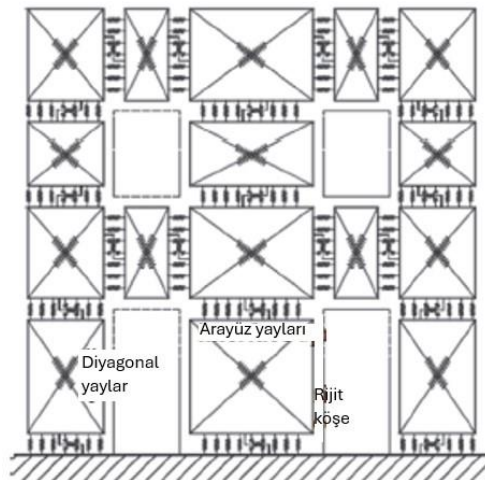
Bahsi geçen yaklaşımlara kıyasla daha basitleştirilmiş modelleme ve çözümleme teknikleri de ihtiyaçlar doğrultusunda geliştirilmiştir. Yığma yapıların yapısal davranışının tespitinde kullanılan en yaygın metotlardan biri Eşdeğer Çubuk Yöntemidir (Equivalent Frame Model). Büyük ölçekli duvar yapıları tek boyutlu çubuk elemanlarla tanımlanabilmekte ve yapısal hasar oluşumları doğrulukla tespit edilebilmektedir (Shrestha et al., 2020). Daha az analiz eforuna ihtiyaç duyması nedeniyle zamandan ve maliyetten tasarruf sağlamaktadır (Quagliarini et al., 2017). Yığma duvarın Eşdeğer Çubuk Yöntem ile idealize edilmiş bir hali Şekil 2.2’de sunulmuştur.



Şekil 2.2 Eşdeğer Çubuk Yöntemi ile idealize edilmiş bir yığma duvar (Morandi et al., 2020).

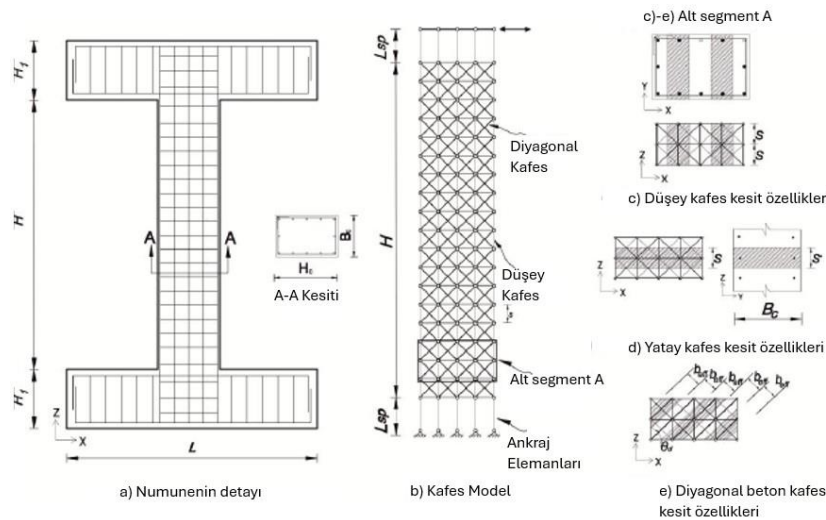
Aşıkoğlu et al. (2020) tarafından iki katlı üç boyutlu yığma yapı iki farklı basitleştirilmiş yaklaşım (Eşdeğer Çubuk Yöntemi ve Yay Tabanlı Makro Eleman) ve Sürekli Sonlu Elemanlar Modeliyle ele alınmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Farklı bir çalışmada ise Eşdeğer Çubuk Yönteminin doğrulaması mikro modelleme tekniğiyle kıyaslanarak gerçekleştirilmiştir (Camata et al., 2022). Her örnek uygulamada değişken koşullar nedeniyle sonuçlarda farklılıklar olsa da Eşdeğer Çubuk Yönteminin pratik bir çözüm imkânı sunduğu vurgulanmıştır.

Yığma yapıların davranışının çözümlenmesinde kullanılmak üzere farklı basitleştirilmiş yaklaşımlar çeşitli çalışmalarda önerilmiştir. Örneğin, alternatif bir Ayrık Elemanlar Modeli (Calio et al., 2012), Çubuk Analojisi Modeli (Strut-and-tie) (Foraboschi and Vanin, 2013) veya Makro Eleman Modeli (3DMacro; Şekil 2.3) (Marques and Lourenço, 2014). Mevcut yaklaşımların basitleştirilmesi üzerine de farklı öneriler sunulmuştur (Boem and Gattesco, 2021; Ramaglia et al., 2023).



Şekil 2.3 Makro Eleman Modeli (3DMacro) (Marques and Lourenço, 2014).

Kafes model yaklaşımı ise literatürde yaygın olarak betonarme yapı elemanlarının sayısal olarak modellenmesinde kullanılmıştır. Betonarme kolon (Şekil 2.4; Girgin et al., 2013), perde duvar (Lu and Panagiotou, 2014), plak şeridi (Girgin, 2019) ve bağ kirişli perde duvarlar (Alvarez et al., 2020) farklı çalışmalarda kafes model yaklaşımıyla idealize edilmiştir. Kolon-kiriş birleşimlerinin kafes model yaklaşımıyla tasarlandığı çok katlı yapının dinamik etkiler altındaki davranışı ise Girgin (2020) tarafından araştırılmıştır.

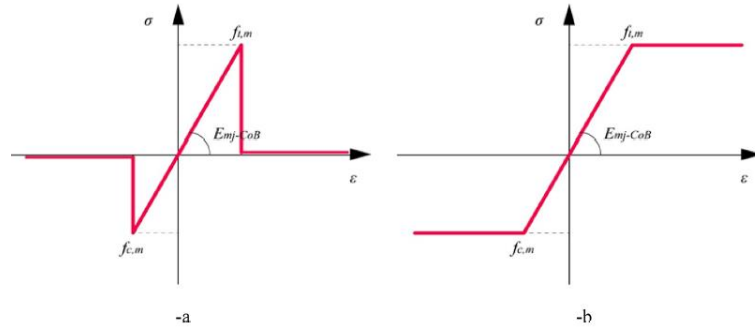


Şekil 2.4 Betonarme kolonun doğrusal olmayan kafes model yaklaşımıyla idealize edilmesi (Girgin et al., 2013).

Kafes model yaklaşımının yığma yapılara entegrasyonu üzerine gerçekleştirilen çalışma sayısının literatürde neredeyse yok denecek kadar az olduğu görülmüştür. Sadece kafes elemanlarla dizayn edilmiş olmasalar da sayısal modelin oluşturulmasında kafes elemanlardan yararlanılan çeşitli hibrit yöntemler önerilmiştir (D'Altri and de Miranda, 2022; Pingaro and Milani, 2023).

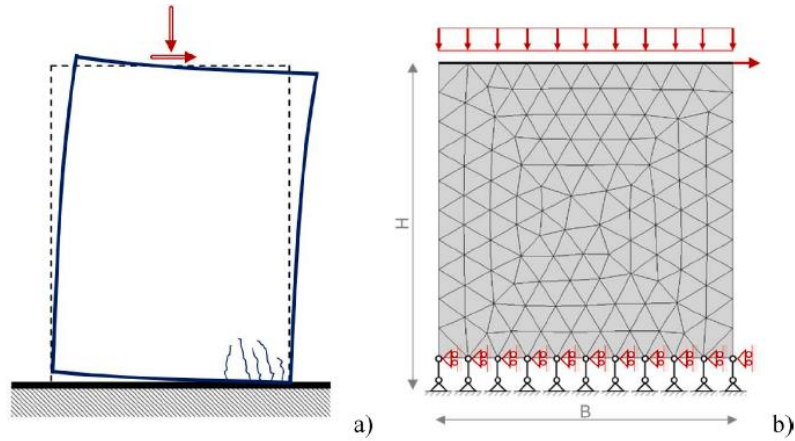
Özellikle son dönemde yapılan çalışmaların sayısında artış olduğu söylenebilir. Pingaro and Milani (2023) tarafından güçlendirilmiş yığma kemer yapısı nümerik olarak idealize edilmiş ve yük-deplasman eğrisi ile hasar oluşumu araştırılmıştır. Harç bölgeleri ve yapıya uygulanan fiber güçlendirme ve yapı arasındaki yüzey elastik ötesi davranışta mükemmel sünek (perfectly ductile) veya mükemmel kırılğan (perfectly brittle) bir davranış sergileyen belirli çekme ve basınç kapasitesine sahip kafes elemanlarla (cutoff bar) tanımlanmıştır. Yöntemin

güvenilir ve uygulanabilir olduğu belirtilmiştir. Kafes elemanlara ait gerilme-birim deformasyon davranışları Şekil 2.5'te verilmiştir.



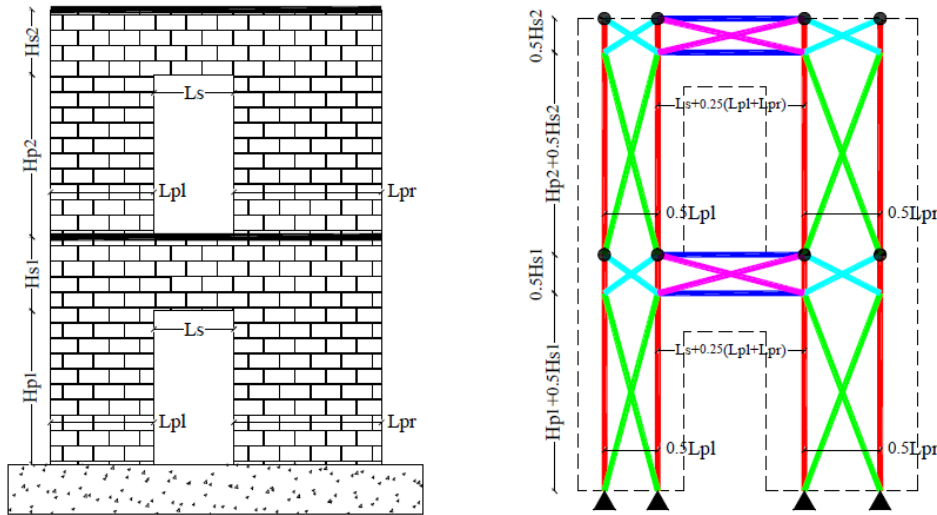
Şekil 2.5 Kafes elemanların (cutoff bar) gerilme-birim deformasyon davranışı: a) Mükemmel kırılkan, b) Mükemmel sünek (Pingaro and Milani, 2023).

Hibrit bir modelleme yaklaşımın önerildiği çalışmada kafes elemanlar ve sürekli model birlikte kullanılmıştır (D'Altri and de Miranda, 2022). Eğilme davranışının hâkim olduğu (kesme davranışının dikkate alınmadığı) yığma duvarlarda hasarın oluşması öngörülen topuk bölgelerine iki sıra tuğla yüksekliğinde kafes elemanlar tanımlanmıştır. Nümerik modelin geri kalanı ise elastik davranış sergileyen sürekli model ile oluşturulmuştur (Şekil 2.6). Kafes elemanlar sadece basınç gerilmelerine direnç göstermekte ve her bir elemana tanımlanan plastik mafsallar yardımıyla meydana gelen doğrusal olmayan davranış tespit edilebilmektedir. İncelenen iki doğrulama örneğinde de eğilme kaynaklı davranışa ait sonuçların önerilen yaklaşım ile başarılı şekilde temsil edebildiği belirtilmiştir.



Şekil 2.6 a) Yığma duvar, b) İdealize edilmiş sayısal model (D'Altri and de Miranda, 2022).

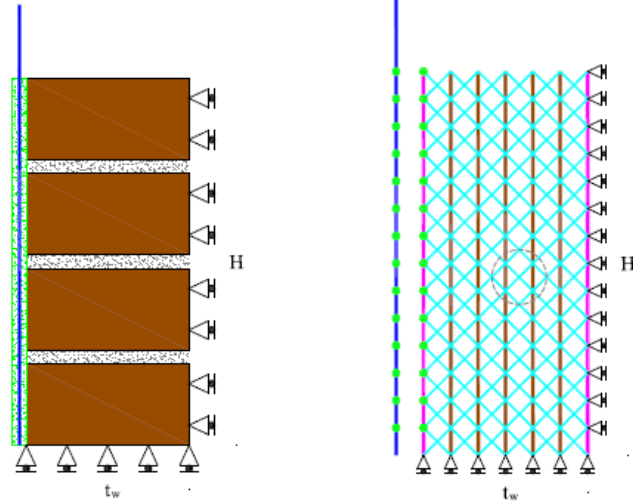
Yığma yapıların düzlem içi davranışını belirleyebilmek amacıyla yeni bir hesaplama yaklaşımı (Multi-Pier) Pirsahab et al. (2020b) tarafından önerilmiştir. Spesifik bölgeler hariç yatay doğrultuda eleman olmaksızın, yığma yapının geometrisi düşey ve diyagonal kafes elemanlar kullanılarak temsil edilmektedir. Hasar gelişimleri ise kafes elemanlara tanımlanan plastik mafsallar yardımıyla belirlenmektedir. İlk çalışmada çeşitli duvar yapıları ele alınmışken, önerilen yaklaşımın güncellenmiş versiyonu (Multi-Pier-Macro) çok katlı yapılar üzerinde test edilmiştir (Pirsahab et al., 2021). Güncellenmiş versiyonda yapının geometrisinin modellenmesinde ihtiyaç duyulan eleman sayısı azaltılmış ve çözümlemelerin daha hızlı gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Böylece daha büyük ölçekli yapıların analizine imkân sağlanmıştır. İki katlı bir yapının Multi-Pier-Macro yaklaşımıyla idealize edilmiş hali Şekil 2.7’de görülmektedir. Sonuçların başarıyla beklentileri karşıladığı vurgulanmıştır.



Şekil 2.7 Yığma yapının Multi-Pier-Macro yaklaşımı ile idealize edilmesi (Pirsahab et al., 2021).

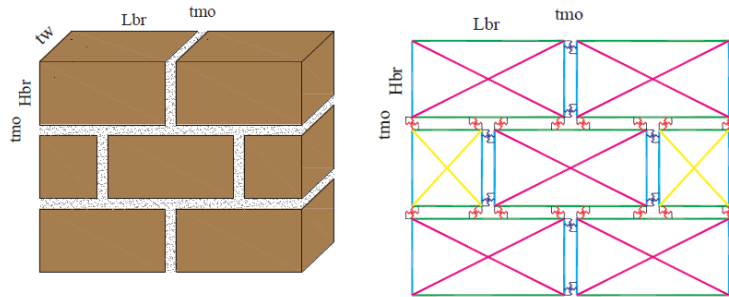
Bahsi geçen Multi-Pier yaklaşımı kullanılarak, düz ve eğimli yığma duvar örneklerinin yüzeylerine uygulanan fiber kumaşın (FRP) aksenal çekme etkisinde yapının yüzeyinden ayrılması incelemiştir (Zhao et al., 2022). Meydana gelmesi olası hasar formu sayısal model ile simüle edilmiştir. Burada duvar ile fiber kumaş arasındaki aderansın mükemmel olduğu varsayılmış ve hasar oluşumunun duvar yüzeyinden katman ayrılması şeklinde olması öngörülmüştür. Sayısal modelde mükemmel aderans Şekil 2.8’de aynı kot hizasında bulunan fiber kumaşa ait düğüm noktası ile yığma duvarın köşe düğüm noktasının hareketlerinin birbirine

bağlanması ile sağlanmıştır. Dış yükleme ise fiber kumaşın çekilmesiyle sayısal modele yansıtılmıştır. Basitleştirilmiş bir yaklaşıma göre sonuçların kabul edilebilir doğrulukta olduğu yazarlar tarafından belirtilmiştir.



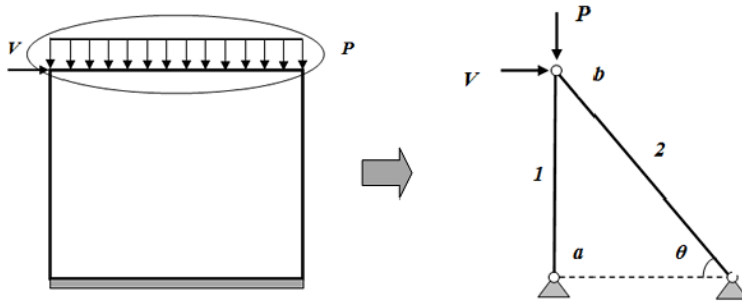
Şekil 2.8 Güçlendirilmiş yığma duvarın sayısal model ile idealize edilmesi (Zhao et al., 2022).

Tuğlaların elastik davranış sergileyen kafes elemanlarla, harçların ise yatay ve düşey doğrultudaki yaylar ile tanımlandığı homojen olmayan Ayrık Elemanlar Metodu Pirsahab et al. (2020b) tarafından önerilmiştir (Şekil 2.9). Burada tuğlaların basınç, çekme ve kayma dayanımının harçkinden daha yüksek olması nedeniyle hasarların harç bölgelerinde oluşacağı varsayımı yapılmıştır. Bu nedenle tuğlaların doğrusal olmayan davranışı ihmal edilirken, harç bölgeleri doğrusal olmayan yaylar ile tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen analizler neticesinde sonuçların tutarlı olduğu vurgulanmıştır. Fakat Multi-Pier yaklaşımıyla kıyaslandığında analiz süresinin ve ihtiyaç duyulan malzeme parametre sayısının daha yüksek olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.9 Yığma duvarın idealize edilmesi (Pirsahab et al., 2020b).

Düzlem içi kayma kesmesine maruz kalan yığma duvarların nümerik olarak idealize edilmesi ve analizi için basit bir Eşdeğer Kafes Model yaklaşımı Najafgholipour (2018) tarafından önerilmiştir (Şekil 2.10). İki kafes elemanın üçgen form oluşturacak şekilde birleştirilmesiyle hesap modeli tanımlanmıştır. Düşey kafes elemanın rijit olduğu varsayımı yapılmıştır. Eğimli kafes eleman ise sadece basınç etkisinde çalışmaktadır. Yüklemeler ise tekil formda uygulanmaktadır. Önerilen yöntem çok katlı ve birden fazla düşey taşıyıcı yığma duvarın olduğu yapılarda da test edilmiştir. Bahsi geçen yaklaşımın benzerlerine göre en temel avantajı düşey yüklerin otomatik olarak dikkate alınabildiği ve böylece her bir düşey taşıyıcı elemanda kullanılan plastik mafsal için ayrı ayrı kapasite hesabının yapılmamasıdır. Ayrıca dikkate alınan örnek çalışmalarda tutarlı sonuçlar elde edildiği vurgulanmıştır.

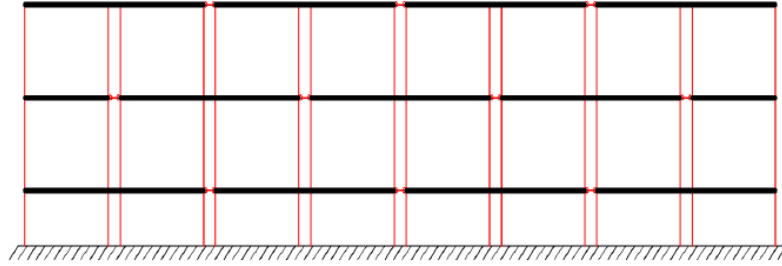


Şekil 2.10 Eşdeğer Kafes Modelin karakteristik özelliklerinin tanımlanması (Najafgholipour, 2018).

Çekme gerilmesi kaynaklı hasar oluşması öngörülen bölgelere yerleştirilen arayüzey elemanların, basınç davranışını temsil eden sürekli modelle birlikte kullanıldığı hibrit yaklaşım (Semi-Lumped Method) Verbrugge (2017) tarafından önerilmiştir. Mevcut durumda yaklaşımın evrensel olarak kabul edilebilir düzeyde yeterli olmadığı ve geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

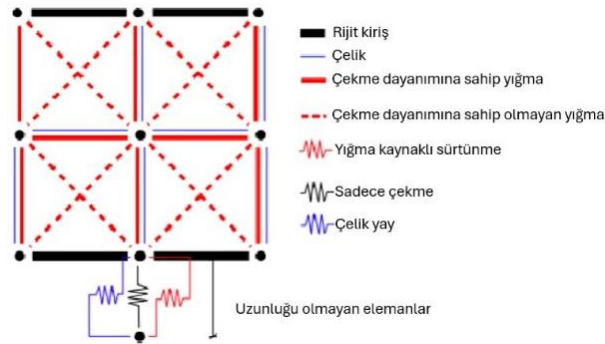
Kafkas (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada yığma duvarların doğrusal davranışının belirlenebilmesi için düzlem çubuk elemanlar kullanılarak mikro modelleme yapılmıştır. Taşıyıcı birim (tuğla) ve yatay derzin yerine her ikisinin de eksenel rijitliğinin birlikte dikkate alındığı eşdeğer çerçeve eleman, düşey derzin yerine ise kafes eleman tanımlanmıştır. Böylece yığma duvar iki boyutlu çerçeve-kafes karma sistem olarak çubuk elemanlarla idealize edilmiştir

(Şekil 2.11). Geliştirilen yazılım aracılığıyla sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçların elastik bölgede literatür verileriyle uyum içerisinde olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.11 Mikro modelin temsili gösterimi (Kafkas, 2015).

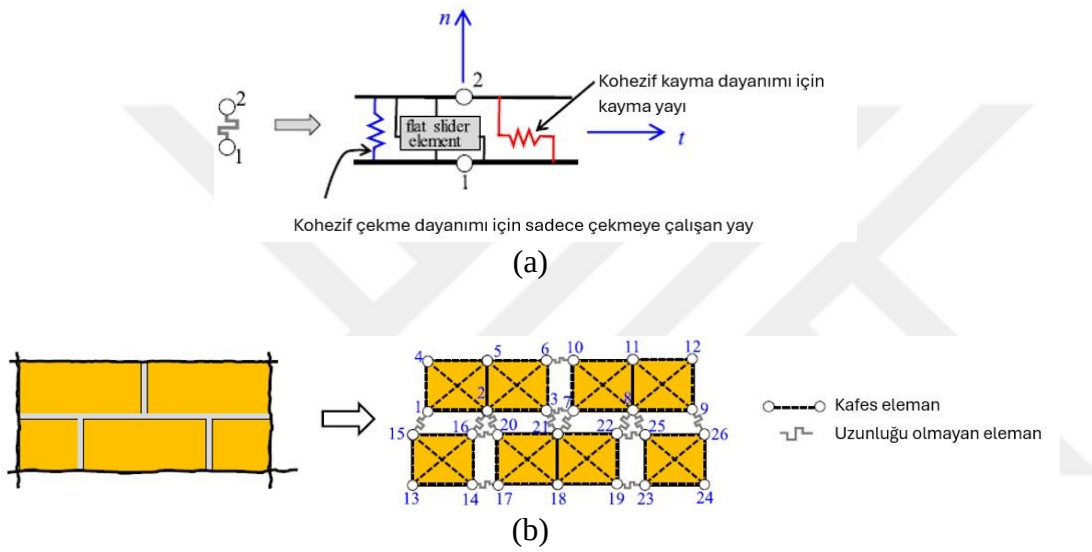
Kafes model ile idealize edilen yığma duvarın mesnetlenme koşulu Williams (2013) tarafından araştırılmıştır. Örnek olarak ele alınan tek ve iki katlı donatılı yığma duvarlar sabit ve kayma etkisinin dikkate alındığı mesnetlenme türleriyle analiz edilmiştir. Temeldeki kayma etkisinin tanımlanmasında iki adet uzunluğu olmayan elemanlar (zero-length element) ve bir adet Flat Slider Eleman kullanılmıştır. Sayısal model örneği Şekil 2.12’de görülmektedir. Taban kayma etkisinin dikkate alındığı sayısal modellere ait taşıma kapasitesinin genel olarak sabit mesnetlenme koşulundakine göre daha düşük kaldığı belirtilmiştir.



Şekil 2.12 Kayma etkisinin dikkate alındığı sayısal model (Williams, 2013).

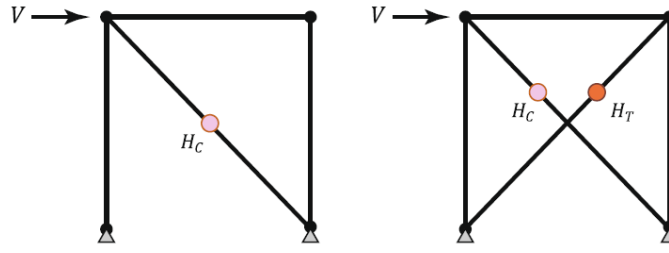
Dolgu duvarlı betonarme çerçeve yapılarda duvarın veya tüm yapının tanımlanmasında kafes elemanlar kullanılabilir. Rankawat et al. (2021) ve Mbewe (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar örnek olarak verilebilir. Fakat Salinas et al. (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışma ise daha kapsamlı bir modelleme yaklaşımını içermektedir.

Salinas et al. (2022) tarafından önerilen yaklaşımda dolgu duvarı oluşturan elemanların birbiriyle ve çerçeve elemanı ile bağlantılarında uzunluğu olmayan elemanlar (zero-length elements) kullanılmıştır. Bu elemanların her biri iki adet yay ve OpenSees yazılımında tanımlı Flat Slider Eleman'dan oluşmaktadır (Şekil 2.13a). Dolgu duvarın önerilen yaklaşım ile idealize edilmesine ait bir görsel Şekil 2.13b'de sunulmuştur. Yöntem ile başarılı sonuçlar elde edilebildiği belirtilmiştir. Fakat çok açıklıklı veya çok katlı yapılarda yaklaşımın hantal kalacağı vurgulanmıştır.



Şekil 2.13 a) Ara bağlantı elemanın tanımlanması, b) Dolgu duvarın idealize edilmesi (Salinas et al., 2022).

Dolgu duvarın eşdeğer kafes elemanlarla tanımlanmasına ait çalışma ise Rankawat et al. (2021) tarafından gerçekleştirilmiştir. Dolgu duvar, yalnız eksenel basınç etkisinde çalışan plastik mafsallara sahip diyagonal kafes elemanlarla idealize edilmiştir. Dolgu duvarın tek veya çift diyagonal elemanla tanımlanmasına ait görsel Şekil 2.14'te sunulmuştur. Düşey ve yatay çerçeve elemanlar ise yükleme boyunca doğrusal davranış sergileyen kafes elemanlarla tanımlanmıştır. Önerilen yaklaşımın kesme etkin davranış sergileyen dolgu duvarlı yapıların doğrusal olmayan hesabında kullanılabileceği belirtilmiştir. Son olarak yaklaşım üç katlı bir yapının sismik etkiler altındaki davranışını incelemek için kullanılmıştır. Çatlama dayanımı, maksimum kesme kapasitesi ve bunlara karşılık gelen ötelenme oranlarının tespit edilebildiği belirtilmiştir.

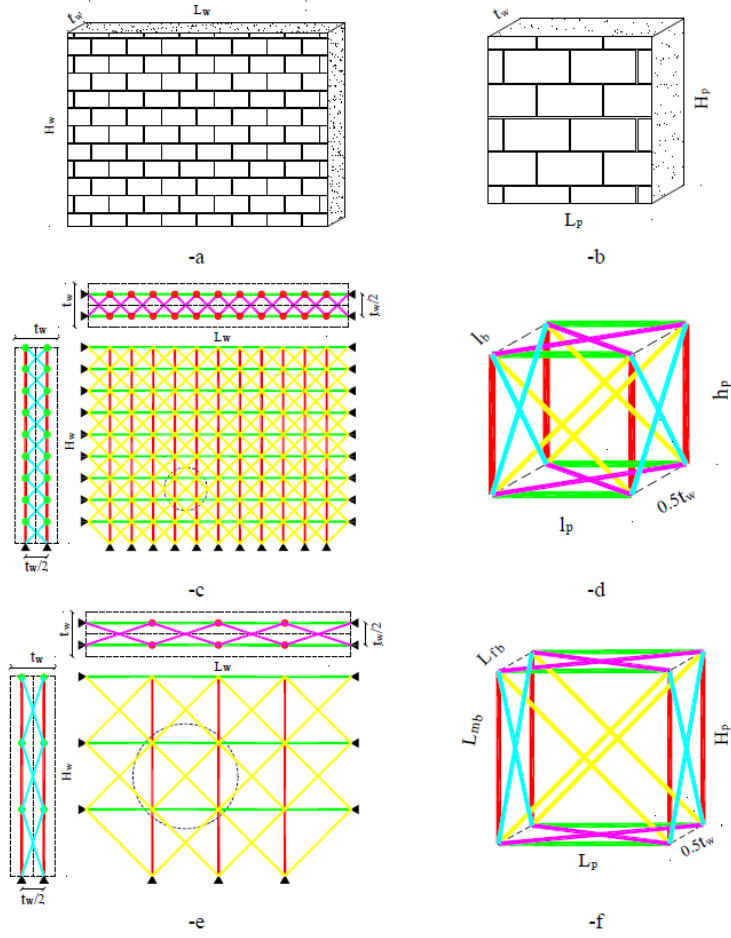


Şekil 2.14 Dolgu duvarın idealize edilmesi (Rankawat et al., 2021).

Dolgu duvarın nümerik olarak idealize edilmesi üzerine gerçekleştirilen alternatif bir çalışmada ise iki metot önerilmiştir; Eşdeğer Basınç Çubuğu (Equivalent Strut Model) (Mbewe and van Zijl, 2019) ve kafes yaklaşımı (Mbewe and van Zijl, 2018). İlk yaklaşımda sayısal model çerçeve sistemin diyagonal kafes eleman ile desteklenmesiyle oluşturulurken, ikincisinde yapının tamamı kafes elemanlarla idealize edilmiştir. İlk yaklaşımdan elde edilen sonuçların ikinciye göre daha tutarlı olduğu belirtilmiştir (Mbewe, 2018).

Yığma yapıların düzlem dışı dayanımlarının düzlem içine göre daha düşük olduğu söylenebilir. Özellikle deprem etkisine maruz kaldıklarında sıklıkla düzlem dışı hasarlarla karşılaşmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında ele alınmasa da önerilen yaklaşımın geliştirilmesiyle düzlem dışı etkiler de incelenebilir. Mevcut literatürde düzlem dışı etkilerin kafes elemanlar yardımıyla çözümlenmesi ile alakalı çalışma sayısı oldukça kısıtlıdır.

Pirsaheb et al. (2020a) tarafından yığma duvarların düzlem içi davranışının belirlenmesinde kullanılan yaklaşım (Multi-Pier), üç boyutlu forma dönüştürülerek düzlem dışı hasar gelişimi araştırılmıştır. Sonuçta yığma duvarın yük taşıma kapasitesi, başlangıç rijitliği, doğrusal olmayan davranışı, çatlak oluşumu, kırılma mekanizması ve herhangi bir bölgesinde meydana gelen gerilme ve birim deformasyonlar belirlenebilmiştir. Geliştirilmiş versiyonu (Multi-Pier-Macro) ile de konu ele alınmıştır. Yöntemin hızlı bir şekilde sonuca ulaştığı ve analizler için kısıtlı bir teorik altyapıya ihtiyaç duyduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte elde edilen sonuçların güvenilir olduğu vurgulanmıştır (Pirsaheb et al., 2022). Bir yığma duvarın bahsi geçen iki yaklaşım aracılığıyla idealize edilişi Şekil 2.15'te verilmiştir.



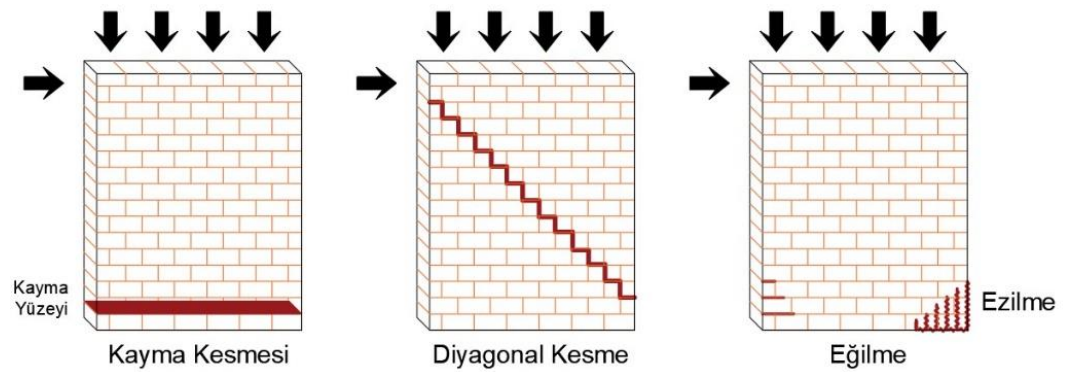
Şekil 2.15 Yığma duvarın (a ve b) Multi-Pier (c ve d) ve Multi-Pier-Macro (e ve f) yaklaşımlarıyla idealize edilişi (Pirsaheb et al., 2022).

Ridwan et al. (2017) tarafından önerilen alternatif yöntem (Fictitious Truss Method) aracılığıyla gerçekleştirilen lineer analizler sonucunda özellikle yükseklik/genişlik oranının birden küçük olduğu yapılarda düzlem dışı dayanımların belirlenebildiği belirtilmiştir. Ayrıca aynı yöntem ile tek doğrultulu ve açıklık boyunca uygulanan güçlendirmelerin de yapı üzerindeki etkisinin tespit edilebileceği vurgulanmıştır.

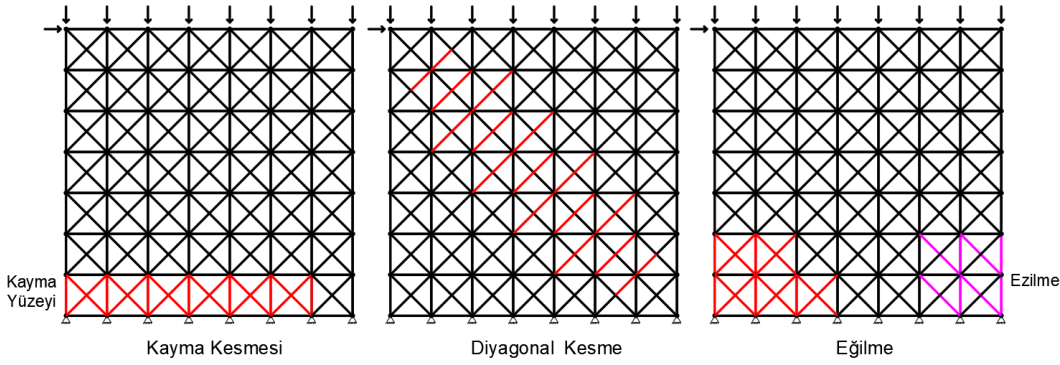
3. METODOLOJİ

Yığma yapıların düzlemdeki davranışının temsil edilebildiği alternatif pratik bir modelleme yaklaşımının geliştirilmesi bu çalışmanın temel amacı olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda yatay ve düşey doğrultulu dış kuvvetler etkisinde meydana gelen düzlem içi yer değiştirmelerin, yapının taşıma kapasitesinin, kırılma mekanizmasının ve hasar oluşum bölgelerinin tespit edilebileceği kafes elemanların birbirine mafsallarla bağlanmasıyla oluşan yeni ve basit bir modelleme yaklaşımı önerilmiştir.

Kafes sistem formunun temel olarak yığma duvarlarda ortaya çıkan düzlem içi hasar modlarının (Şekil 3.1) tanımlanmasına olanak sağlayacak sade bir geometriye sahip olması esastır. Düşey ve yatay doğrultulu kafes elemanlarla oluşturulan kare formun köşegenlerinde diyagonal kafes elemanlar teşkil edilmiştir. Her bir eleman birbirine mafsallar aracılığıyla bağlanmıştır. Hasar oluşumlarının tanımlanmasında daha çok düşey ve diyagonal kafes elemanlar ön plana çıkmakta iken enine elemanlar yatay stabiliteye katkı sunmaktadır. Şekil 3.2’de düzlem içi tipik hasar modlarının kafes elemanlarla temsili görülmektedir. Kırmızı renk maksimum çekme geriniminin, magenta renk ise maksimum basınç geriniminin aşıldığı durumları temsil etmektedir.



Şekil 3.1 Yığma duvarlarda düzlem içi hasar modları.



Şekil 3.2 Kafes modelde düzlem içi hasar modlarının tanımlanması.

Yığma duvarlarda gözlemlenen düzlem içi hasar modları en sade ifade ile önerilen yaklaşımda aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

a) Düşey ve diyagonal elemanlarda eş zamanlı olarak beraber ortaya çıkan çekme hasarları kayma kesmesine karşılık gelmektedir. Eğilme davranışının neden olduğu tabandaki açılmalar da kayma kesmesine benzer formda tanımlanmaktadır.

b) Diyagonal elemanlarda oluşan çekme hasarı diyagonal kesmeyi temsil etmektedir. Hasarın büyüklüğüne bağlı olarak yatay elemanlarda da belirgin çekme deformasyonları meydana gelebilir. Bahsi geçen çekme yatay elemanlar için kayma davranışı olarak dikkate alınır.

c) Düşey ve diyagonal elemanlarda oluşan basınç hasarları eğilme davranışının neden olduğu ezilmelere karşılık gelmektedir.

3.1 Geometrinin Belirlenmesi

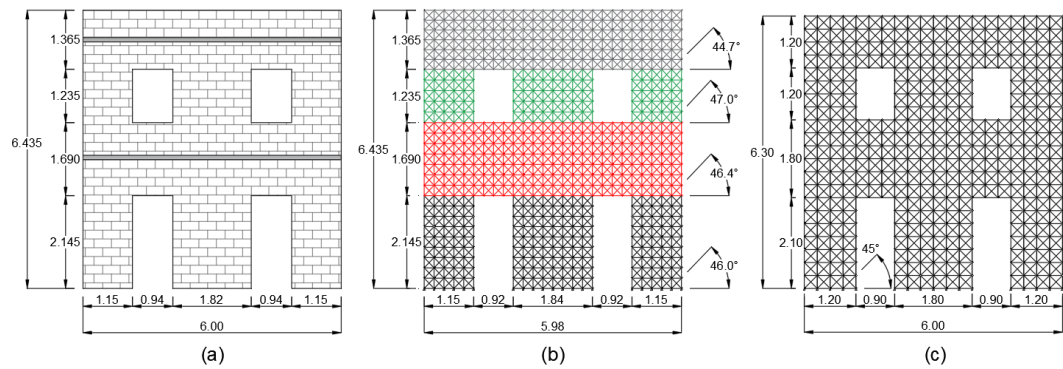
Mevcut bir yapının önerilen yaklaşımla idealize edilebilmesi için gerekli ilk parametre bir kafes eleman modülünün genişliğini temsil eden değerdir (M). Diyagonal elemanların yatay eksen ile 45°'lik açı oluşturacak şekilde tanımlanmaları nedeniyle kafes sistem kare forma sahiptir.

Önerilen metodolojide makro yaklaşım dikkate alınmıştır. Böylece seçilen eleman boyutu taşıyıcı birim elemanından bağımsız olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Fakat tanımlanacak olan yığma yapıdaki kapı ve pencere boşlukları ve/veya çeşitli geometrik kısıtlayıcılar eleman boyutunun seçiminde etkindir. Bunlarla birlikte yapının toplam yüksekliği ve genişliği de seçimi

etkilemektedir. Genellikle bu parametrelere ait ölçü değerleri dikkate alınarak, ortak bölenler eleman boyutu olarak seçilebilmekte ve yapının geometrisi olabildiğince gerçeğine yakın olarak temsil edilebilmektedir. Ayrıca eleman boyutunun toplam kat yüksekliğinin %5-15 aralığında olmasına dikkat edilmelidir. Bu kısım çalışmanın sonunda daha kapsamlı olarak açıklanmıştır (Bkz. Bölüm 4.6).

Özellikle çok katlı ve boşluk sayısı fazla olan yapılarda sabit bir eleman boyutu belirlemek oldukça güçleşmektedir. Bu konu iki farklı örnek çalışma üzerinden detaylı olarak ele alınmıştır (Güner ve Nuhoglu, 2022). Geometrinin tanımlanmasında sabit 45° ve farklı açı değerlerinin bir arada kullanılmasıyla elde edilen nümerik modeller tasarlanmıştır.

Değişken açılı model sabit açılıya göre daha hassas bir geometrik modelleme ortaya koyabilmesine karşın değişken çubuk boylarının ayrı ayrı tanımlanması iş yükünü arttırmaktadır. Çalışmada ele alınmış olan örneklerden birine ait geometrideki değişimler Şekil 3.3'te sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde ilk örnekte her iki modelden elde edilen verilerin birbiriyle örtüştüğü, ikinci örnekte ise farkın daha belirgin olduğu belirtilmiştir. Fakat kapasite eğrilerinin oluşumlarının kendi içlerinde tutarlı olduğu vurgulanmıştır.



Şekil 3.3 a) Modelin geometrisi (Magenes et al., 1995), b) Değişken açılı kafes model, c) Sabit açılı kafes model (m) (Güner ve Nuhoglu, 2022).

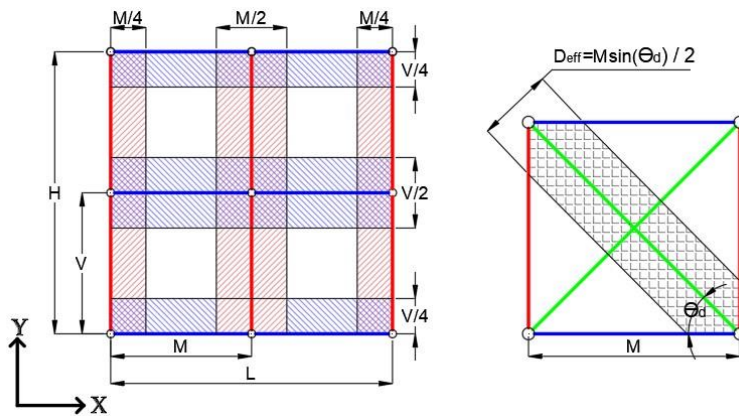
Nümerik çözümlerlerde dizayn edilen ayrıntılı modellemelerin parametrelerin hassasiyetine daha fazla bağımlı olması, bazen beklenenin aksine sonuçları olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu durumda daha basit hesaplama yaklaşımları tercih edilerek alternatif parametre değerleri tekrarlı analizlerle

dikkate alınmalıdır. Nihai olarak elde edilen sonuçların genel davranışa olan etkileri değerlendirilmelidir (VGM, 2017). İdealize edilmiş yapısal taşıyıcı sistemi basitleştirmesinin yanı sıra yukarıda bahsi geçen çalışmada elde edilen bulgular dikkate alındığında, eşdeğer kafes model geometrisinin oluşturulmasında sabit açı kullanılması önerilmiştir. Alternatif eleman boyutlarının ve diyagonal kafes elemanların yatay eksen ile yaptığı açının sonuçlara etkisi bu bölümün sonundaki parametrik çalışmalarda kapsamlı olarak ele alınmıştır (Bkz. Bölüm 3.5 ve 3.6).

3.2 Çubuk Kesit Alanlarının Belirlenmesi

Doğrultularına göre üç farklı kafes elemandan bahsetmek mümkündür; düşey, yatay ve diyagonal. Açının sabit ve 45° kullanılması nedeniyle düşey ve yatay elemanların boyları eşittir.

Diyagonal elemanların da taşıyıcı olmaları nedeniyle mevcut yığma duvarın toplam düşey ve yatay kesit alanlarının yarısı sırasıyla yatay ve düşey kafes elemanlarla diğer yarısı ise diyagonal kafes elemanlarla tanımlanmaktadır. Genel olarak kafes modelin dış çerçevesinde yer alan çubuklara ait kesit alanları, iç bölgedekilerin yarısına eşittir. Mevcut yığma yapı ile idealize edilmiş kafes model geometrilerinde boyutsal farklılıklar söz konusu ise en dıştaki kafes elemanların kesit alanlarında güncelleme yapılabilmektedir. Şekil 3.4'te kafes elemanların kesit alanlarının düzlemde kapladığı bölgeler taralı olarak belirtilmiştir. Taralı alanların duvar kalınlığı ile çarpılmasıyla, her bir çubuk elemanına ait kesit alanı hesaplanabilmektedir.



Şekil 3.4 Kafes elemanlara ait yüzey kesit alanlarının belirlenmesi (Güner and Nuhoglu, 2024a).

Diyagonal elemanın etkili kesit alanı (D_{eff}) ise Lu and Panagiotou (2014) tarafından betonarme yapı elemanları için önerilen yaklaşımdan elde edilmiştir. Bu çalışmanın Lu and Panagiotou (2014) tarafından önerilen yaklaşımdan kesit alanının tespiti hususunda ayrıldığı nokta yarı kesit alanı kullanılmasıdır. Demirtaş et al. (2023) tarafından betonarme kolon-kiriş birleşim noktası üzerine gerçekleştirilen çalışmada da benzer bir öneri sunulmuştur. Güner ve Nuhoglu (2022) tarafından yapılan çalışmada bu husus araştırılmış ve yığma yapılar için Şekil 3.4'te tanımlandığı şekliyle kesit alanı hesabının yapılmasının daha tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu konuda alternatif durumların malzeme davranışıyla birlikte ele alınarak daha kapsamlı incelemeler yapılması önerilmektedir.

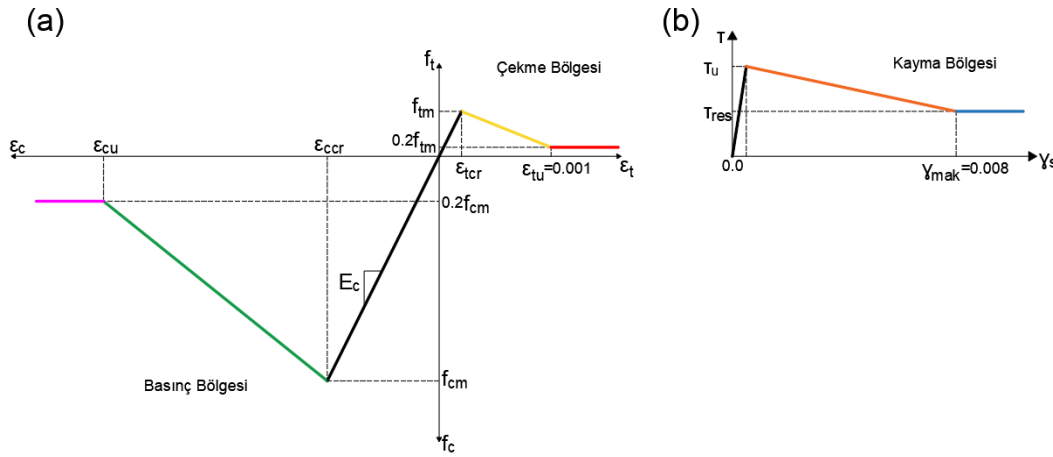
3.3 Malzeme Davranışı

Yığma yapılarda malzeme davranışının tespiti oldukça karmaşık bir konudur. Yapının inşa edildiği yöreden temin edilebilen malzemenin niteliği, bağlayıcı olarak kullanılan harç malzemesinin karışımı, çevresel faktörlerden kaynaklı bozulmalar gibi çeşitli etkiler göz önünde bulundurulduğunda, yapının tamamını temsil edebilecek parametre değerlerinin gerçekçi olarak belirlenmesi zorlaşmaktadır. Ayrıca mevcut parametrelere ait veriler nümerik çalışmaya aktarılırken oluşabilecek hataların yanı sıra makro yaklaşımda olduğu gibi birden fazla yapı elemanının tek bir eşdeğer malzeme olarak tanımlanması ve tüm yapıda homojen dağıldığı varsayılması da hata oranlarını büyük ölçüde arttırabilmektedir.

Ayrıntılı modellerin (mikro) daha fazla parametre girdisi nedeniyle daha gerçekçi sonuçlar vereceği beklentisi yüksektir. Fakat malzeme davranışını belirlemenin bu denli karmaşık olduğu durumlarda beklenen hassasiyet her zaman gerçekleşmeyebilir. Bazen varsayımlar yapılarak malzeme modelinin sadeleştirilmesi daha tutarlı sonuçlar ortaya koyabilmektedir. Varsayımlardaki hata oranları ve/veya malzeme dayanımlarına ait standart sapma değerleri göz önünde bulundurularak sayısal analizlerin sayısı arttırılabilir ve güven aralıkları içerisinde sonuçlar değerlendirilebilir.

Gerçekçi bir taşıma kapasitesi ve hasar tespiti amaçlanıyorsa, doğrusal olmayan malzeme davranışı muhakkak hesaplamalara yansıtılmalıdır. Uzun yıllardır ayakta duran yapıların ilk günkü malzeme dayanımına sahip olamayacakları da aşıkardır. Yığma yapıların basınç dayanımı çekmenin oldukça üzerindedir. Hatta sayısal analizlerde zaman zaman çekme dayanımının olmadığı varsayımı yapılabilmektedir. Fakat analizlerde kısıtlı da olsa bu değeri tanımlamak, daha gerçekçi bir hasar dağılımı ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada basınç veya çekme etkisindeki malzemenin gerilme-birim deformasyon eğrisi Pirsahab et al. (2021) tarafından önerilen davranış formuyla tanımlanmıştır (Şekil 3.5a). Yığma yapılara dair farklı çalışmalarda da benzer eğriler önerilmiştir (Lourenço, 1996; Bolhassani et al., 2015). Burada, basınç ve çekme bölgelerindeki semboller E_c , f_{tm} , ϵ_{tcr} , ϵ_{tu} , f_{cm} , ϵ_{ccr} ve ϵ_{cu} sırasıyla basınç Elastisite Modülü, maksimum çekme dayanımı, çatlamış çekme gerinimi, maksimum çekme gerinimi, maksimum basınç dayanımı, çatlamış basınç gerinimi ve maksimum basınç gerinimini temsil etmektedir.



Şekil 3.5 Kafes elemanlar için tanımlanan malzeme davranışları: a) Basınç ve çekme etkisinde (Pirsahab et al., 2021), b) Kayma etkisinde.

Davranışa ait maksimum çekme gerinimi 0.001 olarak kabul edilmiştir (Rai et al., 2014; Pirsahab et al., 2021). Dayanım parametreleri genel olarak saha veya laboratuvar testleriyle belirlenebilmektedir. Bahsedilen diğer parametreler ise (3.1), (3.2) ve (3.3) denklemleri yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$\epsilon_{tcr} = \frac{f_{tm}}{E_c} \quad (3.1)$$

$$\epsilon_{ccr} = \frac{f_{cm}}{E_c} \quad (3.2)$$

$$\epsilon_{cu} = 2.75 \times \frac{f_{cm}}{E_c} \quad (3.3)$$

Kayma davranışı belirsizliğin daha yüksek olduğu bir konudur. Bu nedenle davranışın deneysel metotlarla belirlenmesi avantaj sağlamaktadır. Fakat mümkün olmadığı durumlarda Denklem (3.4)'de belirtilen Mohr-Coulomb formülasyonu yardımıyla maksimum kayma dayanımı tespit edilebilmektedir. Söz konusu denklemde τ_u , σ_v , c ve μ sembolleri sırasıyla maksimum kayma dayanımı, düşey basınç gerilmesi, kohezyon ve sürtünme katsayısını ifade etmektedir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (AFAD, 2018) ve EN 1996-1-1 (2005) tarafından sürtünme katsayısı 0.4 olarak tavsiye edilmiştir. Literatürde çeşitli değerlerin de önerildiği farklı çalışmalar ve yönetmelikler bulunmaktadır (Xu et al., 2018).

$$\tau_u = c + \mu \sigma_v \quad (3.4)$$

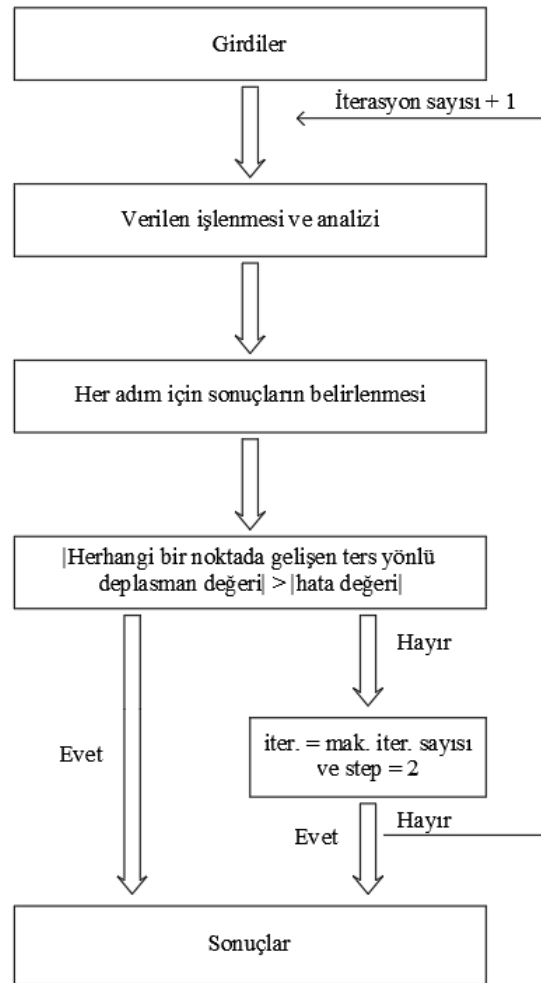
Maksimum kapasitesinin aşılmasından sonraki kısım farklı yaklaşımlarla temsil edilebilir (Wahab, 2015). Burada hesap kolaylığı olması bakımından sabit (constant) veya üç doğrulu (tri-linear) bir yaklaşım benimsenmiştir (Bkz. Şekil 3.5b). Maksimum ve artık (τ_{res}) kayma dayanım değerleri arasındaki fark değiştirilerek, eğrinin eğimi kontrol edilebilmektedir. İncelenen örneğe bağlı olarak bazen her iki durumun etkisi ayrı ayrı, bazen de yalnızca birinin kullanılmasıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Çekme davranışındakine benzer şekilde varsayım yapılarak maksimum kayma gerinim (γ_{mak}) değeri 0.008 olarak benimsenmiştir (Thuyet et al., 2018). Kayma Modülünün belirtilmediği durumlarda Elastisite Modülünün %40'ı olarak alınabilmektedir (AFAD, 2018).

Önerilen yaklaşımda düşey, yatay ve diyagonal olmak üzere üç farklı doğrultuda kafes elemanlar bulunmaktadır. Eğer kafes elemanlar negatif eksenel gerilmeye (basınç etkisi) maruz kalıyorsa, doğrultusu fark etmeksizin benzer

davranış sergilemektedir. Pozitif eksenel gerilmeye (çekme etkisi) maruz kaldıklarında düşey ve diyagonal elemanlar çekme, yatay elemanlar ise kayma davranışı sergilemektedir.

3.4 Analiz

Malzeme ve geometrik tanımlamaların gerçekleştirilmesiyle bir sonraki adım olan analiz aşaması kapsamlı olarak ele alınmıştır. Sonlu Elemanlar Deplasman Metodu ilkelerinin esas alındığı doğrusal olmayan çözümleme yapabilen bir algoritma geliştirilmiştir (Şekil 3.6). Bu kapsamda açık kaynak erişime sahip Python (Python Software Foundation, 2021) programlama dili PyCharm (Jet Brains S.R.O., 2022) arayüzü aracılığıyla kullanılmıştır.



Şekil 3.6 Çözüm algoritması.

3.4.1 Yazılım

Ana başlıklar dikkate alındığında geliştirilen algoritma (Bkz. Şekil 3.6) bir tanesi kontrol noktası olmak üzere toplam beş adımdan oluşmaktadır. İlk adımda eleman ve düğüm noktası numaraları, düğüm noktalarına ait koordinatlar, çubuk kesit alanları, mesnetlenme ve sınır koşulları, dış yüklemeler, malzeme özelliklerine ait girdiler, birim hacim ağırlıkları, iterasyon sayıları gibi ihtiyaç duyulan parametre değerleri tanımlanmaktadır (Şekil 3.7). Ayrıca analiz türü (doğrusal veya doğrusal olmayan), geometrik doğrusal olmayan davranışın analizlere yansıtılıp yansıtılmayacağı ve Master-Slave Method'un uygulanıp uygulanmayacağı belirtilmektedir.

```
# Basınç Davranışı
Ec = 1650                                # Başlangıç basınç elastisite modülü
fcm = -3                                # Maksimum basınç dayanımı
Epsilon_ccr = fcm / Ec                    # Çatlamış basınç gerinimi
Epsilon_cu = 2.75 * Epsilon_ccr          # Maksimum çekme gerinimi
fmin = -0.6                              # 0.2fcm
Etc = (fmin - fcm) / (Epsilon_cu - Epsilon_ccr) # Yumuşama bölgesinin eğimi

# Çekme Davranışı
ftm = 0.06                               # Maksimum çekme dayanımı
Epsilon_tcr = ftm / Ec                    # Çatlamış çekme gerinimi
Epsilon_tu = 0.001                       # Maksimum çekme gerinimi
fmak = 0.012                             # 0.2ftm
Ett = (fmak - ftm) / (Epsilon_tu - Epsilon_tcr) # Yumuşama bölgesinin eğimi
```

Şekil 3.7 Malzemenin çekme ve basınç davranışlarının tanımlanması.

İkinci adımda ise çubuk elemanların lokal rijitlik matrisleri, sonrasında ise tüm kafes sistemin global rijitlik matrisi oluşturulmaktadır. Sınır koşulları dikkate alınarak, global rijitlik ve yük matrisleri sadeleştirilmekte ve nihayetinde (3.5) eşitliğinde verilen denklem takımının çözülmesi ile düğüm noktalarında meydana gelen global yer değiştirmeler tespit edilmektedir. F, K ve Δ ifadeleri sırasıyla global eksenlerdeki dış yük matrisini, sistem rijitlik matrisini ve düğüm noktalarında meydana gelen deplasmanlara ait matrisi temsil etmektedir.

$$F = K * \Delta \quad (3.5)$$

Her bir iterasyon sonucunda meydana gelen deplasman, gerilme, çubuk kuvveti, birim deformasyon değerleri ayrı ayrı ve kümülatif olarak üçüncü adımda ele alınmaktadır. Doğrusal olmayan deformasyonların başladığı kafes elemanlar tespit edilerek değişen Elastisite Modülleri ve meydana gelen deplasman değerlerine bağlı olarak düğüm noktalarına ait koordinatlar bir sonraki iterasyon adımı için yeniden hesaplanmaktadır. Şekil 3.5'te belirtilen maksimum gerinim sınırlarının aşılması durumunda ise elemanın aksenal rijitliği yaklaşık olarak sıfır kabul edilmektedir. Böylece ilgili kafes eleman taşıyıcılığını yitirmektedir.

Dördüncü adımda ise iki farklı kontrol sağlanmakta ve böylece analizin devam edip etmeyeceği belirlenmektedir. İlk olarak herhangi bir düğüm noktasında beklenenin aksine gelişen deplasman değeri var ise tespit edilmektedir. Örneğin X doğrultusunda uygulanan bir düzlem içi yatay yükleme mevcut iken herhangi bir düğüm noktasında -X doğrultusunda yatay yer değiştirme meydana gelmesidir. Sonrasında bu değer başlangıçta kabul edilen hata oranı (hesap hassasiyeti) ile kıyaslanmakta ve mutlak değerce büyük ise analiz sonlandırılmaktadır. Eğer büyük değilse, ikinci kontrol adımına geçilmektedir. Bahsedilen kontrol Şekil 3.8'de verilen yazılım ile sağlanmaktadır.

Dış yüklemeler artımsal iteratif olacak şekilde ilk olarak düşey (Step 1) ve sonrasında yatay (Step 2) doğrultularda uygulanmaktadır. İkinci kontrolde eğer adım sayısı ikiye ve iterasyon sayısı başlangıçta belirtilen iterasyon sayısına eşitse analiz sonlandırılmaktadır. Koşulun sağlanmaması durumunda benzer işlemler için iterasyon sayısı bir arttırılarak güncellenmiş parametre verileriyle (Elastisite Modülü, düğüm noktası koordinatları, toplam gerilme, kuvvet ve birim deformasyon değerleri) ikinci basamağa geri dönülmektedir.

Son adımda ise ihtiyaç duyulan nihai yer değiştirmeler, çubuk gerilmeleri ve kuvvetleri, mesnet reaksiyonları, taban kesme kuvvetine karşılık gelen yatay ve düşey yer değiştirmeler (belirlenen nokta için), hem birim deformasyona hem de performans düzeyine bağlı olarak hasar gelişim görselleri elde edilmektedir.

Geliştirilen yazılıma dair kodlamalara ve detaylı açıklamalara çalışmanın sonunda yer verilmiştir (Bkz. Ekler).

```

fark = [0] # Kapalı durumda hata vermemesi için, 0. index 0 olarak tanımlanmıştır.

if Tum_sistem_sonlandirma == "Açık" and Step == 2:

    for i in range(0, nokta_sayisi):
        Dep_Dugum_Dep_Kont_Listesi.append(Toplam_DepLasmanlar[i][0])

    for i in range(0, nokta_sayisi):
        a = 1
        mak_deger = 0
        artis = nokta_sayisi
        alt_liste = []
        alt_liste.append(Dep_Dugum_Dep_Kont_Listesi[i])

        while len(Dep_Dugum_Dep_Kont_Listesi) / nokta_sayisi > a:

            alt_liste.append(Dep_Dugum_Dep_Kont_Listesi[i + a * artis])
            a += 1

        mak_deger = max(alt_liste)
        fark.append(Toplam_DepLasmanlar[i][0] - mak_deger)

    if min(fark) <= Negatif_Sinir_Deger:
        min_index = fark.index(min(fark))
        print("-----")
        print(" DepLasman düğümü negatif yönlü hareket etmeye başladı. Program sonlandırılıyor.\n")
        print(" Sorunun başladığı düğüm noktası: {}".format((min_index)))
        break

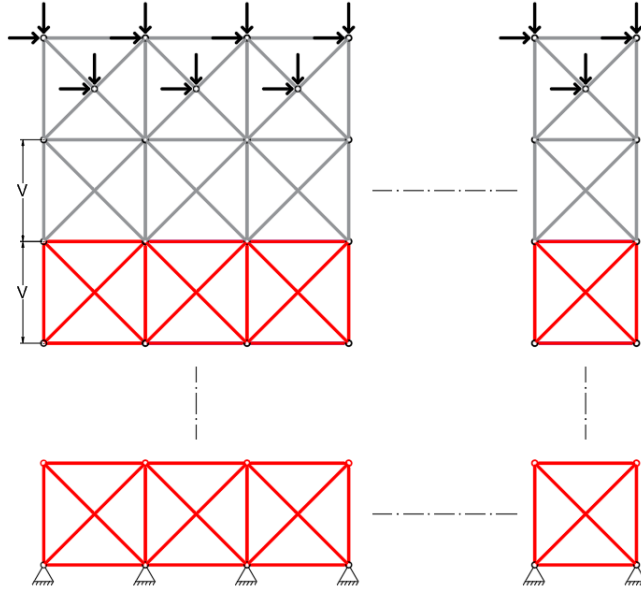
```

Şekil 3.8 Analizin sonlandırılması için ilk kontrol noktası (hata oranına göre).

3.4.2 Yükleme

Dış yüklemenin uygulanma prosedürü sonuçlar üzerinde oldukça etkilidir. Özellikle kafes sistemlerde tek bir düğüm noktasına veya kısıtlı bir bölgeye tekil dış yükleme uygulanması lokal hasar oluşumlarına ve gerçekçi olmayan bir yük dağılımına sebebiyet verebilmektedir. Bu hususun çözümü için laboratuvar deneylerinde uygulandığı gibi çelik veya betonarme kiriş vasıtasıyla yüklerin sisteme olabildiğinde homojen dağıtılması önemlidir. İdealize edilmiş kafes modelde bahsedilen kiriş en üst iki sırada sadece doğrusal davranış sergileyen kafes elemanlarla tanımlanmaktadır.

Düşey yüklerin sistem üzerinde mümkün olduğunca homojen dağılması ise analizin ilerleyen aşamalarını doğrudan etkilemektedir. Oldukça düşük çekme kapasitesine sahip olan yığma yapılar basınç etkisi altındayken nispeten daha yüksek bir çekme davranışı sergilemektedir. Bu nedenle yükün daha iyi dağılabilmesi için çelik kirişin üst sırasındaki diyagonal elemanların kesişme noktalarına ilave mafsallar tanımlanmış ve dış yüklemeler Şekil 3.9'da gösterildiği biçimde uygulanmıştır. Böylece diyagonal kafes elemanlarda düşük çekme kapasitesi kaynaklı hasar oluşumlarının meydana gelmesi geciktirilmiştir. Diğer bir deyişle, söz konusu diyagonal elemanların taşıma kapasiteleri arttırılmıştır.



Şekil 3.9 Çelik veya betonarme kirişin kafes başlık (gri) ve dış yük dağılımı.

Dış yüklemeler modele iki adımda yansıtılmaktadır. İlk adımda (Step 1) düşey ve zati (hesaplamaya dahil edilmiş ise), sonraki adımda ise yatay kuvvetler (Step 2) uygulanmaktadır. Düğüm noktalarına denk gelen düşey yük değeri toplam düşey yükün düğüm noktası sayısının bir eksiğine bölünmesiyle belirlenmektedir. Dış köşelerdeki düğüm noktalarına yarım, diğerlerine ise tam yük olacak şekilde dağılım gerçekleştirilmektedir. Eğer zati yük analizde dikkate alınacak ise yazılım tarafından hesaplanmakta ve tüm düğüm noktalarına eşit bir şekilde uygulanmaktadır. İlk adım (Step 1) için iterasyon sayısı sabit ve 1000 olarak belirlenmiştir. İterasyon sayısı tecrübe ile ve hedeflenen hesap hassasiyetine göre tespit edilmiştir. Genelde lokal hasarlar hariç düşey yükleme etkisinde yapıda lineer ötesi bir davranış veya göçme durumu öngörülmemektedir.

İkinci adımda ise yatay kuvvetler yapıya ardışık olarak uygulanmaktadır. Burada sabit bir iterasyon sayısı belirlemek yerine alternatif değerler test edilerek yakınsama analizi gerçekleştirilebilir. Çok fazla iterasyon sayısı tanımlamak analiz süresini gereğinden fazla uzatırken, az tanımlamak hassasiyeti düşürmektedir.

İterasyon sayısı, çelik kirişin tek veya çift sıra olarak tanımlanması, çelik kirişte diyagonal elemanların kesişim noktalarında düğüm noktası olup olmaması gibi çeşitli durumlar Bölüm 4'deki doğrulama örnekleri içerisinde ele alınmış ve sonuçlara olan etkileri değerlendirilmiştir.

Mevcut yazılımda yük kontrollü bir yükleme prosedürü uygulanmaktadır. Bununla birlikte dış yükler yapıya iteratif olarak yansıtılmaktadır. Böylece her iterasyon sonucunda elde edilen veriler bir sonraki adımda başlangıç değerleri olarak kullanılabilir. Tüm iterasyonlarda eş bir yük uygulanmakta ve toplam yükün iterasyon sayısına bölünmesiyle belirlenmektedir.

3.4.3 Sınır koşulları

Düzlem içi analizlerde kafes elemanlar birbirlerine mafsallarla bağlanmış olmaları nedeniyle her bir düğüm noktasında X ve Y doğrultularında olmak üzere toplamda iki adet yer değiştirme değeri oluşmaktadır. En alt sıradaki düğüm noktalarına sabit mesnetlenme uygulanarak hareketleri kısıtlanmıştır. Bunun dışında deneysel veya nümerik çalışmadaki davranışın olabildiğince gerçekçi şekilde temsil edilebilmesi amacıyla ihtiyaç duyulan örneklerde dış yüklemenin uygulandığı çelik veya betonarme kirişteki düğüm noktaları Master-Slave Method kullanılarak birbirlerine bağlanmıştır. Böylece kirişin her iki doğrultuda birlikte hareket etmesi sağlanmış ve düzlem içi dönme hareketi engellenmiştir.

3.4.4 Doğrusal olmayan davranış

Maksimum dayanım limitlerinin aşılması sonrasında kafes elemanlarda plastik deformasyonlar oluşmaya başlamaktadır. Eğimin negatif yönlü olması (Bkz. Şekil 3.5) davranışın analiz sürecine dahil edilmesini daha karmaşık bir hale getirmektedir. Her ne kadar gerçekçi olmasa da negatif Elastisite Modülü yaklaşımı bu aşamada kullanılabilir (Khoei and Karimi, 2008; Varma et al., 2012; Vignjevic et al., 2018). Bu sayede gerilme-birim deformasyon eğrisindeki taşıma kapasitesinde oluşan düşüş analizlere her iteratif adım sonrası yansıtılabilir.

Hesaplanan kümülatif birim deformasyon değeri maksimum sınırı aştığında kafes elemanın taşıma kapasitesi yaklaşık olarak sıfır kabul edilir ve Elastisite Modülü 10^{-9} MPa olarak hesaplamalarda dikkate alınır.

3.4.5 Hata oranı

Analizin sonlandırılmasında kullanılan ve başlangıçta varsayım yapılarak belirlenen hata oranı örnek çalışmalarda genel olarak yatay deplasmanlar cinsinden 0.25-0.35 mm aralığında negatif değer olarak seçilmiştir. Hata oranı için farklı birkaç değer denemesiyle elde edilen kapasite eğrilerinin oluşumu incelenerek varsayım yapılabilmektedir. Emin olunamadığı durumlarda alternatif değerler hesaplamalara dahil edilebilir ve elde edilen sonuçlar güven aralığı içerisinde değerlendirilebilir.

3.4.6 Hasarın tanımlanması

Hasar, her bir kafes elemanda meydana gelen toplam birim deformasyon aracılığıyla tanımlanmaktadır. Şekil 3.5'te temsil edilen malzeme davranışında her bir hasar türü (basınç, çekme veya kayma) lineer, yumuşama ve yumuşama sonrası olmak üzere üç farklı bölgeden meydana gelmektedir. Her bir bölge Tablo 3.1'de gösterildiği gibi çeşitli renklerle temsil edilmektedir.

Tablo 3.1 Birim deformasyona bağlı renk skalası.

Siyah	Basınç, Çekme ve Kayma Bölgesi - Elastik
Yeşil	Basınç Bölgesi – Yumuşama
Magenta	Basınç Bölgesi – Maksimum birim deformasyon aşıldı
Sarı	Çekme Bölgesi - Yumuşama
Kırmızı	Çekme Bölgesi – Maksimum birim deformasyon aşıldı
Turuncu	Kayma Bölgesi – Yumuşama
Mavi	Kayma Bölgesi – Maksimum birim deformasyon aşıldı
Gri	Çelik veya betonarme kiriş elemanlar

Analizin sonunda yazılım aracılığıyla elde edilen iki boyutlu görselde her bir kafes elemanın rengine göre lokal veya global nitelikteki boyutlara ulaşmış hasarlar tespit edilebilmektedir. Buna ek olarak yapının kırılma mekanizması da belirlenebilmektedir. Sadece doğrusal davranış sergileyen çelik veya betonarme kirişi temsil eden kafes elemanlar ise daima gri renk ile tanımlanmıştır.

Daha önce de belirtildiği gibi yığma duvarlarda gözlemlenen düzlem içi hasar modları idealize edilmiş kafes modelde aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

a) Düşey ve diyagonal elemanlarda eş zamanlı olarak beraber ortaya çıkan çekme hasarları kayma kesmesine karşılık gelmektedir. Eğilme davranışının neden olduğu tabandaki açılmalar da kayma kesmesine benzer formda tanımlanmaktadır.

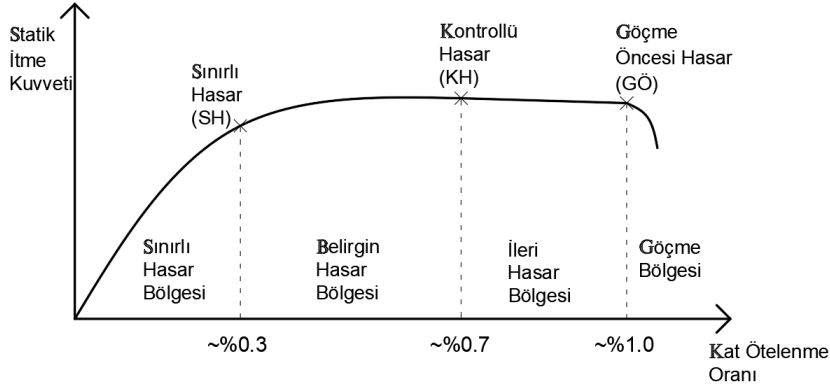
b) Diyagonal elemanlarda oluşan çekme hasarı diyagonal kesmeyi temsil etmektedir. Hasarın büyüklüğüne bağlı olarak yatay elemanlarda da belirgin çekme deformasyonları meydana gelebilir. Bahsi geçen çekme yatay elemanlar için kayma davranışı olarak dikkate alınır.

c) Düşey ve diyagonal elemanlarda oluşan basınç hasarları eğilme davranışının neden olduğu ezilmelere karşılık gelmektedir.

3.4.7 Deprem açısından değerlendirme

Yığma yapıların kütlelerinin büyük olması taşıyıcı sistemi oluşturan elemanlardaki deprem etkilerini arttırmaktadır. Meydana gelen çekme gerilmeleri ise başlıca hasar oluşumunun nedenidir. TBDY yeni yapılacak yapıların tasarımı ve mevcut binaların deprem güvenliğinin değerlendirilmesi hususlarında kurallar içermektedir. Bunlar tarihi yapıların değerlendirilmesinde de yol gösterici olarak kullanılabilir. Fakat özellikle belirli bir deprem etkisinde öngörülen performans durumlarının aynen uygulanması bazen çözümsüzlük getirebilmektedir (VGM, 2017).

Tarihi yapıların analizinde kabul edilebilir hasar seviyesi yapının kullanım amacı ve maruz kalacağı kullanıcı yoğunluğuna, diğer bir deyişle yapının önem düzeyine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Dünya çapında bilinirlik ve buna bağlı olarak ziyaretçi sayısının yüksek olması durumunda hasar görülebilirlik en düşük seviyede tutulurken, yerel öneme sahip yapılarda göreceli olarak daha ileri bir hasar seviyesi tercih edilebilir. Tarihi yapılar için yapısal performans düzeyleri Şekil 3.10'daki gibi tanımlanmıştır (VGM, 2017).



Şekil 3.10 Statik itme eğrisi ve sınır durumları (VGM, 2017).

Sünek davranışın kısıtlı olduğu durumlarda sınırlı hasar ile göçme durumu birbirine yakın olarak ortaya çıkabilmektedir. Taşıyıcı sistem için bu sınırların matematiksel olarak belirlenebilmesi karmaşık bir konudur. Yerel şekil değiştirmelerle birlikte, yapının tamamını temsil eden ötelenme oranının kontrolü daha belirleyici olabilmektedir. Bu amaçla Şekil 3.10'da belirtilen performans sınır durumları dikkate alınabilir. Ayrıca malzemenin şekil değiştirme kapasitesinin aşıp aşılmadığının da kontrol edilmesi gerekmektedir (VGM, 2017).

Bu çalışmanın asıl amacı yeni bir metodoloji geliştirmek olsa da hasar gelişiminin performans düzeyleri açısından değerlendirilmesi ve yorumlanması sunulan prosedürün deprem etkilerinde de kullanılabilir olduğunu göstermek açısından önemlidir. Bu kapsamda birim deformasyona dayalı hasar oluşumunda kullanılan yaklaşımın bir benzeri burada uygulanmaktadır. Analiz sonrası düşey veya diyagonal doğrultuya sahip her bir kafes elemanı için göreceli kat ötelenme değeri ilgili kafes elemanının bağlı olduğu düğüm noktalarındaki yatay yer değiştirmeler dikkate alınarak ayrı ayrı tespit edilmektedir. Akabinde iki düğüm noktası arasındaki fark elemanın ilk yüksekliğine bölünerek kat ötelenme oranı belirlenmektedir. Böylece Şekil 3.10'daki performans düzeylerine göre ilgili kafes elemanının hangi hasar bölgesi içerisinde yer aldığı tespit edilebilmektedir. Tablo 3.2'de belirtilen renk skalası yardımıyla kafes elemanlardaki hasar dağılımı görsel olarak da izlenebilmektedir. Yatay doğrultulu ve yükleme kirişini temsil eden kafes elemanlar gri renk ile tanımlanmış ve hasar dağılımının dışında bırakılmıştır.

Ayrıca sayısal modele ait yapının genelini temsil eden hasar düzeyinin belirlenebilmesi için örnek çalışmalarda kapasite eğrilerinin oluşturulmasında kullanılan düğüm noktaları dikkate alınmıştır. Hesaplanan kat ötelenme oranları Şekil 3.10'daki performans düzeylerine göre değerlendirilmiştir. Böylece eleman bazında oluşan hasarlarla yapının geneli arasındaki ilişki de karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.2 Performans düzeyine bağlı renk skalası (statik itme eğrisine göre).

Siyah	Sınırlı Hasar Bölgesi
Yeşil	Belirgin Hasar Bölgesi
Sarı	İleri Hasar Bölgesi
Kırmızı	Göçme Bölgesi
Gri	Yatay ve çelik/betonarme kiriş elemanlar

3.4.8 Güven aralığı

Hesap prosedürünün bir parçası olmasa da doğrulama örneklerinde alternatif geometrik koşullar ve/veya çeşitli malzeme parametreleri kullanılarak elde edilen sayısal analiz sonuçlarının yorumlanmasında güven aralığı tanımına sıkça yer verilmiştir. Güven aralığına ait üst ve alt limitlerin belirlenmesi Denklem (3.6)'a göre sağlanmaktadır. $\bar{x}$ sembolü sonuçların aritmetik ortalamasını temsil etmektedir. Örnek uygulamalarda bu değer tüm sonuçlar yerine literatürden elde edilen deneysel veya nümerik sonuçlar dikkate alınarak belirlenmiştir. s ve n ifadeleri ise sırasıyla standart sapmayı ve analiz sayısını ifade etmektedir. Bu iki parametrenin hesaplanmasına literatür verilerinin yanı sıra kafes modellerden elde edilen sonuçlar da dahil edilmiştir.

Hesaplama da kullanılan alfa değeri 0.05 olarak dikkate alınmış ve böylece güvenirlilik düzeyi %95 olarak hesaplanmıştır. Standart normal dağılım tablosu kullanılarak z skoru 1.96 olarak belirlenmiştir.

$$\text{Güven aralığı} = \bar{x} \pm z \left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad (3.6)$$

3.5 Parametrik Çalışma I

Önerilen yaklaşımda diyagonal kafes elemanların yatay eksen ile yaptığı açı sabit ve 45° olarak ele alınmıştır. Literatürdeki farklı çalışmalarda da aynı açı değeri yığma yapıların kafes elemanlarla modellenmesinde önerilmiştir (Pirsaheb et al., 2020b; Zhao et al., 2022). Fakat kapsamlı bir çalışma ile eğim açısının etkisi araştırılmamıştır.

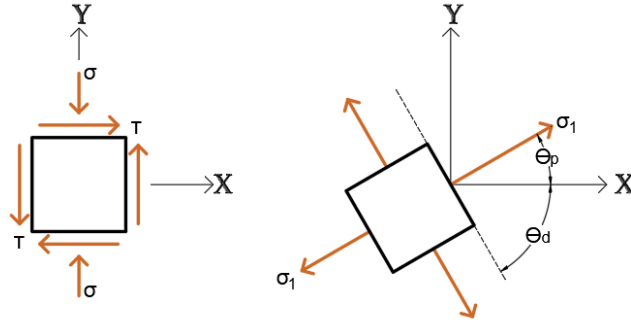
Açı etkisi, geometrinin tanımlanmasında ve sonuçlar üzerinde doğrudan etken parametrelerden birisi olması nedeniyle alternatif koşullar dikkate alınarak kapsamlı olarak incelenmiştir (Güner and Nuhoğlu, 2024b). Örnek model olarak daha önce deneysel (Magenes et al., 2008; Magenes et al., 2010a) ve nümerik (Araujo, 2014) olarak incelenmiş duvar yapıları tercih edilmiştir.

Betonarme yapı elemanlarının kafes elemanlarla idealize edilmesinde diyagonal elemanların yatay eksen ile yaptığı eğim açısı, θ_d , Gargari (2016) tarafından açıklanan basitleştirilmiş yaklaşım kullanılarak belirlenebilmektedir. Düzlem içi hasar oluşum türlerinden biri olan diyagonal kesme çatlakları (Bkz. Şekil 3.1), normal ve kayma gerilmelerine bağlı olarak hesaplanan asal çekme gerilmesine dik doğrultuda ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.11). Buradan yola çıkarak, yapının çekme kapasitesi (f_{tm}) maksimum asal gerilme değerine (σ_1) eşdeğer varsayılarak, mevcut kayma gerilmesi hesaplanabilmektedir (Denklem (3.7)). Böylece asal gerilme ekseninin yatay düzlemle oluşturduğu açı (θ_p) ve kırılma açısı (eğim açısı) tespit edilebilmektedir (Denklem (3.8) ve (3.9)). Fakat aynı çalışmada kesme etkin davranış sergileyen perde duvarlarda 45° 'lik açının daha tutarlı sonuçlar ortaya koyduğu vurgulanmıştır. σ ve τ sembolleri sırasıyla eksenel ve kayma gerilmelerini temsil etmektedir.

$$\sigma_1 = f_{tm} = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\frac{\sigma^2}{4} + \tau^2} \quad (3.7)$$

$$\tan(2\theta_p) = \frac{2\tau}{\sigma} \quad (3.8)$$

$$\theta_d = 90^\circ - \theta_p \quad (3.9)$$



Şekil 3.11 Asal gerilmeler ve yatay düzlemle yaptığı açı (Güner and Nuhoğlu, 2024b).

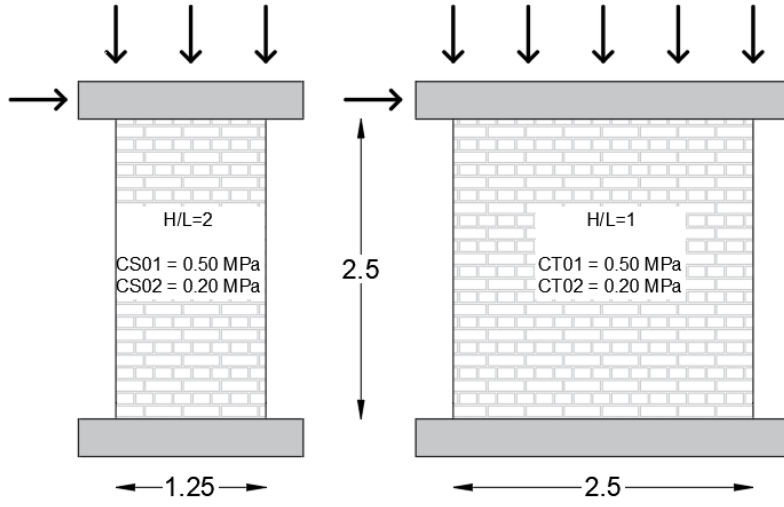
Yığma yapıların çekme kapasitesi basınca kıyasla oldukça düşüktür. Bunun sonucu olarak asal gerilmelerin yatay eksenle yaptığı açı 45° 'den küçük çıkmaktadır. Diğer bir deyişle, kırılma açısı (eğim açısı) 45° 'den büyüktür. Fakat yığma duvarların sadece 45° ile idealize edildiği örneklerle literatürde karşılaşılmaktadır. Bu nedenle farklı koşullar etkisinde çeşitli açı değerlerinin sonuçlar üzerinde meydana getirdiği değişiklikleri belirleyebilmek için Tablo 3.3'te belirtilen parametreler göz önünde bulundurularak, toplamda 72 sayısal analizden oluşan bir parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.3 Alternatif parametre değerleri.

Eğim Açısı (θ_d)	: $40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ$ ve 65°
Eleman Boyutu (M)	: 150 ve 250 mm
Yükseklik/Genişlik Oranı (H/L)	: 1 ve 2
Düşey Gerilme Değeri (σ_v)	: 0.20, 0.35 ve 0.50 MPa

Şekil 3.12'deki yığma duvar yapıları önerilen kafes model yaklaşımıyla ilk olarak 45° 'lik eğim açısı kullanılarak tasarlanmıştır. Duvar kalınlığının 320 mm ve tepe dönmesinin kısıtlandığı (Master-Slave Method uygulanmıştır) modelde iki farklı yükseklik/genişlik oranı mevcuttur; ince duvar (CS) ve kalın duvar (CT). Analiz sonuçlarının sayısını arttırmak amacıyla 0.35 MPa eksenel gerilme seviyesi nümerik çalışmaya ilave edilmiştir (CS03 ve CT03). Hesaplamalarda zati ağırlık ilave yük olarak dikkate alınmıştır. Birim hacim ağırlık ve hata oranı sırasıyla 18.64

kN/m^3 ve -0.35 mm olarak kabul edilmiştir. Analizlerde öncelikle düşey, sonrasında yatay yükleme iteratif olarak uygulanmıştır.



Şekil 3.12 Örnek çalışmaya ait yığma duvar yapıları (m) (Güner and Nuhoğlu, 2024b).

Malzeme parametrelerine ait veriler deneysel çalışmalarla tespit edilmiştir (Tablo 3.4) (Magenes et al., 2010b). Elastisite Modülü genel olarak numunenin basınç yüklemesi altındaki davranışı üzerinden tespit edilmektedir. Fakat bu her zaman homojen olmayan, farklı geometrik konfigürasyonlara sahip ve sınır koşullarının mevcut olduğu bir modeli tanımlamakta yeterli olmayabilir (Araujo, 2014). Bu nedenle ihtiyaç doğrultusunda sayısal analizlerdeki malzeme parametrelerinde makul revizyonlar yapılabilmektedir (Tablo 3.5). Çelik kirişin Elastisite Modülü ise 210 GPa olarak kabul edilmiştir.

Tablo 3.4 Malzeme parametreleri (MPa).

	G	f_{cm}	f_{tm}
Magenes et al. (2010b)	840	3.28	0.137
Araujo (2014)	-	3.28	0.140
Kafes model	840	3.28	0.137

Tablo 3.5 Elastisite Modülleri (MPa).

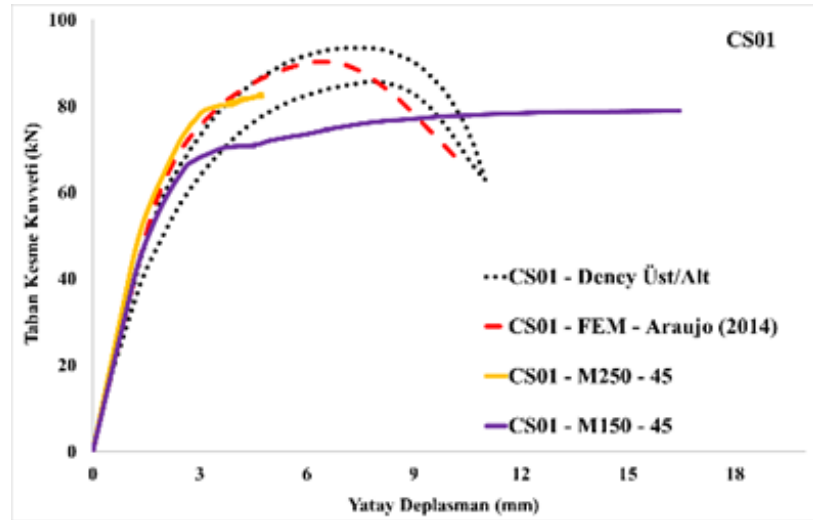
	CS01	CS02	CT01	CT02
Magenes et al. (2010b)	2550	2550	2550	2550
Araujo (2014)	1500	2000/1100	1000	800
Kafes model	2550	2550	2000	2000

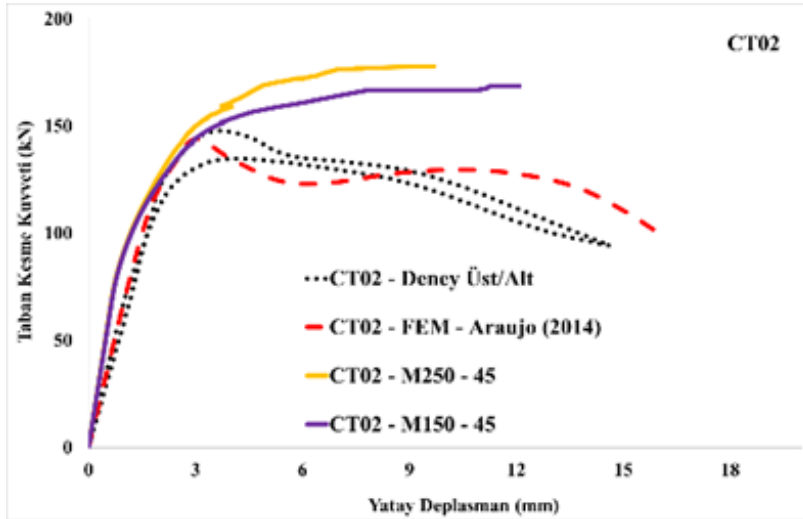
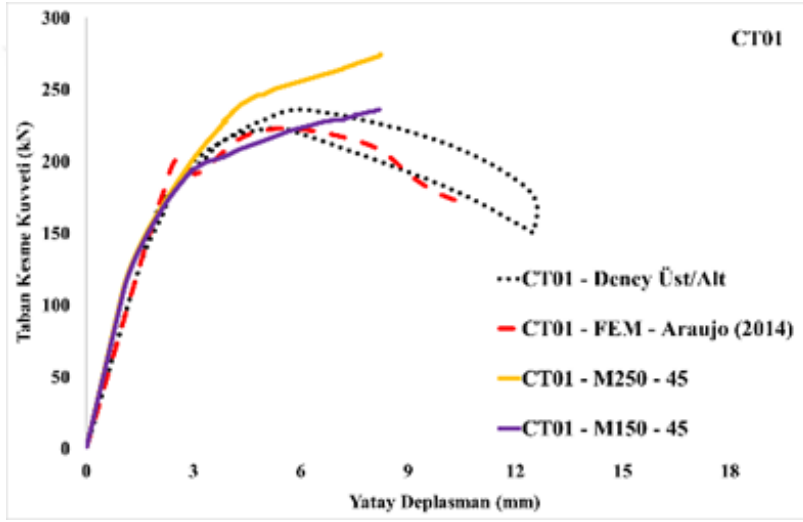
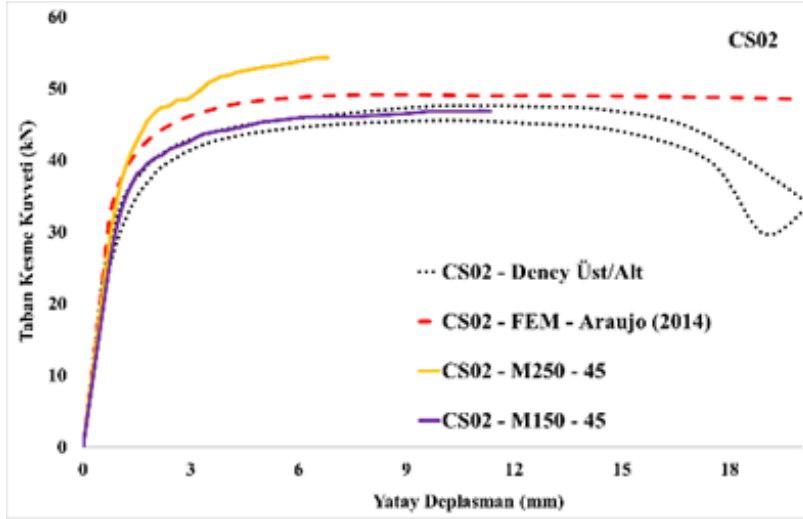
Kayma dayanım değeri ise Mohr-Coulomb formülasyonu (Bkz. Denklem (3.4)) yardımıyla hesaplanmıştır (Tablo 3.6). Kohezyon değeri belirtilmediği için duvar örgü formu bu çalışmadakine benzer olması sebebiyle moloz taş duvarlar üzerine gerçekleştirilen farklı bir parametrik çalışmada önerilen formülasyon, $2 * f_{tm}$, kohezyon değerinin hesaplanmasında kullanılmıştır (Pereira et al., 2021). Maksimum kayma dayanım değerinin aşılmasından sonra eğrinin yatay doğrultuda yaklaşık olarak sabit devam ettiği varsayılmıştır. Sürtünme katsayısı ise 0.4 olarak hesaplamalarda dikkate alınmıştır.

Tablo 3.6 Eksenel gerilmeye bağlı kayma dayanım değerleri (MPa).

σ_v	0.50	0.35	0.20
τ_u	0.47	0.41	0.35
τ_{res}	0.46	0.40	0.34

İki farklı eleman boyutu dikkate alınarak gerçekleştirilen sayısal analizler incelendiğinde (Şekil 3.13), CS01 örneği hariç 250 mm eleman boyutuyla tasarlanan kafes model yaklaşımı diğer analiz sonuçlarına kıyasla beklenenin üzerinde bir taşıma kapasitesi sergilemiştir. Buna karşılık 150 mm’de taşıma kapasitesi beklentinin CS01’de altında ve CT02’de üstünde kalmış olsa da daha tutarlı sonuçlar ortaya koymaktadır. Buradaki temel amaç her bir sonucun mükemmel bir şekilde örtüşmesini sağlamak yerine optimum bir eleman boyutu belirleyerek tüm analizlerdeki davranışın tutarlılıkla temsil edilebilmesidir.



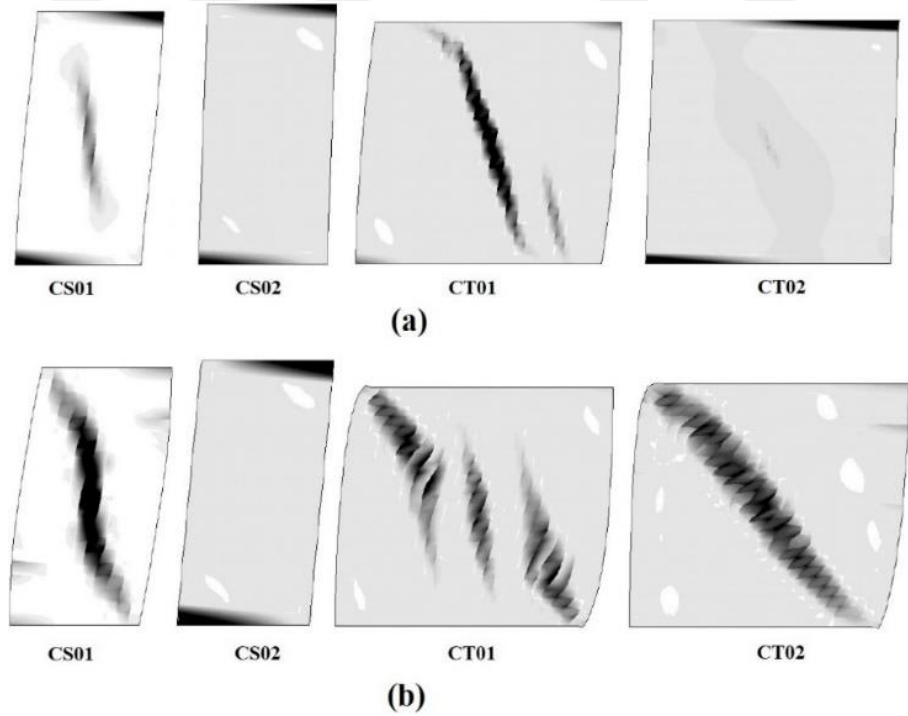


Şekil 3.13 Taban kesme kuvvetine karşılık yatay tepe deplasman değeri.

Eğrilerin uyumu kadar kırılma mekanizmasının ve hasar oluşumunun doğru tespiti de önem arz etmektedir. Tablo 3.7’de belirtilen kırılma modlarının birebir örtüştüğü görülmektedir. Araujo (2014) tarafından gerçekleştirilen Sonlu Elemanlar analizlerinde ortaya çıkan hasar oluşumları Şekil 3.14’te verilmiştir. CS01’de maksimum yük seviyesinde eğilme ve kesme hasarları birlikte etken iken son aşamada yapı diyagonal kesme nedeniyle taşıma kapasitesini kaybetmiştir. CS02’de ise sol alt ve sağ üst bölgelerde meydana gelen açılmalar belirgin bir eğilme davranışının göstergesidir. H/L oranının bire düşmesiyle hasar oluşumu tamamen diyagonal kesmeye dönmüştür. Bu durum CT01’de belirgin bir şekilde görülebilmekteyken, CT02’de düşük eksenel yük seviyesine bağlı olarak maksimum yük yerine taşıma kapasitesinin tükendiği son aşamada ortaya çıkmıştır.

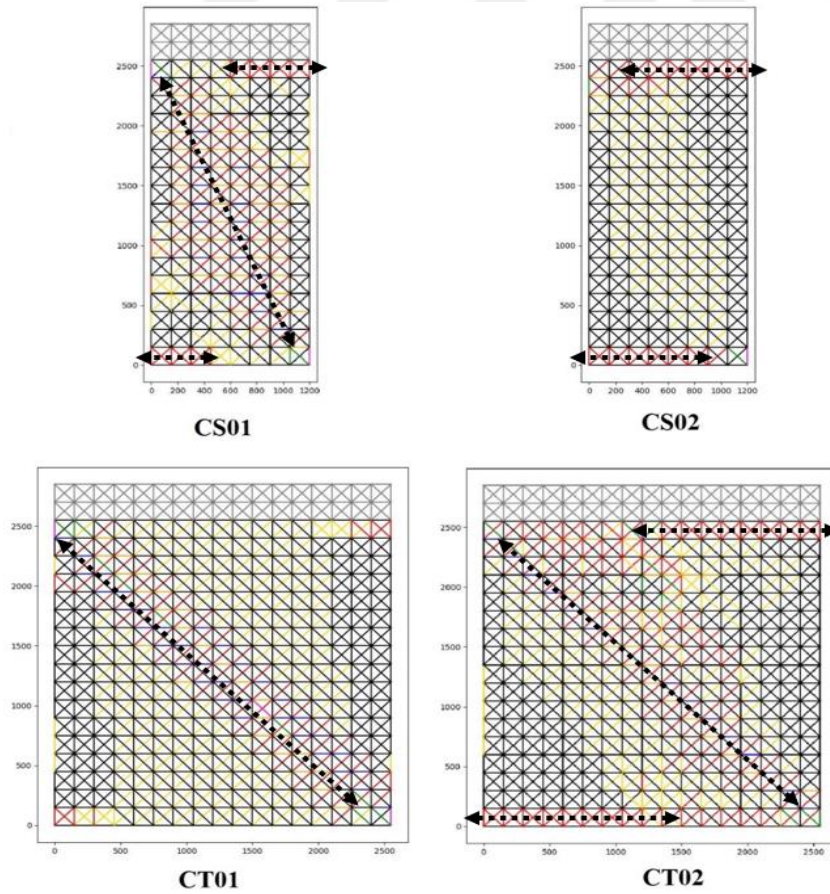
Tablo 3.7 Kırılma modları.

	CS01	CS02	CT01	CT02
Magenes et al. (2010a)	Kesme	Eğilme / Kesme	Kesme	Kesme
Araujo (2014)	Kesme	Eğilme	Kesme	Kesme
Kafes model	Kesme	Eğilme	Kesme	Kesme

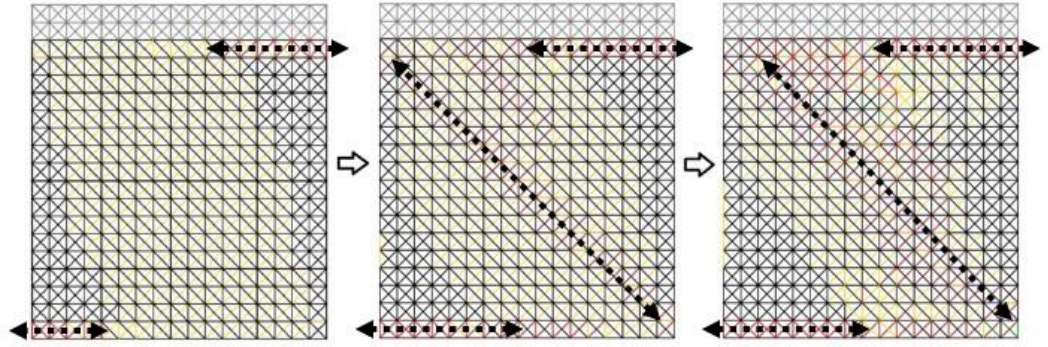


Şekil 3.14 Birim deformasyon dağılımı: a) Maksimum yükteki çekme hasarı, b) Son aşamadaki çekme hasarı (Araujo, 2014).

Önerilen kafes model yaklaşımıyla hasar oluşumları ele alındığında ise büyük bir benzerlik görülmektedir (Şekil 3.15). Fakat hasar gelişiminde birim deformasyona bağlı değişken bir ölçekleme yapılmaması nedeniyle bir kısım farklılıklar göze çarpmaktadır. Örneğin CS01’de Araujo’un (2014) Sonlu Elemanlar Modeline benzer şekilde önce eğilme davranışı kaynaklı hasar oluşumları ortaya çıksa da sonrasında diyagonal kesme hasarı göçmeye sebebiyet vermektedir. Fakat köşelerdeki açılmalar kaybolmamaktadır. Diğer bir deyişle, önerilen yaklaşımda dinamik bir renk skalası dağılımı bulunmamaktadır. Benzer şekilde CT02 örneğinde eğilme hasarından diyagonal kesmeye belirgin bir geçiş olduğu Sonlu Elemanlar analizinde görülebilmektedir. Bu değişim kafes model yaklaşımında iteratif analiz süresince alınan üç farklı hasar görseli ile kademeli olarak incelendiğinde, ilk olarak eğilme, sonrasında ise diyagonal kesme hasarının meydana geldiği tespit edilebilmektedir (Şekil 3.16). Her ne kadar diyagonal kesme hasarı analiz ilerledikçe gelişmeye devam etse de yapının başlangıçta sergilemiş olduğu eğilme davranışının etkileri analiz sonunda hala görülebilmektedir.



Şekil 3.15 Kafes model yaklaşımında birim deformasyona bağlı hasar dağılımı.



Şekil 3.16 CT02 örneğinde birim deformasyona bağlı kademeli hasar gelişimi.

Genel olarak değerlendirildiğinde 45° açı değeri ile tasarlanan kafes modelin incelenen örnek yapının kapasite eğrisinin, kırılma modunun ve hasar gelişiminin tespitinde tutarlı sonuçlar sergilediği söylenebilir. Alternatif açı değerleri de buradan sonra analizlerde ele alınarak sonuçlardaki değişim araştırılmıştır.

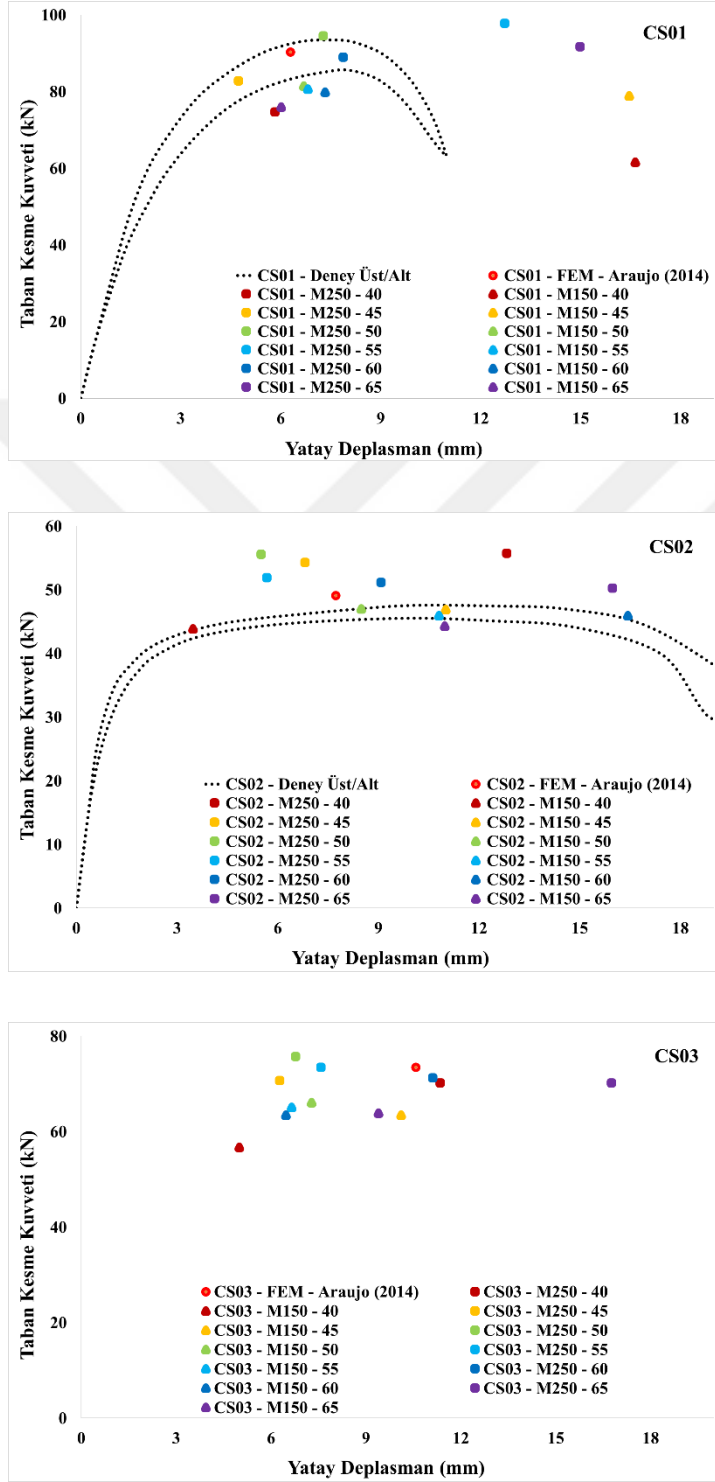
Eleman boylarında yatay genişliğin (M) sabit tutulmasıyla, açı değişikliği diyagonal elemanların etkili kesit alanı (D_{eff}) ve düşey kafes çubuğun boyu (V) üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Parametre değerlerindeki değişiklikler nedeniyle kafes model yaklaşımının toplam kesit alanında ve/veya yüksekliğinde zaruri farklılıklar meydana gelebilmektedir. Farklılıkları azaltabilmek ve olabildiğince eş koşullar altında kıyaslama gerçekleştirilebilmesi için öncelikle bir kesitteki diyagonal kafes elemanların eksenler doğrultusundaki toplam etkili kesit alanları hesaplanmıştır (Denklem (3.10) ve (3.11)). Eksen doğrultusu dikkate alınarak yığma duvarın kesit alanından hesaplanan kesit alanı düşülmüş ve sonrasında geriye kalan alan köşelerdeki (yarım alan) ve ortadaki (tam alan) kafes elemanlara dağıtılmıştır. Böylece tüm örneklerdeki toplam kesit alanı eşitlenmiştir.

$$\text{Düşey Kesit Alanı} = D_{eff} * \sin(\theta_d) * \text{Diyagonal Kafes Eleman Sayısı} \quad (3.10)$$

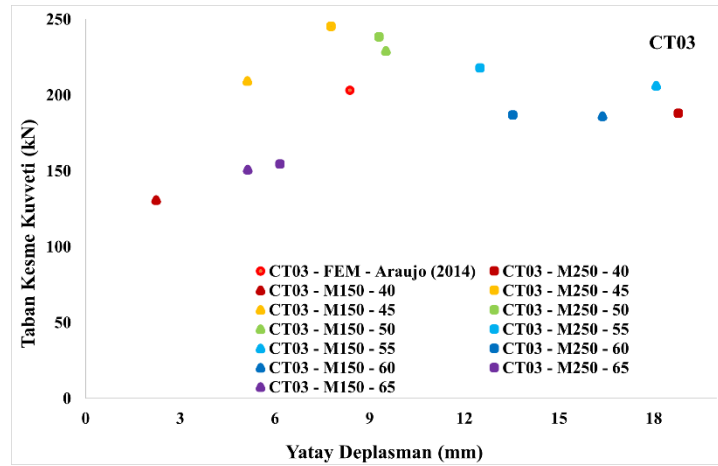
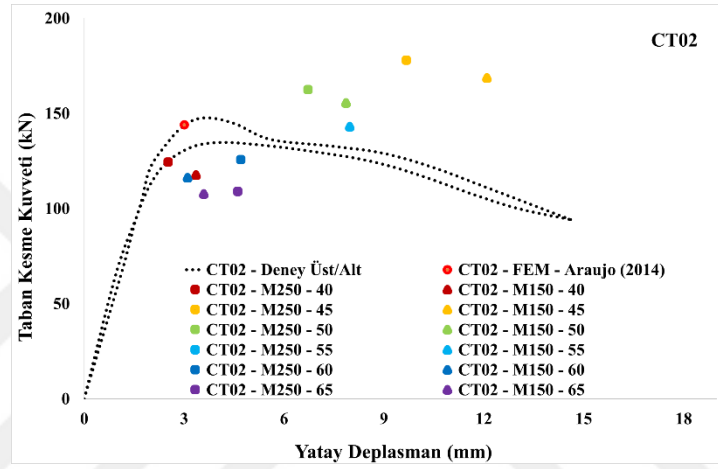
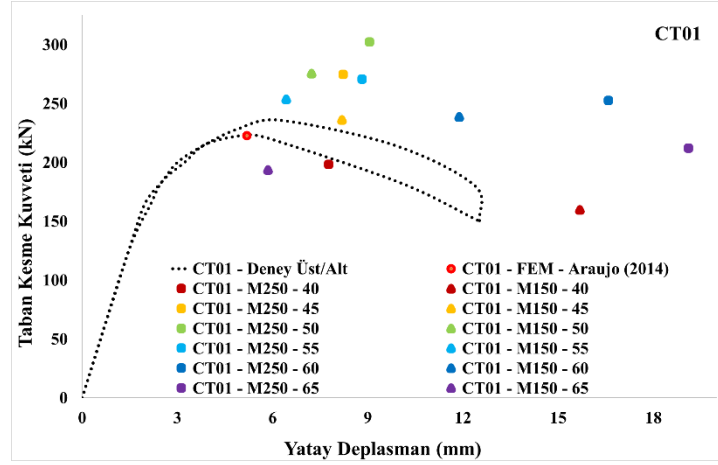
$$\text{Yatay Kesit Alanı} = D_{eff} * \cos(\theta_d) * \text{Diyagonal Kafes Eleman Sayısı} \quad (3.11)$$

Çelik kafes başlık ise tüm modellerde 45° açı sabit olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca düşey kafes çubuğun boyundaki değişimden kaynaklı toplam yükseklikte ufak farklılıklar meydana gelebilmektedir. Fakat bunların sonuçlar üzerinde belirleyici etkiye sahip olmadığı daha önce Bölüm 3.1’de vurgulanmıştır.

45°'nin yanı sıra 40°, 50°, 55°, 60° ve 65° açı değerleri sayısal çözümlerinde dikkate alınmıştır. Toplamda 72 sayısal analiz gerçekleştirilmiş ve sonuçlar üzerinde ön değerlendirme yapılmıştır (Şekiller 3.17 ve 3.18).



Şekil 3.17 Analiz sonuçları (CS).



Şekil 3.18 Analiz sonuçları (CT).

- Eksenel gerilme seviyesi ve sınır koşullarına bağlı olarak oran değişse de tüm analizlerde 250 mm eleman boyutuyla tasarlanan sayısal modeller 150 mm'e göre daha yüksek taşıma kapasitesine erişmiştir. Fakat 150 mm eleman boyutunun tercih edildiği modellere ait sonuçlar literatür verileriyle daha iyi örtüşmektedir.

• Yükseklik/genişlik (H/L) oranının eşit olduğu analizlerde taşıma kapasitesi yaklaşık üç katına çıkmaktadır. Benzer şekilde eksenel gerilme seviyesinin yükselmesi de taşıma kapasitesini arttırmaktadır. Bu artış H/L oranının iki ve eleman boyutunun 150 mm olduğu örnek çalışmalarda 0.20 MPa eksenel gerilme seviyesinin 0.35 ve 0.50 MPa değerlerine çıkarılmasıyla ortalama olarak sırasıyla %40 ve %73'tür. Ayrıca eksenel gerilmenin artmasıyla birlikte hasar oluşumu eğilmeden diyagonal kesmeye dönmektedir.

• $\theta_d = 40^\circ$ olan analizlerde yeterli taşıma kapasite erişilemediği saptanmıştır. Bu nedenle daha düşük açılarının incelenmesine gerek görülmemiştir. Ayrıca yığma yapılarda hesaplanan eğim açısı 45° 'den oldukça yüksek çıkmaktadır.

• $\theta_d = 60^\circ$ olan analizlerde kapasite eğrisi literatür verileriyle uyumlu sayılabilir. Fakat ortaya çıkan kırılma mekanizması ve hasar oluşumları beklentiyi karşılayamamaktadır. Hasar oluşumu, özellikle ince duvarda, genel olarak eğilme davranışı kaynaklı sol alt ve sağ üst bölgelerde açılma olarak ortaya çıkmaktadır.

• $\theta_d = 65^\circ$ olan analizlerde hem taşıma kapasitesi hem de hasar oluşumu yeterli doğrulukla belirlenememektedir.

• Açı değerindeki artışın kesme hasarını geri plana atarak, eğilme kaynaklı hasarı tetiklediği gözlemlenmiştir. Benzer bir tespit ise kafes elemanlarla idealize edilmiş ve sayısal çözümlemesi yapılmış betonarme kolon için Gargari (2016) tarafından yapılmıştır.

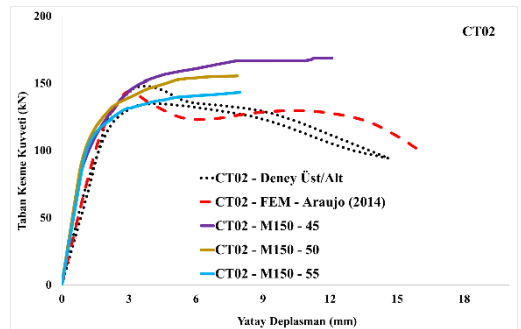
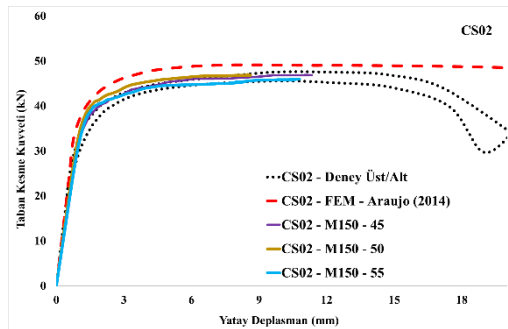
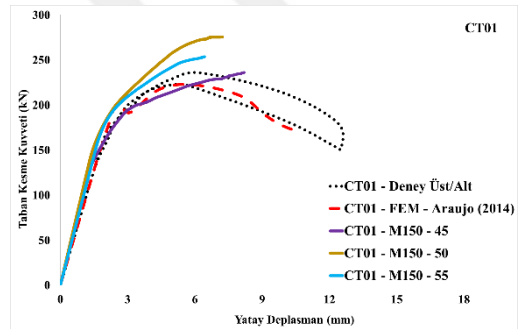
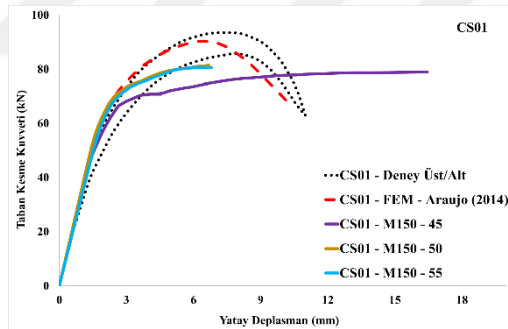
Başlangıç rijitlikleri doğal periyod değeri üzerinden ele alındığında, açı değerinin yükselmesiyle birlikte periyod değerleri artmakta yani başlangıç rijitliğinde düşüş görülmektedir (Tablo 3.8). Özellikle bu durum eğim açısının 60° ve 65° olduğu kafes modellerde daha belirgindir.

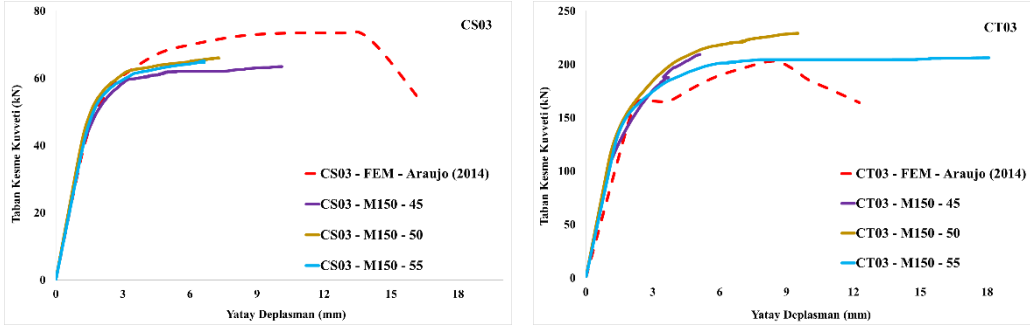
Tablo 3.8 Eksenel gerilme seviyesinin 0.50 MPa olduğu analizlerde açıya bağlı doğal periyod değerleri (s) (değişim oranları parantez içerisinde verilmiştir).

	40°	45°	50°	55°	60°	65°
CS01	0.149 (%-2.0)	0.152 (%0.0)	0.150 (%-1.3)	0.156 (%2.6)	0.161 (%5.9)	0.167 (%9.9)
CT01	0.114 (%-8.1)	0.124 (%0.0)	0.123 (%-0.8)	0.130 (%4.8)	0.138 (%11.3)	0.150 (%21.0)

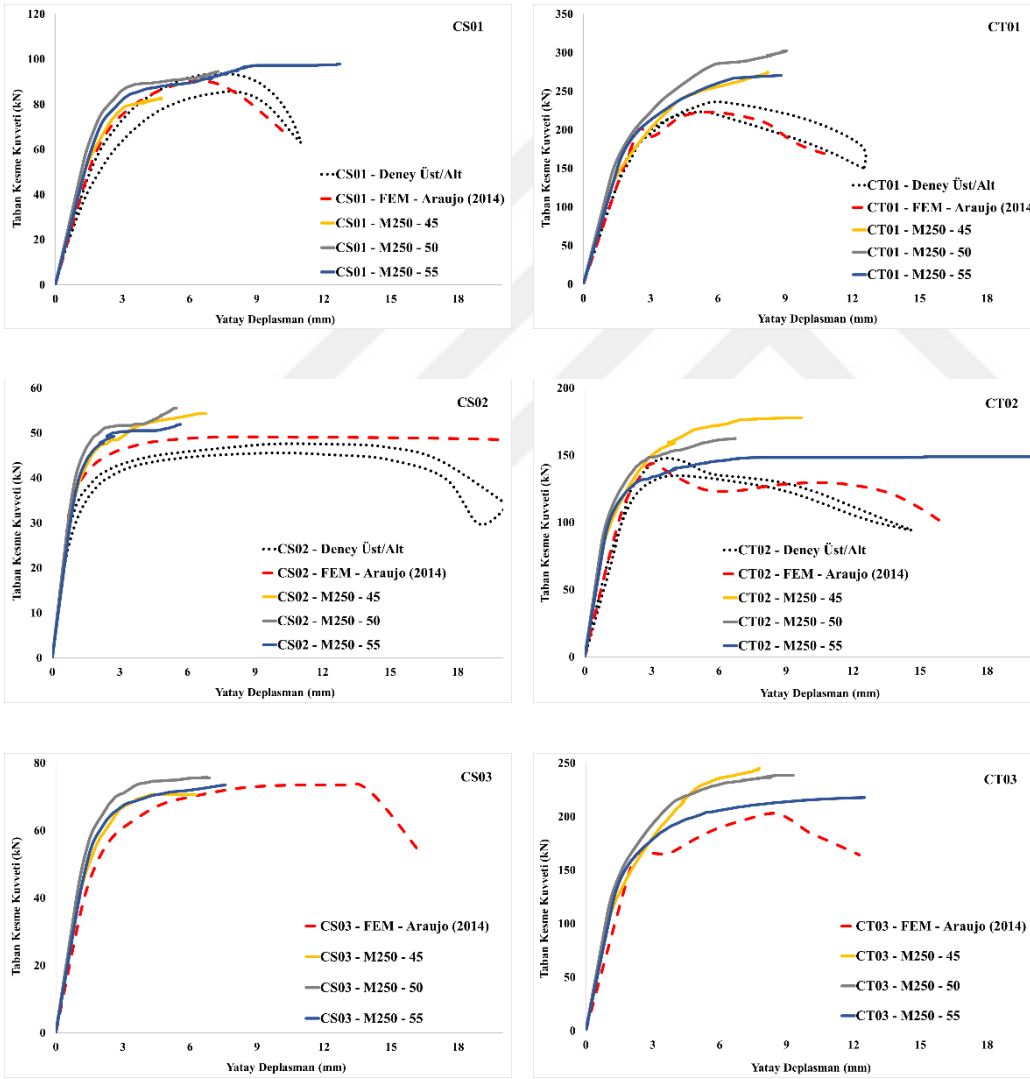
Beklentiye karşılayamayan açı değerlerinin ($\theta_d = 40^\circ, 60^\circ$ ve 65°) hesaplamalardan çıkarılmasıyla, Şekiller 3.19 ve 3.20’de 150 ve 250 mm eleman boyutlarıyla tasarlanan kafes model yaklaşımlarına ait sonuçlar literatür verileriyle kıyaslamalı olarak sırasıyla sunulmuştur. Tüm sonuçlar birbiriyle paralellik göstermese de genel olarak değerlendirildiğinde aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- İnce duvar (CS) örneklerinin muhtemelen daha kısıtlı taşıma kapasitelerine sahip olmaları nedeniyle birbirlerine göre sayısal olarak sapma değerleri daha düşük kalmıştır.
- Eleman boyutunun 250 mm olduğu kafes model yaklaşımından elde edilen sonuçlar olması gerekenin üzerinde taşıma kapasitelerine erişmiştir (CS01 hariç).
- Hasar oluşumlarının yaygın olarak diyagonal kesme kaynaklı olduğu daha önce belirtilmiştir. Açı değerinin yükselmesiyle birlikte diyagonal elemanlara ait kesit alanları da artmıştır. Buna paralel olarak modelin taşıma kapasitesinde kısıtlı da olsa artış gözlemlenmiş ve doğrusal olmayan davranışın başlaması ötelenmiştir.





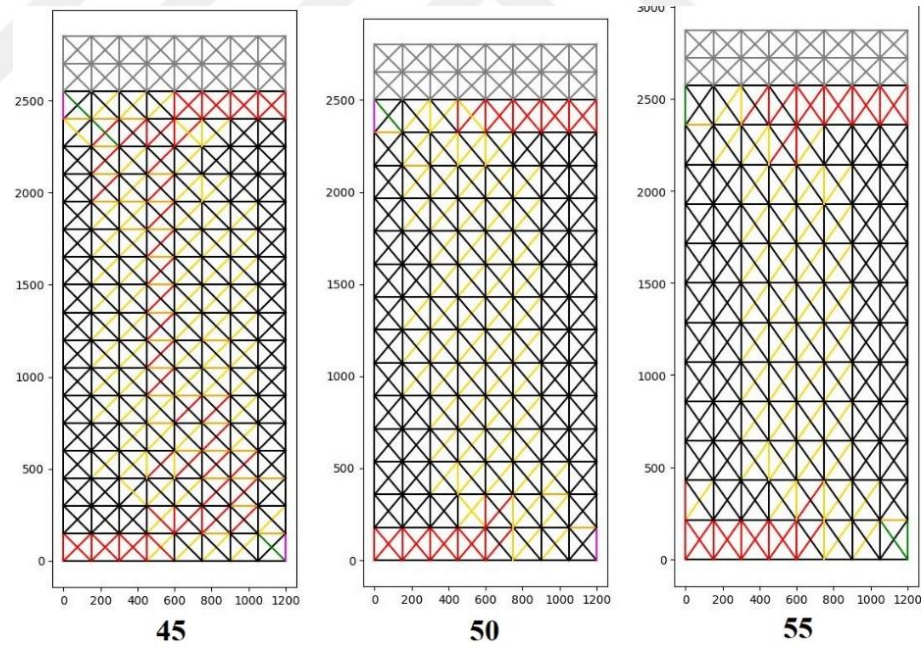
Şekil 3.19 Kapasite eğrileri (150 mm).



Şekil 3.20 Kapasite eğrileri (250 mm).

Üç açı değerinin de kapasite eğrisinin tespiti açısından kabul edilebilir seviyede doğrulukla sonuçlar verdiği görülmüştür. Özellikle, $\theta_d = 55^\circ$ olduğu kafes model en tutarlı sonuçları sergilemiştir. Fakat konu hasar oluşumları açısından da dikkatle ele alınmalıdır.

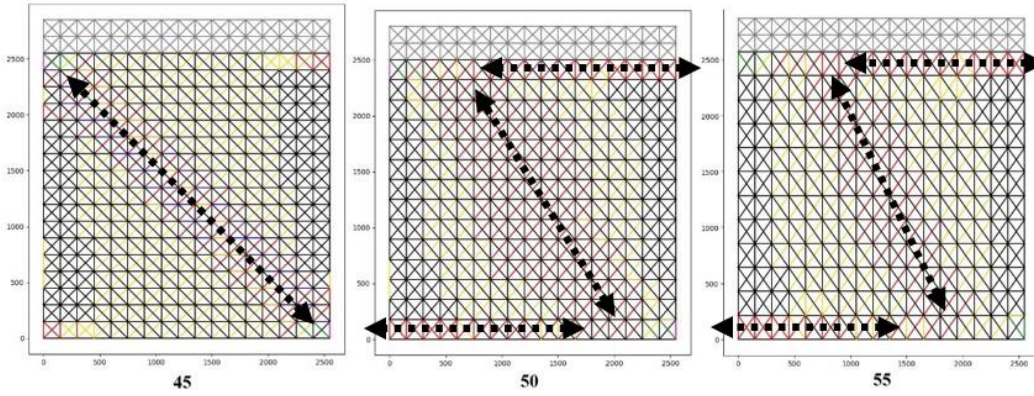
150 mm eleman boyutuyla tasarlanan kafes model yaklaşımı hasar oluşumları açısından incelendiğinde CS01 örneğinde ortaya çıkması beklenen diyagonal kesme hasarı sadece $\theta_d = 45^\circ$ olduğu modelde tespit edilebilmiştir. Diğer iki açı değerinde daha kısıtlı yatay yer değiştirme ve açı değerindeki yükselme sebebiyle hasar oluşumları yalnızca sol alt ve sağ üst bölgelerde açılma olarak meydana gelmiştir. Benzer durum CS03 örneği için de geçerlidir. Bu örnek için Araujo (2014) tarafından gerçekleştirilen Sonlu Elemanlar analizlerinde eğilme ve kesme davranışının birlikte ortaya çıktığı belirtilmiştir. Bu durum önerilen yaklaşımda gene 45° açı değerinin kullanıldığı sayısal modelle en iyi şekilde temsil edilmiştir (Şekil 3.21). CS02 örneğinde ise genel bir uyum söz konusudur.



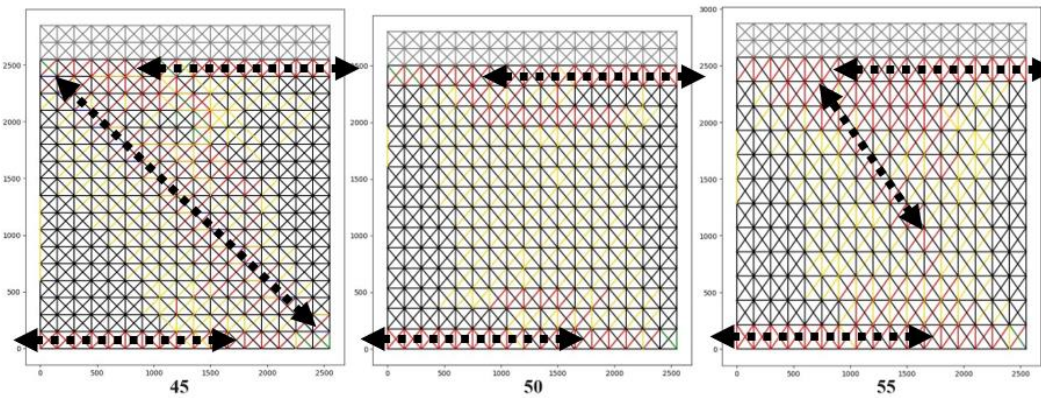
Şekil 3.21 150 mm eleman boyutuyla tasarlanan CS03 örneğinde açığa bağlı hasar oluşumu.

CT01 örneğinde açının artmasıyla birlikte diyagonal kesme hasarının oluşumu daha dik bir form almakta (Şekil 3.22) ve bu durum Sonlu Elemanlar Modeliyle daha iyi örtüşmektedir (Bkz. Şekil 3.14). Fakat öngörülmeyen eğilme hasarları da eş zamanlı olarak ortaya çıkmaktadır.

CT02’de 50° kırılma açısına sahip kafes modelde eğilme davranışı hasar oluşumuna yön vermektedir. 55° ’de ise diyagonal kesme hasarları oluşmaya başlasa da hala eğilme davranışı baskındır (Şekil 3.23). Buna karşılık 45° açı ile tasarlanan kafes model diyagonal kesme hasarını başarıyla temsil etmektedir. Son olarak CT03’deki davranış ise CT01 örneğine benzemektedir.



Şekil 3.22 150 mm eleman boyutuyla tasarlanan CT01 örneğinde açığa bağlı hasar oluşumu.



Şekil 3.23 150 mm eleman boyutuyla tasarlanan CT02 örneğinde açığa bağlı hasar oluşumu.

250 mm eleman boyutuyla tasarlanan kafes modellerden elde edilen sonuçlarda da benzer davranışlar gözlemlenmiştir. Fakat eleman boyutunun büyük olması hasar dağılımına ait görselliğin kalitesini düşürmekte ve sonuçların yorumlanmasını zorlaştırmaktadır.

0.50, 0.35 ve 0.20 MPa eksenel gerilme seviyeleri için Denklemler (3.7), (3.8) ve (3.9) kullanılarak kırılma açıları sırasıyla 65° , 62° ve 57° olarak hesaplanmıştır. Fakat parametrik çalışmadan elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, açı değerinin

45° - 55° aralığında seçilmesi tavsiye edilmektedir. Öngörülen hasar oluşumlarını karşılayıp karşılamadığına dikkat edilmesi koşuluyla aralık içerisinde seçilen açı değeriyle daha hassas kapasite eğrisi elde etmek mümkündür. Fakat bu çalışmanın temel amacı mümkün olduğunca basit bir yaklaşım sunmaktır. Bu nedenle hem kapasite eğrisini hem de hasar gelişimini tespit edebilmek için yeterli doğrulukta sonuçlar ortaya koyan 45° açı değerinin kullanılması uygun görülmüştür. Ayrıca diyagonal kesme hasarının oluşumu alternatif açı değerlerine kıyasla çok daha başarılı bir şekilde belirlenebilmektedir.

3.6 Parametrik Çalışma II

İkinci çalışmada ise malzeme parametrelerinin ve eleman boyutunun sonuçlar üzerindeki etkisine odaklanılmıştır. Bu uygulamada ele alınan duvar yapısı daha önce deneysel (Petry and Beyer, 2014, 2015a), analitik (Petry and Beyer, 2015b) ve nümerik (D’Altri and de Miranda, 2022) olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada 2.25 x 2.01 x 0.20 m (yükseklik x genişlik x derinlik) boyutlarında içi boş kil tuğla kullanılarak imal edilen altı yığma duvar farklı sınır koşullarında incelenerek kırılma mekanizmaları ve yatay yer değiştirme kapasiteleri belirlenmiştir. Burada ise PUP3 ve PUP4 isimli iki duvara odaklanılmıştır.

Aynı koşullarda test edilen duvar numuneleri arasındaki tek fark PUP3 ve PUP4 için sırasıyla 419 ve 619 kN olan düşey yük seviyesidir. Duvarlar öncelikle düşey akabinde çift yönlü tekrarlı yatay yüklemeye maruz bırakılmıştır. Duvarın üzerine yerleştirilen yükleme kirişi düzlemde dönmeye müsait olarak tasarlanmıştır. Kafes model yaklaşımında kullanılan malzeme parametrelerine ait sayısal değerler ve formülasyonlar (Tablo 3.9) deneysel çalışmalarla tespit edilmiştir (Petry and Beyer, 2015a). Maksimum ve artık kayma dayanım değerleri PUP3 için sırasıyla 1.25 ve 0.95 MPa olarak hesaplanmıştır. Eksenel gerilme seviyesinin artmasıyla birlikte bu değerler PUP4 için 1.72 ve 1.41 MPa olmuştur. Yükleme kirişinin Elastisite Modülü ise 210 GPa olarak kabul edilmiştir.

Tablo 3.9 Malzeme parametreleri (MPa).

E_c	G	f_{cm}	f_{tm}	τ_u	τ_{res}
3550	$0.25 * E_c = 890$	5.85	0.50*	$0.94\sigma + 0.27$	0.91σ

*Analitik ve sayısal analizlerde çekme dayanımı sıfır olarak kabul edilmiştir.

Malzeme parametrelerine ait sayısal değerler analiz sonuçlarında doğrudan etkilidir. Özellikle bu çalışmanın seçilmesinde parametre değerlerinin deneysel olarak belirlenmiş olması başlıca nedendir. Bununla birlikte yapının farklı çalışmalarda ele alınmış olması sonuçların güvenilirliğini arttırmaktadır.

Dört adet kafes model farklı eleman boyutları ($M = 100, 150, 200$ ve 250 mm) ve 45° 'lik eğim açısı kullanılarak oluşturulmuştur. Yükleme kirişindeki dönme hareketi kısıtlanmadığı için Master-Slave Method uygulanmamıştır. Hesaplamalarda zati ağırlık ihmal edilmiş ve hata oranı ise -0.35 mm olarak varsayılmıştır. Yatay yükleme deneysel çalışmadan farklı olarak tek doğrultulu uygulanmıştır. Düşey ve diyagonal doğrultulu kafes elemanların çekme dayanımı analitik ve nümerik çalışmalarda olduğu gibi yaklaşık sıfır olarak kabul edilmiştir. Bu duvar örneği ayrıca ilerleyen bölümde tekrar incelenmiş (Bkz. Bölüm 4.1) ve optimum eleman boyutu 250 mm olarak tespit edilmiştir.

Parametrik çalışma iki alt bölüme ayrılmıştır. İlk kısımda malzeme davranışında yapılan kabullerin güncellemesiyle sonuçlardaki değişim incelenmiştir. Diğer bölümde ise farklı eleman boylarının sonuçlar üzerindeki etkileri ve aralarındaki ilişki araştırılmıştır.

3.6.1 Malzeme davranışının sonuca etkisi

Kafes model yaklaşımında kabul edilen malzeme davranışı Şekil 3.5'te tanımlanmıştır. Ele alınan örnek çalışmada çekme dayanımı sıfır kabul edilmiş, kayma ve basınç dayanımları deneysel olarak tespit edilmiştir. Geriye kalan maksimum basınç gerinimi (ϵ_{cu}) ve maksimum kayma gerinimi (γ_{mak}) değerleri üzerinden malzeme davranışının sonuçlara yansımaları araştırılmıştır.

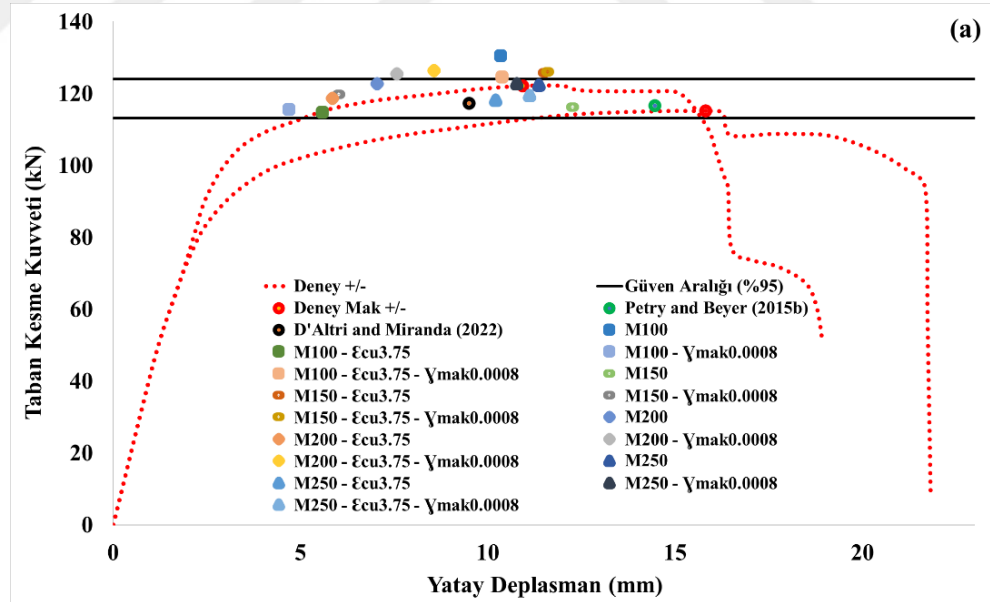
ϵ_{cu} değerinin tespit edildiği Denklem (3.3)'de sabit katsayı olarak hesaba katılan 2.75 değeri 3.75 olarak güncellenmiş ve böylece basınç bölgesindeki doğrusal olmayan davranışın kapasitesi arttırılmıştır. γ_{mak} değeri ise binde sekiz yerine on binde sekiz olarak revize edilmiş ve böylece kayma bölgesindeki doğrusal olmayan davranışın kapasitesi azaltılmıştır. Her iki değişiklik tek tek ve birlikte ele alınmış ve toplamda 32 sayısal analiz gerçekleştirilmiştir.

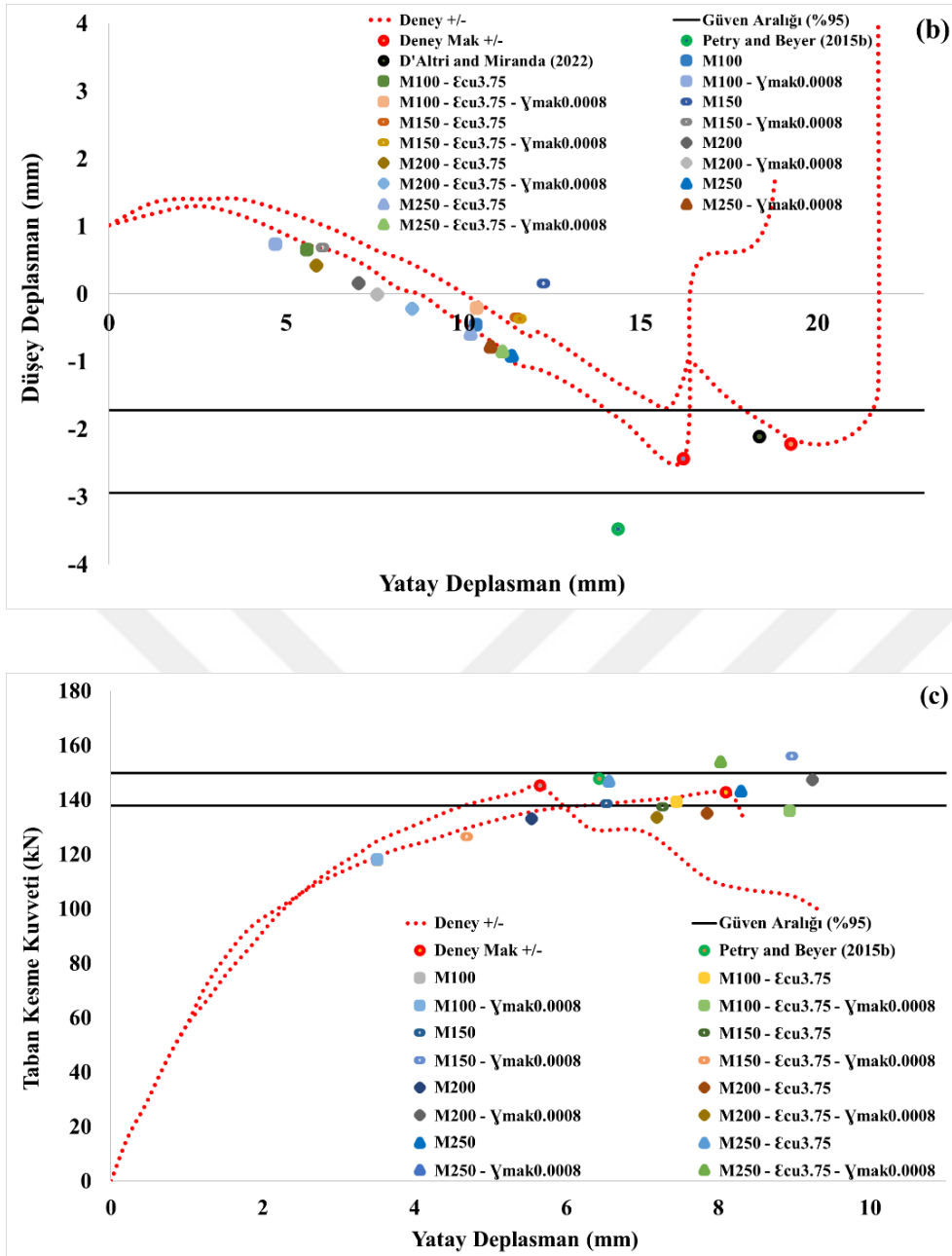
Analiz sayısının fazlalığı nedeniyle sonuçların yorumlanmasını kolaylaştırmak ve görselliğini arttırmak amacıyla her bir analiz sonucunda ortaya çıkan maksimum taşıma kapasitesi noktasal formda tanımlanmıştır (Şekil 3.24). Aynı zamanda deney sonucuna ait kapasite eğrisi ve alt ve üst limitlerin tanımlandığı güven aralığı da birlikte verilmiştir (Tablo 3.10). PUP3’de kapasite eğrisinin yanı sıra aynı nokta için yatay ve düşey yer değiştirmeler arasındaki ilişki de sunulmuştur.

Tablo 3.10 Güven aralığı ve ilgili parametre değerleri.

Duvar Modeli	Alpha	Boyut	Standard Sapma	Güven Aralığı
PUP3	0.05	20	4.51	122.1 + 1.98 (kN) 115.1 – 1.98 (kN)
PUP3*	0.05	20	1.14	-2.23 + 0.50 (mm) -2.45 – 0.50 (mm)
PUP4	0.05	19	10.54	145.1 + 4.74 (kN) 142.6 – 4.74 (kN)

*Düşey ve yatay yer değiştirmeler arasındaki ilişkiye dayalı güven aralığı parametreleri.





Şekil 3.24 a) Analiz sonuçları (PUP3), b) Düşey deplasman değerine karşılık yatay deplasman değeri (PUP3), c) Analiz sonuçları (PUP4).

Malzeme parametrelerindeki değişikliklerin kısıtlı ölçüde sonuçlar üzerinde etken olduğu söylenebilir. Fakat her zaman pozitif bir etkiden bahsetmek mümkün değildir. Bazen olumsuz bazen ise belirgin bir değişikliğe sebebiyet vermemektedir. Genel olarak analiz sonuçları güven aralığının içerisinde veya civarında kümelenmiştir. Hasar oluşumlarında da benzerlik söz konusudur.

Bu analizlerde aç ı değeri sabit olarak kabul edilmiştir. Bunun hasar oluşumu ve ilerleyişi üzerinde baskılayıcı bir etki ortaya koyması olasıdır. Ayrıca sayısal modelin test edildiği koşullar da yapıdaki hasar oluşumu üzerinde etkindir. Örneğin düşük eksenel yük seviyesinde eğilme davranışı kaynaklı hasar oluşumları ortaya çıkarken, yüksek eksenel yük seviyesinde diyagonal kesme hasarları ön plandadır. Farklı hasar oluşumları için çeşitli parametre değeri daha belirleyici rol oynamaktadır. Bu nedenle her yapı örneğinde farklılıklar olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu çalışmada başlangıçtaki varsayımların olduğu şekliyle kalması uygun bulunmuştur. Kabulleri güncellemek yerine ilgili yapı modelinin ihtiyaçları doğrultusunda alternatif parametre değeriyle sayısal analizlerin tekrarlanması ve sonuçların güven aralığı içerisinde sunulması tercih edilmiştir.

3.6.2 Farklı eleman boyutlarının sonuca etkisi

İkinci kısımda ise farklı eleman boyutlarının sonuçlar üzerindeki etkileri ve birbirleriyle olan ilişkileri araştırılmıştır. Örnek uygulamalar kısmında detaylı olarak bahsedilecek olan optimum eleman boyutu değeri 250 mm olarak belirlenmiştir. Diğer boyutlarla ($M = 100, 150$ ve 200 mm) tasarlanan kafes modellerin Elastisite ve Kayma Modülü ($0.25E$) değeri revize edilerek, çözümlemeler tekrar gerçekleştirilmiştir. Elastisite Modülüne ait yeni değeri ise yapının başlangıç rijitliğini temsil edebilen bir parametre olması nedeniyle doğal periyod değeri üzerinden tespit edilmiştir.

Doğal periyodun belirlenmesinde kütle ve uygulandığı yükseklik doğrudan etken olmaktadır. Analizlerde dış yükleme duvarın üstüne tanımlanmış olan çelik kafes kiriş vasıtasıyla yapıya uygulanmaktadır. Fakat kirişin yüksekliği eleman boyutuna bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Örneğin 250 mm eleman boyutu için toplam kiriş yüksekliği 500 mm iken 100 mm eleman boyutu için toplam kiriş yüksekliği 200 mm'dir. Dolayısıyla bu durum periyod değeri üzerinde etkindir. Bu nedenle çalışma yapı yüksekliğinin belirlenmesi hususunda ikiye ayrılmıştır; çelik kiriş üst kot ve duvar üst kot. Her iki durum için de farklı Elastisite ve Kayma Modülü değeri hesap edilmiştir.

Başlangıç durumundaki doğal periyod değerleri Tablo 3.11’de, revize edilen Elastisite Modülü ve yeniden hesaplanan doğal periyod değerleri Tablo 3.12’de verilmiştir. Çelik kiriş üst kotundaki yükseklik farklılıkları nedeniyle sonuçlar arasındaki standart sapma daha fazladır.

Tablo 3.11 Başlangıç durumundaki doğal periyod değerleri (s).

	M250	M200	M150	M100	Ort. Standart Sapma (%)
	Çelik Kiriş Üst Kot				
PUP3	0.226	0.213	0.211	0.197	1.04
PUP4	0.275	0.258	0.257	0.239	1.26
	Duvar Üst Kot				
PUP3	0.183	0.179	0.186	0.181	0.26
PUP4	0.222	0.218	0.226	0.220	0.34

Tablo 3.12 Yeni Elastisite Modülü değerleri (ilk 6 sonuç çelik kiriş üst kot, diğer altı sonuç ise duvar üst kot değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir).

Örnek	Boyut (mm)	E (MPa)	G (MPa)	Çelik Kiriş Üst Kot (s)	Duvar Üst Kot (s)
PUP3	100	2685	671	0.226	0.208
PUP4	100	2685	671	0.275	0.253
PUP3	150	3100	775	0.226	0.199
PUP4	150	3100	775	0.275	0.242
PUP3	200	3150	878.5	0.226	0.190
PUP4	200	3150	878.5	0.274	0.231
PUP3	100	3475	869	0.199	0.183
PUP4	100	3475	869	0.242	0.223
PUP3	150	3680	920	0.208	0.183
PUP4	150	3680	920	0.252	0.222
PUP3	200	3410	825.5	0.217	0.183
PUP4	200	3410	825.5	0.264	0.222

Belirlenen yeni Elastisite Modülü değerleri dikkate alınarak, nümerik çözümler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar güven aralığıyla (Tablo 3.13) birlikte Şekil 3.25’te sunulmuştur. Toplamda 20 analiz gerçekleştirilmiş ve sonuçların genel olarak güven aralığı içerisinde veya civarında kümelendiği görülmüştür. Elastisite Modülünün revize edilmesi ilk olarak başlangıç rijitliğini akabinde ise doğrusal olmayan davranışı etkilemektedir. Fakat periyod değerlerinin birbirine yaklaştırılmasıyla, farklı eleman boyutlarına ait sonuçların M250 modeline ait

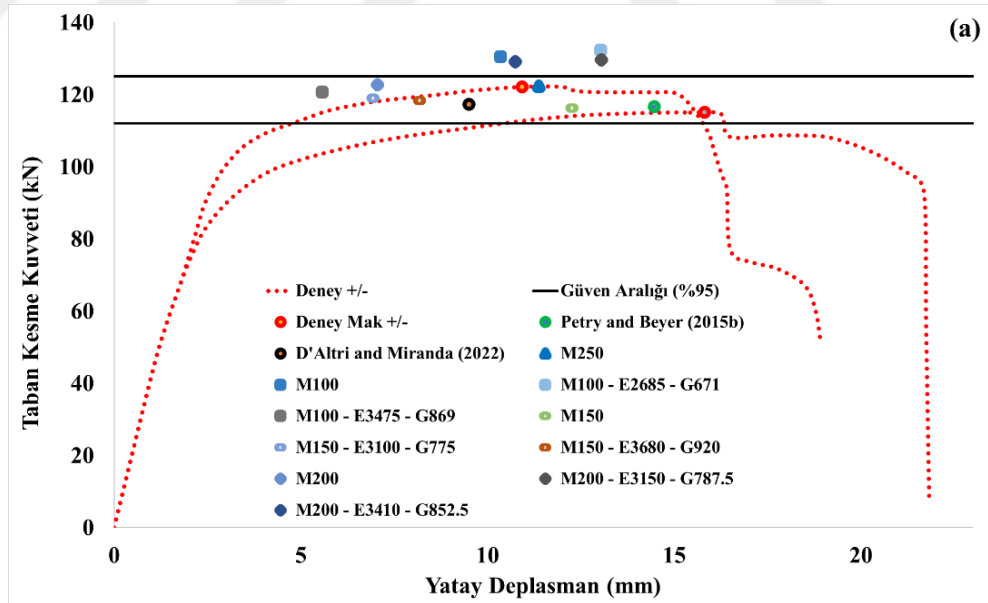
sonuca kesin veya genel olarak yaklaştığını söylemek mümkün değildir. Hasar gelişimleri ise genel olarak paralellik göstermektedir.

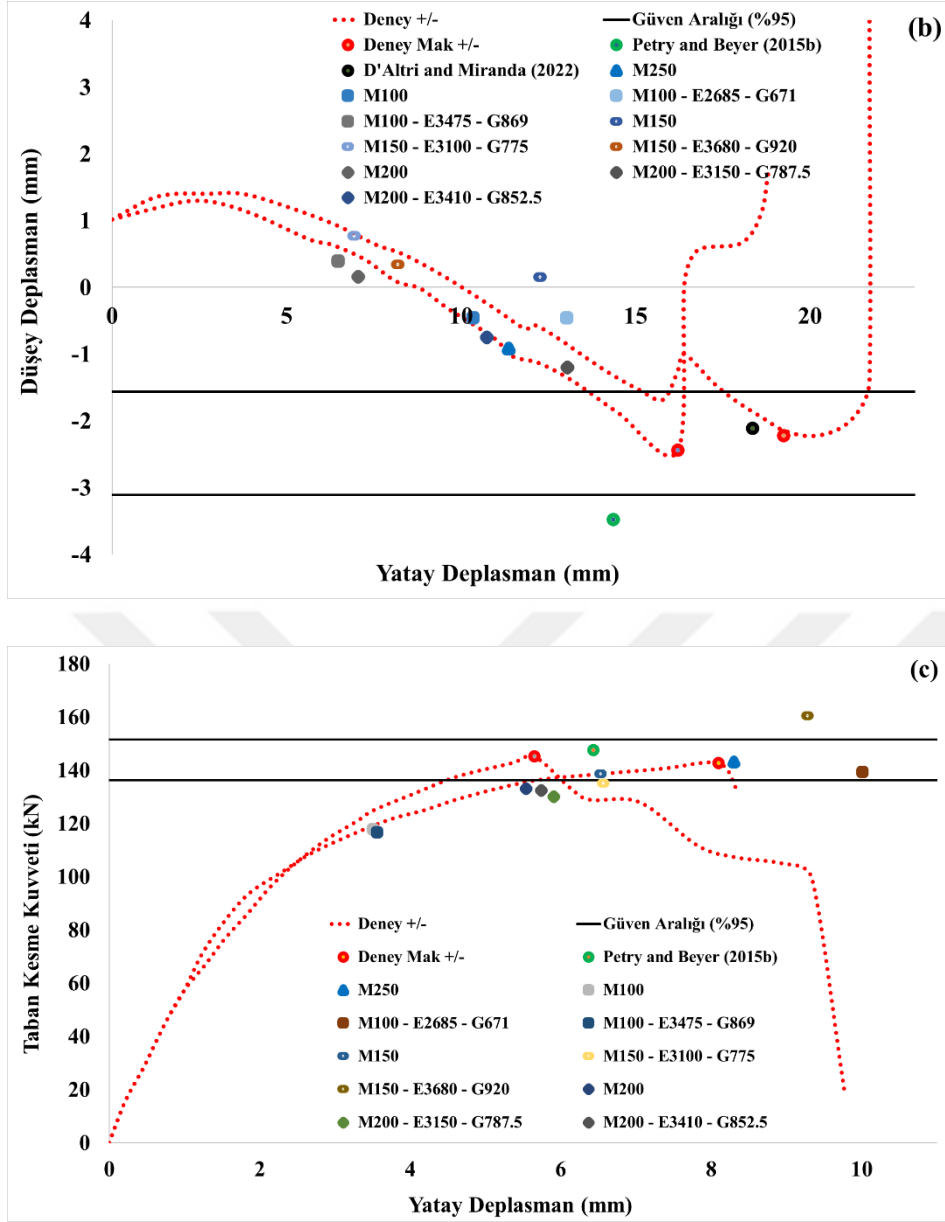
Malzeme davranışında olduğu gibi burada da kesin bir yargıya varmak mümkün değildir. Bu nedenle birkaç farklı eleman boyutu ele alınarak analiz sayısının artırılması ve sonuçların güven aralığı içerisinde değerlendirilmesi hata olasılığını düşürmek için daha doğru bir tercih olmaktadır.

Tablo 3.13 Güven aralığı ve ilgili parametre değerleri.

Duvar Modeli	Alpha	Boyut	Standard Sapma	Güven Aralığı
PUP3	0.05	14	5.84	122.1 + 3.06 (kN) 115.1 – 3.06 (kN)
PUP3*	0.05	14	1.27	-2.23 + 0.67 (mm) -2.45 – 0.67 (mm)
PUP4	0.05	13	11.83	145.1 + 6.43 (kN) 142.6 – 6.43(kN)

*Düşey ve yatay yer değiştirmeler arasındaki ilişkiye dayalı güven aralığı parametreleri.





Şekil 3.25 a) Analiz sonuçları (PUP3), b) Düşey deplasman değerine karşılık yatay deplasman değeri (PUP3), c) Analiz sonuçları (PUP4).

4. ÖRNEK UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRMELER

Önerilen yaklaşımın doğruluğu ve uygulanabilirliği deneysel ve/veya nümerik olarak daha önce incelenmiş çeşitli çalışmalar aracılığıyla test edilmiştir. Örnek yapıların seçiminde olabildiğince farklı koşullara sahip olmalarına özen gösterilmiştir. Yükseklik/genişlik oranı, eksenel gerilme seviyesi, tepe dönmelerinin serbest veya tutulu olması gibi çeşitli koşullar altında önerilen prosedür test edilmiştir. Son olarak ise çok katlı bir yapının davranışı incelenmiştir.

İlk örnek Petry and Beyer (2014) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmadaki düşey yük değerleri farklı olan iki duvardır (PUP3 ve PUP4). İkinci örnek ise yükseklik/genişlik oranı farklı olan iki duvardır (HW ve LW) ve De Castro Oliveira (2003) tarafından nümerik olarak incelenmiştir. Üçüncü duvar örneği (W-m-1) deneysel (Xu et al., 2018) ve nümerik (Pirsaheb et al., 2020b) olarak araştırılmış ve yükseklik/genişlik oranı birden küçüktür. Son duvar örneği ise deneysel (Sarhosis et al., 2010) ve nümerik (Giamundo et al., 2014) olarak ele alınmış, fakat ilk üç örnekten farklı olarak boşluklu bir forma sahiptir ve sadece düşey yüke maruz bırakılmıştır. Bunlar dışında Milani et al. (2009) ve Pirsaheb et al. (2021) tarafından çeşitli nümerik yaklaşımlarla incelenmiş üç katlı boşluklu bir yığma yapı önerilen yaklaşım ile çözümlenmiştir. Örnek çalışmalara ait genel bilgiler Tablo 4.1’de sunulmuştur.

Tablo 4.1 Doğrulama örneklerine ait genel bilgiler.

Duvar Modeli	H/L	MSM	Zati Yük	Düşey Yük (kN)
PUP3	1.12	Hayır	Hayır	419
PUP4	1.12	Hayır	Hayır	619
JRC Walls - HW	2.00	Evet	Evet	150
JRC Walls - LW	1.35	Evet	Evet	150
W-m-1	0.50	Evet	Hayır	669
Wall Panel	-	Evet	Evet	6.00
Çok Katlı Yapı	1.13*	Evet	Evet/Hayır	127.8**

*Yükseklik olarak zemin kat, genişlik olarak ise sol köşe nokta ile kapı boşluğu arasındaki mesafe dikkate alınmıştır.

**Her bir kattaki döşeme hizasından taşıyıcı duvarlara uygulanan toplam yük.

Literatürdeki çalışmalarda önerilen prosedürde ihtiyaç duyulan parametreler tanımlanmamış veya varsayımlarla belirlenmiş olabilmektedir. Bununla birlikte

dayanım değerlerinin tespitinde standart sapma yüksek çıkabilmektedir. Bu değerler sonuçlar üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu nedenle ihtiyaç duyulduğunda ilgili parametre değerleri revize edilmiş, sayısal analizler tekrarlanmış ve tüm sonuçlar güven aralığı içerisinde yorumlanmıştır. Ek olarak çelik kafes kirişin oluşturulma formu, iterasyon sayısı ve modelleme yaklaşımıyla ilgili parametreler de güven aralığına dahil edilmiştir.

Tüm örneklerde kullanılan çelik kafes kirişin davranışı doğrusal olarak tanımlanmış ve Elastisite Modülü 210 GPa olarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Çok katlı yapıda ise betonarme döşemeyi temsil etmesi öngörülen kafes elemanların Elastisite Modülü 28 GPa olarak çözümlemelerde dikkate alınmıştır.

Birim deformasyona bağlı hasar oluşumlarındaki renklerin anlamları Tablo 3.1’de, performans düzeyine bağlı hasar oluşumlarındaki renklerin anlamları ise Tablo 3.2’de açıklanmıştır.

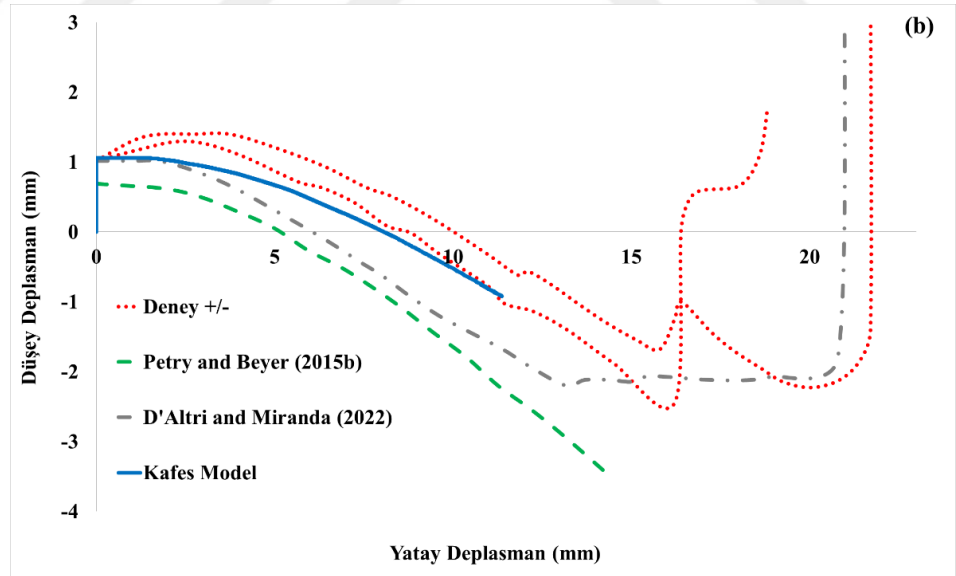
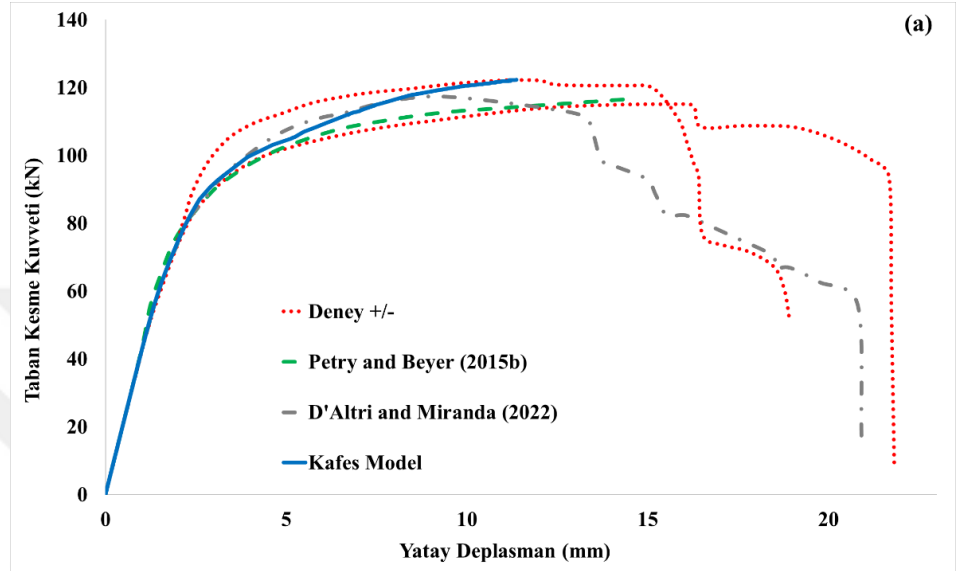
4.1 Uygulama I (PUP3 ve PUP4)

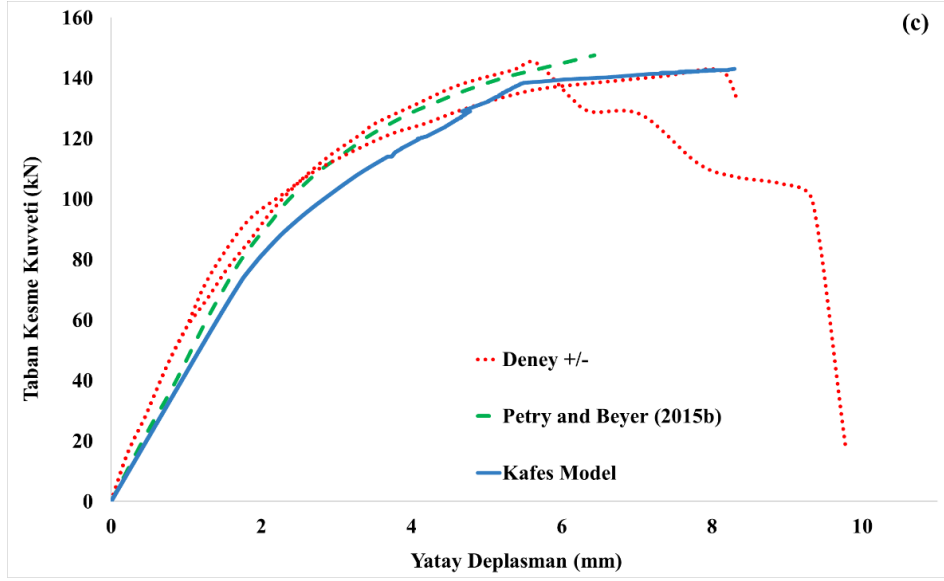
İlk doğrulama örneğine ait malzeme parametrelerinin sayısal değerleri, geometrik ölçüler ve sınırlamalar daha önce belirtilmiştir (Bkz. Bölüm 3.6).

Kafes model yaklaşımıyla 100, 150, 200 ve 250 mm olmak üzere dört farklı eleman boyutu ile yığma duvarın sayısal modeli oluşturulmuş ve Tablo 3.9’da belirtilen malzeme parametrelerine ait değerler kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Her iki duvar örneğine ait hasar oluşumları ve kapasite eğrileri dikkate alınarak, optimum eleman boyutu 250 mm olarak belirlenmiştir. Kapasite eğrisinin belirlenmesinde taban kesme kuvvetine karşılık duvarın üst orta noktasındaki yatay yer değiştirme değeri dikkate alınmıştır. 250 mm eleman boyutuyla tasarlanan nümerik model çelik kafes kiriş de dahil olmak üzere toplam 387 kafes eleman ve 116 düğüm noktasından oluşmaktadır.

Şekil 4.1a’da PUP3 örneğine ait kapasite eğrisi, Şekil 4.1b’de seçilen düğüm noktası için düşey deplasmana karşın yatay deplasman değeri ve Şekil 4.1c’de ise PUP4 için elde edilen kapasite eğrisi verilmiştir. PUP4’teki başlangıç rijitliğindeki

ufak farklılık haricinde her iki duvar örneğinde de tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Düşey deplasman değerindeki değişimin ise tutarlı bir yol izlediği söylenebilir. Fakat yük kontrollü bir metot uygulanması nedeniyle erişilen maksimum yük değerinden sonra kapasite eğrisindeki düşüş gözlemlenmemektedir. Bu da yatay hareketin daha kısıtlı kalmasına neden olmaktadır.





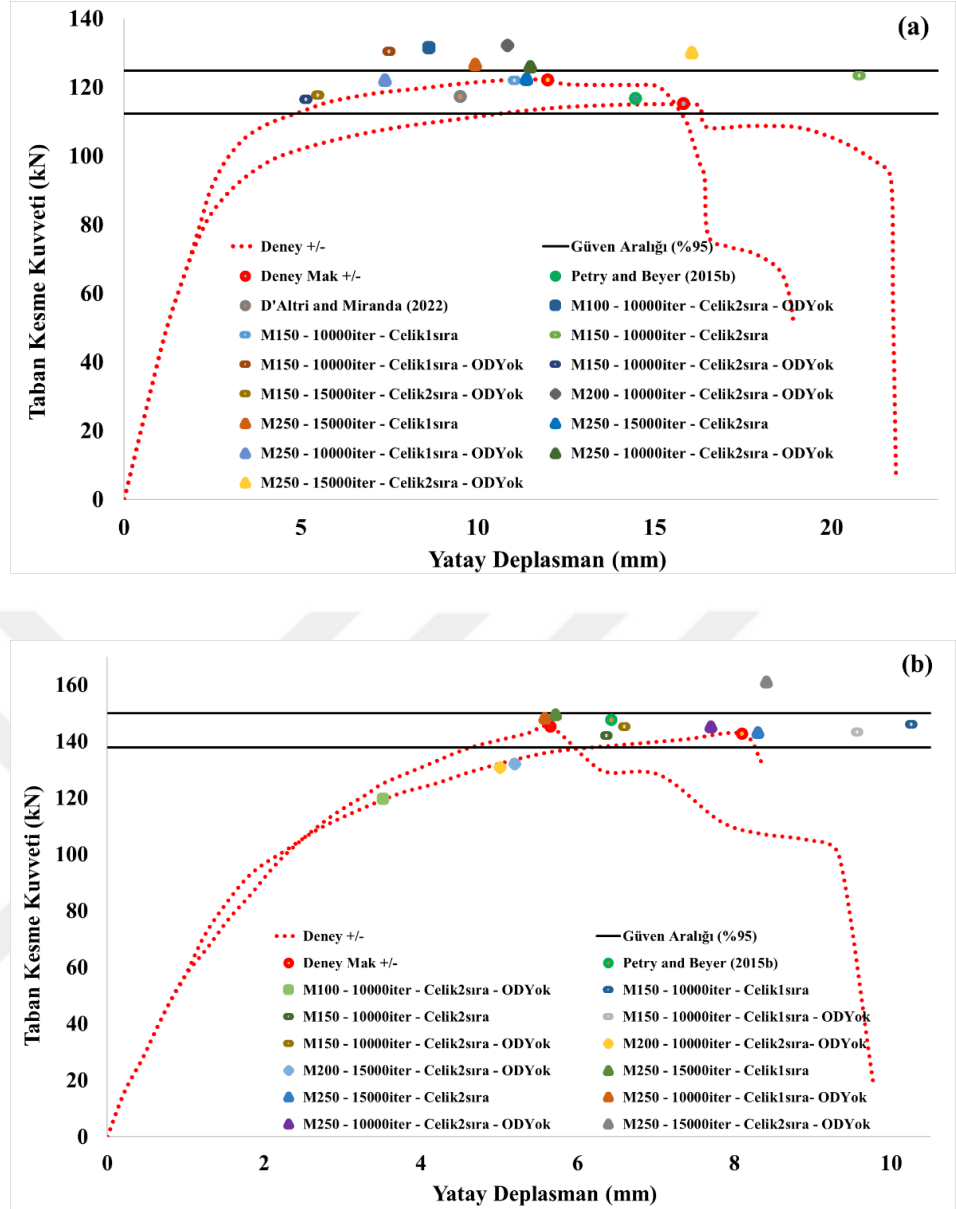
Şekil 4.1 a) Kapasite eğrisi (PUP3), b) Düşey deplasman değerine karşılık yatay deplasman değeri (PUP3), c) Kapasite eğrisi (PUP4).

Geometrik sınırların ve malzeme parametrelerinin tanımlanmasında yeterli veri olması nedeniyle güven aralığının oluşturulmasında eleman boyutlarının yanı sıra çelik kirişin etkisi de dikkate alınmıştır. Çelik kirişin iki (Celik2sıra) veya tek (Celik1sıra) sıra olarak tanımlanması ve diyagonal kafes elemanların kesiştiği yerde düğüm noktasının bulunmaması (ODYok) durumları araştırılmıştır. Ek olarak yatay yüklemde (Step 2) farklı iterasyon sayılarıyla da analizler gerçekleştirilmiştir. Güven aralığına ait parametre değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2 Güven aralığı ve ilgili parametre değerleri.

Duvar Modeli	Alpha	Boyut	Standard Sapma	Güven Aralığı (kN)
PUP3	0.05	16	5.73	122.1 + 2.81 115.1 – 2.81
PUP4	0.05	15	9.48	145.1 + 4.80 142.6 – 4.80

Her iki çalışmada da erişilen maksimum taban kesme kuvveti değerleri genel olarak güven aralığı içerisinde veya bir miktar üzerinde kümelenmiştir (Şekil 4.2). Fakat yatay deplasman değerlerindeki saçılım PUP3 için 5-15 mm aralığında yoğunlaşırken, PUP4 için bu aralık 5-8 mm’dir. PUP4’ün daha yüksek eksenel gerilmeye maruz kalması saçılımın daha kısıtlı bir alanda oluşmasına sebebiyet vermiştir.



Şekil 4.2 Güven aralığı: a) PUP3, b) PUP4.

Farklı koşullar, özellikle çelik kirişin tasarlanış formu, sonuçlar üzerinde belirgin değişikliklere neden olmamıştır. Fakat diyagonal elemanların kesişim yerlerine tanımlanmış olan düğüm noktalarına, özellikle PUP3 örneğinde, düşey kuvvet uygulanmasıyla kafes modelin yatay deplasman kapasitesi genel olarak artmıştır. Her analizde ufak farklılıklar olsa da tek sıra çelik kafes kirişe sahip modellerde sol tarafta beklenmedik lokal basınç hasarları meydana gelmiştir. Tüm modellerde hasarın gelişimi ise genel olarak benzerlik göstermiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, diyagonal elemanların kesişim yerlerinde düğüm noktalarının tanımlandığı çift sıra çelik kiriş en uygun form olarak tespit edilmiştir (Bkz. Şekil

3.9). Sonuçların görece diğer eleman boylarına kıyasla daha tutarlı olması nedeniyle eleman boyunun 150 ve 250 mm olduğu kafes model yaklaşımlarına çözümlemelerde ağırlık verilmiştir.

Kapasite eğrisindeki uyum kadar, hasar oluşumunun ve kırılma mekanizmasının tespiti de önemlidir. Sonuçların değerlendirmesinde yüklemedeki farklılık da göz önünde bulundurulmalıdır. Deneysel çalışmada çift yönlü tekrarlı yükleme (quasi-static cyclic test) uygulanırken, kafes model yaklaşımında tek doğrultulu artımsal itme analizi gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmada her iki duvarda da öncelikle eğilme davranışı gözlemlenmiştir. İlerleyen aşamalarda ise diyagonal hasarlar oluşmaya başlamıştır. PUP3 duvarının kırılma mekanizması eğilme davranışı kaynaklı ezilme (rocking) iken PUP4'inki hem eğilme hem de diyagonal kesme kaynaklıdır (Şekiller 4.3a ve b). PUP4 duvarındaki yüksek eksenel gerilme seviyesi taşıma kapasitesini artırırken, maksimum yüke erişildiği ötelenme oranını (drift ratio) yaklaşık yarı yarıya düşürmüştür (Petry and Beyer, 2014).

Önerilen yaklaşımda her iki duvarın sağ alt köşesindeki basınç ezilmeleri ve köşeden merkeze doğru ilerleyen diyagonal kesme hasarları gözlemlenebilmektedir (Şekiller 4.3c ve d). PUP4 için daha ince ve uzun formda yaklaşık 1.5 m'ye erişen deneysel çalışmadakine benzer bir diyagonal hasardan bahsedilebilir. Hasar oluşumları her iki duvar için de tutarlı olmasına karşın tek doğrultulu yükleme ve yapının sergilediği eğilme davranışı nedeniyle kafes modelin sol tarafında siyah kesikli çizgi ile vurgulanan doğrultuda diyagonal kesme hasarı ve tabanda açılmalar meydana gelmiştir.

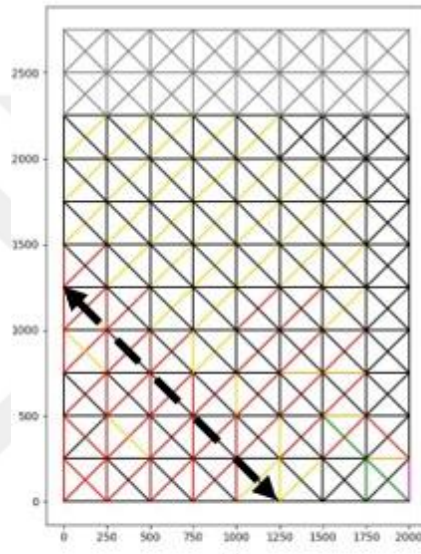
Şekiller 4.3e ve f ise her bir düşey ve diyagonal elemanın Şekil 3.10'daki performans düzeylerine göre hasar dağılımını temsil etmektedir. Tablo 4.3'te her bir hasar bölgesinde bulunan kafes eleman sayıları, Tablo 4.4'te eleman doğrultularına bağlı olarak yüzdesel dağılım görülmektedir. Yoğunlukla belirgin hasar düzeyinde deformasyonun meydana geldiği söylenebilir.



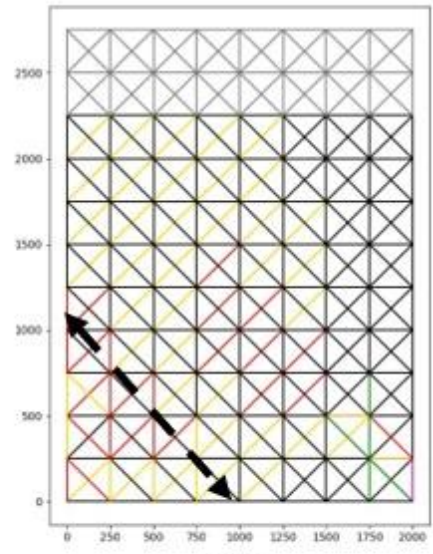
(a)



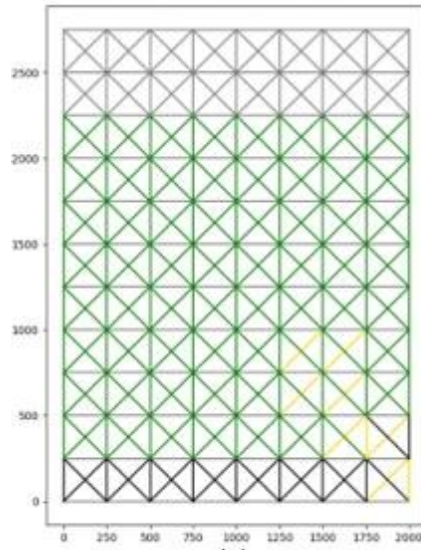
(b)



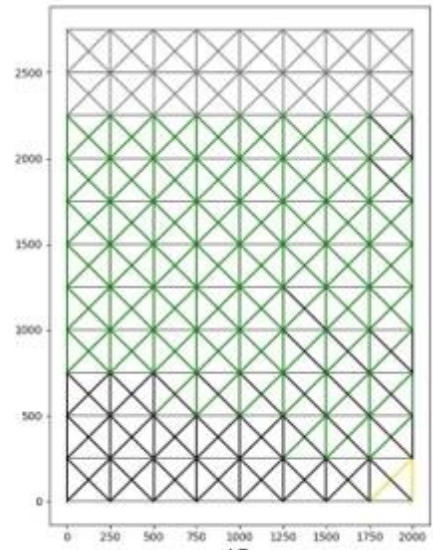
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.3 Hasar görselleri: Deney a) PUP3 b) PUP4 (Petry and Beyer, 2015a), Birim deformasyona bağlı c) PUP3 d) PUP4, Performans düzeyine bağlı e) PUP3 f) PUP4.

Tablo 4.3 Hasar bölgelerindeki kafes eleman sayıları (adet).

Duvar Modeli	Sınırlı Hasar Bölgesi (Siyah)	Belirgin Hasar Bölgesi (Yeşil)	İleri Hasar Bölgesi (Sarı)	Göçme Bölgesi (Kırmızı)
PUP3	25	191	9	0
PUP4	64	159	2	0

Tablo 4.4 Hasar bölgelerindeki kafes eleman sayılarının doğrultularına bağlı olarak yüzdelik dağılımı (%).

Duvar Modeli	Eleman Doğrultusu	Sınırlı Hasar Bölgesi (Siyah)	Belirgin Hasar Bölgesi (Yeşil)	İleri Hasar Bölgesi (Sarı)	Göçme Bölgesi (Kırmızı)
PUP3	Düşey	11.1	86.4	2.5	0.0
	Diagonal	11.1	84.0	4.9	0.0
PUP4	Düşey	24.7	74.1	1.2	0.0
	Diagonal	30.6	68.8	0.7	0.0

Şekil 4.1'deki PUP3 ve PUP4 duvarları için elde edilen kapasite eğrileri (kafes model) dikkate alınarak yapıların tamamında meydana gelen ötelenme oranları hesaplanmıştır. PUP3 ve PUP4 için gerçekleşen yatay deplasman değerleri sırasıyla 11.37 ve 8.30 mm'dir. Kapasite eğrilerinde kullanılan tepe düğüm noktasının mesnet kotundan yüksekliği ise 2250 mm'dir. Her iki duvar için de hesaplanan kat ötelenme oranları sırasıyla %0.51 ve %0.37'dir. Şekil 3.10'daki performans düzeylerine göre her iki duvarında belirgin hasar bölgesinde yer aldığı görülmektedir. Bu sonuç kafes elemanların tek tek incelendiği durumla da örtüşmektedir. Hatta PUP4'ün sınırlı hasar bölgesine daha yakın bir davranış sergilediği her iki hesaplama yöntemiyle de tespit edilebilmektedir.

4.2 Uygulama II (JRC Walls: HW ve LW)

Bu bölümde iki farklı çalışmada nümerik yaklaşımla ele alınmış yükseklik/genişlik oranları farklı olan iki duvar örneği incelenmiştir (De Castro Oliveira, 2003; Kuruşçu, 2012). Duvar örneklerinin yükseklikleri 2.00 ve 1.35 m'dir. Genişlikleri ve derinlikleri ise sırasıyla 1.00 ve 0.25 m'dir. Duvar yapıları iki sıra tuğla örgü kullanılarak inşa edilmiştir.

Yükleme öncesi dönmenin önleildiği çelik kiriş duvar numunelerinin üstüne yerleştirilmiş, sonrasında 150 kN'luk eksenel kuvvet uygulanmıştır. Yatay yük deneysel çalışmada çift yönlü tekrarlı, De Castro Oliveira (2003) tarafından gerçekleştirilen Sonlu Elemanlar analizlerinde hem tekrarlı hem de tekdüze olarak uygulanmıştır.

Kafes modele ait sonuçlar De Castro Oliveira (2003) tarafından gerçekleştirilen Sonlu Elemanlar analizleriyle kıyaslanması nedeniyle ilgili çalışmada önerilen malzeme parametrelerine ait sayısal değerler kullanılmıştır (Tablo 4.5). Çalışmada Kayma Modülü ve kayma dayanımı belirtilmemiştir. Buna karşılık kohezyon değerinin 0.35 MPa olduğu verilmiştir. Kayma Modülü Elastisite Modülünün %40'ı olarak kabul edilmiştir. Maksimum kayma dayanım değeri ise Mohr-Coulomb formülasyonu yardımıyla 0.59 MPa olarak hesaplanmıştır. Fakat kayma dayanımının 0.89 MPa olarak hesaplamalarda dikkate alınması daha tutarlı sonuçlar sergilemiştir. Artık kayma dayanımı ise kohezif direncin maksimum dayanımın aşılması sonrasında kademeli olarak etkisini yitirebileceği de göz önünde bulundurularak iki farklı değerle analizlerde ele alınmıştır. Bu konuya güven aralığı kapsamında daha detaylı olarak yer verilmiştir. Yapının birim hacim ağırlığı ise 18.0 kN/m^3 olarak kabul edilmiştir.

Tablo 4.5 Malzeme parametreleri (MPa).

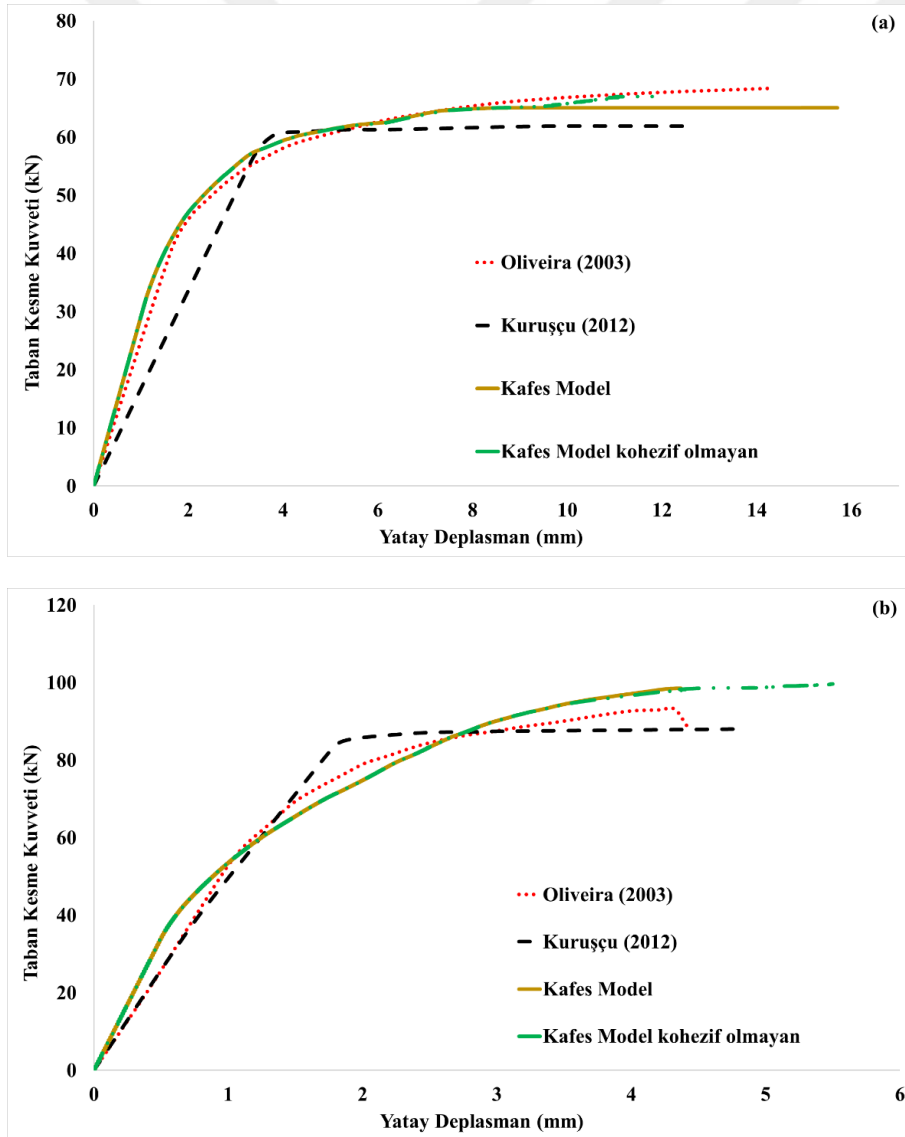
E_c	G	f_{cm}	f_{tm}	τ_u	τ_{res}
2500	1000	5.00	0.15	0.89	0.88
				0.89	0.54

Çeşitli eleman boyutları ($M = 100, 150$ ve 200 mm) ve 45° 'lik eğim açısı kullanılarak üç farklı kafes model tasarlanmıştır. Yüklem plakasındaki dönme hareketi engellendiği için Master-Slave Method uygulanmıştır. Zati ağırlık tüm düğüm noktaları vasıtasıyla hesaplamalara dahil edilmiştir. Hata oranı ise -0.25 mm olarak kabul edilmiştir. Yatay yüklem tek doğrultulu olarak uygulanmıştır.

Her iki duvar örneğine ait hasar oluşumları ve kapasite eğrileri dikkate alınarak, optimum eleman boyutu 100 mm olarak belirlenmiştir. Kapasite eğrisinin belirlenmesinde taban kesme kuvvetine karşılık çelik kirişin üst orta noktasındaki

yatay yer değiştirme değeri dikkate alınmıştır. 100 mm eleman boyutuyla tasarlanan nümerik model elik kafes kiriş de dahil olmak üzere yüksek duvarda (HW) 932 kafes eleman ve 263 düğüm noktası içermektedir. Aynı koşuldaki kısa duvarda (LW) ise 645 kafes eleman ve 186 düğüm noktası bulunmaktadır.

şekil 4.4'te HW ve LW örneklerine ait kapasite eğrileri verilmiştir. Yüksek duvarda kafes modele ait eğri De Castro Oliveira (2003) tarafından elde edilen sonuçla oldukça benzerlik göstermektedir. Kısa duvarda ise başlangıç rijitliğindeki ve maksimum taşıma kapasitesindeki ufak sapmalar dışında tutarlılık söz konusudur. Kohezyon etkisinin artık kayma dayanımından çıkarılması ise kısa duvarda yer değiştirme kapasitesini artırırken, yüksek duvarda azaltmıştır.



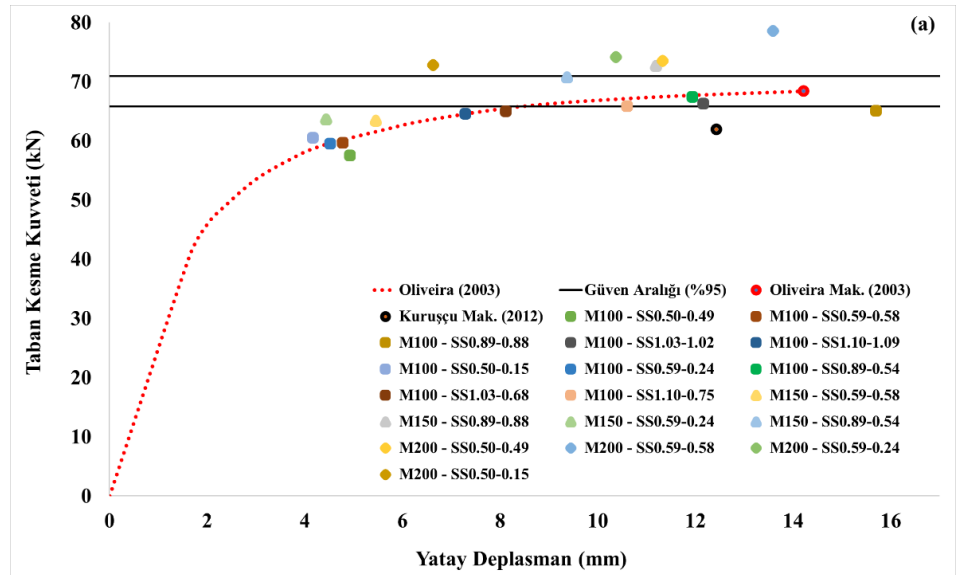
şekil 4.4 Kapasite eğrileri: a) HW, b) LW.

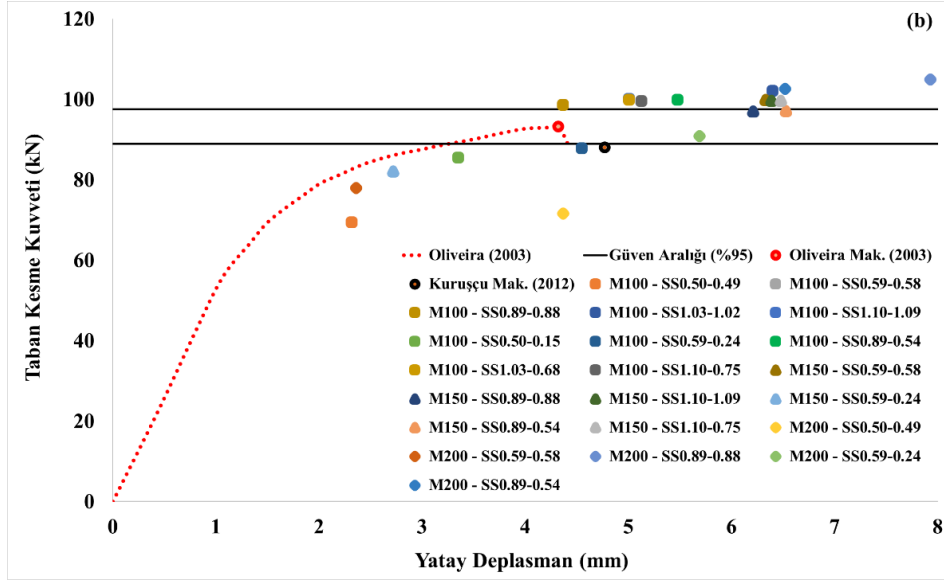
Yapının kayma dayanımı formül aracılığıyla belirlenmiştir. Varsayımların sürece dahil olması nedeniyle olası hataları azaltabilmek için güven aralığında alternatif kayma dayanım değerlerine odaklanılmıştır. Eleman boyutlarıyla birlikte beş farklı maksimum kayma dayanım değeri ($SS = 0.50, 0.59, 0.89, 1.03$ ve 1.10 MPa) kohezif etkinin olup olmamasına göre kombine edilerek yüksek duvarda 18 ve kısa duvarda 21 sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan güven aralığına ait bilgiler Tablo 4.6’da sunulmuştur.

Tablo 4.6 Güven aralığı ve ilgili parametre değerleri.

Duvar Modeli	Alpha	Boyut	Standard Sapma	Güven Aralığı (kN)
HW	0.05	19	5.75	68.4 + 2.59 68.4 – 2.59
LW	0.05	22	10.27	93.2 + 4.29 93.2 – 4.29

Sonuçların genel olarak güven aralığı civarında kümелendiği söylenebilir (Şekil 4.5). Bununla birlikte kısa duvarda yatay deplasman değerleri 2-7 mm aralığında yoğunlaşmışken, yüksek duvarda bu açıklık yaklaşık 4-14 mm’dir. Eksenel gerilmedeki artış gibi yükseklik/genişlik oranının azalması da sonuçları birbirlerine yaklaştırmıştır.





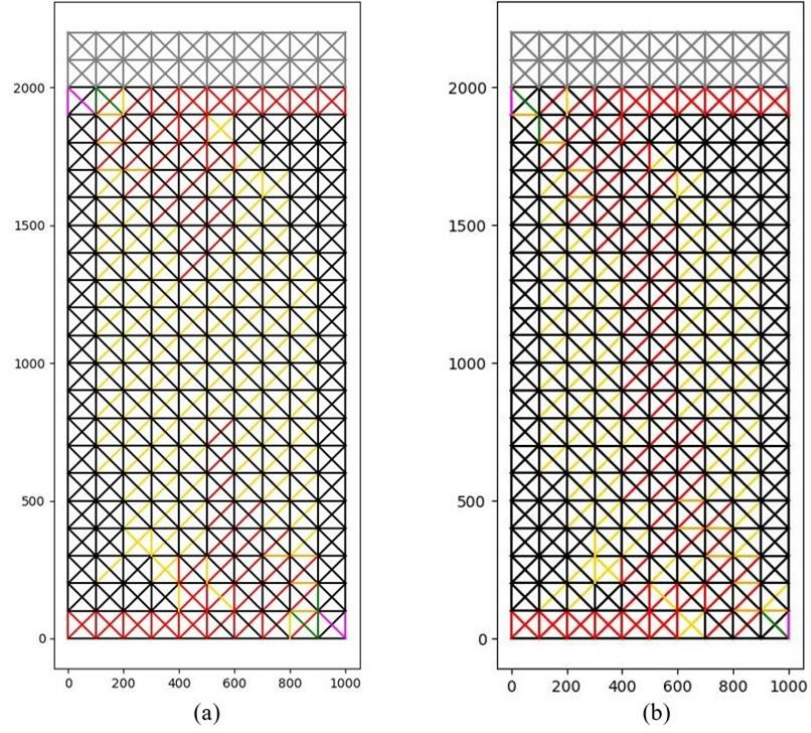
Şekil 4.5 Güven aralığı: a) HW, b) LW.

Kayma dayanım değerinin 0.50 veya 0.59 MPa olarak analizlerde kullanılması çoğunlukla yeterli taşıma ve yer değiştirme kapasitesi sunamamıştır. Bir istisna olarak yüksek duvarda eleman boyunun 200 mm olduğu analizlerde güven aralığının üstünde değerlere erişilmiştir. Kayma dayanım değerinin daha yüksek seçildiği analizlerde ise maksimum taşıma kapasitesinde belirgin değişiklikler gözlemlenmemiştir. En tutarlı kayma dayanım değeri ise 0.89 MPa olarak belirlenmiştir.

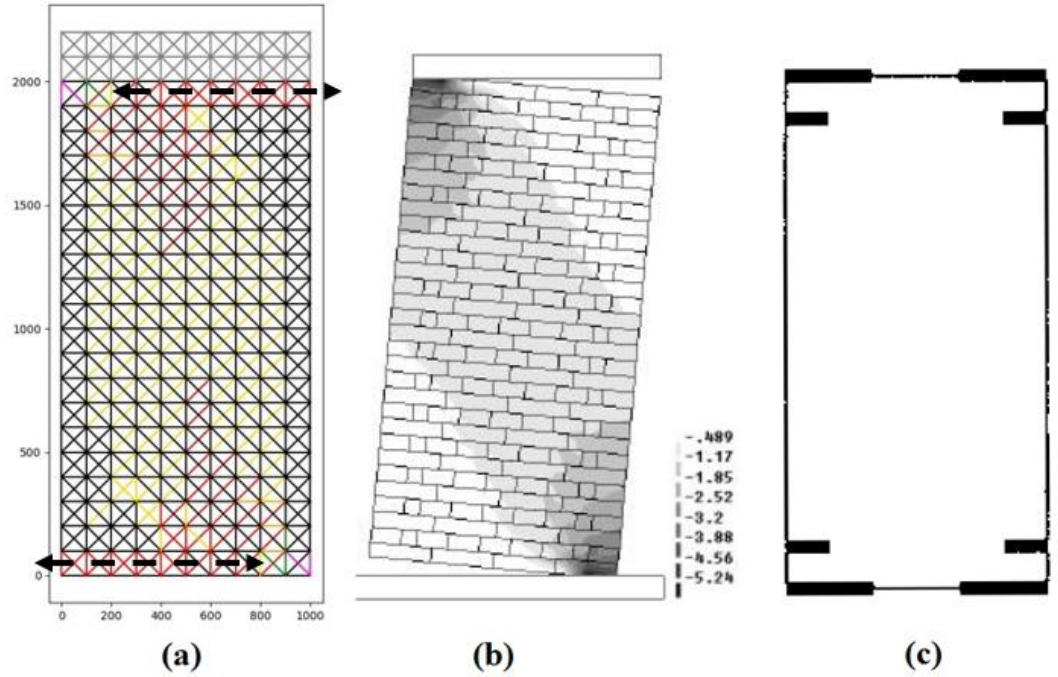
Kohezif direncin kaldırılması sonuçlar üzerinde kısmen etkili, fakat belirleyici değildir. Genel olarak hasar oluşumlarında da büyük farklılıklara neden olmamıştır. Belirgin değişikliklerden birisi yüksek duvarda daha düşük yer değiştirme hareketine karşın orta bölgede düşey doğrultulu diyagonal çekme hasarlarının oluşumudur (Şekil 4.6).

Hasar oluşumları incelenirken deneysel çalışmada çift yönlü tekrarlı yükleme olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Kafes model, Sonlu Elemanlar Modeli ve deneysel çalışmada meydana gelen hasar oluşumları yüksek duvar örneğinde oldukça benzerlik göstermektedir (Şekil 4.7). Sol alt ve sağ üst köşelerdeki yapının eğilme davranışı kaynaklı açılmalar gözlemlenmiş ve kafes modelde kesikli siyah çizgiler ile vurgulanmıştır. Ayrıca sağ alt ve sol üst köşelerde lokal ezilmelerin

başladığı Sonlu Elemanlar Modelinde görülebilmektedir. Kafes modelde bahsi geçen hasarlar magenta ve yeşil renkli kafes elemanlarla temsil edilmiştir.

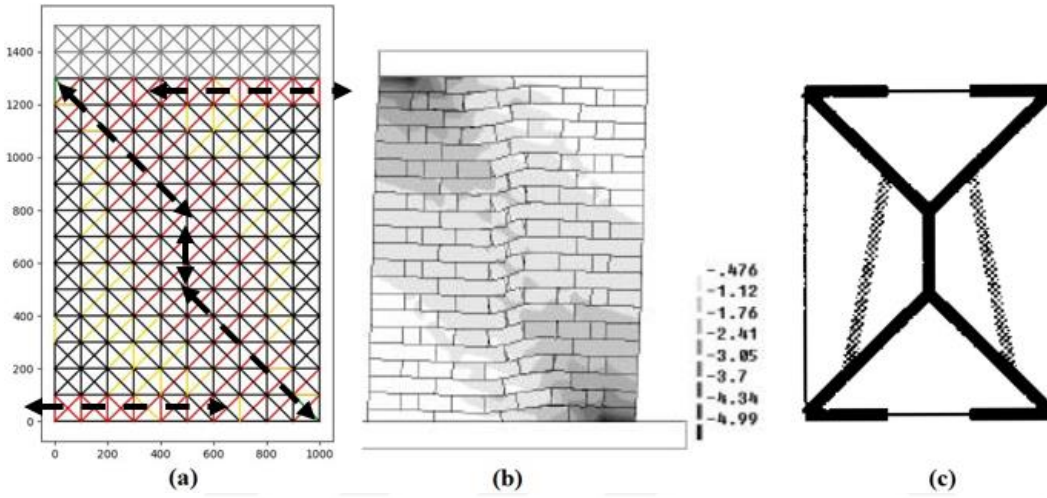


Şekil 4.6 Hasar oluşumları ($SS = 0.89$ MPa): a) Kafes model, b) Kafes model kohezif olmayan.



Şekil 4.7 Yüksek duvarda hasar gelişimi: a) Kafes model, b) Sonlu Elemanlar Modeli (üzerinde asal basınç gerilme dağılımı belirtilmiştir (MPa)) (De Castro Oliveira, 2003), c) Deneysel çalışma (Anthoine et al., 1995).

Kısa duvar ele alındığında ise hasar oluşumlarında farklılıklardan bahsedilebilir. Sonlu Elemanlar Modelinde duvarın orta bölgesinde başlayan ve sonrasında harç bölgelerinde düşey doğrultuda devam eden bir hasar meydana gelmiştir. Deneysel çalışmada sol alt ve sağ üst bölgelerdeki açılmaların yanı sıra diyagonal kesme hasarı mevcuttur. Kafes model yaklaşımı ise deneysel çalışma ile birebir örtüşmektedir (Şekil 4.8). Yapı boyunun kısılmasıyla hasar oluşumunun eğilmeden diyagonal kesmeye döndüğü net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Önerilen yaklaşımın bu ayrıntıyı da başarılı bir şekilde ortaya koyduğu söylenebilir.

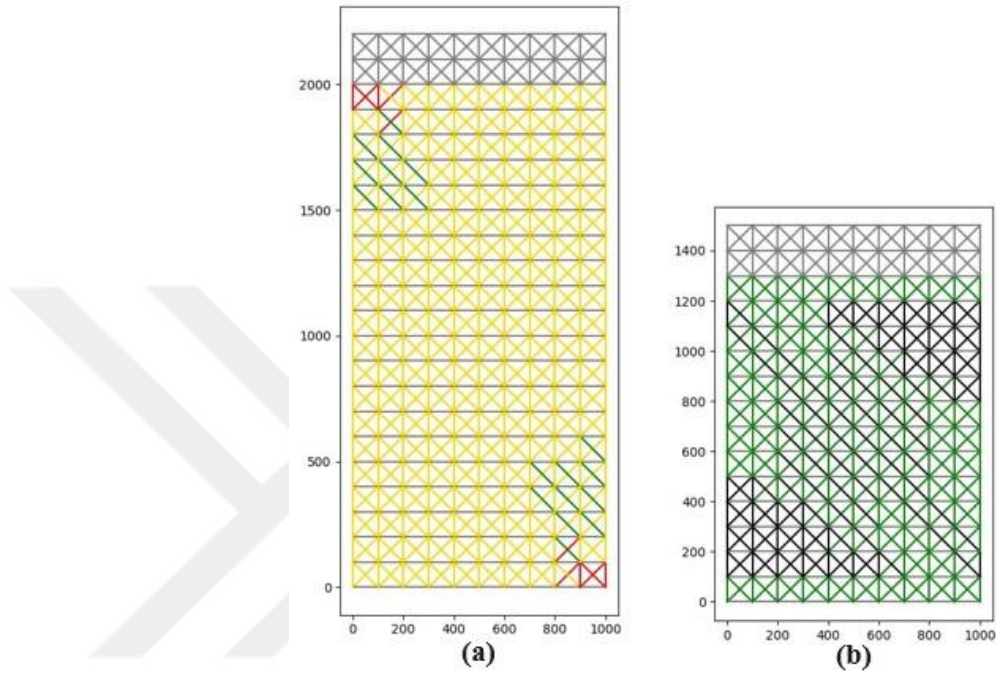


Şekil 4.8 Kısa duvarda hasar gelişimi: a) Kafes model, b) Sonlu Elemanlar Modeli (üzerinde asal basınç gerilme dağılımı belirtilmiştir (MPa)) (De Castro Oliveira, 2003), c) Deneysel çalışma (Anthoine et al., 1995).

Şekil 4.9’da her bir düşey ve diyagonal elemanın Şekil 3.10’daki performans düzeylerine göre hasar dağılımı görülmektedir. Tablo 4.7’de ise her bir hasar bölgesinde bulunan kafes eleman sayıları, Tablo 4.8’de eleman doğrultularına bağlı olarak yüzdesel dağılım verilmiştir. Yüksek duvarda ileri hasar düzeyi baskınken, görece olarak daha rijit bir davranış sergileyen kısa duvarda tüm elemanlar sınırlı veya belirgin hasar düzeyinde toplanmıştır.

Şekil 4.4’teki her iki duvar için elde edilen kapasite eğrileri (kafes model) dikkate alınarak yapıların tamamında meydana gelen ötelenme oranları hesaplanmıştır. Yüksek ve kısa duvarlar için gerçekleşen yatay deplasman değerleri sırasıyla 15.70 ve 4.37 mm’dir. Kapasite eğrilerinde kullanılan tepe düğüm noktalarının mesnet kotundan yüksekliği yüksek ve kısa duvarlar için sırasıyla 2200

ve 1500 mm'dir. Her iki duvar için de hesaplanan kat ötelenme oranları sırasıyla %0.71 ve %0.29'dur. Şekil 3.10'daki performans düzeylerine göre yüksek duvar ileri hasar bölgesinin başlarında iken kısa duvar sınırlı ile belirgin hasar bölgelerinin kesişiminde yer almaktadır. Bu sonuç kafes elemanların tek tek incelendiği durumla yaklaşık olarak benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.9 Performans düzeyine bağlı hasar oluşumları: a) HW, b) LW.

Tablo 4.7 Hasar bölgelerindeki kafes eleman sayıları (adet).

Duvar Modeli	Sınırlı Hasar Bölgesi (Siyah)	Belirgin Hasar Bölgesi (Yeşil)	İleri Hasar Bölgesi (Sarı)	Göçme Bölgesi (Kırmızı)
HW	0	19	589	12
LW	147	256	0	0

Tablo 4.8 Hasar bölgelerindeki kafes eleman sayılarının doğrultularına bağlı olarak yüzdelik dağılımı (%).

Duvar Modeli	Eleman Doğrultusu	Sınırlı Hasar Bölgesi (Siyah)	Belirgin Hasar Bölgesi (Yeşil)	İleri Hasar Bölgesi (Sarı)	Göçme Bölgesi (Kırmızı)
HW	Düşey	0.0	0.0	98.2	1.8
	Diagonal	0.0	4.8	93.3	2.0
LW	Düşey	26.6	73.4	0.0	0.0
	Diagonal	41.9	58.1	0.0	0.0

4.3 Uygulama III (W-m-1)

Üçüncü örnek olarak 1.56 x 3.30 x 0.24 m (yükseklik x genişlik x derinlik) boyutlarında ve yükseklik/genişlik oranı 0.5 olan deneysel (Xu et al., 2018) ve nümerik (Pirsaheb et al., 2020b) olarak incelenmiş bir yapı seçilmiştir. Duvarın üzerine inşa edilen betonarme kiriş vasıtasıyla yapı çelik yükleme başlığına bağlanmış ve sonrasında yaklaşık 669 kN'luk eksenel yük uygulanmıştır. Yatay yükleme ise deneysel çalışmada çift yönlü tekrarlı, nümerik çözümlemede tek yönlü olarak uygulanmıştır.

Kafes model yaklaşımında kullanılan malzeme parametrelerine ait sayısal değerler (Tablo 4.9) Pirsaheb et al. (2020b) tarafından gerçekleştirilen nümerik çalışmadan alınmıştır. Maksimum kayma dayanım değeri ise Mohr-Coulomb formülasyonu yardımıyla 0.71 MPa olarak hesaplanmıştır. Çalışmada kohezyon değeri ise 0.373 MPa olarak belirtilmiştir.

Tablo 4.9 Malzeme parametreleri (MPa).

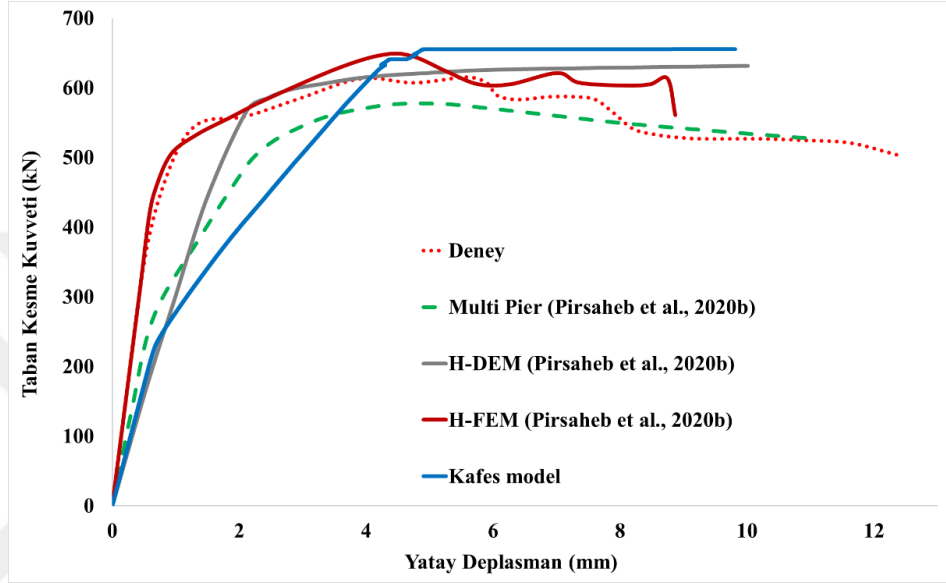
E_c	G	f_{cm}	f_{tm}	τ_u	τ_{res}
3096	1238	5.63	0.18	0.71	0.70

Çeşitli eleman boyutları ($M = 100, 150$ ve 300 mm) ve 45° 'lik eğim açısı kullanılarak üç farklı kafes model oluşturulmuştur. Çelik kirişte dönme hareketi büyük ölçüde kısıtlandığı için Master-Slave Method uygulanmıştır. Hesaplamalarda zati ağırlık ihmal edilmiş ve hata oranı -0.35 mm olarak varsayılmıştır. Yatay yükleme tek doğrultulu olarak uygulanmıştır.

Hasar oluşumu ve kapasite eğrisi dikkate alınarak, optimum eleman boyutu 150 mm olarak belirlenmiştir. Kapasite eğrisinin belirlenmesinde taban kesme kuvvetine karşılık yığma duvarın üst orta noktasındaki yatay yer değiştirme değeri dikkate alınmıştır. 150 mm eleman boyutuyla tasarlanan kafes modelde çelik kiriş de dahil olmak üzere 1134 kafes eleman ve 321 düğüm noktası bulunmaktadır.

Şekil 4.10'da deneysel çalışmanın yanı sıra alternatif nümerik yaklaşımlarla elde edilmiş kapasite eğrilerine ve kafes modele ait sonuca yer verilmiştir. Multi-

Pier metoduyla kafes modelin davranışı başlangıçta paralellik gösterse de eriştikleri maksimum taşıma kapasiteleri arasında farklılık mevcuttur. Ayrıca her iki yaklaşımda da deney sonucuna kıyasla daha erken plastik deformasyon oluşmaya başlamış ve daha kısıtlı bir kapasite eğrisi gözlemlenmiştir. Fakat kafes model ile ulaşılan maksimum taşıma kapasitesi, deney ve diğer nümerik yaklaşımlarla uyumludur.



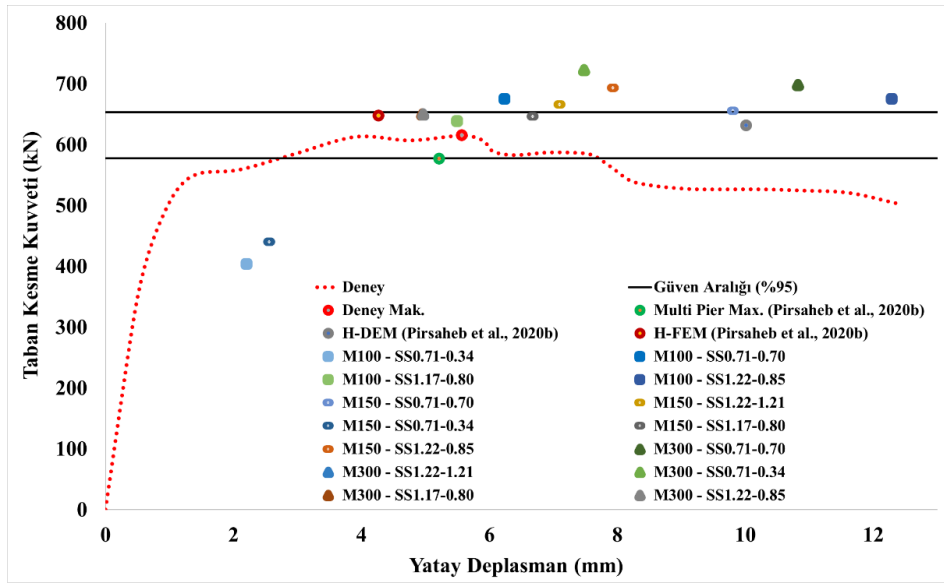
Şekil 4.10 Kapasite eğrileri (Multi-Pier: Pirsahab et al. (2020b) tarafından geliştirilen yöntem; H-DEM: Heterojen Ayırık Elemanlar Yöntemi; H-FEM: Heterojen Sonlu Elemanlar Yöntemi).

Bir önceki örnek uygulamadakine benzer şekilde, eleman boyutlarının yanı sıra maksimum kayma dayanım değeri ($SS = 0.71, 1.17$ ve 1.22 MPa) çeşitlendirilerek bir güven aralığı tanımlanmıştır. Ayrıca kohezif etkinin kademeli olarak azalmasının sonuçlara yansımaları da güven aralığına dahil edilmiştir. Toplamda 14 analiz gerçekleştirilmiş ve güven aralığına ait bilgiler Tablo 4.10'da belirtilmiştir.

Tablo 4.10 Güven aralığı ve ilgili parametre değerleri.

Duvar Modeli	Alpha	Boyut	Standard Sapma	Güven Aralığı (kN)
W-m-1	0.05	18	82.38	615.1 + 38.1 615.1 - 38.1

Sonuçların genel olarak güven aralığının üst limiti civarında kümелendiği söylenebilir (Şekil 4.11). Yatay yer değiştirme değerleri ise yoğunlukla 4-10 mm aralığında değişmektedir. 300 mm eleman boyutuna ait analiz sonucu hariç kayma dayanımının 0.71 MPa olduğu analizlerde kohezif etkinin kaldırılması yetersiz taşıma kapasitesine sebebiyet vermektedir. Kayma dayanım değerinin 1.22 MPa olarak seçildiği durumda ise analizlerin tamamında erişilen maksimum taban kesme kuvveti güven aralığının üst sınırında veya üzerindedir. Bununla birlikte aynı kayma dayanım değerinde eleman boyutunun 100 ve 150 mm olduğu kafes modellerin orta bölgelerinde beklenmedik basınç hasarları gözlemlenmiştir.

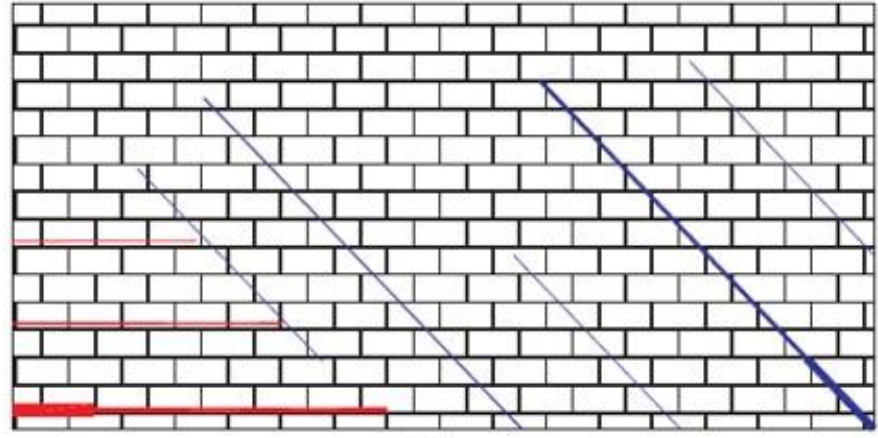


Şekil 4.11 Güven aralığı.

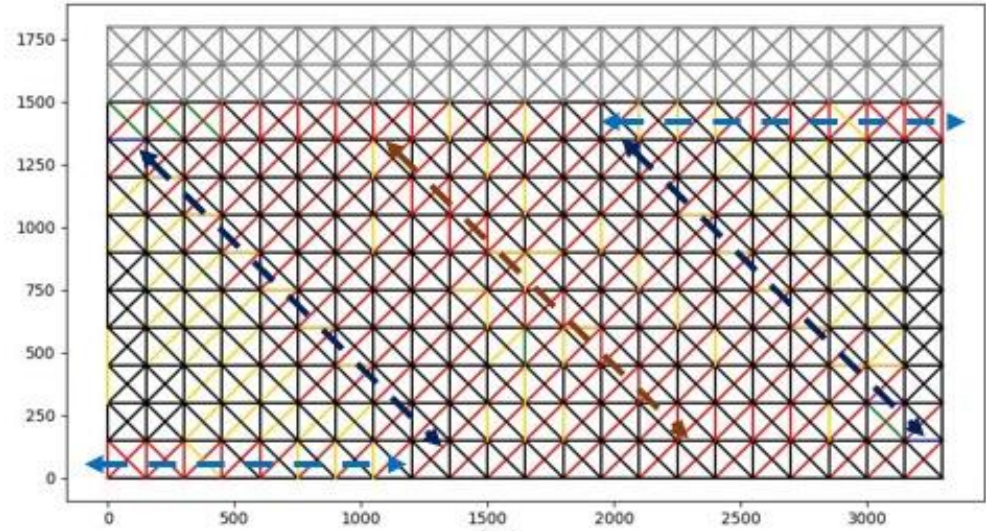
Hasar oluşumu incelendiğinde ise yüklemdeki farklılığın sonuçlar üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Deneysel çalışmada ilk olarak sol alt köşeden başlayan ve neredeyse bütün duvar boyu devam eden yatay harç bölgesinde kayma hasarı meydana gelmiştir. Sonrasında yükün artmasıyla çapraz diyagonal hasar neticesinde duvar taşıma kapasitesini yitirmiştir (Şekil 4.12a) (Xu et al., 2018). Multi-Pier yaklaşımına ait sonuç incelendiğinde ise göçmeye çeşitli genişliklerdeki diyagonal çatlakların sebebiyet verdiği vurgulanmıştır. Ayrıca sol alt kısımda çekme çatlaklarının gözlemlendiği belirtilmiştir (Şekil 4.12b) (Pirsaheb et al., 2020b).



(a)



(b)

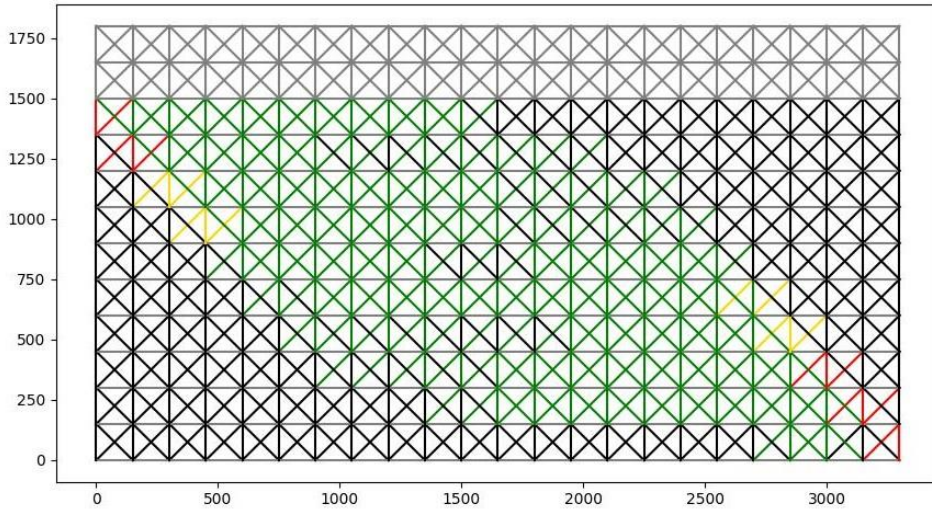


(c)

Şekil 4.12 Hasar oluşumları: a) Deney (Xu et al., 2018), b) Multi-Pier (Pirsaheb et al., 2020b), c) Kafes model.

Yüklemedeki benzerlik sebebiyle kafes modele ait hasar oluşumu Multi-Pier yaklaşımıyla uyum içerisindedir. Diyagonal kesme hasarlarının öncelikle siyah kesikli çizgiler boyunca oluşmaya başladığı sonrasında tüm yapıya hâkim olduğu gözlemlenmiştir. Ek olarak bahsi geçen çizgi hatları boyunca yatay elemanlarda da plastik deformasyonlar tespit edilmiştir ki, bu da o bölgelerde daha geniş bir çatlağın meydana geleceğinin göstergesidir. Ayrıca sol alt ve sağ üst bölgelerde açık mavi kesikli çizgi ile tanımlanan çekme çatlaklarının meydana geldiği görülebilmektedir (Şekil 4.12c).

Şekil 4.13'te her bir düşey ve diyagonal elemanın Şekil 3.10'daki performans düzeylerine göre hasar dağılımı görülmektedir. Tablo 4.11'de ise her bir hasar bölgesinde bulunan kafes eleman sayıları, Tablo 4.12'de eleman doğrultularına bağlı olarak yüzdesel dağılım verilmiştir. Yoğunlukla sınırlı ve belirgin hasar düzeyinde deformasyon olduğu söylenebilir.



Şekil 4.13 Performans düzeyine bağlı hasar oluşumu.

Tablo 4.11 Hasar bölgelerindeki kafes eleman sayıları (adet).

Duvar Modeli	Sınırlı Hasar Bölgesi (Siyah)	Belirgin Hasar Bölgesi (Yeşil)	İleri Hasar Bölgesi (Sarı)	Göçme Bölgesi (Kırmızı)
W-m-1	345	301	11	13

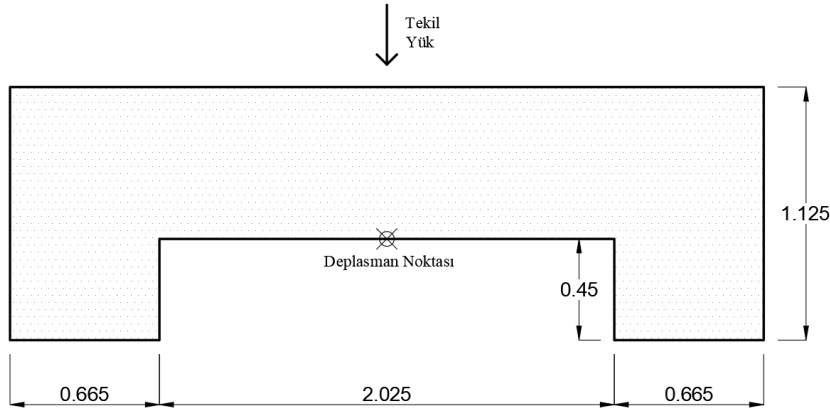
Tablo 4.12 Hasar bölgelerindeki kafes eleman sayılarının doğrultularına bağlı olarak yüzdelik dağılımı (%).

Duvar Modeli	Eleman Doğrultusu	Sınırlı Hasar Bölgesi (Siyah)	Belirgin Hasar Bölgesi (Yeşil)	İleri Hasar Bölgesi (Sarı)	Göçme Bölgesi (Kırmızı)
W-m-1	Düşey	50.9	45.7	1.3	2.2
	Diagonal	51.8	44.5	1.8	1.8

Şekil 4.10'daki kafes model ile elde edilen kapasite eğrisi dikkate alınarak yapının tamamında meydana gelen ötelenme oranı hesaplanmıştır. Yükleme sonucunda ortaya çıkan yatay deplasman değeri 9.81 mm'dir. Kapasite eğrisinde kullanılan tepe düğüm noktasının mesnet kotundan yüksekliği 1500 mm ve hesaplanan kat ötelenme oranı %0.65'tir. Şekil 3.10'daki performans düzeylerine göre yapı belirgin hasar bölgesinde yer almaktadır. Bu sonuç kafes elemanların tek tek incelendiği durumla kısmen benzerlik göstermektedir. Bir önceki iteratif adımda elde edilen yatay deplasman değerine (4.90 mm) göre hesap yapıldığında ise oran %0.33'tür. Yeni oran değeri kafes elemanların tek tek ele alındığı sonuçla daha iyi örtüşmektedir. Son iteratif adımda yapının taşıma kapasitesini yitirdiği ve çok kısıtlı yük artışına karşın ciddi bir yatay yer değiştirme yaptığı söylenebilir.

4.4 Uygulama IV (Wall Panel)

Son yığma duvar örneğinde boşluklu bir yapı ele alınmıştır. Yüksekliği ve genişliği sırasıyla 1.115 x 3.355 m'dir. Duvarın orta alt bölgesinde 0.45 x 2.025 m (yükseklik x genişlik) boyutlarında boşluk bulunmaktadır (Şekil 4.14). Derinliği ise 0.1025 m'dir. Duvarın düşey tekil yükleme etkisindeki davranışı araştırılmış ve 4 kere tekrarlanan deneysel çalışmada 3.69 - 5.67 kN aralığında değişen kırılma yüklerine erişilmiştir (Sarhosis et al., 2010). Ayrıca yapı iki farklı nümerik yaklaşımla incelenmiştir (Giamundo et al., 2014).



Şekil 4.14 Geometrik ölçüler (m).

Kafes modelde kullanılan malzeme parametrelerine ait sayısal değerler (Tablo 4.13) Giamundo et al. (2014) tarafından gerçekleştirilen nümerik çalışmadaki mikro yaklaşımda kullanılan verilerden türetilmiştir. Eksik parametreler için ise varsayımlar yapılmıştır. Kayma Modülü Elastisite Modülünün %40'ı olarak kabul edilmiş ve maksimum basınç dayanımı 3 MPa olarak hesaplamalarda dikkate alınmıştır. Başlangıç durumunda yapının zati ağırlığı hariç ek bir düşey yük olmaması nedeniyle maksimum kayma dayanımı kohezyon değerine eş varsayılmıştır.

Tablo 4.13 Malzeme parametreleri (MPa).

E_c	G	f_{cm}	f_{tm}	τ_u	τ_{res}
1600	640	3	0.05	0.052	0.051

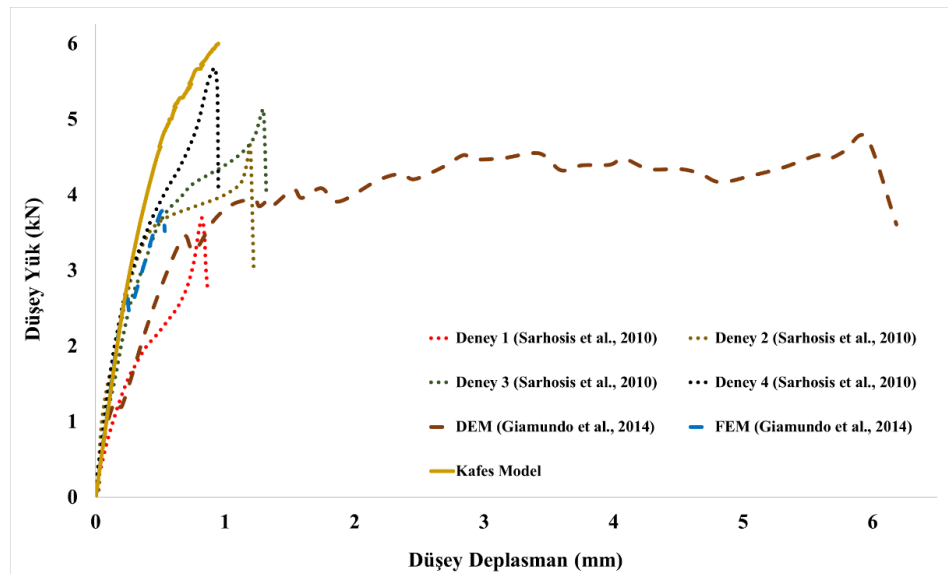
75 ve 100 mm olmak üzere iki farklı eleman boyutu kullanılarak iki farklı kafes model tasarlanmıştır. Tekil yüklemenin olduğu bölgede lokal hasarların önüne geçebilmek için çelik başlık oluşturulmuş ve başlığa ait düğüm noktaları birbirine Master-Slave Method ile bağlanmıştır. Hesaplamalara zati ağırlık dahil edilmiş, fakat yük-deplasman eğrisinde düşey yüke olan katkısı dikkate alınmamıştır. Tüm sayısal analizler 6 kN'luk sabit bir düşey yük etkisinde gerçekleştirilmiştir.

Hem hasar oluşumundaki hem de kapasite eğrisindeki uyum dikkate alındığında, 75 mm eleman boyutuyla oluşturulan kafes modelin daha tutarlı sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür. Ayrıca yapının geometrisi de oldukça

başarılı bir şekilde temsil edilebilmektedir. Kapasite eğrisinin belirlenmesinde düşey yüke karşılık yığma duvardaki boşluğun üst orta noktasındaki düşey yer değiştirme değeri dikkate alınmıştır (Bkz. Şekil 4.14). 75 mm eleman boyutuyla tasarlanan kafes modelde çelik başlık da dahil olmak üzere 2150 kafes eleman ve 591 düğüm noktası bulunmaktadır.

Şekil 4.15'te deneysel ve alternatif nümerik yaklaşımlarla elde edilen kapasite eğrilerine ait sonuçlar verilmiştir. Giamundo et al. (2014) tarafından Ayrık Elemanlar (DEM) ve Sonlu Elemanlar (FEM) Yöntemleri kullanılarak tasarlanan modeller üzerinden sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sonlu Elemanlarda ise mikro modelleme yaklaşımı tercih edilmiştir. Kafes modele ait kapasite eğrisinin deneysel çalışma sonuçlarıyla örtüştüğü görülmüştür. Ayrıca maksimum taşıma kapasiteleri arasında fark olsa da eğrinin davranışı açısından FEM sonucuyla da tutarlı olduğu söylenebilir. DEM'den elde edilen sonuç ise diğerlerine kıyasla çok daha büyük bir düşey deplasman sergilemiştir.

Burada kafes model için bir hata oranı tanımlanmamış olması nedeniyle maksimum taşıma kapasitesi tespiti yapılmamıştır. Uygulanan 6 kN'luk düşey yükleme etkisinde kapasite eğrisinin değişimi ve yapıdaki hasar oluşumu dikkate alınarak sonuçlar yorumlanmıştır.



Şekil 4.15 Kapasite eğrileri.

Malzeme parametre değerlerinin mikro modelleme yaklaşımına ait verilerden türetilmiş olması nedeniyle güven aralığının tanımlanmasında Elastisite Modülüne, Kayma Modülüne ve maksimum basınç dayanımına eleman boyutuyla birlikte yer verilmiştir. Toplamda 16 analiz gerçekleştirilmiş ve güven aralığına ait bilgiler Tablo 4.14'te belirtilmiştir. Güven aralığında dört deneysel çalışmada ulaşılan maksimum kırılma yüklerinin ortalaması (4.77 kN) dikkate alınmıştır.

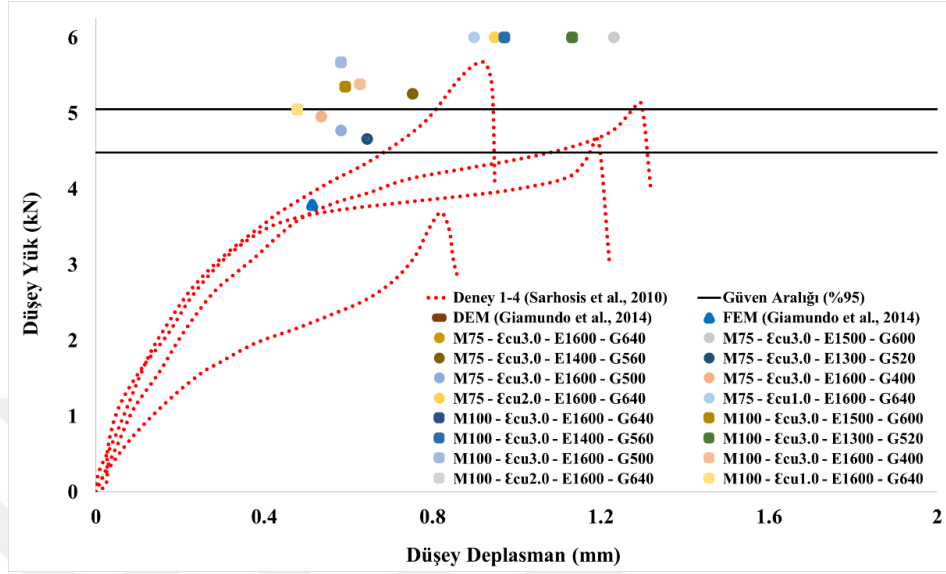
Tablo 4.14 Güven aralığı ve ilgili parametre değerleri.

Duvar Modeli	Alpha	Boyut	Standard Sapma	Güven Aralığı (kN)
Wall Panel	0.05	22	0.69	4.77 + 0.29 4.77 - 0.29

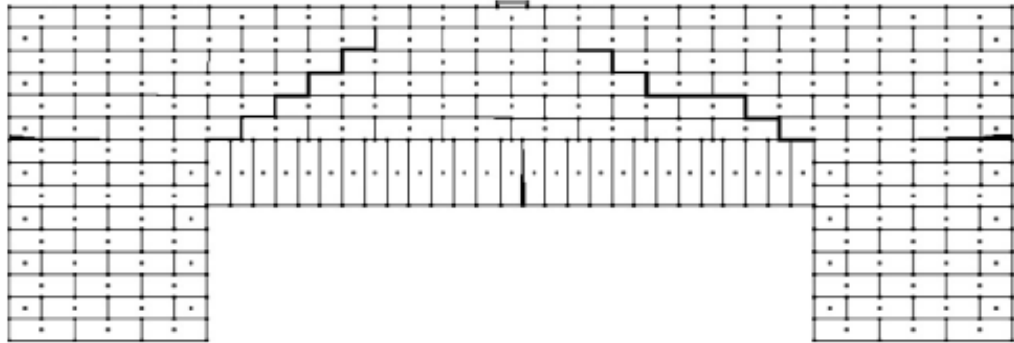
Genel olarak 100 mm eleman boyutuyla tasarlanan kafes modelin biraz daha yüksek bir kapasite eğrisi oluşturduğu gözlemlenmiştir. Fakat yine de her iki eleman boyutunun davranışları benzerlik göstermektedir (Şekil 4.16). Sayısal analizlerde dört farklı Elastisite Modülü dikkate alınmıştır. 75 mm eleman boyutuyla elde edilen sonuçlarla Sonlu Elemanlar Modelinin başlangıç rijitliğindeki uyum göz önünde bulundurularak, Elastisite Modülünün 1600 MPa olarak hesaplamalarda dikkate alınmasına karar verilmiştir. Aynı eleman boyutuyla gerçekleştirilen analizlerde Elastisite Modülünü veya sadece Kayma Modülünü azaltmak taşıma kapasitesinde düşüşe neden olmuştur. Basınç dayanımının değiştirilmesi ise sonuçlarda herhangi bir değişikliğe neden olmamıştır. Her bir analiz 6 kN'luk sabit dış yükleme etkisinde çözüme ulaşmış olsa da kapasite eğrisinin oluşumunun tutarlı ve makul olup olmadığı incelenmiş ve uygun görülmediği yerde maksimum taşıma kapasitesine eriştiği varsayılmıştır. DEM maksimum taşıma kapasitesine yaklaşık 5.77 mm'de ulaşmıştır.

Hasar oluşumlarının birbiriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Giamundo et al. (2014) tarafından gerçekleştirilen sayısal analizlerde ilk çatlağın açıklığın orta bölgesinde meydana geldiği belirtilmiştir. Kafes modelde de benzer şekilde hasar oluşumu öncelikle açıklığın orta bölgesindeki yatay elemanlarda plastik deformasyonların başlamasıyla ortaya çıkmıştır. Bununla beraber aynı noktadan düşey doğrultuda ilerleyen çekme hasarı gözlemlenmiştir. Ayrıca diyagonal kesme hasarları ve köşelerdeki açılmalar oluşmaya başlamıştır. Şekil

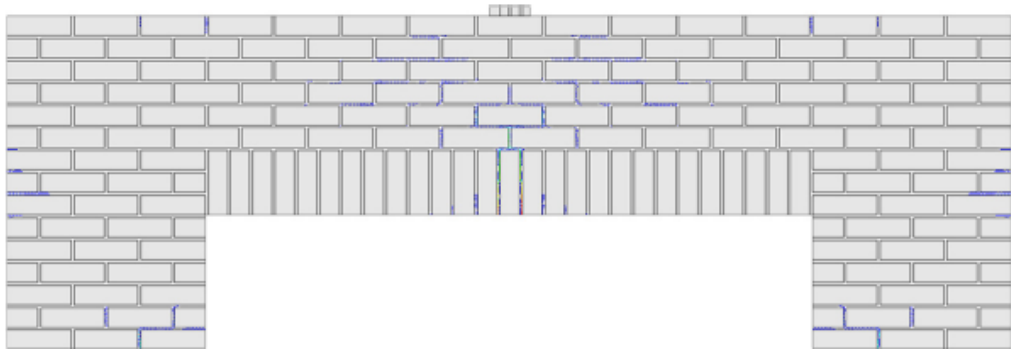
4.17’de iki farklı nümerik çalışmaya ve kafes modele ait nihai hasar oluşumları görülmektedir. Şekil 4.18’de ise kafes modele ait farklı düşey yük seviyelerindeki hasar oluşumları verilmiştir.



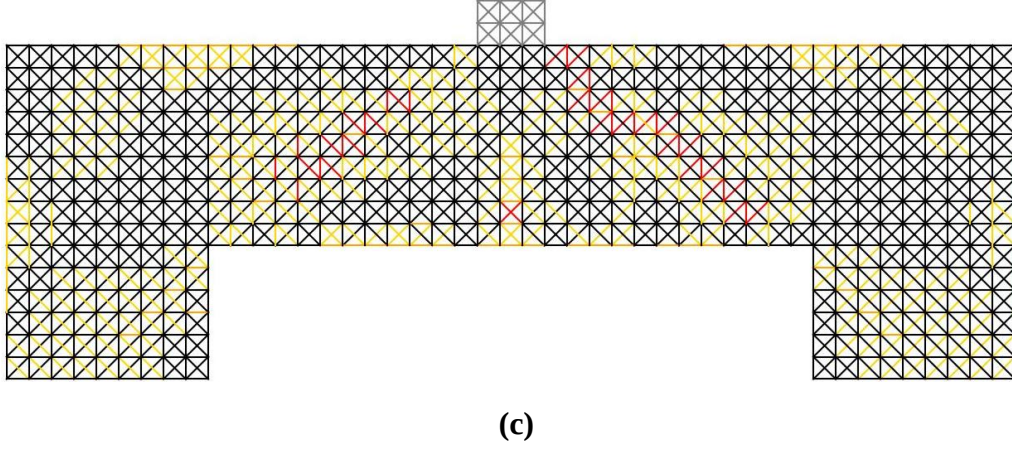
Şekil 4.16 Güven aralığı.



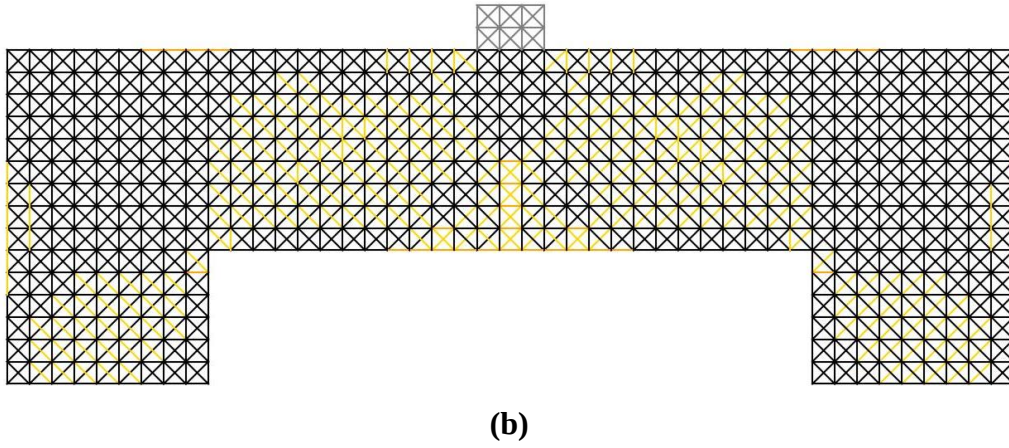
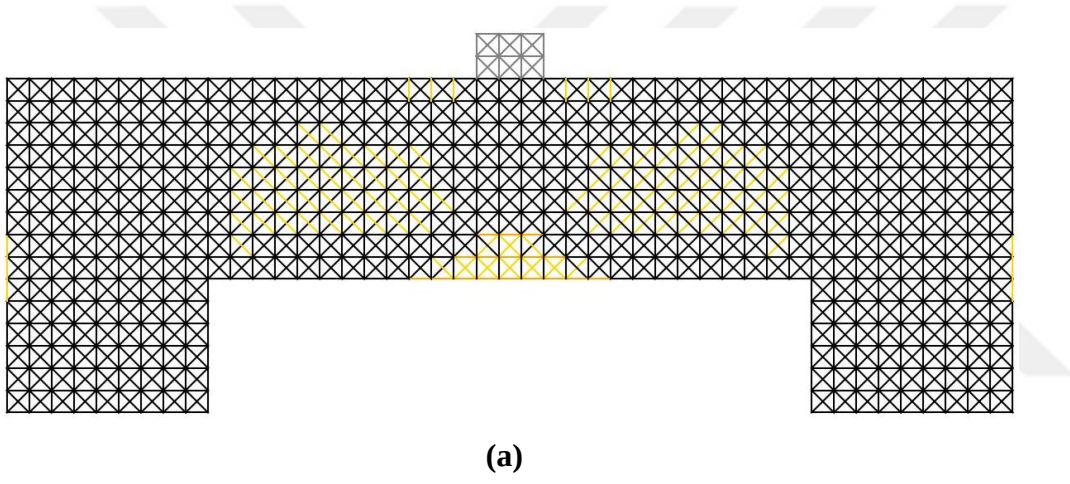
(a)

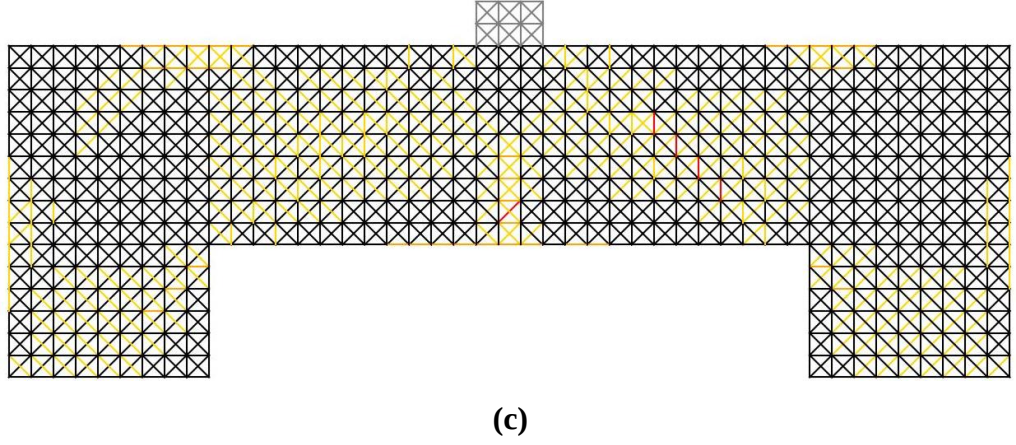


(b)



Şekil 4.17 Hasar oluşumları: a) DEM (Giamundo et al., 2014), b) FEM (Giamundo et al., 2014), c) Kafes model.

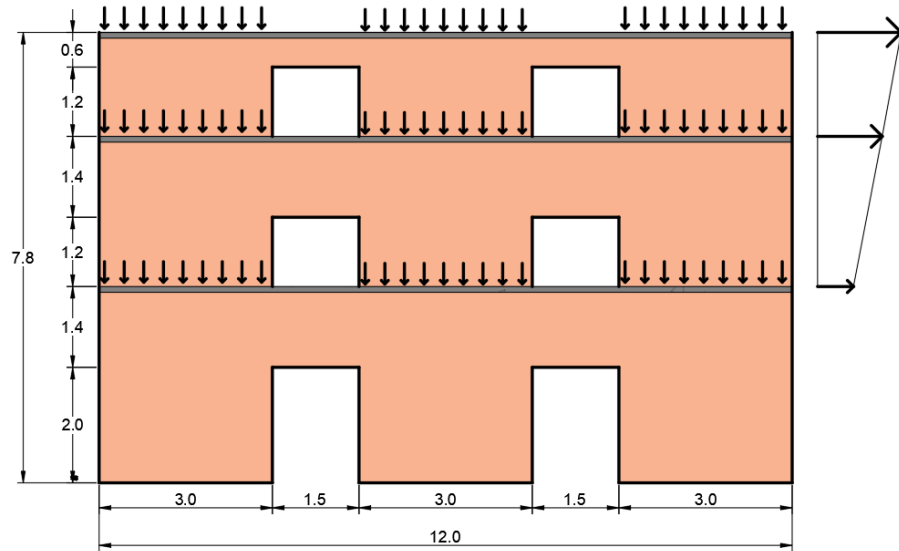




Şekil 4.18 Düşey yük seviyesine bağlı kafes model hasar oluşumları: a) 3 kN, b) 4.5 kN, c) 5.25 kN.

4.5 Uygulama V (Çok Katlı Yapı)

Son doğrulama örneğinde toplam boyutları 7.80 x 12.0 x 0.175 m (yükseklik x genişlik x derinlik) olan üç katlı yığma yapı ele alınmıştır (Şekil 4.19). Katlar birbirinden betonarme döşemeyle ayrılmış ve her bir kat hizasında düşey taşıyıcı duvarlara zati ve hareketli yükleri temsilen toplamda 127.8 kN'luk eksenel kuvvet uygulanmıştır.



Şekil 4.19 Geometrik ölçüler (m) ve yükleme durumu.

Yatay yükleme ise ters üçgen formunda katların etki katsayıları dikkate alınarak uygulanmıştır. İlk kattan son kata doğru etki katsayıları sırasıyla 0.43, 0.77

ve 1.00'dır. Toplamda yapı 330 kN'luk bir yatay kuvvete maruz bırakılmıştır. Daha önce nümerik olarak iki farklı çalışmada incelenen yapıya yatay yükleme statik itme (pushover) yöntemiyle uygulanmıştır (Milani et al., 2009; Pirsheeb et al., 2021).

Kafes modele ait malzeme parametre değerleri (Tablo 4.15) Pirsheeb et al. (2021) tarafından gerçekleştirilen nümerik çalışmadan alınmıştır. Maksimum kayma dayanım değeri ise Mohr-Coulomb formülasyonu ile hesaplanmıştır. Fakat kayma dayanım değeri katlara, boşluklu veya dolu kesit gerilme dağılımına ve zati ağırlığın dahil edilip edilmemesine göre değişkenlik göstermektedir (Tablo 4.16). Boşluklu kesitten kastedilen kapı veya pencere alanlarının kesit alanından çıkarılmasıdır. Artık kayma dayanımı ise maksimum kayma dayanım değerinin 0.01 MPa eksiği olarak varsayılmıştır. Tablo 4.16'daki τ_{u1} , τ_{u2} ve τ_{u3} sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü kattaki maksimum kayma dayanım değerlerini, σ_{v1} , σ_{v2} ve σ_{v3} sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü kattaki eksenel gerilme değerlerini temsil etmektedir. Kat döşemelerindeki betonarme yapının davranışı doğrusal varsayılmış ve Elastisite Modülü 28 GPa olarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Yapının birim hacim ağırlığı ise 10.80 kN/m³ olarak belirtilmiştir.

Tablo 4.15 Malzeme parametreleri (MPa).

E_c	G	f_{cm}	f_{tm}	c
1650	660	3.00	0.06	$1.4 * f_{tm}$

Tablo 4.16 Maksimum kayma dayanım değerleri (MPa).

	c	σ_{v1}	τ_{u1}	σ_{v2}	τ_{u2}	σ_{v3}	τ_{u3}
Zati ağırlık hariç							
Boşluklu Kesit (BK)	0.084	0.243	0.181	0.162	0.149	0.081	0.116
Dolu Kesit (DK)	0.084	0.183	0.157	0.122	0.133	0.061	0.108
Zati ağırlık dahil							
Boşluklu Kesit	0.084	0.340	0.220	0.217	0.171	0.103	0.125
Dolu Kesit	0.084	0.255	0.186	0.163	0.149	0.077	0.115

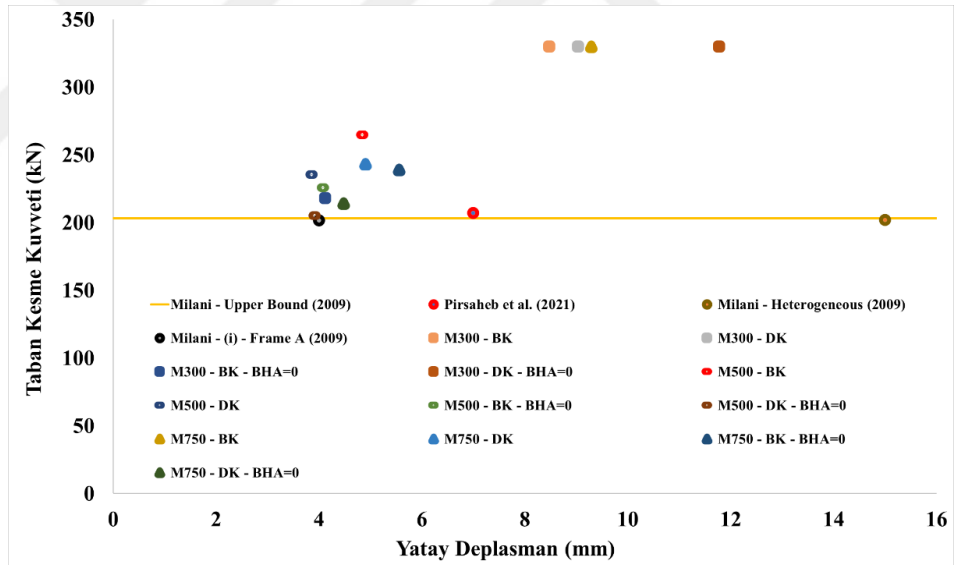
Yapı, önerilen yaklaşım aracılığıyla üç farklı eleman boyutu ($M = 300, 500$ ve 750 mm) ile ayrı ayrı modellenmiştir. Boyutun değişmesi kat yüksekliklerinde farklılıklar oluşmasına neden olmaktadır (Tablo 4.17). Her bir kattaki betonarme döşemeyi temsil eden düğüm noktalarının hareketleri kendi içlerinde birbirlerine

Master-Slave Method kullanılarak bağlanmıştır. Hata oranı -0.25 mm olarak kabul edilmiş ve yatay yükleme tek doğrultulu olarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.17 Eleman boyutlarına bağlı kat yükseklikleri (m).

	Örnek Yapı	Eleman Boyutu		
		300	500	750
Kat 1	3.40	3.60	3.50	3.75
Kat 2	6.00	6.30	6.00	6.75
Kat 3	7.80	8.10	7.50	9.00

Üç farklı eleman boyutunun yanı sıra dolu veya boşluklu kesit alanına ve zati ağırlığın analizlere dahil edilip edilmemesi durumuna ($BHA = 0$ ise dahil edilmemiştir) göre sonuçlar değerlendirilmiştir (Şekil 4.20). Kapasite eğrilerinin belirlenmesinde taban kesme kuvvetine karşılık en tepe noktada bulunan ortadaki düğümün yatay yer değiştirme değeri dikkate alınmıştır.

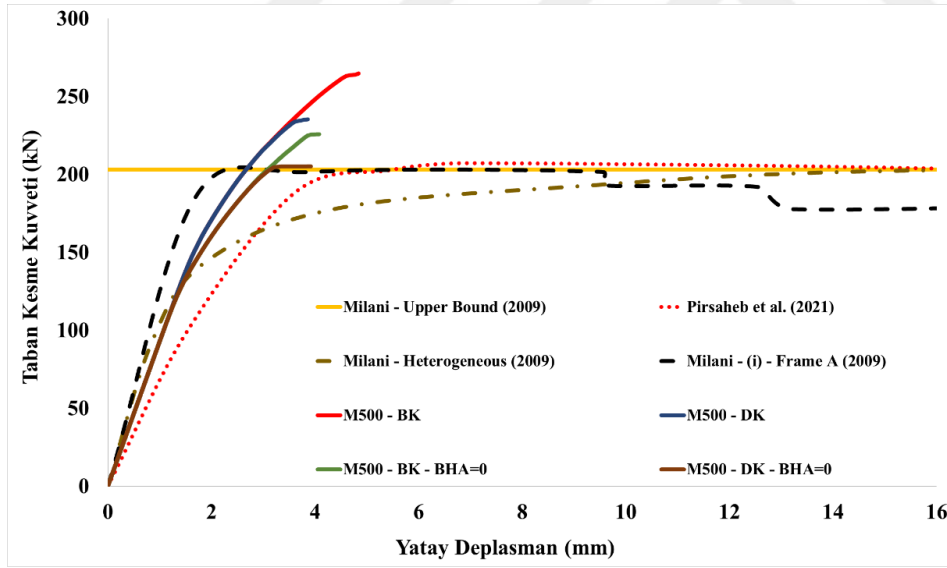


Şekil 4.20 Farklı eleman boyutları ve koşullara ait analiz sonuçları.

300 mm eleman boyutuyla tasarlanan kafes model bir analiz sonucu hariç tamamında uygulanan toplam yükün çözümünü sağlamıştır. 750 mm eleman boyutuna dizayn edilen kafes modelde ise bir analiz için benzer durum söz konusudur. Diğer sonuçlar ise sınır değer olarak kabul edilen 203 kN'un biraz üzerinde 200-260 kN aralığında kümelenmiştir. 300 mm gibi görece daha küçük eleman boyutlarının tercih edilmesi toplam çubuk sayısını arttırmakta ve böylece

yapının doğrusal olmayan davranış kapasitesi yükselmektedir. En tutarlı sonuçların 500 mm eleman boyutu ile sağlanmasının yanı sıra geometrik ölçü açısından da en uyumlu boyut olması nedeniyle optimum değer olarak seçilmiştir. 500 mm eleman boyutuyla tasarlanan kafes modelde 1315 kafes eleman ve 376 düğüm noktası bulunmaktadır.

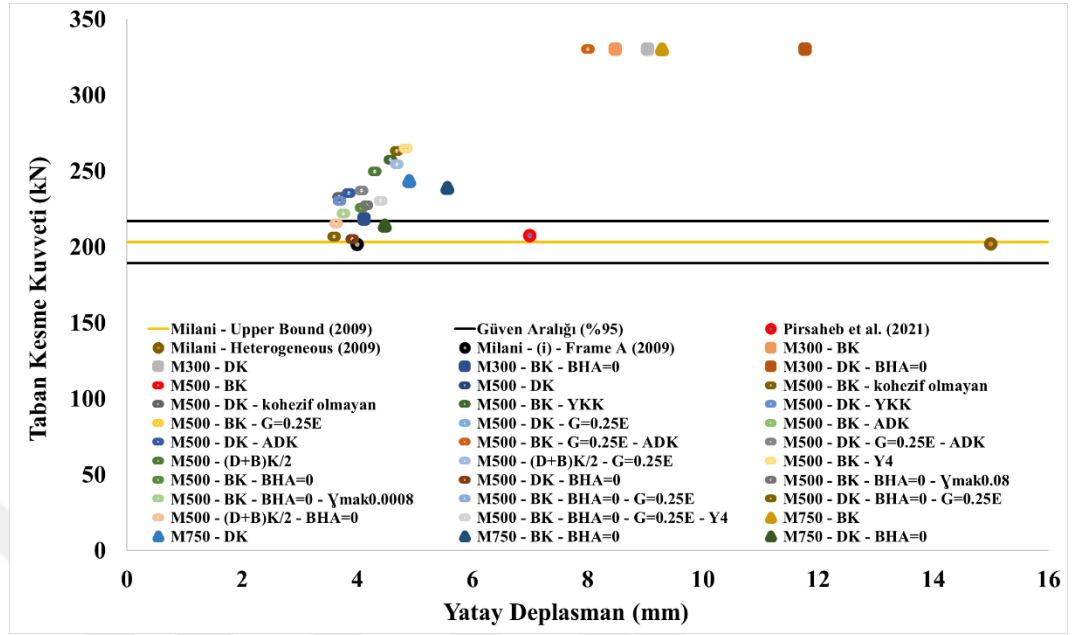
Başlangıç rijitliklerinin ve erişilen maksimum taşıma kapasitesi değerlerinin literatür çalışmalarıyla tutarlı olduğu Şekil 4.21’de görülmektedir. Fakat tercih edilen yükleme metodu nedeniyle kafes modelin erişilen maksimum taşıma kapasitesinden sonra analizlere devam etmemesi, yatay deplasmanların daha kısıtlı olarak sonuçlara yansımaya neden olmaktadır. 500 mm eleman boyutu için boşluklu kesitin taşıma kapasitesi dolu kesite göre ortalamada yaklaşık %11 daha fazladır, bunun da temel sebebi boşluklu kesitteki kayma dayanım değerlerinin daha yüksek olmasıdır. Aynı eleman boyutu için zati ağırlığın analizlere dahil edilmesi modelin taşıma kapasitesini ortalamada yaklaşık %15.5 artırmaktadır.



Şekil 4.21 Taban kesme kuvvetine karşılık tepe noktadaki deplasman değeri.

Parametre değerlerindeki belirsizliğin yüksek olması nedeniyle çeşitli kombinasyonlar oluşturularak kapsamlı bir güven aralığı tanımlanmıştır. Toplamda 4 literatür ve 31 kafes model sonucunun yer aldığı güven aralığına ait parametre değerleri Tablo 4.18’de, sonuçlar ise Şekil 4.22’de verilmiştir. Elde edilen

sonuçların genel olarak güven aralığının üst limitinde veya biraz üzerinde kümелendiği söylenebilir.



Şekil 4.22 Güven aralığı.

Tablo 4.18 Güven aralığı ve ilgili parametre değerleri.

Duvar Modeli	Alpha	Boyut	Standard Sapma	Güven Aralığı (kN)
Çok Katlı Yapı	0.05	35	41.87	203 + 13.87 203 - 13.87

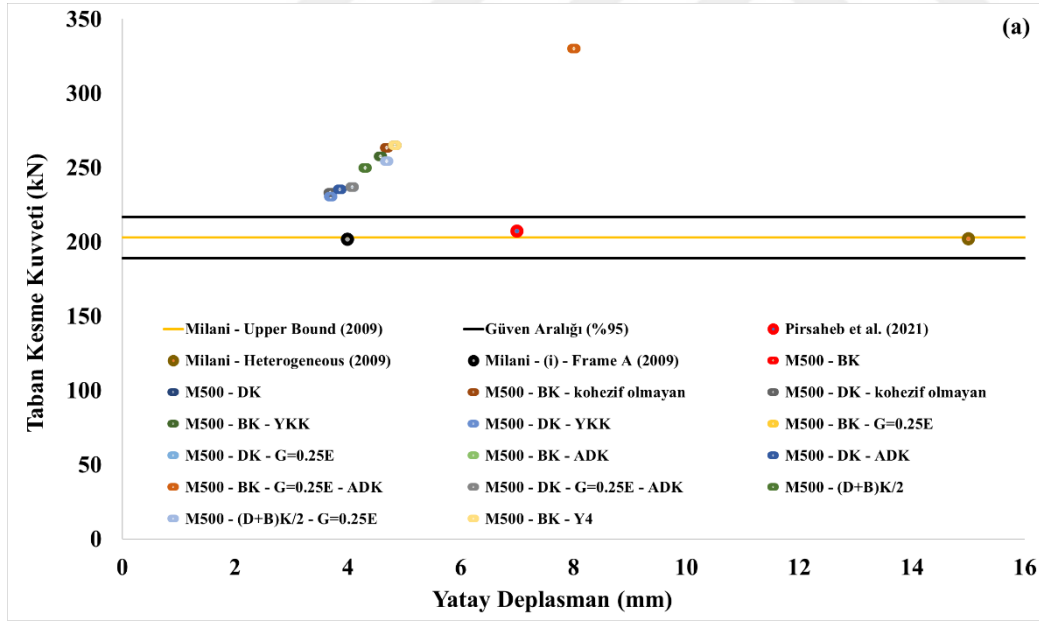
Güven aralığı içerisinde:

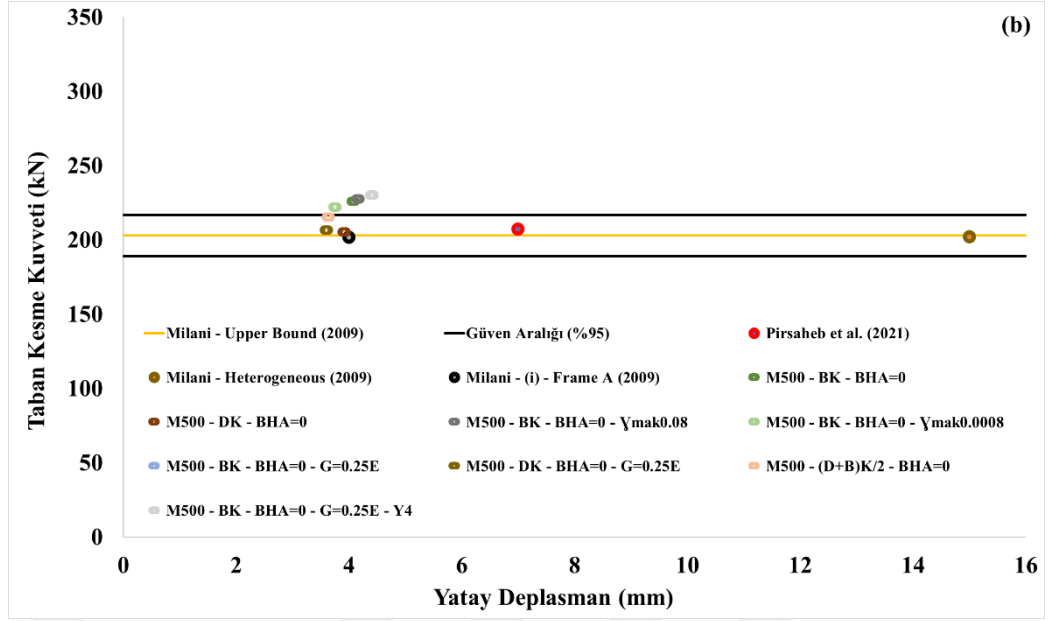
- Eleman boyutu etkisi,
- Boşluklu veya dolu kesite göre kayma dayanımı hesabı,
- Zati ağırlık etkisi,
- Kayma Modülünün $G = 0.40E$ yerine $G = 0.25E$ alınması,
- Maksimum kayma birim deformasyonun $\gamma_{mak} = 0.08$ veya 0.0008 alınması (normalde 0.008),
- Kat hizalarındaki düşey yükün tüm betonarme düğüm noktalarına dağıtılması (ADK),

• Alternatif kayma dayanım değerlerinin belirlenmesi (kat kütesinin yarısının dikkate alındığı (YKK), pencere alt bölgelerinde düşey yükün dahil edilmediği (Y4), dolu ve boşluklu kesitten elde edilen değerlerin ortalamasının alındığı $((D+B)K/2)$, kohezyon etkisinin olmadığı) gibi çeşitli durumlar yer almaktadır.

Bu koşullar tek başına veya birkaç tanesi kombine edilerek hesaplamalara dahil edilmiştir. Parametre sayısının oldukça fazla olması nedeniyle kıyaslamalar genellikle optimum eleman boyutu 500 mm ile tasarlanan kafes model üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Şekiller 4.23a ve b’de zati ağırlığın dahil olduğu ve hariç bırakıldığı analiz sonuçlarına sırasıyla yer verilmiştir. Her iki durumda da bir analiz hariç sonuçları değiştirebilecek büyük farklılıklar söz konusu değildir. Zati ağırlığın dahil edildiği analiz sonuçları biraz daha güven aralığının üzerinde kümelenmişlerdir.





Şekil 4.23 Analiz sonuçları: a) Zati ağırlık dahil, b) Zati ağırlık hariç.

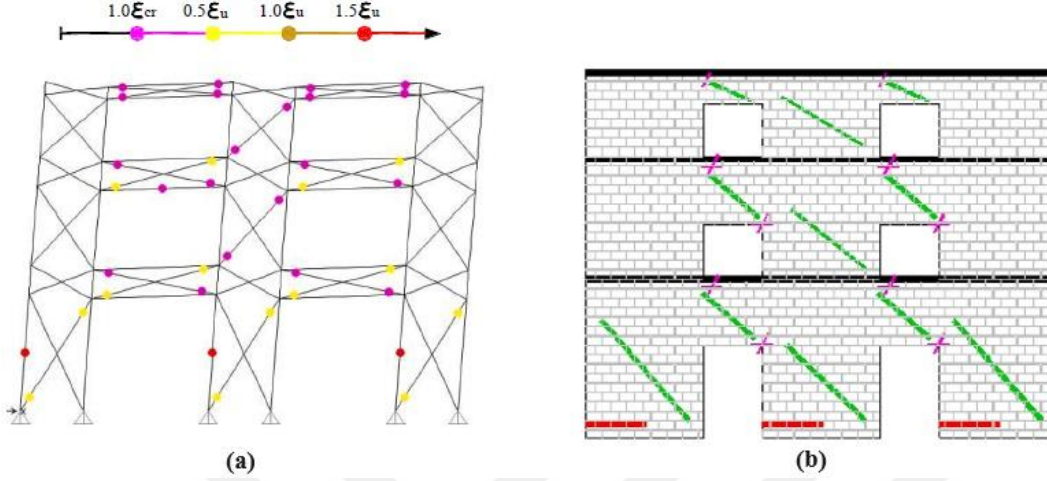
Bu örnekte daha hassas bir hasar dağılımı elde edebilmek amacıyla Şekil 3.5'te sarı, yeşil ve turuncu renklerle tanımlanmış olan yumuşama bölgeleri üçer eş parçaya ayrılmış ve renk skalası genişletilmiştir. Yenilenmiş renk skalasına ait açıklamalar Tablo 4.19'da verilmiştir.

Tablo 4.19 Birim deformasyona bağlı genişletilmiş renk skalası.

Siyah	Basınç, Çekme ve Kayma Bölgesi - Elastik
Açık Yeşil	Basınç Bölgesi – Yumuşama I
Yeşil	Basınç Bölgesi – Yumuşama II
Magenta (Açık)	Basınç Bölgesi – Yumuşama III
Magenta	Basınç Bölgesi – Maksimum birim deformasyon aşıldı
Sarı	Çekme Bölgesi – Yumuşama I
Koyu Sarı	Çekme Bölgesi – Yumuşama II
Açık Pembe	Çekme Bölgesi – Yumuşama III
Kırmızı	Çekme Bölgesi – Maksimum birim deformasyon aşıldı
Turuncu	Kayma Bölgesi – Yumuşama I
Kahverengi	Kayma Bölgesi – Yumuşama II
Açık mavi	Kayma Bölgesi – Yumuşama III
Mavi	Kayma Bölgesi – Maksimum birim deformasyon aşıldı

Multi-Pier-Macro yaklaşımıyla elde edilen hasar oluşumu Şekil 4.24'te görülmektedir (Pirsaneb et al., 2021). Zemin kat duvarlarıyla birlikte kapı ve birinci kat pencere üst bölgelerinde diyagonal kesme hasarları mevcuttur (plastik mafsallık).

oluşumu dikkate alındığında). Ayrıca zemin kattaki duvarların sol alt kısımlarında çekme hasarları meydana gelmiştir. Bunlar dışında mor renkli lokal basınç ezilmeleri gözlemlenmiştir.

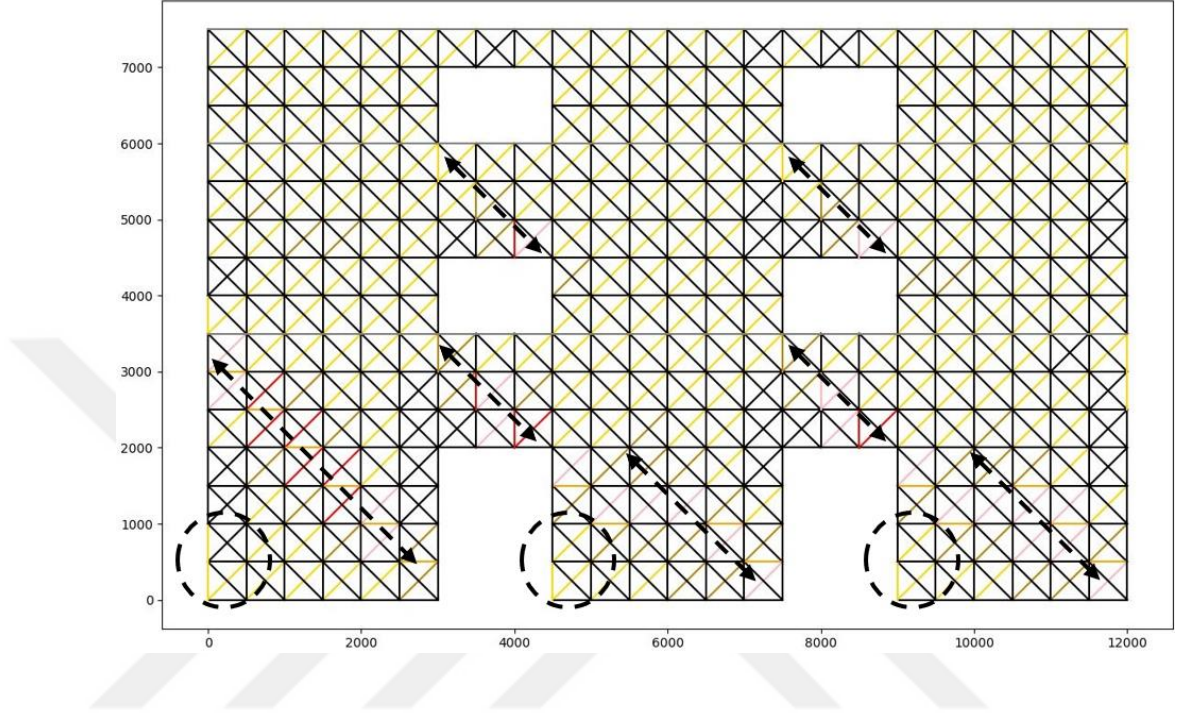


Şekil 4.24 a) Son aşamadaki plastik mafsal oluşumları, b) Hasar oluşumları (yeşil: diyagonal kesme çatlağı; kırmızı: çekme çatlağı; mor: basınç ezilmesi) (Pirsaheb et al., 2021).

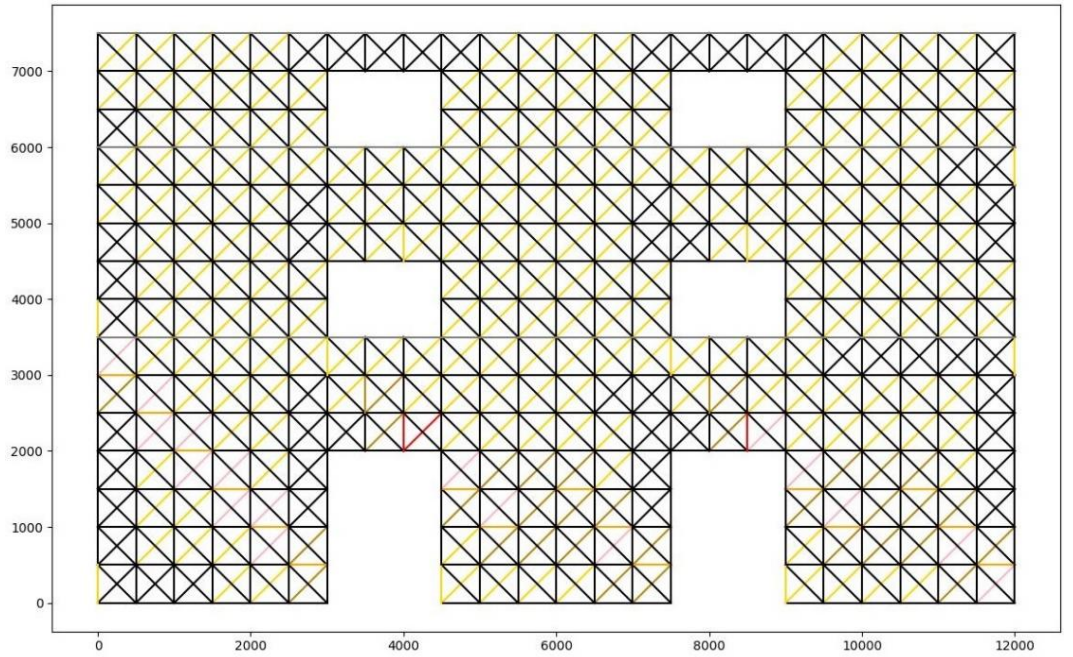
İlgili çalışmadaki renk skalası incelendiğinde yumuşama ve maksimum birim deformasyon sonrasındaki bölgelerin kendi içlerinde ikiye ayrıldığı görülmektedir. Mor renk elastik ötesi davranışın ilk basamağını temsil ederken, sarı renk ise ilk basamak ile maksimum birim deformasyon arasındaki bölgeyi tanımlamaktadır. Kahverengi renk maksimum birim deformasyon değerinin aşılmasından sonraki ilk bölgeyi, kırmızı ise sonrasını temsil etmektedir (Pirsaheb et al., 2021).

Kafes model yaklaşımına ait sonuçlar incelendiğinde çeşitli parametrelere yer verilse de genel olarak benzer hasar oluşumlarının meydana geldiği görülmüştür (Şekiller 4.25, 4.26, 4.27 ve 4.28). En belirgin olarak karşılaşılan hasar türü zemin kat duvarlarında ve kapı üst bölgelerinde ortaya çıkan diyagonal kesme çatlaklarıdır. Ayrıca zemin kat duvarlarının sol alt köşelerinde çekme hasarlarının oluşmaya başladığı gözlemlenmiştir. Multi-Pier-Macro yaklaşımıyla kıyaslandığında ise hasar oluşumunda paralellik görülmektedir. Fakat kafes model yaklaşımında lokal basınç ezilmeleri tespit edilememiş ve tabandaki çekme hasarları kısıtlı kalmıştır. Bunun nedeni ise yatay deplasman hareketleri arasındaki belirgin farklılıktır.

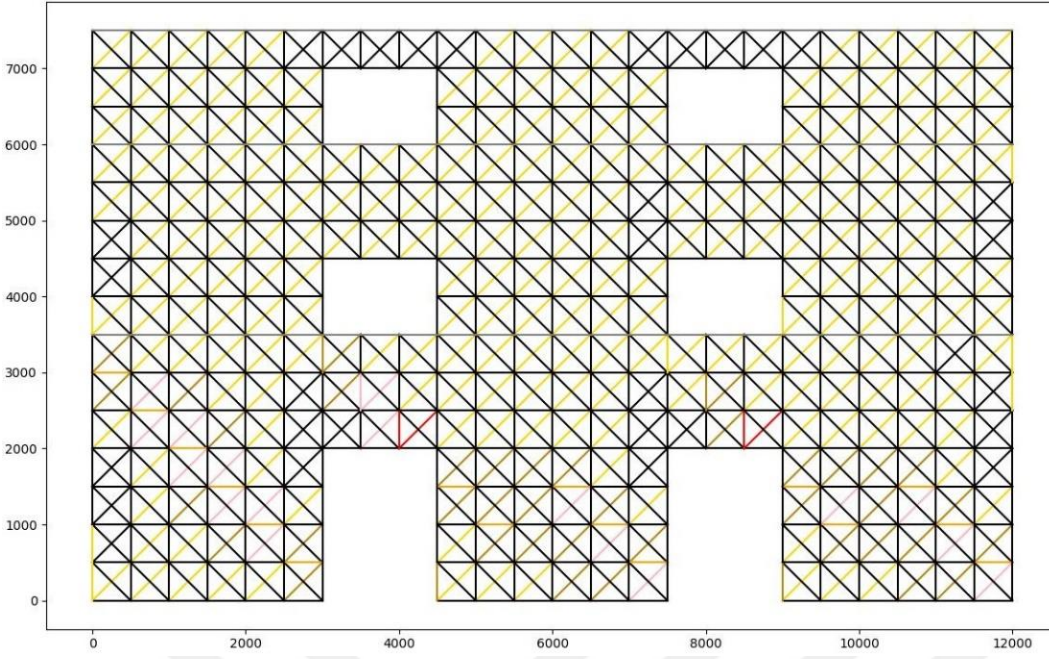
M500-BK (Şekil 4.25) örneğinde ek olarak birinci kat pencere üst bölgelerinde örnek çalışmadaki gibi diyagonal kesme hasarları oluşmaya başlamıştır. Diyagonal kesme hasarlarının gelişimi kesikli siyah çizgi, çekme hasarlarının oluşmaya başladığı yerler ise kesikli siyah daire ile belirtilmiştir.



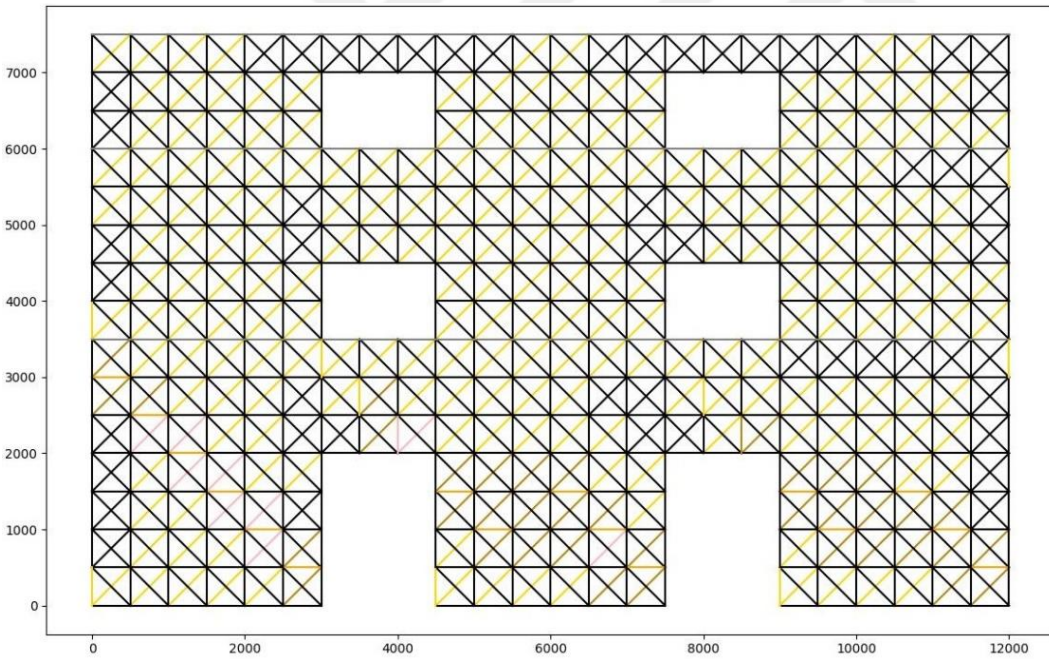
Şekil 4.25 M500-BK.



Şekil 4.26 M500-DK.



Şekil 4.27 M500-BK-BHA=0.



Şekil 4.28 M500-DK-BHA=0.

Şekil 3.10'daki performans düzeylerine göre hasar incelemesi yapıldığında yatay deplasman değerlerinin kısıtlı olması nedeniyle tüm çubukların sınırlı hasar bölgesinde yer aldığı görülmüştür. Yapının genel davranışı da incelendiğinde benzer durum söz konusudur. Bu yapı örneği için deplasman kontrollü yükleme ile daha sağlıklı değerlendirme yapılabilir.

4.6 Eleman Boyutunun Tespiti

Eleman boyutunun ön analiz yapılmaksızın belirlenmesi güç olabilmektedir. Bu nedenle mevcut yapının geometrisini temsil edebilecek birkaç farklı eleman boyutu test edilerek, en uygun olanı optimum değer olarak seçilebilir. Ele alınan örnekler incelendiğinde optimum eleman boylarının kat yüksekliklerinin %5-15 aralığında değiştiği görülmüştür (Tablo 4.20). Yükseklik/genişlik oranının bire yaklaşımla daha büyük eleman boyutu seçilebiliyorken, daha narin olan yapılarda boyut küçültülmelidir. Önerilen yaklaşımın pratikliği de düşünüldüğünde, alternatif eleman boylarının analizlerde dikkate alınarak sonuçların bir güven aralığı içerisinde değerlendirilmesi en uygun yaklaşımdır.

Tablo 4.20 Duvar özellikleri ve optimum eleman boyutları (kalın karakter olarak vurgulanmıştır).

Duvar Modeli	H/L	Yükseklik (mm)	Eleman Boyutları (mm)	Oran (%)
PUP3 ve PUP4	1.12	2250	100	4.44
			150	6.67
			200	8.89
			250	11.11
JRC Walls – HW	2.00	2000	100	5.00
			150	7.50
			200	10.00
JRC Walls – LW	1.35	1350	100	7.41
			150	11.11
			200	14.81
W-m-1	0.50	1560	100	6.41
			150	9.62
			300	19.23
Wall Panel	-	1125	75	6.67
			100	8.89
Çok Katlı Yapı	1.13	3400*	300	8.82
			500	14.71
			750	22.06
CT1-2-3	1.00	2500	150	6.00
			250	10.00
CS1-2-3	2.00	2500	150	6.00
			250	10.00

*Zemin kat yüksekliğidir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında yığma taşıyıcı sisteme sahip yapıların düzlem içi davranışlarının ve hasar oluşumlarının belirlenmesi için yeni bir metodoloji geliştirilmiştir. Bu kapsamda yığma taşıyıcı sistem sadece eksenel doğrultuda yük taşıyan ve deforme olan çubuk elemanlar kullanılarak kafes formuna dönüştürülmüştür. Böylece dizayn edilen eşdeğer kafes sistemin dış yüklemeler etkisinde doğrusal olmayan analizleri geliştirilen yazılım aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Nihayetinde önerilen yaklaşımın hızlı, pratik ve uygulanabilir bir alternatif çözüm yolu sunduğu görülmüştür. Çalışmanın başında belirtilen yığma yapılarda yük taşıma kapasitesinin, kırılma mekanizmasının ve hasar bölgelerinin tespit edilmesi gibi temel beklentiler başarıyla karşılanmıştır.

Doğrusal olmayan analizin doğası gereği hesaplamalarda varsayımlar ve basitleştirmeler yapılmaktadır. Bu nedenle sayısal analizlerden elde edilen sonuçların tecrübe sahibi kişilerce yorumlanması ve değerlendirilmesi zaruridir. İhtiyaç duyulan noktalarda analizin çeşitli parametre girdilerinin değiştirilerek tekrarlanması esastır. Önerilen prosedürde de benzer durum söz konusudur. Fakat çeşitli parametreler süreç içerisinde incelenmiş ve kullanıcı için tavsiyeler sunulmuştur. Her ne kadar karmaşık gibi görünse de analiz süreci ve parametre girdilerinin yazılıma tanımlanması oldukça basit, elde edilen sonuçların yorumlanması kolaydır. Bu hususta ayrıntılı modelleme yaklaşımlarına göre önerilen metodoloji büyük avantaj sağlamaktadır.

Kafes modelin oluşturulmasında eğim açısının $45^\circ - 55^\circ$ aralığında seçilerek sonuçlardaki hassasiyetin artırılabilceği ama hasar oluşumlarında beklentinin her zaman karşılanamadığı görülmüştür. Bu nedenle açı seçiminde kapasite eğrisi kadar hasar oluşumu da göz önünde bulundurulmalıdır. Hem geometrik olarak modelin oluşturulmasındaki pratikliği hem de sonuçlardaki tutarlılığı dikkate alındığında 45° açı varsayımı beklentiyi yeterli düzeyde karşılamaktadır.

Kafes modelde optimum eleman boyu genellikle yapının yükseklik/genişlik oranına da bağlı olarak kat yüksekliğinin %5-15 aralığında değişmektedir. Narinliğin yüksek olduğu yapılarda eleman sıklığı artırılırken, yükseklik/genişlik

oranının bire yaklaşmasıyla daha büyük eleman boyutları tercih edilebilir. Mevcut yapının geometrisini de makul şekilde temsil edebilecek ve belirtilen aralığa uygun birkaç farklı eleman boyutuyla sayısal modellerin dizayn edilmesi ve analizlerin gerçekleştirilmesi tavsiye edilmektedir.

Yığma yapılardaki başlıca sorunlar malzeme parametrelerine ait verilerin tespiti ve yapısal formun tanımlanmasıdır. Bunun yanı sıra tüm bu verilerin nümerik yaklaşımlara aktarılması ise başka büyük bir problemidir. Bu hususta basitleştirilmiş yaklaşımlara başvurularak çeşitli parametre değerleri tekrarlı analizlerle ele alınabilir ve güven aralıkları tanımlanarak hata oranları düşürülebilir. Bunu kapsamlı modelleme yaklaşımları ile gerçekleştirmek oldukça karmaşık ve zaman alıcı iken önerilen kafes model yaklaşımıyla çok daha pratik bir şekilde yapılabilmektedir.

Burada önerilen yaklaşımın temel amacı kesin sonuç elde etmekten ziyade hesap sürecini ve sonrasında sonuçların yorumlanmasını basitleştirerek kullanıcıya kısa sürede yapının ön değerlendirmesini yapma imkânı sunmaktır. Buna göre ihtiyaç duyulması halinde daha detaylı yaklaşımlar veya hibrit prosedürler de akabinde tercih edilebilir.

Yazılım süreci gelişime oldukça açık bir alandır. Hem açık kaynak erişim olması hem de kullanıcının özgün düşüncelerini daha sağlıklı olarak yansıtabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu hususta çalışma teşvik edici olarak değerlendirilebilir.

Önerilen metodoloji ile kısıtlı literatürün bulunduğu yığma taşıyıcı sistemlerin kafes elemanlarla idealize edilmesi ve çözümlenmesi hususlarındaki eksikler ele alınmış ve tartışılmıştır. Böylece literatürdeki eksiklikler kısmen de olsa giderilmiş ve yeni bir basitleştirilmiş sayısal model yaklaşımı literatüre kazandırılmıştır. Ayrıca araştırmacıların da faydalanabileceği çeşitli öneriler çalışma bünyesinde sunulmuştur.

İlerleyen süreçte yazılıma çift yönlü yükleme özelliği eklenebilir veya deplasman kontrollü yükleme entegre edilerek yapısal performans

değerlendirmeleri maksimum yük sonrasında da dikkate alacak şekilde gerçekleştirilebilir. Bunlarla birlikte üç boyutlu tanımlamalar ile düzlem dışı etkilerin araştırılabileceği veya çeşitli yapısal güçlendirme analizlerinin işlem prosedürüne adapte edilebileceği aşıkardır.

Son olarak, bu çalışmada her ne kadar basitleştirilmiş yaklaşımın avantajları arasında yer verilse de analiz süresi kıyaslamalarından açıkça bahsedilmemiştir. Keza analiz süresi hesap algoritmasının ne kadar profesyonel olarak kurgulandığı ve uygulanan çözüm metoduyla doğrudan ilişkilidir. Bu hususta hazır paket programlarla kıyaslama yapmanın gerçekçi bir sonuç ortaya koyamayacağı değerlendirilmiştir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD)**, 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Resmî Gazete, Sayı: 30364 (Mükerrer), Ankara, 416s.
- Ahmed, A., Shahzada, K., Ali, S.M., Khan, A.N. and Shah, S.A.A.**, 2019, Confined and unreinforced masonry structures in seismic areas: validation of macro models and cost analysis, *Engineering Structures*, 199:109612. Doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109612
- Alvarez, R., Restrepo, J.I., Panagiotou, M. and Godinez, S.E.**, 2020, Analysis of reinforced concrete coupled structural walls via the beam-truss model, *Engineering Structures*, 220:111005. Doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111005
- Anthoine, A., Magonette, G. and Magenes, G.**, 1995, Shear-compression testing and analysis of brick masonry walls, *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*, 3:1657-1662pp, Duma. [Google Scholar](#)
- Araujo, A.S.F.F.**, 2014, Modelling of the Seismic Performance of Connections and Walls in Ancient Masonry Buildings, PhD Thesis, University of Minho, 212p.
- Asteris, P.G., Sarhosis, V., Mohebkah, A., Plevris, V., Papaloizou, L., Komodromos, P. and Lemos, J.V.**, 2015, Numerical modeling of historic masonry structures, *Handbook of Research on Seismic Assessment and Rehabilitation of Historic Structures*, Asteris, P.G. and Plevris, V. (Eds.), IGI Global, USA, 213-256pp. Doi: 10.4018/978-1-4666-8286-3.ch007
- Aşıkoğlu, A., Vasconcelos, G., Lourenço, P.B. and Panto, B.**, 2020, Pushover analysis of unreinforced irregular masonry buildings: lessons from different modeling approaches, *Engineering Structures*, 218:110830. Doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110830
- Boem, I. and Gattesco, N.**, 2021, The roof bracing as minimum intervention for the reduction of the seismic vulnerability of historical industrial buildings: analytical and numerical simplified strategies for the assessment of the performances, *International Journal of Architectural Heritage*, 15(2):274-288pp. Doi: 10.1080/15583058.2020.1805817

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bolhassani, M., Hamid, A.A., Lau, A.C.W. and Moon, F.**, 2015, Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages, *Construction and Building Materials*, 83:159-173pp. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.021
- Calio, I., Marletta, M. and Panto, B.**, 2012, A new discrete element model for the evaluation of the seismic behaviour of unreinforced masonry buildings, *Engineering Structures*, 40:327-338pp. Doi: 10.1016/j.engstruct.2012.02.039
- Camata, G., Marano, C., Sepe, V., Spacone, E., Siano, R., Petracca, M., Roca, P. and Pela, L.**, 2022, Validation of non-linear equivalent-frame models for irregular masonry walls, *Engineering Structures*, 253:113755. Doi: 10.1016/j.engstruct.2021.113755
- Cannizzaro, F., Castellazzi, G., Grillanda, N., Panto, B. and Petracca, M.**, 2022, Modelling the nonlinear static response of a 2-storey URM benchmark case study: comparison among different modelling strategies using two- and three-dimensional elements, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20:2085-2114pp. Doi: 10.1007/s10518-021-01183-0
- D’Altri, A.M. and de Miranda, S.**, 2022, Prediction of flexural drift capacity in masonry walls through a nonlinear truss-based model, *International Journal of Solids and Structures*, 243:111593. Doi: 10.1016/j.ijsolstr.2022.111593
- D’Altri, A.M., Sarhosis, V., Milani, G., Rots, J., Cattari, S., Lagomarsino, S., Sacco, E., Tralli, A., Castellazzi, G. and de Miranda, S.**, 2020, Modeling strategies for the computational analysis of unreinforced masonry structures: review and classification, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27:1153-1185pp. Doi: 10.1007/s11831-019-09351-x
- De Castro Oliveira, D.V.**, 2003, Experimental and Numerical Analysis of Blocky Masonry Structures under Cyclic Loading, PhD Thesis, University of Minho, 221p.
- Demirtaş, Y., Yurdakul, Ö. and Avşar, Ö.**, 2023, Lattice modelling of substandard RC beam-column joints considering localization issues, *Structures*, 47:2515-2530pp. Doi: 10.1016/j.istruc.2022.12.062

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Doran, B., Karslioglu, M., Aslan, Z.U. and Vatansever, C.**, 2023, Experimental and numerical investigation of unreinforced masonry walls with and without opening, *International Journal of Architectural Heritage*, 17(11):1833-1854pp. Doi: 10.1080/15583058.2022.2080611
- EN 1996-1-1**, 2005, Eurocode 6: Design of Masonry Structures - Part 1-1: General Rules for Reinforced and Unreinforced Masonry Structures, Brussels, 125 p.
- Erdogan, Y.S.**, 2017, Discrete and continuous finite element models and their calibration via vibration and material tests for the seismic assessment of masonry structures, *International Journal of Architectural Heritage*, 11(7):1026-1045pp. Doi: 10.1080/15583058.2017.1332255
- Foraboschi, P. and Vanin, A.**, 2013, Non-linear static analysis of masonry buildings based on a strut-and-tie modeling, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 55:44-58pp. Doi: 10.1016/j.soildyn.2013.08.005
- Gargari, M.M.**, 2016, Development of Novel Computational Simulation Tools to Capture the Hysteretic Response and Failure of Reinforced Concrete Structures under Seismic Loads, PhD Thesis, The Faculty of The Virginia Polytechnic Institute and State University, 243p.
- Giamundo, V., Sarhosis, V., Lignola, G.P., Sheng, Y. and Manfredi, G.**, 2014, Evaluation of different computational modelling strategies for the analysis of low strength masonry structures, *Engineering Structures*, 73:160-169pp. Doi: 10.1016/j.engstruct.2014.05.007
- Girgin, S.C., Lu, Y. and Panagiotou, M.**, 2013, Nonlinear cyclic truss model for shear-critical reinforced concrete columns, *2nd Turkish Conference on Earthquake Engineering and Seismology (TDMSK 2013)*, Hatay, Turkey, 10p.
- Girgin, S.C.**, 2019, Kesme etkin betonarme elemanların doğrusal olmayan kafes kiriş analojisi ile modellenmesi, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(3):1177-1186s. Doi: 10.24012/dumf.587804

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Girgin, S.C.**, 2020, Effect of modeling beam-column joints on performance assessment of columns in non-ductile RC frames, *Teknik Dergi*, Paper 593:10339-10358pp. Doi: 10.18400/tekderg.456752
- Güner, Y. and Nuhoglu, A.**, 2024a, Determination of the in-plane behavior of masonry walls using the truss model, *International Journal of Architectural Heritage*, 16p. Doi: 10.1080/15583058.2024.2367693
- Güner, Y. and Nuhoglu, A.**, 2024b, Development and application of the truss method on masonry walls to determine the in-plane behavior: a parametric study, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 42(5) (in press).
- Güner, Y. ve Nuhoglu, A.**, 2022, Yığma yapıların düzlem içi davranışının kafes model yaklaşımı ile analizi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 26(3):479-489s. Doi: 10.19113/sdufenbed.1110156
- Jet Brains S.R.O.**, 2022, PyCharm Community Edition 2022.2.1, <https://www.jetbrains.com/pycharm/> (Erişim tarihi: 12 Nisan 2024)
- Kafkas, U.**, 2015, Yığma Duvar Elastik Davranışının Düzlem Çubuk Elemanlarla Mikro Modellemesi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 99s.
- Kahya, V., Genç, A.F., Sunca, F., Roudane, B., Altunışık, A.C., Yılmaz, S., Günaydin, M., Dok, G., Kirtel, O., Demir, A., Aykanat, B., Arslan, M.E., Sarıbiyik, A., Aydın, F., Aslan, B., Sezdirmez, T., Tatar, T., Emiroğlu, M., Atmaca, B., Adanur, S., Atmaca, E.E., Güleş, O., Demirkaya, E., Öztürk, H. and Akgül, T.**, 2024, Evaluation of earthquake-related damages on masonry structures due to the 6 February 2023 Kahramanmaraş-Türkiye earthquakes: a case study for Hatay Governorship Building, *Engineering Failure Analysis*, 156:107855. Doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107855
- Khoei, A.R. and Karimi, K.**, 2008, An enriched-FEM model for simulation of localization phenomenon in Cosserat continuum theory, *Computational Materials Science*, 44:733-749pp. Doi: 10.1016/j.commatsci.2008.05.019

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kuruşçu, A.O.**, 2012, Yığma Duvar ve Temellerde Doğrusal Olmayan Modelleme, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 192s.
- Lemos, J.V.**, 2019, Discrete element modeling of the seismic behavior of masonry construction, *Buildings*, 9(2):43. Doi: 10.3390/buildings9020043
- Lourenço, P.B.**, 1996, Computational Strategies for Masonry Structures, PhD Thesis, Delft University of Technology, 220p.
- Lu, Y. and Panagiotou, M.**, 2014, Three-dimensional cyclic beam-truss model for nonplanar reinforced concrete walls, *Journal of Structural Engineering*, 140(3):04013071. Doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000852
- Magenes, G., Calvi, G.M. and Kingsley, G.R.**, 1995, Seismic Testing of a Full-Scale, Two-Story Masonry Building: Test Procedure and Measured Experimental Response, *Experimental and Numerical Investigation on a brick Masonry Building Prototype – Numerical Prediction of the Experiment, Report 3.0 – G.N.D.T.*, University of Pavia, 42p.
- Magenes, G., Morandi, P. and Penna, A.**, 2008, Test Results on the Behaviour of Masonry under Static Cyclic In Plane Lateral Loads, *Enhanced Safety and Efficient Construction of Masonry Structures in Europe*, Project No. Coll – Ct – 2003 – 500291, University of Pavia, 129p. [URL](#)
- Magenes, G., Penna, A., Galasco, A. and Da Pare, M.**, 2010a, In-plane cyclic shear tests of undressed double-leaf stone masonry panels, *8th International Masonry Conference*, Dresden, Germany, 10p.
- Magenes, G., Penna, A., Galasco, A. and Rota, M.**, 2010b, Experimental characterisation of stone masonry mechanical properties, *8th International Masonry Conference*, Dresden, Germany, 247-256pp.
- Marques, R. and Lourenço, P.B.**, 2014, Unreinforced and confined masonry buildings in seismic regions: validation of macro-element models and cost analysis, *Engineering Structures*, 64:52-67pp. Doi: 10.1016/j.engstruct.2014.01.014

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mbewe, P.B.K. and van Zijl, G.P.A.G.**, 2018, A simplified non-linear structural analysis of reinforced concrete frames with masonry infill subjected to seismic loading, *Engineering Structures*, 177:630-640pp. Doi: 10.1016/j.engstruct.2018.10.005
- Mbewe, P.B.K. and van Zijl, G.P.A.G.**, 2019, Characterization of equivalent struts for macromodeling of infilled masonry RC frames subjected to lateral load, *Journal of Structural Engineering*, 145(5):04019035. Doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002316
- Mbewe, P.B.K.**, 2018, Nonlinear Truss Modelling of Masonry Infill Frames Towards Sustainable Residential Buildings, PhD Thesis, Stellenbosch University, 314p.
- Milani, G., Beyer, K. and Dazio, A.**, 2009, Upper bound limit analysis of meso-mechanical spandrel models for the pushover analysis of 2D masonry frames, *Engineering Structures*, 31:2696-2710pp. Doi: 10.1016/j.engstruct.2009.06.015
- Morandi, P., Manzini, C.P. and Magenes, G.**, 2020, Application of seismic design procedures on three modern URM buildings struck by the 2012 Emilia earthquakes: inconsistencies and improvement proposals in the European codes, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18:547-580pp. Doi: 10.1007/s10518-019-00650-z
- Najafgholipour, M.A.**, 2018, An equivalent truss model for in-plane nonlinear analysis of unreinforced masonry walls, *Civil Engineering Journal*, 4(4):828-835pp. Doi: 10.28991/cej-0309136
- Pepe, M., Sangirardi, M., Reccia, E., Pingaro, M., Trovalusci, P. and de Felice, G.**, 2020, Discrete and continuous approaches for the failure analysis of masonry structures subjected to settlements, *Frontiers in Built Environment*, 6:43. Doi: 10.3389/fbuil.2020.00043

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pereira, J.M., Correia, A.A. and Lourenço, P.B.**, 2021, In-plane behaviour of rubble stone masonry walls: experimental, numerical and analytical approach, *Construction and Building Materials*, 271:121548. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121548
- Petry, S. and Beyer, K.**, 2014, Influence of boundary conditions and size effect on the drift capacity of URM walls, *Engineering Structures*, 65:76-88pp. Doi: 10.1016/j.engstruct.2014.01.048
- Petry, S. and Beyer, K.**, 2015a, Cyclic test data of six unreinforced masonry walls with different boundary conditions, *Earthquake Spectra*, 31(4):2459-2484pp. Doi: 10.1193/101513EQS269
- Petry, S. and Beyer, K.**, 2015b, Force–displacement response of in-plane-loaded URM walls with a dominating flexural mode, *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 44:2551-2573pp. Doi: 10.1002/eqe.2597
- Pingaro, N. and Milani, G.**, 2023, Simple non-linear numerical modelling of masonry arches reinforced with SRG using elasto-fragile and elasto-ductile truss finite elements, *Engineering Structures*, 293:116637. Doi: 10.1016/j.engstruct.2023.116637
- Pirsaheb, H., Moradi, M.J. and Milani, G.**, 2020a, A Multi-Pier MP method for the non-linear static analysis of out-of-plane loaded masonry walls, *Engineering Structures*, 223:111040. Doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111040
- Pirsaheb, H., Moradi, M.J. and Milani, G.**, 2020b, A Multi-Pier MP procedure for the non-linear analysis of in-plane loaded masonry walls, *Engineering Structures*, 212:110534. Doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110534
- Pirsaheb, H., Wang, P., Moradi, M.J. and Milani, G.**, 2021, A Multi-Pier-Macro MPM method for the progressive failure analysis of perforated masonry walls in-plane loaded, *Engineering Failure Analysis*, 127:105528. Doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105528

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pirsaheb, H., Wang, P., Milani, G. and Habibi, M.,** 2022, A Multi-Pier-Macro MPM method for the progressive failure analysis of full scale walls in two way bending, *Engineering Failure Analysis*, 131:105862. Doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105862
- Python Software Foundation,** 2021, Python 3.10, <https://www.python.org/> (Erişim tarihi: 12 Nisan 2024)
- Quagliarini, E., Maracchini, G. and Clementi, F.,** 2017, Uses and limits of the equivalent frame model on existing unreinforced masonry buildings for assessing their seismic risk: a review, *Journal of Building Engineering*, 10:166-182pp. Doi: 10.1016/j.jobbe.2017.03.004
- Rai D.C., Singhal, V., Paikara, S. and Mukherjee, D.,** 2014, Sub-paneling of masonry walls using precast reinforced concrete elements for earthquake resistance, *Earthquake Spectra*, 30(2):913-937pp. Doi: 10.1193/102010EQS178M
- Ramaglia, G., Lignola, G.P. and Prota, A.,** 2023, Simplified analysis of a masonry cross vault under dynamic actions, *International Journal of Architectural Heritage*. Doi: 10.1080/15583058.2023.2287142
- Rankawat, N., Brzev, S., Jain, S.K. and Gavilan J.J.P.,** 2021, Nonlinear seismic evaluation of confined masonry structures using equivalent truss model, *Engineering Structures*, 248:113114. Doi: 10.1016/j.engstruct.2021.113114
- Ridwan, M., Yoshitake, I. and Nassif, A.Y.,** 2017, Two-dimensional fictitious truss method for estimation of out-of-plane strength of masonry walls, *Construction and Building Materials*, 152:24-38pp. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.138
- Salinas, D., Koutromanos, I. and Leon R.T.,** 2022, Nonlinear truss modeling method for masonry-infilled reinforced concrete frames, *Engineering Structures*, 262:114329. Doi: 10.1016/j.engstruct.2022.114329

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sarhosis, V., Sheng, Y. and Garrity, S.W.**, 2010, Computational modelling of clay brickwork walls containing openings, *International Masonry Society Proceedings 11*, 3:1743-1752pp. [URL](#)
- Shrestha, J.K., Bhandari, S., Pradhan, S. and Gautam, D.**, 2020, Simplified frame model for capacity assessment of masonry buildings, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 131:106056. Doi: 10.1016/j.soildyn.2020.106056
- Smoljanovic, H., Zivaljic, N., Nikolic, Z. and Munjiza, A.**, 2018, Numerical analysis of 3D dry-stone masonry structures by combined finite-discrete element method, *International Journal of Solids and Structures*, 136-137:150-167pp. Doi: 10.1016/j.ijsolstr.2017.12.012
- Thuyet, V.N., Deb, S.K. and Dutta, A.**, 2018, Mitigation of seismic vulnerability of prototype low-rise masonry building using U-FREIs, *J. Perform. Constr. Facil.*, 32(2):04017136. Doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001136
- Vakıflar Genel Müdürlüğü (VGM)**, 2017, Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, Ankara, 229s.
- Varma, R., Barros, J.A.O. and Sena-cruz, J.M.**, 2012, Design-curves of strain softening and strain hardening fibre reinforced concrete elements subjected to axial load and bending moments, *BEFIB 2012*, Portugal, 12p.
- Verbrugge, M.**, 2017, Modelling In-Plane Behaviour of Masonry Shear Walls through a Predefined Crack Pattern at Macro Level, MSc Thesis, Delft University of Technology, 77p.
- Vignjevic, R., Djordjevic, N., De Vuyst, T. and Gemkow, S.**, 2018, Modelling of strain softening materials based on equivalent damage force, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 335:52-68pp. Doi: 10.1016/j.cma.2018.01.049
- Wahab, M.M.A.**, 2015, Simulating mode I fatigue crack propagation in adhesively-bonded composite joints, *Fatigue and Fracture of Adhesively-Bonded Composite Joints*, Vassilopoulos, A.P. (Ed.), Woodhead Publishing, UK, 323-344pp. Doi: 10.1016/B978-0-85709-806-1.00011-2

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Williams, S.A.**, 2013, Numerical Analysis of Reinforced Masonry Shear Walls Using the Nonlinear Truss Approach, MSc Thesis, The Faculty of The Virginia Polytechnic Institute and State University, 104p.
- Xu, H., Gentilini, C., Yu, Z., Wu, H. and Zhao, S.**, 2018, A unified model for the seismic analysis of brick masonry structures, *Construction and Building Materials*, 184:733-751pp. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.208
- Zhao, L., Song, Z., Feng, H., Zhao, M. and Pirsheh, H.**, 2022, A Multi Pier (MP) method for the evaluation FRP delamination on flat and curve masonry substrates, *Composite Structures*, 294:115793. Doi: 10.1016/j.compstruct.2022.115793

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince desteklerini benden esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme ve sevgili eşim Aslıhan'a çok teşekkür ederim. Bununla birlikte başta danışmanım Doç. Dr. Ayhan NUHOĞLU ve değerli hocalarım Prof. Dr. Alper SEZER ve Doç. Dr. Sadık Can GİRĞİN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez savunmam sırasında değerli katkılarını benden esirgemeyen Prof. Dr. İbrahim Serkan MISIR, Doç. Dr. Emre ERCAN ve Doç. Dr. Ali MORTAZAVİ hocalarıma çok teşekkürlerimi sunarım.

Eğitimim süresince “TÜBİTAK BİDEB 2211 Yurt İçi Doktora Burs Programı” kapsamında şahsımı destekleyen TÜBİTAK kurumuna ve özverili personellerine teşekkürlerimi sunarım.

22 / 08 / 2024

Yunus GÜNER

ÖZGEÇMİŞ

Yunus GÜNER, 2010 yılında lisans eğitimine başladığı Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2015 yılında bölüm birincisi olarak mezun oldu. Aynı sene Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı ve 2018 yılında eğitimini tamamladı. Yazar, 2018 yılında hem Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya hem de Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında doktora eğitimine başladı. 2024 yılında doktora eğitimini tamamladı.

Çalışma alanı yoğunlukla yığma yapılar üzerine olan yazarın, üç adet SCI-E, iki adet E-SCI ve bir adet TR Dizin olmak üzere toplamda altı adet makalede ve bir adet bildiride katkısı bulunmaktadır.

EKLER

Ek 1. Yazılımın Açıklanması ve Analiz Prosedürü

Python programlama dili PyCharm arayüzünde kullanılarak, yığma yapıların düzlemdeki davranışını nümerik olarak çözümleyen hesap algoritması geliştirilmiştir. İlk adım olan yapısal parametre girdilerinden sonuçlar elde edilinceye kadar geçen sürece ait kodlamalar ana akış ekranında oluşturulmuştur. Bununla birlikte, birçok alt fonksiyon tanımlanarak spesifik hesaplamalar gerçekleştirilmiş ve ana ekran akışı sadeleştirilmiştir. Aynı zamanda yazılımın daha hızlı çözüme ulaşması sağlanmıştır.

Yeni bir metodolojinin ortaya konması ve geliştirilmesi oldukça uzun bir süreçtir. Yazılımda buna paralel olarak ihtiyaçlar doğrultusunda sürekli olarak güncellenmektedir. Başlangıçta hesaplamalarda kullanılan bazı parametreler veya matrisler sonrasında terkedilebilir. Alternatif çözüm yolları geliştirilerek ihtiyaç duyulan sonuçlar farklı yöntemlerle elde edilebilir. İncelenen yapı örneğine bağlı olarak gereksinim duyulan parametrelerin sayısı artırılabilir ya da azaltılabilir. Bu hususta ana ekran kodlamaları paylaşılırken mümkün olabildiğince kullanılmayan parametreler sadeleştirilmiştir.

Ana ekranın akış durumu kodlamalarla birlikte madde madde açıklamalı olarak sunulmuştur. Malzeme veya geometrik parametrelerde sunulan sayısal değerler çok katlı yapı örneğine (M500 – DK – BHA=0) aittir (Bkz. Bölüm 4.5).

1) Geometrik veriler, sınır koşulları ve dış yüklemeler Excel dosyasında oluşturulmuş ve “.txt” dosyasına aktarılmıştır. Sonrasında yazılım tarafından dosya okutularak eleman ve koordinat listeleri oluşturulmuştur.

""" Dosyalardan Bilgilerin Çekilmesi """

```
liste_elemanlar = [ ]  
liste_koordinatlar = [ ]
```

```
with open("ornek_elemanlar.txt", "r", encoding="utf-8") as file:  
    for satir in file:  
        satir = satir[:-1]
```

```

liste_elemanlar.append(satir.split(" "))

with open("ornek_koordinatlar.txt", "r", encoding="utf-8") as file2:
    for satir in file2:
        satir = satir[:-1]
        liste_koordinatlar.append(satir.split(" "))

# Verilerin İşlenmesi

eleman_sayisi = int(len(liste_elemanlar))

nokta_sayisi = int(len(liste_koordinatlar))

for i in range(0, eleman_sayisi):
    liste_elemanlar[i][0] = int(liste_elemanlar[i][0])    # Eleman Numarası
    liste_elemanlar[i][1] = int(liste_elemanlar[i][1])    # Düğüm Noktası Başlangıcı
    liste_elemanlar[i][2] = int(liste_elemanlar[i][2])    # Düğüm Noktası Bitişi
    liste_elemanlar[i][3] = float(liste_elemanlar[i][3])  # Çubuk Kesit Alanı

for i in range(0, nokta_sayisi):
    liste_koordinatlar[i][0] = int(liste_koordinatlar[i][0])  # Düğüm Noktası
    liste_koordinatlar[i][1] = float(liste_koordinatlar[i][1])  # X Koordinatı
    liste_koordinatlar[i][2] = float(liste_koordinatlar[i][2])  # Y Koordinatı
    liste_koordinatlar[i][3] = int(liste_koordinatlar[i][3])    # Sınır Şartları
    liste_koordinatlar[i][4] = float(liste_koordinatlar[i][4])  # X Yönü Kuvvet
    liste_koordinatlar[i][5] = float(liste_koordinatlar[i][5])  # Y Yönü Kuvvet

```

2) Malzeme parametrelerine ait sayısal değerler, birim hacim ağırlık, iterasyon sayıları, çözüm yöntemi, hata oranı, kat kütleleri ve etki noktaları gibi çeşitli verilerin girdisi gerçekleştirilmektedir. Ayrıca elemanların (yatay, düşey veya diyagonal) doğrultuları da belirlenmektedir.

""" Girdiler """

""" Çelik Başlık """

```

Celik_Bas_El_No = 1244    # Çelik çubukların başladığı eleman numarası
Celik_Bit_El_No = 1315    # Çelik çubukların bittiği eleman numarası
Ecelik = 28000            # Çeliğin/Beton elastisite modülü.

```

""" Eleman Doğrultularının Belirlenmesi - Yatay - Düşey - Diyagonal """

```

dogrultu_matris = np.zeros((eleman_sayisi, 2))
Eleman_Sistem_Matris.eleman_dogrultusu_belirleme(eleman_sayisi, liste_elemanlar,
liste_koordinatlar, dogrultu_matris, Celik_Bas_El_No, Celik_Bit_El_No)

```

""" Yığma """

Basınç Davranışı

```

Ec = 1650    # Başlangıç basınç elastisite modülü
fcm = -3     # Maksimum basınç dayanımı
Epsilon_ccr = fcm / Ec    # Çatlamış basınç gerinimi
Epsilon_cu = 2.75 * Epsilon_ccr    # Maksimum çekme gerinimi
fmin = -0.6    # 0.2fcm
Etc = (fmin - fcm) / (Epsilon_cu - Epsilon_ccr)    # Yumuşama bölgesinin eğimi

```

Çekme Davranışı

ftm = 0.06 # Maksimum çekme dayanımı
Epsilon_tcr = ftm / Ec # Çatlamış çekme gerinimi
Epsilon_tu = 0.001 # Maksimum çekme gerinimi
fmak = 0.012 # 0.2ftm
Ett = (fmak - ftm) / (Epsilon_tu - Epsilon_tcr) # Yumuşama bölgesinin eğimi

"" Kayma Davranışı Belirleme ""

Kayma Davranışı - Tek kayma değeri durumunda

G = 660 # Kayma modülü
Tb1 = 0.71 # Maksimum kayma gerilmesi
Epsilon_elastik1 = Tb1 / G # Elastik Birim Deformasyon Sınırı
Epsilon_maksimum = 0.008 # Maksimum Birim Deformasyon
Ts1 = 0.70 # Artık kayma dayanım değeri
Gt1 = (Ts1 - Tb1) / (Epsilon_maksimum - Epsilon_elastik1) # Eğim

kayma_dayanım_parametre_matris = np.zeros((eleman_sayisi, 2))
Eleman_Sistem_Matris.kayma_dayanımı_belirleme_tek_deger(eleman_sayisi, dogrultu_matris,
kayma_dayanım_parametre_matris, Gt1, Epsilon_elastik1)

Kayma Davranışı – Çoklu kayma değerleri durumunda

G = 660 # Kayma modülü
Tb1 = 0.157 # Maksimum kayma dayanım değeri
Tb2 = 0.133
Tb3 = 0.108
Epsilon_elastik1 = Tb1 / G # Elastik Birim Deformasyon Sınırı
Epsilon_elastik2 = Tb2 / G
Epsilon_elastik3 = Tb3 / G
Epsilon_maksimum = 0.008 # Maksimum Birim Deformasyon
Ts1 = 0.147 # Artık kayma dayanım değeri
Ts2 = 0.123
Ts3 = 0.098
Gt1 = (Ts1 - Tb1) / (Epsilon_maksimum - Epsilon_elastik1) # Eğim
Gt2 = (Ts2 - Tb2) / (Epsilon_maksimum - Epsilon_elastik2)
Gt3 = (Ts3 - Tb3) / (Epsilon_maksimum - Epsilon_elastik3)

kayma_dayanım_parametre_matris = np.zeros((eleman_sayisi, 2))
Eleman_Sistem_Matris.kayma_dayanımı_belirleme(eleman_sayisi, dogrultu_matris,
kayma_dayanım_parametre_matris, Gt1, Epsilon_elastik1, Gt2, Epsilon_elastik2, Gt3,
Epsilon_elastik3)

"" Diğer ""

#BHA = 0.00000549
BHA = 0

Birim Hacim Ağırlık

Dep_Dugum = 364
Negatif_Sinir_Deger = -0.25
iterasyon_sayisi = 1000
iterasyon_sayisi_step2 = 10000
GCBK = 0.03

Yük-Deplasman eğrisinde kullanılan düğüm noktası.
Hata oranı
Step 1 için iterasyon sayısı (düşey yük)
Step 2 için iterasyon sayısı (yatay yük)
Görsel çıktı büyütme katsayısı

Step = 1
Step_sayisi = 2
Sonuc_Dongu = 0

Step = 1 düşey yükler, Step = 2 yatay yükler.
Toplam step sayısı
Yuk_Dep_Listesinin eleman sayısını belirlemek için kullanılıyor.

```
Toplam_Dongu_Sayisi = 0      # Toplamda kaç döngünün meydana geldiğini sayıyor.
mesnet_dusey_kuvvet = mesnet_yatay_kuvvet = 0
min_index = 0                # Analizi sonlandıran düğümü tanımlamada kullanılıyor.
```

"" Master-Slave Method - Tekli ""

```
Master_Node = 1
Slave_Node_Listesi = [ ]
```

"" Master-Slave Method - Çoklu ""

```
Master_Node1 = 172
Slave_Node_Listesi1 = [160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 173, 174,
175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184]
```

```
Master_Node2 = 293
Slave_Node_Listesi2 = [281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 294, 295,
296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305]
```

```
Master_Node3 = 364
Slave_Node_Listesi3 = [352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 365, 366,
367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376]
```

```
Slave_Node_Listesi_Toplam = Slave_Node_Listesi1 + Slave_Node_Listesi2 +
Slave_Node_Listesi3
```

```
Cozum_Method = 2            # Çözüm yöntemi belirleniyor. 1: Lineer 2: Softening 3: Hardening
Master_Slave_Method = "Kapalı" # Master-Slave Method tek katlı için
Master_Slave_Method_Coklu = "Açık" # Master-Slave Method 3 katlı için
Tum_sistem_sonlandirma = "Açık" # Hata oranına göre analizi sonlandırma için
Strain_softening = "Açık"      # Strain Softening açık yaparsak, datalarını tabloya aktarıyor
Gnonlinear = "Açık"           # Geometrik nonlineeri hesaplara dahil etmek için
```

"" Doğal Frekansın Belirlenmesi ""

```
kat_sayisi = 3
kat_kutleleri = np.zeros((kat_sayisi, 1))      # Kat kütleleri - matris
kat_yukseklikleri = np.zeros((kat_sayisi, 1))  # Kat yükseklikleri - matris
kat_kutleleri[0][0] = 127000                    # N cinsinden
kat_kutleleri[1][0] = 127000
kat_kutleleri[2][0] = 127000
kat_yukseklikleri[0][0] = 3500                  # mm cinsinden
kat_yukseklikleri[1][0] = 6000
kat_yukseklikleri[2][0] = 7500
etki_dugumleri = [172, 293, 364]
```

3) Yazılımda kullanılan global matrislerin ve listelerin tanımlanması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Master-Slave Method'un kullanılması durumunda, mevcut listelerin revize edilmesi ile ilgili kodlamaya yer verilmiştir.

"" Global Matrisler ve Tanımlamalar ""

```
Elastisite_matris = np.zeros((eleman_sayisi, 1)) # Elastisite modülüne ait matris
Elastisite_baslagic = np.zeros((eleman_sayisi, 1)) # Başlangıç elastisite modülünü hafızaya alınması
Birim_deformasyon_matris = np.zeros((eleman_sayisi, 1)) # Birim deformasyon matrisi
Hasar_birim_deformasyon_matris = np.zeros((eleman_sayisi, 1)) # Hasarda en son - 1 olarak
```

```

birim deformasyon matrisi kabul ediliyor
Keleman_matrisleri = [ ] # Elemanların rijitlik matrisi
Transformasyon_matris = [ ] # Lokal çubuk uç kuvvetlerinin
belirlenebilmesi için transformasyon matrisi
Dugum_kuvvet_matris = np.zeros((nokta_sayisi, 2)) # Düğüm noktalarında meydana gelen
kuvvetler
Cubuk_uc_kuvvet_matris = np.zeros((eleman_sayisi, 4)) # Çubuklarda meydana gelen kuvvetler
(method2 - matrislerden)
Cubuk_kuvvetleri_method2_matris = np.zeros((eleman_sayisi, 1))
Cubuk_kuvvetleri = np.zeros((eleman_sayisi, 1)) # Çubuk kuvvetleri (method1 - boy değişiminden)
Cubuk_Kuvvetleri_Softening = np.zeros((eleman_sayisi, 1)) # Çubuk kuvvetleri strain softening
Cubuk_Gerilmeleri = np.zeros((eleman_sayisi, 1))
Cubuk_Gerilmeleri_Softening = np.zeros((eleman_sayisi, 1))
Cikti_Cubuk_Gerilmeleri_Softening = np.zeros((eleman_sayisi, 1)) # Son adım - 1 olarak gerilme
değerlerini veriyor.
Toplam_Deplasmanlar = np.zeros((nokta_sayisi, 2)) # Deplasman matrisinin tanımlanması
Cikti_Toplam_Deplasmanlar = np.zeros((nokta_sayisi, 2)) # Son adım - 1 olarak düğüm
deplasman değerlerini veriyor.
Yuk_Dep_Liste = [ ] # Döngüler içerisinde önce listeye ekleniyor.
Dep_Dugum_Dep_Kont_Listesi = [ ] # Dep düğümün deplasmanlarını kontrol ederek
programı sonlandırmada kullanılıyor.
Mak_Cubuk_Alt_Liste = [ ] # Her iterasyonda maksimum birim deformasyon
sınırını aşan çubuk numaraları
Mak_Cubuk_Liste = [ ] # Her iterasyondaki birim deformasyon sınırı aşan
çubukların toplandığı liste
ss_index = Sinir_Sartlari.sinir_sartlari_index(nokta_sayisi, liste_koordinatlar) # Sınır şartlarının
indexlerini belirliyor
sss = Sinir_Sartlari.sinir_sartlari(nokta_sayisi, liste_koordinatlar) # Sınır şartları sayısı
mesnet_reaksiyon = np.zeros((len(ss_index), 3))
index_dep_dugum = Yuk_Dep_Matris.dep_dugum_index(nokta_sayisi, liste_koordinatlar,
Dep_Dugum) # Dep Düğümünün yerinin belirlenmesi.
Malzeme_Nonlineer.elastikmatrisolusturma(Elastisite_matris, Elastisite_baslagic, Ec,
eleman_sayisi, liste_elemanlar, dogrultu_matris, G, Ecelik, Etabanmesnet) # Elastisite ve kayma
modüllerine ait matrisinin başlangıç duruma göre oluşturulması.

if Master_Slave_Method == "Açık":
    index_master_dugum = Master_Slave.master_dugum_index(nokta_sayisi, liste_koordinatlar,
Master_Node) # Master noktasının indexi belirleniyor.
    index_master_dugum_yeni = Master_Slave.master_dugum_yeni_index(Slave_Node_Listesi,
Master_Node, index_master_dugum) # Slave noktaların matristen çıkarılmasından dolayı index
azalıyor.
    msss = Master_Slave.slave_sinir_sartlari(Slave_Node_Listesi) # Slave noktalarının kaç
yönten tutulu olduğuna bakılarak toplam sınır sayısı belirleniyor.
    Master_Slave.Transformasyon_Matris = np.zeros((2 * nokta_sayisi, 2 * nokta_sayisi - msss))
    Master_Slave.Master_Slave_Transformasyon_Matris_Olusturma(nokta_sayisi,
Master_Slave.Transformasyon_Matris, Slave_Node_Listesi, index_master_dugum_yeni)
    ms_liste_koordinatlar = Master_Slave.ms_sinir_kosullari(liste_koordinatlar, nokta_sayisi,
Slave_Node_Listesi) # Çıkarılan düğümlerden dolayı yeni düğüm ve sınır koşulu listesi
oluşturuluyor.

if Master_Slave_Method_Coklu == "Açık":
    index_master_dugum = Master_Slave.master_dugum_index_coklu(nokta_sayisi,
liste_koordinatlar, Master_Node1, Master_Node2, Master_Node3) # Master noktasının indexi
belirleniyor.
    index_master_dugum_yeni =
Master_Slave.master_dugum_yeni_index_coklu(Slave_Node_Listesi_Toplam, Master_Node1,
Master_Node2, Master_Node3, index_master_dugum) # Slave noktaların matristen
çıkarılmasından dolayı index azalıyor.
    msss = Master_Slave.slave_sinir_sartlari_coklu(Slave_Node_Listesi_Toplam) # Slave
noktalarının kaç yönten tutulu olduğuna bakılarak toplam sınır sayısı belirleniyor.

```

```

Master_Slave_Transformasyon_Matris = np.zeros((2 * nokta_sayisi, 2 * nokta_sayisi - msss))
Master_Slave.Master_Slave_Transformasyon_Matris_Olusturma_Coklu(nokta_sayisi,
Master_Slave_Transformasyon_Matris, Slave_Node_Listesi1, Slave_Node_Listesi2,
Slave_Node_Listesi3, index_master_dugum_yeni)
ms_liste_koordinatlar = Master_Slave.ms_sinir_kosullari_coklu(liste_koordinatlar,
nokta_sayisi, Slave_Node_Listesi_Toplam) # Çıkarılan düğümlerden dolayı yeni düğüm ve
sınır koşulu listesi oluşturuluyor.

```

4) Doğal periyod (birinci mod) değerinin hesaplanması.

if Master_Slave_Method == "Açık":

```

    frekanshesaplama.dogalfrekansbelirleme_ms(kat_sayisi, kat_yukseklıkları, kat_kutleleri,
etki_dugumleri, eleman_sayisi, nokta_sayisi, liste_elemanlar, liste_koordinatlar, sss,
Elastisite_matris, Keleman_matrisleri, Transformasyon_matris,
Cubuk_kuvvetleri_method2_matris, Gnonlinear, Master_Slave_Transformasyon_Matris, msss,
Slave_Node_Listesi, ms_liste_koordinatlar)

```

elif Master_Slave_Method_Coklu == "Açık":

```

    frekanshesaplama.dogalfrekansbelirleme_ms_coklu(kat_sayisi, kat_yukseklıkları, kat_kutleleri,
etki_dugumleri, eleman_sayisi, nokta_sayisi, liste_elemanlar, liste_koordinatlar, sss,
Elastisite_matris, Keleman_matrisleri, Transformasyon_matris,
Cubuk_kuvvetleri_method2_matris, Gnonlinear, Master_Slave_Transformasyon_Matris, msss,
Slave_Node_Listesi_Toplam, ms_liste_koordinatlar)

```

else:

```

    frekanshesaplama.dogalfrekansbelirleme(kat_sayisi, kat_yukseklıkları, kat_kutleleri,
etki_dugumleri, eleman_sayisi, nokta_sayisi, liste_elemanlar, liste_koordinatlar, sss,
Elastisite_matris, Keleman_matrisleri, Transformasyon_matris,
Cubuk_kuvvetleri_method2_matris, Gnonlinear)

```

5) Zati ağırlığın belirlenmesi ve yük matrisine eklenmesi.

```

zati_agirlik = Yuk_Matris.zati_agirlik(eleman_sayisi, liste_elemanlar, liste_koordinatlar, BHA)
liste_koordinatlar = Yuk_Matris.zati_yuk_ekleme(nokta_sayisi, zati_agirlik, liste_koordinatlar)

```

6) Tanımlamalar ve ön hesaplamaların tamamlamasından sonra analiz sürecine geçilmiştir. Öncelikle düşey sonrasında yatay yüklemeler etkisinde çözümlerler gerçekleştirilmiştir. Her iteratif döngüde elde edilen veriler işlenerek bir sonraki adıma ait parametreler hazırlanmıştır.

while Step < Step_sayisi + 1: # Steplere göre dış yükün belirlendiği döngü.

```

    iterasyon = 1
    Dongu_Sayisi = 0
    aaa = 1

```

```

    if Step == 2:
        iterasyon_sayisi = iterasyon_sayisi_step2

```

while iterasyon < iterasyon_sayisi + 1:

```
if iterasyon == aaa:
    Sonuc_Dongu += 1
    Dongu_Sayisi = 0
    aaa += 1

Dongu_Sayisi += 1
Toplam_Dongu_Sayisi += 1
```

"" Eleman, Sistem ve Yük Matrislerinin Oluşturulması ve Deplasmanların Belirlenmesi - Master Slave Method Opsiyonel ""

```
if Master_Slave_Method == "Açık":
```

```
    Ksyeni = Master_Slave.elemanmatristanimlama(eleman_sayisi, nokta_sayisi,
    liste_elemanlar, liste_koordinatlar, sss, Elastisite_matris, Keleman_matrisleri,
    Transformasyon_matris, Cubuk_kuvvetleri_method2_matris, Gnonlinear,
    Master_Slave_Transformasyon_Matris, msss, Slave_Node_Listesi, ms_liste_koordinatlar)
    # Daraltılmış Sistem Matrisi
    yuk_matrisi = Master_Slave.dis_yuk_tanimlama(Step, nokta_sayisi, liste_koordinatlar,
    iterasyon_sayisi, Master_Slave_Transformasyon_Matris) # Adım ve iterasyonlara göre dış yük
    matrisinin oluşturulması.
    Yuk_matris_yeni = Master_Slave.dis_yuk(nokta_sayisi, sss, yuk_matrisi, msss,
    Slave_Node_Listesi, ms_liste_koordinatlar) # Daraltılmış Yük Matrisi
    Deplasman = Master_Slave.ters_matris_yontemi(nokta_sayisi, sss, Ksyeni,
    Yuk_matris_yeni, msss, Slave_Node_Listesi, Master_Slave_Transformasyon_Matris,
    ms_liste_koordinatlar) # Ters matris yöntemi ile çözüm gerçekleştiriliyor.
```

```
elif Master_Slave_Method_Coklu == "Açık":
```

```
    Ksyeni = Master_Slave.elemanmatristanimlamacoklu(eleman_sayisi, nokta_sayisi,
    liste_elemanlar, liste_koordinatlar, sss, Elastisite_matris, Keleman_matrisleri,
    Transformasyon_matris, Cubuk_kuvvetleri_method2_matris, Gnonlinear,
    Master_Slave_Transformasyon_Matris, msss, Slave_Node_Listesi_Toplam,
    ms_liste_koordinatlar) # Daraltılmış Sistem Matrisi
    yuk_matrisi = Master_Slave.dis_yuk_tanimlama_coklu(Step, nokta_sayisi,
    liste_koordinatlar, iterasyon_sayisi, Master_Slave_Transformasyon_Matris) # Adım ve
    iterasyonlara göre dış yük matrisinin oluşturulması.
    Yuk_matris_yeni = Master_Slave.dis_yuk_coklu(nokta_sayisi, sss, yuk_matrisi, msss,
    Slave_Node_Listesi_Toplam, ms_liste_koordinatlar) # Daraltılmış Yük Matrisi
    Deplasman = Master_Slave.ters_matris_yontemi_coklu(nokta_sayisi, sss, Ksyeni,
    Yuk_matris_yeni, msss, Slave_Node_Listesi_Toplam, Master_Slave_Transformasyon_Matris,
    ms_liste_koordinatlar) # Ters matris yöntemi ile çözüm gerçekleştiriliyor.
```

```
else:
```

```
    Ksyeni = Eleman_Sistem_Matris.elemanmatristanimlama(eleman_sayisi, nokta_sayisi,
    liste_elemanlar, liste_koordinatlar, sss, Elastisite_matris, Keleman_matrisleri,
    Transformasyon_matris, Cubuk_kuvvetleri_method2_matris, Gnonlinear) # Daraltılmış Sistem
    Matrisi
    yuk_matrisi = Yuk_Matris.dis_yuk_tanimlama(Step, nokta_sayisi, liste_koordinatlar,
    iterasyon_sayisi) # Adım ve iterasyonlara göre dış yük matrisinin oluşturulması.
    Yuk_matris_yeni = Yuk_Matris.dis_yuk(nokta_sayisi, liste_koordinatlar, sss, yuk_matrisi)
    # Daraltılmış Yük Matrisi
    Deplasman = Matris_Cozum_Yontemleri.ters_matris_yontemi(nokta_sayisi,
    liste_koordinatlar, sss, Ksyeni, Yuk_matris_yeni) # Ters matris yöntemi ile çözüm
    gerçekleştiriliyor.
```

"" Yeni Koordinatların Belirlenmesi ""

```
yenikoordinat = Yeni_Koordinatlar.Yeni_koordinatlar(nokta_sayisi, liste_koordinatlar,
Deplasman)
```

"" Birim Deformasyonlar ""

Birim_deformasyon = Malzeme_Nonlinear.Birim_Deformasyon(eleman_sayisi, liste_elemanlar, liste_koordinatlar, yenikoordinat, Birim_deformasyon_matris, Epsilon_tcr, Epsilon_ccr, Hasar_birim_deformasyon_matris)

if Cozum_Method == 1: # Lineer

Cubuk_uc_kuvvet = Yük_Dep_Matris.dugum_kuvvetleri(eleman_sayisi, Dugum_kuvvet_matris, Keleman_matrisleri, liste_elemanlar, Deplasman)
lokal_cubuk_kuvvetleri = Çubuk_Kuvvetleri.Cubuk_Kuvvetleri_Method2(eleman_sayisi, Transformasyon_matris, Cubuk_uc_kuvvet, Cubuk_uc_kuvvet_matris) # Çubuklarda meydana gelen uç kuvvetler kümülatif olarak ve iteratif olarak belirleniyor.
Çubuk_Kuvvetleri.Method2_devam(eleman_sayisi, liste_elemanlar, Cubuk_uc_kuvvet_matris, Cubuk_kuvvetleri_method2_matris) # Çubuk kuvvetleri belirleniyor.
Çubuk_Kuvvetleri.Cubuk_Gerilmeleri(eleman_sayisi, Cubuk_kuvvetleri_method2_matris, liste_elemanlar, Cubuk_Gerilmeleri)

elif Cozum_Method == 2: # Strain Softening

kontrol = Malzeme_Nonlinear.strain_softening(eleman_sayisi, liste_elemanlar, Ec, Ett, Etc, Epsilon_tcr, Epsilon_tu, Epsilon_ccr, Epsilon_cu, Birim_deformasyon_matris, Elastisite_matris, Birim_deformasyon, dogrultu_matris, Epsilon_maksimum, G, Ecelik, Cubuk_Gerilmeleri_Softening, Elastisite_baslagic, kayma_dayanim_parametre_matris, Mak_Cubuk_Alt_Liste, Cikti_Cubuk_Gerilmeleri_Softening, Etabanmesnet)
Cubuk_uc_kuvvet = Yük_Dep_Matris.dugum_kuvvetleri(eleman_sayisi, Dugum_kuvvet_matris, Keleman_matrisleri, liste_elemanlar, Deplasman)
Çubuk_Kuvvetleri.Cubuk_Kuvvetleri_Softening(eleman_sayisi, Cikti_Cubuk_Gerilmeleri_Softening, liste_elemanlar, Cubuk_Kuvvetleri_Softening)

elif Cozum_Method == 3: # Strain Hardening

kontrol = Malzeme_Nonlinear.strain_hardening(eleman_sayisi, liste_elemanlar, Ec, Ett, Etc, Epsilon_tcr, Epsilon_tu, Epsilon_ccr, Epsilon_cu, Birim_deformasyon_matris, Elastisite_matris, Birim_deformasyon, dogrultu_matris, Epsilon_maksimum, G, Ecelik, kayma_dayanim_parametre_matris)
Cubuk_uc_kuvvet = Yük_Dep_Matris.dugum_kuvvetleri(eleman_sayisi, Dugum_kuvvet_matris, Keleman_matrisleri, liste_elemanlar, Deplasman)
lokal_cubuk_kuvvetleri = Çubuk_Kuvvetleri.Cubuk_Kuvvetleri_Method2(eleman_sayisi, Transformasyon_matris, Cubuk_uc_kuvvet, Cubuk_uc_kuvvet_matris) # Çubuklarda meydana gelen uç kuvvetler kümülatif olarak ve iteratif olarak belirleniyor.
Çubuk_Kuvvetleri.Method2_devam(eleman_sayisi, liste_elemanlar, Cubuk_uc_kuvvet_matris, Cubuk_kuvvetleri_method2_matris) # Çubuk kuvvetleri belirleniyor.
Çubuk_Kuvvetleri.Cubuk_Gerilmeleri(eleman_sayisi, Cubuk_kuvvetleri_method2_matris, liste_elemanlar, Cubuk_Gerilmeleri)

else:

print("\n\nÇözüm Metodu girdisi yanlış...\n\n")
sys.exit()

"" Toplam Deplasmanlar ""

Yeni_Koordinatlar.Toplam_Deplasmanlar(nokta_sayisi, liste_koordinatlar, Toplam_Deplasmanlar, Deplasman, Cikti_Toplam_Deplasmanlar) # Toplam deplasmanlar belirleniyor.

"" Yük-Deplasman Eğrisine Ait Verilerin Elde Edilmesi ""

if Step == 1:

mesnet_dusey_kuvvet = Yük_Dep_Matris.dusey_mesnet_kuvvetleri_topla(nokta_sayisi, liste_koordinatlar, Dugum_kuvvet_matris, iterasyon, iterasyon_sayisi)

if Step == 2:

```
mesnet_yatay_kuvvet = Yuk_Dep_Matris.yatay_mesnet_kuvvetleri_topla(nokta_sayisi,
liste_koordinatlar, Dugum_kuvvet_matris, iterasyon, iterasyon_sayisi)
```

Yük - Deplasman Grafiğine Veri Aktarımı

```
Yuk_Dep_Matris.yuk_dep_liste(Yuk_Dep_Liste, Step, iterasyon, Toplam_Deplasmanlar,
index_dep_dugum, mesnet_dusey_kuvvet, mesnet_yatay_kuvvet)
```

İterativ Döngü İçin Koordinatların liste_koordinatlara Aktarılması

```
if Cozum_Method != 1 or Cozum_Method == 1 and Gnonlineer == "Açık":
    Yeni_Koordinatlar.Koordinat_guncelleme(nokta_sayisi, liste_koordinatlar, yenikoordinat)
```

Sıfırlamalar

```
Mak_Cubuk_Liste.append(Mak_Cubuk_Alt_Liste) # Her iterasyonda birim deformasyon
sınırını aşan elemanların listesini genel matris listesine tanımlanıyor.
```

```
Keleman_matrisleri = [ ]
Transformasyon_matris = [ ]
Mak_Cubuk_Alt_Liste = [ ]
```

Analizin Durdurulma Koşulu

```
fark = [0] # Kapalı durumda hata vermemesi için, 0. index 0 olarak tanımlanmıştır. Yeni
eklenenlerin indexleri 1'den başlamaktadır.
```

```
if Tum_sistem_sonlandirma == "Açık" and Step == 2:
```

```
for i in range(0, nokta_sayisi):
    Dep_Dugum_Dep_Kont_Listesi.append(Toplam_Deplasmanlar[i][0])
```

```
for i in range(0, nokta_sayisi):
    a = 1
    mak_deger = 0
    artis = nokta_sayisi
    alt_liste = [ ]
    alt_liste.append(Dep_Dugum_Dep_Kont_Listesi[i])
```

```
while len(Dep_Dugum_Dep_Kont_Listesi) / nokta_sayisi > a:
```

```
    alt_liste.append(Dep_Dugum_Dep_Kont_Listesi[i + a * artis])
    a += 1
```

```
    mak_deger = max(alt_liste)
    fark.append(Toplam_Deplasmanlar[i][0] - mak_deger)
```

```
if min(fark) <= Negatif_Sinir_Deger:
    min_index = fark.index(min(fark))
    print("-----")
    print("Negatif yönlü hareket başladı. Program sonlandırılıyor.\n")
    print("Sorunun başladığı düğüm noktası: {}".format((min_index)))
    break
```

```
iterasyon += 1 # While (iterasyon) döngüsünün iterasyonunu artırıyor.
```

```
Step += 1 # While (step) döngüsünün iterasyonunu artırıyor.
```

7) Son aşama ise analiz sonuçlarının işlenmesidir. Sonuçlar genel olarak tablolar halinde kullanıcıya sunulmaktadır. Fakat hasar dağılımı görsel olarak ifade edilmektedir.

"""" Yük-Deplasman Listesinin Matrise Dönüştürülmesi """"

```
Yuk_Dep_Matris = np.zeros((Sonuc_Dongu + 1, 6))  # +1 ilk satırı tamamen sıfır yapabilmek için eklendi (Step = 0)
```

```
kkk = 0
for i in range(1, Sonuc_Dongu + 1):
    for j in range(0, 6):
        Yuk_Dep_Matris[i][j] = Yuk_Dep_Liste[kkk]
        kkk += 1
```

"""" Mesnet Reaksiyonlarının Belirlenmesi """"

```
mesnet_toplam = Mesnet_Reaksiyonlari.Mesnet_Reaksiyonlari(ss_index, mesnet_reaksiyon, liste_koordinatlar, Dugum_kuvvet_matris)
```

"""" Strain Softening 'Açık' ise Matrisin Güncelleme """"

```
if Cozum_Method == 2:

    for i in range(0, eleman_sayisi):
        Cubuk_Gerilmeleri[i][0] = Cikti_Cubuk_Gerilmeleri_Softening[i][0]  # İteraston - 1'e göre gerilme değerlerini veriyor
        Cubuk_kuvvetleri_method2_matris[i][0] = Cubuk_Kuvvetleri_Softening[i][0]
```

"""" Sonuçların Tablolara Aktarılması """"

```
def tablo_olustur():
    cursor.execute("CREATE TABLE IF NOT EXISTS Ornek1 (Eleman_No INT, Cubuk_Kuvveti FLOAT, Cubuk_Gerilme FLOAT)")
    con.commit()

def tablo_olustur2():
    cursor.execute("CREATE TABLE IF NOT EXISTS Ornek1_2 (Dugum_Noktası INT, X_deplasman FLOAT, Y_deplasman FLOAT)")
    con.commit()

def tablo_olustur3():
    cursor.execute("CREATE TABLE IF NOT EXISTS Ornek1_3 (Step INT, Iterasyon_No INT, Taban_Kesme_Kevveti FLOAT, Dep_Dugum_X FLOAT, Dusey_Kuvvet FLOAT, Dep_Dugum_Y FLOAT)")
    con.commit()

def tablo_olustur4():
    cursor.execute("CREATE TABLE IF NOT EXISTS Ornek1_4 (X_Yonu_Toplam_Mesnet FLOAT, Y_Yonu_Toplam_Mesnet FLOAT, Toplam_Dongu_Sayisi INT, Toplam_Analiz_Suresi FLOAT, Analizi_Sonlandiran_Dugum)")
    con.commit()

def tablo_olustur5():
    cursor.execute("CREATE TABLE IF NOT EXISTS Ornek1_5 (Dugum_No INT, X_Yonu_Mesnet_Reaksiyonu FLOAT, Y_Yonu_Mesnet_Reaksiyonu FLOAT)")
    con.commit()
```

```
def veri_ekle(Eleman_No, Cubuk_Kuvveti, Cubuk_Gerilme):
    cursor.execute("INSERT INTO Ornek1 VALUES (?, ?, ?)", (Eleman_No, Cubuk_Kuvveti,
Cubuk_Gerilme))
    con.commit()
```

```
def veri_ekle2(Dugum_No, X_deplasman, Y_deplasman):
    cursor.execute("INSERT INTO Ornek1_2 VALUES (?, ?, ?)", (Dugum_No, X_deplasman,
Y_deplasman))
    con.commit()
```

```
def veri_ekle3(Step, Iterasyon_No, Taban_Kesme_Kevveti, Dep_Dugum_X, Dusey_Kuvvet,
Dep_Dugum_Y):
    cursor.execute("INSERT INTO Ornek1_3 VALUES (?, ?, ?, ?, ?, ?)", (Step, Iterasyon_No,
Taban_Kesme_Kevveti, Dep_Dugum_X, Dusey_Kuvvet, Dep_Dugum_Y))
    con.commit()
```

```
def veri_ekle4(X_Yonu_Toplam_Mesnet, Y_Yonu_Toplam_Mesnet, Toplam_Dongu_Sayisi,
Toplam_Analiz_Suresi, Analizi_Sonlandiran_Dugum):
    cursor.execute("INSERT INTO Ornek1_4 VALUES (?, ?, ?, ?, ?)",
(X_Yonu_Toplam_Mesnet, Y_Yonu_Toplam_Mesnet, Toplam_Dongu_Sayisi,
Toplam_Analiz_Suresi, Analizi_Sonlandiran_Dugum))
    con.commit()
```

```
def veri_ekle5(Dugum_No, X_Yonu_Mesnet_Reaksiyonu, Y_Yonu_Mesnet_Reaksiyonu):
    cursor.execute("INSERT INTO Ornek1_5 VALUES (?, ?, ?)", (Dugum_No,
X_Yonu_Mesnet_Reaksiyonu, Y_Yonu_Mesnet_Reaksiyonu))
    con.commit()
```

```
con = sqlite3.connect("sonuclar.db")
cursor = con.cursor()
cursor.execute("DROP TABLE Ornek1")
cursor.execute("DROP TABLE Ornek1_2")
cursor.execute("DROP TABLE Ornek1_3")
cursor.execute("DROP TABLE Ornek1_4")
cursor.execute("DROP TABLE Ornek1_5")
```

```
tablo_olustur()
tablo_olustur2()
tablo_olustur3()
tablo_olustur4()
tablo_olustur5()
```

```
for i in range(0, eleman_sayisi):
    Eleman_No = liste_elemanlar[i][0]
    Cubuk_Kuvveti = round(Cubuk_kuvvetleri_method2_matris[i][0], 2)
    Cubuk_Gerilme = round(Cubuk_Gerilmeleri[i][0], 2)
    veri_ekle(Eleman_No, Cubuk_Kuvveti, Cubuk_Gerilme)
```

```
for i in range(0, nokta_sayisi):
    Dugum_No = liste_koordinatlar[i][0]
    X_deplasman = round(Cikti_Toplam_Deplasmanlar[i][0], 2)
    Y_deplasman = round(Cikti_Toplam_Deplasmanlar[i][1], 2)
    veri_ekle2(Dugum_No, X_deplasman, Y_deplasman)
```

```
for i in range(0, Sonuc_Dongu + 1):
    Step = int(Yuk_Dep_Matris[i][0])
    Iterasyon_No = int(Yuk_Dep_Matris[i][1])
    Taban_Kesme_Kevveti = round(Yuk_Dep_Matris[i][2], 2) * (-0.001) # Sadece pozitif işaret
elde etmek için eksiyle çarpılıyor. Ayrıca birimi kN'a çevriliyor.
```

```

Dep_Dugum_X = round(Yuk_Dep_Matris[i][3], 2)
Dusey_Kuvvet = round(Yuk_Dep_Matris[i][4], 2) * (0.001) # Birimi kN'a çevriliyor.
Dep_Dugum_Y = round(Yuk_Dep_Matris[i][5], 2) * (-1)
veri_ekle3(Step, Iterasyon_No, Taban_Kesme_Kevveti, Dep_Dugum_X, Dusey_Kuvvet,
Dep_Dugum_Y)

```

```

X_Yonu_Toplam_Mesnet = mesnet_toplam[0][0]
Y_Yonu_Toplam_Mesnet = mesnet_toplam[0][1]
Toplam_Dongu_Sayisi = Toplam_Dongu_Sayisi
Toplam_Analiz_Suresi = round(analiz_suresi, 2)
Analizi_Sonlandiran_Dugum = min_index
veri_ekle4(X_Yonu_Toplam_Mesnet, Y_Yonu_Toplam_Mesnet, Toplam_Dongu_Sayisi,
Toplam_Analiz_Suresi, Analizi_Sonlandiran_Dugum)

```

```

for i in range(0, len(ss_index)):
    Dugum_No = int(mesnet_reaksiyon[i][0])
    X_Yonu_Mesnet_Reaksiyonu = round(mesnet_reaksiyon[i][1], 2)
    Y_Yonu_Mesnet_Reaksiyonu = round(mesnet_reaksiyon[i][2], 2)
    veri_ekle5(Dugum_No, X_Yonu_Mesnet_Reaksiyonu, Y_Yonu_Mesnet_Reaksiyonu)

```

```

con.close()
con.close()
con.close()
con.close()
con.close()

```

"""" Hasar Çıktıları - Görseller """"

Hasar gelişimlerine ait görsellerin elde edilmesi.

```

Gorsel_Ciktilari.Gorsel_cikti_ilk_durum(eleman_sayisi, nokta_sayisi,
Hasar_birim_deformasyon_matris, Epsilon_ccr, Epsilon_cu, Epsilon_tcr, dogrultu_matris,
Epsilon_tu, kayma_dayanim_parametre_matris, Epsilon_maksimum, GCBK) # Birim
deformasyona bağlı hasar gelişimi

```

```

Gorsel_Ciktilari.Gorsel_cikti_ilk_durum_detayli(eleman_sayisi, nokta_sayisi,
Hasar_birim_deformasyon_matris, Epsilon_ccr, Epsilon_cu, Epsilon_tcr, dogrultu_matris,
Epsilon_tu, kayma_dayanim_parametre_matris, Epsilon_maksimum, GCBK) # Birim
deformasyona bağlı hasar gelişimi (çok katlı yapı için detaylı renk skalasına göre)

```

```

Gorsel_Ciktilari.Gorsel_hasar_degerlendirme(eleman_sayisi, nokta_sayisi,
Cikti_Toplam_Deplasmanlar, dogrultu_matris, GCBK) # Kapasite eğrisine göre (Şekil 3.10)

```

8) İlk yedi maddede ana ekran akışı paylaşılmıştır. Fakat algoritmaya ait birçok çözümleme alt fonksiyonlarla sağlanmaktadır. Bazı fonksiyonlara ait açıklamalar maddeler halinde sunulmuştur.

a) Eleman doğrultusunun belirlenmesi:

```

def eleman_dogrultusu_belirleme(eleman_sayisi, liste_elemanlar, liste_koordinatlar,
dogrultu_matris, Celik_Bas_El_No, Celik_Bit_El_No):

```

```

for i in range(0, eleman_sayisi):

```

```

    basnok = liste_elemanlar[i][1]

```

```

bitnok = liste_elemanlar[i][2]
Xbasnok = liste_koordinatlar[basnok - 1][1]
Xbitnok = liste_koordinatlar[bitnok - 1][1]
Ybasnok = liste_koordinatlar[basnok - 1][2]
Ybitnok = liste_koordinatlar[bitnok - 1][2]

dogrultu_matris[i][0] = liste_elemanlar[i][0]

if Xbasnok == Xbitnok and Ybasnok != Ybitnok:
    dogrultu_matris[i][1] = 1 # Dusey
    print("Eleman Numarası: {}, Eleman Doğrultusu: Dusey".format(liste_elemanlar[i][0]))

if Xbasnok != Xbitnok and Ybasnok == Ybitnok:
    dogrultu_matris[i][1] = 2 # Yatay
    print("Eleman Numarası: {}, Eleman Doğrultusu: Yatay".format(liste_elemanlar[i][0]))

if Xbasnok != Xbitnok and Ybasnok != Ybitnok:
    dogrultu_matris[i][1] = 3 # Diagonal
    print("Eleman Numarası: {}, Eleman Doğrultusu:
Diagonal".format(liste_elemanlar[i][0]))

# Celik Başlığın tanımlanması.

if Celik_Bit_El_No >= liste_elemanlar[i][0] >= Celik_Bas_El_No:
    dogrultu_matris[i][1] = 4 # Çelik başlık

```

b) Zati ağırlığın belirlenmesi ve düşey yüke eklenmesi:

```

def zati_agirlik(eleman_sayisi, liste_elemanlar, liste_koordinatlar, BHA):

    toplam_hacim = 0
    toplam_agirlik = 0

    for i in range(0, eleman_sayisi):
        eleman_boyu = Eleman_Sistem_Matris.eleman_boyu_belirleme(i, liste_elemanlar,
liste_koordinatlar)
        eleman_hacim = eleman_boyu * liste_elemanlar[i][3]
        toplam_hacim = toplam_hacim + eleman_hacim

    toplam_agirlik = toplam_hacim * BHA

    print("\nToplam Ağırlık: ", round(toplam_agirlik, 2))
    print("\n-----")

return toplam_agirlik

def zati_yuk_ekleme(nokta_sayisi, zati_agirlik, liste_koordinatlar):

    zati_agirlik_dugum = - (zati_agirlik / nokta_sayisi)

    for i in range(0, nokta_sayisi):
        liste_koordinatlar[i][5] = liste_koordinatlar[i][5] + zati_agirlik_dugum

return liste_koordinatlar

```

c) Kafes elemanlara ait lokal ve tüm sistemi temsil eden global rijitlik matrislerinin hesaplanması, sonrasında global matris üzerinde sınır koşullarının uygulanması:

```
def elemanmatristanimlama(eleman_sayisi, nokta_sayisi, liste_elemanlar, liste_koordinatlar, sss,
Elastisite_matris, Keleman_matrisleri, Transformasyon_matris,
Cubuk_kuvvetleri_method2_matris, Gnonlinear):
```

```
    eleman_boyu_matrisi = np.zeros((eleman_sayisi, 2))
    Ksistem = np.zeros((2 * nokta_sayisi, 2 * nokta_sayisi))
    Ksyeni = np.zeros((2 * nokta_sayisi - sss, 2 * nokta_sayisi - sss))
```

```
    for i in range(0, eleman_sayisi):
```

```
        basnok = liste_elemanlar[i][1]
        bitnok = liste_elemanlar[i][2]
        Xbasnok = liste_koordinatlar[basnok - 1][1]
        Xbitnok = liste_koordinatlar[bitnok - 1][1]
        Ybasnok = liste_koordinatlar[basnok - 1][2]
        Ybitnok = liste_koordinatlar[bitnok - 1][2]
        eleman_boyu = ((Xbitnok - Xbasnok) ** 2 + (Ybitnok - Ybasnok) ** 2) ** 0.5
        eleman_boyu_matrisi[i][0] = liste_elemanlar[i][0]
        eleman_boyu_matrisi[i][1] = eleman_boyu
        c = (Xbitnok - Xbasnok) / eleman_boyu # cosinüs
        s = (Ybitnok - Ybasnok) / eleman_boyu # sinüs
```

```
    # Transformasyon Matrisi (Çubuk uç kuvvetlerinin belirlenmesi için)
```

```
    Ktransformasyon = np.zeros((4, 4))
```

```
    Ktransformasyon[0][0] = c
    Ktransformasyon[0][1] = s
    Ktransformasyon[0][2] = 0
    Ktransformasyon[0][3] = 0
    Ktransformasyon[1][0] = -s
    Ktransformasyon[1][1] = c
    Ktransformasyon[1][2] = 0
    Ktransformasyon[1][3] = 0
    Ktransformasyon[2][0] = 0
    Ktransformasyon[2][1] = 0
    Ktransformasyon[2][2] = c
    Ktransformasyon[2][3] = s
    Ktransformasyon[3][0] = 0
    Ktransformasyon[3][1] = 0
    Ktransformasyon[3][2] = -s
    Ktransformasyon[3][3] = c
```

```
    Transformasyon_matris.append(Ktransformasyon)    # Global'e aktarıyor.
```

```
    # Eleman Rijitlik Matrisi
```

```
    Keleman = np.zeros((4, 4))
```

```
    Keleman[0][0] = c * c
    Keleman[0][1] = c * s
    Keleman[0][2] = -c * c
    Keleman[0][3] = -c * s
```

```

Keleman[1][0] = c * s
Keleman[1][1] = s * s
Keleman[1][2] = -c * s
Keleman[1][3] = -s * s
Keleman[2][0] = -c * c
Keleman[2][1] = -c * s
Keleman[2][2] = c * c
Keleman[2][3] = c * s
Keleman[3][0] = -c * s
Keleman[3][1] = -s * s
Keleman[3][2] = c * s
Keleman[3][3] = s * s

```

```
Keleman = Keleman * ((liste_elemanlar[i][3] * Elastisite_matris[i][0]) / eleman_boyu)
```

Geometrik Rijitlik Matrisi

```
if Gnonlinear == "Açık":
```

```
Kgeometrik = np.zeros((4, 4))
```

```

Kgeometrik[0][0] = s * s
Kgeometrik[0][1] = -c * s
Kgeometrik[0][2] = -s * s
Kgeometrik[0][3] = c * s
Kgeometrik[1][0] = -c * s
Kgeometrik[1][1] = c * c
Kgeometrik[1][2] = c * s
Kgeometrik[1][3] = -c * c
Kgeometrik[2][0] = -s * s
Kgeometrik[2][1] = c * s
Kgeometrik[2][2] = s * s
Kgeometrik[2][3] = -c * s
Kgeometrik[3][0] = c * s
Kgeometrik[3][1] = -c * c
Kgeometrik[3][2] = -c * s
Kgeometrik[3][3] = c * c

```

```
Kgeometrik = Kgeometrik * (Cubuk_kuvvetleri_method2_matris[i][0] / eleman_boyu)
```

```
Keleman = Keleman + Kgeometrik
```

```
Keleman_matrisleri.append(Keleman) # Global'e aktarıyor.
```

Sistem Matrisinin Oluşturulması

```

Ksistem[(2 * basnok - 1) - 1][(2 * basnok - 1) - 1] = Ksistem[(2 * basnok - 1) - 1][(2 * basnok - 1) - 1] + Keleman[0][0]
Ksistem[(2 * basnok - 1) - 1][(2 * basnok) - 1] = Ksistem[(2 * basnok - 1) - 1][(2 * basnok) - 1] + Keleman[0][1]
Ksistem[(2 * basnok) - 1][(2 * basnok - 1) - 1] = Ksistem[(2 * basnok) - 1][(2 * basnok - 1) - 1] + Keleman[1][0]
Ksistem[(2 * basnok) - 1][(2 * basnok) - 1] = Ksistem[(2 * basnok) - 1][(2 * basnok) - 1] + Keleman[1][1]
Ksistem[(2 * basnok - 1) - 1][(2 * bitnok - 1) - 1] = Ksistem[(2 * basnok - 1) - 1][(2 * bitnok - 1) - 1] + Keleman[0][2]
Ksistem[(2 * basnok - 1) - 1][(2 * bitnok) - 1] = Ksistem[(2 * basnok - 1) - 1][(2 * bitnok) - 1] + Keleman[0][3]
Ksistem[(2 * basnok) - 1][(2 * bitnok - 1) - 1] = Ksistem[(2 * basnok) - 1][(2 * bitnok - 1) - 1] + Keleman[1][2]

```

```

Ksistem[(2 * basnok) - 1][(2 * bitnok) - 1] = Ksistem[(2 * basnok) - 1][(2 * bitnok) - 1] +
Keleman[1][3]
Ksistem[(2 * bitnok - 1) - 1][(2 * basnok - 1) - 1] = Ksistem[(2 * bitnok - 1) - 1][(2 * basnok -
1) - 1] + Keleman[2][0]
Ksistem[(2 * bitnok - 1) - 1][(2 * basnok) - 1] = Ksistem[(2 * bitnok - 1) - 1][(2 * basnok) -
1] + Keleman[2][1]
Ksistem[(2 * bitnok) - 1][(2 * basnok - 1) - 1] = Ksistem[(2 * bitnok) - 1][(2 * basnok - 1) -
1] + Keleman[3][0]
Ksistem[(2 * bitnok) - 1][(2 * basnok) - 1] = Ksistem[(2 * bitnok) - 1][(2 * basnok) - 1] +
Keleman[3][1]
Ksistem[(2 * bitnok - 1) - 1][(2 * bitnok - 1) - 1] = Ksistem[(2 * bitnok - 1) - 1][(2 * bitnok -
1) - 1] + Keleman[2][2]
Ksistem[(2 * bitnok - 1) - 1][(2 * bitnok) - 1] = Ksistem[(2 * bitnok - 1) - 1][(2 * bitnok) - 1]
+ Keleman[2][3]
Ksistem[(2 * bitnok) - 1][(2 * bitnok - 1) - 1] = Ksistem[(2 * bitnok) - 1][(2 * bitnok - 1) - 1]
+ Keleman[3][2]
Ksistem[(2 * bitnok) - 1][(2 * bitnok) - 1] = Ksistem[(2 * bitnok) - 1][(2 * bitnok) - 1] +
Keleman[3][3]

```

Sistem matrisinin sınır koşullarına göre kontrolü.

```

for i in range(0, 2 * nokta_sayisi):
    for j in range(0, 2 * nokta_sayisi):
        k = Ksistem[i][j]
        if k == -4444.4444:
            print("Sistem Matrisinde -4444.4444 değeri bulunmaktadır. "
                  "Sınır Koşullarının Uygulanmasını gözden geçiriniz.")
            print("-----")
            print("Sınır koşulu hatası nedeniyle program sonlandırılıyor.")
            sys.exit()

```

Sınır Koşullarının Uygulanması

```

for i in range(0, nokta_sayisi):
    a = i + 1                                # Düğüm noktası numarasını temsil ediyor.

    if liste_koordinatlar[i][0] == a:

        if liste_koordinatlar[i][3] == 1:    # X yönü tutulu.
            for j in range(0, 2 * nokta_sayisi):
                Ksistem[(2 * a - 1) - 1][j] = -4444.4444
                Ksistem[j][(2 * a - 1) - 1] = -4444.4444

        if liste_koordinatlar[i][3] == 2:    # Y yönü tutulu.
            for j in range(0, 2 * nokta_sayisi):
                Ksistem[(2 * a) - 1][j] = -4444.4444
                Ksistem[j][(2 * a) - 1] = -4444.4444

        if liste_koordinatlar[i][3] == 12:   # X ve Y yönleri tutulu.
            for j in range(0, 2 * nokta_sayisi):
                Ksistem[(2 * a - 1) - 1][j] = -4444.4444
                Ksistem[j][(2 * a - 1) - 1] = -4444.4444
                Ksistem[(2 * a) - 1][j] = -4444.4444
                Ksistem[j][(2 * a) - 1] = -4444.4444

```

Sınır Koşullarına Bağlı Olarak Yeni Matrisin Oluşturulması

```

aa = bb = 0
for i in range(0, 2 * nokta_sayisi):
    for j in range(0, 2 * nokta_sayisi):

```

```

if Ksistem[i][j] != -4444.4444:
    if bb == 2 * nokta_sayisi - sss:
        aa += 1
        bb = 0
    Ksyeni[aa][bb] = Ksistem[i][j]
    bb += 1

```

```

return Ksyeni

```

d) Düğüm noktalarındaki dış yüklerin tanımlanması ve global yük matrisi üzerinde sınır koşullarının uygulanması:

```

def dis_yuk_tanimlama(Step, nokta_sayisi, liste_koordinatlar, iterasyon_sayisi):

```

```

    # Yük Matrisinin Oluşturulması

```

```

    yuk_matrisi = np.zeros((2 * nokta_sayisi, 1))

```

```

    for i in range(0, nokta_sayisi):

```

```

        a = i + 1 # Düğüm noktası numarasını temsil ediyor.

```

```

        if liste_koordinatlar[i][0] == a:

```

```

            if Step == 1:

```

```

                yuk_matrisi[(2 * a) - 1, 0] = liste_koordinatlar[i][5] / iterasyon_sayisi # İterasyon
                sayısına bölünüyor.

```

```

            elif Step == 2:

```

```

                yuk_matrisi[(2 * a - 1) - 1, 0] = liste_koordinatlar[i][4] / iterasyon_sayisi # İterasyon
                sayısına bölünüyor.

```

```

            else:

```

```

                print("Step sayısının 2'den büyük olmasıyla ilgili koşullar tanımlanmamıştır.")

```

```

                print("-----")

```

```

                print("Program Sonlandırılıyor...")

```

```

                sys.exit()

```

```

    return yuk_matrisi

```

```

def dis_yuk(nokta_sayisi, liste_koordinatlar, sss, yuk_matrisi):

```

```

    Yuk_matris_yeni = np.zeros((2 * nokta_sayisi - sss, 1))

```

```

    # Yük matrisinin sınır koşullarına göre kontrolü.

```

```

    for i in range(0, 2 * nokta_sayisi):

```

```

        i = yuk_matrisi[i][0]

```

```

        if i == -4444.4444:

```

```

            print("Yük Matrisinde -4444.4444 değeri bulunmaktadır. "

```

```

                  "Sınır Koşullarının Uygulanmasını gözden geçiriniz.")

```

```

            print("-----")

```

```

            print("Sınır koşulu hatası nedeniyle program sonlandırılıyor.")

```

```

            sys.exit()

```

```

    # Sınır Koşullarının Uygulanması

```

```

    for i in range(0, nokta_sayisi):

```

$a = i + 1$ # Düğüm noktası numarasını temsil ediyor.

if liste_koordinatlar[i][0] == a:

if liste_koordinatlar[i][3] == 1: # X yönü tutulu.
yuk_matrisi[(2 * a - 1) - 1][0] = -4444.4444

if liste_koordinatlar[i][3] == 2: # Y yönü tutulu.
yuk_matrisi[(2 * a) - 1][0] = -4444.4444

if liste_koordinatlar[i][3] == 12: # X ve Y yönleri tutulu.
yuk_matrisi[(2 * a - 1) - 1][0] = -4444.4444
yuk_matrisi[(2 * a) - 1][0] = -4444.4444

aa = 0

for i **in** range(0, 2 * nokta_sayisi):

if yuk_matrisi[i][0] != -4444.4444:
Yuk_matris_yeni[aa][0] = yuk_matrisi[i][0]
aa += 1

return Yuk_matris_yeni

e) Ters matris yöntemiyle Denklem (3.5)'in çözülmesi:

def ters_matris_yontemi(nokta_sayisi, liste_koordinatlar, sss, Ksyeni, Yuk_matris_yeni):

dep = np.zeros((2 * nokta_sayisi - sss, 1))
deplasman = np.zeros((nokta_sayisi, 2))

ters_Ks = np.linalg.inv(Ksyeni)

dep = np.dot(ters_Ks, Yuk_matris_yeni)

Tüm düğüm noktalarının X ve Y yönlerine ait deplasman değerlerinin belirlenmesi

k = 0

for i **in** range(0, nokta_sayisi):

if liste_koordinatlar[i][3] == 0: # X ve Y yönleri serbest.
deplasman[i][0] = dep[k][0]
deplasman[i][1] = dep[k + 1][0]
k += 2

elif liste_koordinatlar[i][3] == 1: # X yönü tutulu, Y yönüne değer atandı
deplasman[i][1] = dep[k][0]
k += 1

elif liste_koordinatlar[i][3] == 2: # Y yönü tutulu, X yönüne değer atandı
deplasman[i][0] = dep[k][0]
k += 1

else:

pass # X ve Y yönleri tutulu olursa herhangi bir değer atanmamaktadır. Matris zaten sıfır matrisi olarak tanımlanmıştır.

return deplasman # Her iteratif adım sonrasında ortaya çıkan deplasmanlar.

f) Her iterasyon sonrasında yeni koordinatların belirlenmesi, mevcut koordinatların güncellenmesi ve toplam deplasmanların hesaplanması:

```
def Yeni_koordinatlar(nokta_sayisi, liste_koordinatlar, Deplasman):
    yenikoordinat = np.zeros((nokta_sayisi, nokta_sayisi))

    for i in range(0, nokta_sayisi):
        yenikoordinat[i][0] = Deplasman[i][0] + liste_koordinatlar[i][1] # X koordinatları
        yenikoordinat[i][1] = Deplasman[i][1] + liste_koordinatlar[i][2] # Y koordinatları

    return yenikoordinat
```

""" Koordinat Değerlerinin Güncellenmesi """

```
def Koordinat_guncelleme(nokta_sayisi, liste_koordinatlar, yenikoordinat):
    for i in range(0, nokta_sayisi):
        liste_koordinatlar[i][1] = yenikoordinat[i][0]
        liste_koordinatlar[i][2] = yenikoordinat[i][1]

    return liste_koordinatlar
```

""" Toplam Deplasman Değerlerinin Güncellenmesi """

```
def Toplam_Deplasmanlar(nokta_sayisi, liste_koordinatlar, Toplam_Deplasmanlar, Deplasman,
                        Cikti_Toplam_Deplasmanlar):
    for i in range(0, nokta_sayisi):
        Cikti_Toplam_Deplasmanlar[i][0] = Toplam_Deplasmanlar[i][0]
        Cikti_Toplam_Deplasmanlar[i][1] = Toplam_Deplasmanlar[i][1]
        Toplam_Deplasmanlar[i][0] = Toplam_Deplasmanlar[i][0] + Deplasman[i][0]
        Toplam_Deplasmanlar[i][1] = Toplam_Deplasmanlar[i][1] + Deplasman[i][1]

    return Toplam_Deplasmanlar
```