

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DEMİR KENET VE ZIVANA İÇEREN TARİHİ TAŞ DUVARLARIN YAPISAL
MODELLENMESİ VE DÜZLEM İÇİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melika SALMAN

Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Oğuz Cem ÇELİK

TEMMUZ 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DEMİR KENET VE ZIVANA İÇEREN TARİHİ TAŞ DUVARLARIN YAPISAL
MODELLENMESİ VE DÜZLEM İÇİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Melika SALMAN
(802241219)**

Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Oğuz Cem ÇELİK

TEMMUZ 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**STRUCTURAL MODELING AND IN-PLANE BEHAVIOR OF HISTORICAL
STONE MASONRY WALLS WITH IRON CLAMPS AND DOWELS**



M.Sc. THESIS

**Melika SALMAN
(802241219)**

Department of Earthquake Engineering

Earthquake Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Oğuz Cem ÇELİK

JULY 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 802241219 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Melika SALMAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DEMİR KENET VE ZIVANA İÇEREN TARİHİ TAŞ DUVARLARIN YAPISAL MODELLENMESİ VE DÜZLEM İÇİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Oğuz Cem ÇELİK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ercan YÜKSEL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet BAL
Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Teslim Tarihi : 25 Haziran 2025
Savunma Tarihi : 29 Temmuz 2025





Aileme,



ÖNSÖZ

Hayatımın en önemli dönemlerinden biri olan yüksek lisans eğitimimi tamamlarken, bu yolculukta yanımda olan, bana inanan ve desteklerini hiç esirgemeyen herkese gönülden teşekkür etmek istiyorum.

Tez danışmanım Prof. Dr. Oğuz Cem ÇELİK'e, bu süreçte bana rehberlik ettiği, bilgi ve deneyimini paylaşarak hem akademik hem de mesleki gelişimime katkı sağladığı için içtenlikle teşekkür ederim. Onunla çalışmak, yüksek lisans hayatım boyunca edindiğim en değerli şanslardan biri oldu. Sadece mühendislik alanında değil, çalışma disiplini ve yaklaşımıyla bana birçok açıdan yol gösterdi. Onun rehberliğinde şekillenen bu süreç, mesleki gelişiminin ötesinde kişisel dönüşümümde de çok kıymetli bir yer tuttu. Her zaman minnetle anacağım.

Lisans yaşamım boyunca bilgisini ve desteğini her zaman cömertçe paylaşan, üzerimde derin izler bırakan ve bugün aramızda olmasa da kalbimde daima yaşayacak olan kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TÜRKMEN'e rahmet ve minnetle teşekkür ederim.

Tez jürimde yer alarak bana vakit ayıran, bilgi ve deneyimleriyle katkı sunan Prof. Dr. Ercan YÜKSEL ve Dr. Öğr. Üyesi Ahmet BAL hocalarıma da teşekkür ederim.

Yanımda olan, desteği ve dostluğuyla güç veren kıymetli arkadaşım İnş. Yük. Müh. Elif DURGUT'a gönülden teşekkür ederim.

Bu zorlu ve emek dolu yolculukta, her zaman yanımda olan, varlıklarıyla bana güç veren aileme en derin teşekkürlerimi sunuyorum. Sevgili annem ve babam; koşulsuz sevginiz ve dualarınızla büyük dayanağım oldunuz. Canım ablam; anlayışın ve desteğinle kalbime güven verdin. Dünya güzeli yeğenlerim Elif ile Deniz siz hayatımın neşesi, en saf mutluluk kaynağısınız. Gülüşleriniz, en yorgun anlarımda bana umut ve güç oldu. İyi ki varsınız.

Güç bulduğum, birlikte öğrendiğim ve birlikte büyüdüğüm, en karamsar dönemlerimde yolumu aydınlatan hayat arkadaşına, Otomotiv Yük. Müh. Sercan DEVRİM'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Sabırla yanımda olman, her anımda bana anlayış ve destek göstermen, bu süreçte bana sadece güç katmakla kalmadı, aynı zamanda bana güven verdi. Senin desteğinle her zorluk aşılabılır oldu. Yardımların, anlayışın ve sabrın için çok teşekkür ederim.

Ve son olarak; bir kadının okuyabildiği, düşünebildiği ve üretebildiği bir ülkede yaşamamı mümkün kılan, başta biz kadınlar olmak üzere bir milleti ayağa kaldıran Ulu Önder Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK'e, onun açtığı yolda ilerleyebilmemi sağladığı için sonsuz saygı özlem ve minnetle.

Temmuz 2025

Melika SALMAN
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR.....	xv
SEMBOLLER	xvii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xxi
ÖZET.....	xxix
SUMMARY	xxx
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Motivasyon.....	1
1.2 Amaç	1
1.3 Kapsam ve Yöntem	8
1.4 Genel Değerlendirme	9
2. TARİHİ KESME TAŞ DUVARLAR: GENEL BİR BAKIŞ	11
2.1 Kuru Derzli Kesme Taş Duvar Üretimi	11
2.2 Yığılma/Kârgir Modelleme Teknikleri.....	14
2.3 Literatürdeki Yaygın Modelleme Yaklaşımı ve Bu Çalışmanın Katkısı	15
2.4 Göçme Mekanizmaları	20
2.5 Literatür Çalışması/Önceki Çalışmaların Özeti	22
2.6 Genel Değerlendirme	30
3. MODEL BİLGİLERİ, MALZEME MODELLERİ, ARAYÜZ ETKİLEŞİM MODELLERİ VE SONLU ELEMAN AĞLARI.....	31
3.1 Model Bilgileri	31
3.1.1 Taş model.....	33
3.1.2 Kenet model	34
3.1.3 Model 1 pim.....	35
3.1.4 Model 1 hibrit.....	36
3.1.5 Model 2 pim.....	37
3.1.6 Model 2 hibrit.....	38
3.1.7 Model 3 pim.....	39
3.1.8 Model 3 hibrit.....	40
3.1.9 Model 4 pim.....	41
3.1.10 Model 4 hibrit.....	42
3.1.11 Model 5 pim.....	43
3.1.12 Model 5 hibrit.....	44
3.2 Malzeme Modelleri	51
3.2.1 Küfeki taşı	51
3.2.1.1 Concrete damaged plasticity model (CDP).....	54
3.2.2 Dövme demir.....	57
3.2.2.1 Genel metal plastisite modeli	59

3.3 Arayüz Etkileşim Modelleri	60
3.3.1 Taş-taş arası etkileşimler	61
3.3.2 Taş-kenet ve taş-zıvana arası etkileşimler	62
3.4 Sonlu Elemanlar Ağı	64
3.5 Arayüz Etkileşim ve Sonlu Eleman Ağ modelleri	68
3.5.1 Taş model	68
3.5.2 Taş model	69
3.5.3 Kenet model	70
3.5.4 Kenet model	71
3.5.5 Model 1 pim	72
3.5.6 Model 1 pim	73
3.5.7 Model 1 hibrit	74
3.5.8 Model 1 hibrit	75
3.5.9 Model 2 pim	76
3.5.10 Model 2 pim	77
3.5.11 Model 2 hibrit	78
3.5.12 Model 2 hibrit	79
3.5.13 Model 3 pim	80
3.5.14 Model 3 pim	81
3.5.15 Model 3 hibrit	82
3.5.16 Model 3 hibrit	83
3.5.17 Model 4 pim	84
3.5.18 Model 4 pim	85
3.5.19 Model 4 hibrit	86
3.5.20 Model 4 hibrit	87
3.5.21 Model 5 pim	88
3.5.22 Model 5 pim	89
3.5.23 Model 5 hibrit	90
3.5.24 Model 5 hibrit	91
3.6 Genel Değerlendirme	92
4. SONLU ELEMEN ANALİZLERİ	93
4.1 Analiz Prosedürleri	93
4.2 Yükleme Protokolü	95
4.3 Genel Değerlendirme	98
5. SAYISAL HESAP SONUÇLARININ İNCELENMESİ	99
5.1 Süneklik	99
5.2 Rijitlik	102
5.3 Performans Seviyeleri ve Hasar Gelişimi İncelenmesi: 12 Model Üzerinden Değerlendirme	106
5.3.1 Taş model	106
5.3.2 Kenet model	111
5.3.3 Model 1 pim	117
5.3.4 Model 1 hibrit	123
5.3.5 Model 2 pim	129
5.3.6 Model 2 hibrit	136
5.3.7 Model 3 pim	142
5.3.8 Model 3 hibrit	148
5.3.9 Model 4 pim	154
5.3.10 Model 4 hibrit	160
5.3.11 Model 5 pim	166

5.3.12 Model 5 hibrit.....	172
5.4 Genel Değerlendirme	178
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	179
6.1 Çalışmanın Özeti	179
6.2 Çalışmada Ulaşılan Ana Sonuçlar	181
6.3 Bu Çalışmanın Katkıları Doğrultusunda Gelecekte Yürütülebilecek Araştırmalar	186
KAYNAKLAR.....	189
ÖZGEÇMİŞ.....	193





KISALTMALAR

CDP	: Concrete Damage Plasticity
SH	: Sınırlı Hasar Performans Seviyesi
KH	: Kontrollü Hasar Performans Seviyesi
GÖ	: Göçmenin Önlenmesi Performans Seviyesi
HK	: Hemen Kullanım Performans Seviyesi
CG	: Can Güvenliği Performans Seviyesi
URM	: Donatısız Yığma Kargir/Kâgir
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
ASCE	: American Society of Civil Engineers
TYDRYK	: Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu
C3D8R	: 8 Düğüm Noktalı Azaltılmış Entegrasyonlu 3 Boyutlu Eleman



SEMBOLLER

f_b	: Yığmanın Basınç Dayanımı
f_t	: Yığmanın Çekme Dayanımı
E	: Elastisite Modülü
E_0	: Başlangıç Elastisite Modülü
γ	: Birim Hacim Ağırlık
ν	: Poisson Oranı
f_y	: Akma Dayanımı
σ	: Gerilme
σ_c	: Basınç Gerilmesi
σ_t	: Çekme Gerilmesi
ϵ	: Şekildeğiştirme
ϵ_c^{pl}	: Basınç Plastik Şekildeğiştirmesi
ϵ_t^{pl}	: Çekme Plastik Şekildeğiştirmesi
ϵ_c^{in}	: İnelastik Şekildeğiştirme
μ	: Sürtünme Kuvveti
Δ_u	: Nihai yerdeğiştirme
Δ_y	: Akma yerdeğiştirmesi
Δ_{max}	: Maksimum yerdeğiştirme
$d_{c,t}$	: Basınç ve Çekme İçin Hasar Parametreleri
σ_{true}	: Gerçek Gerilme
σ_{Eng}	: Mühendislik Gerilmesi
ϵ_{true}	: Gerçek Şekildeğiştirme
ϵ_{Eng}	: Mühendislik Şekildeğiştirmesi
C	: Karbon
Si	: Silisyum
S	: Kükürt
P	: Fosfor
Mn	: Manganez
Ni	: Nikel

Mo	: Molibden
Cu	: Bakır
CaCO₃	: Küfeki Taşı
CO₂	: Karbondioksit
H₂O	: Su
Ca(HCO₃)₂	: Kalsiyumbikarbonat



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Tarihi yapılarda kullanılan kenet ve zıvana boyutları.	32
Çizelge 3.2 : Küfeki taşı örneklerinin laboratuvar test sonuçları. (Menteşe, 2018)..	53
Çizelge 3.3 : Detaylı mikro modelde taş malzeme için mekanik parametreler.	57
Çizelge 3.4 : Alınan kenetlerin kimyasal test sonuçları (% olarak) (Demir, 2012)...	58
Çizelge 3.5 : Detaylı mikro model demir malzeme için mekanik parametreler (Bussell 1997).	59
Çizelge 3.6 : Modellerde kullanılan etkileşim tipleri.	63
Çizelge 4.1 : TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.	95
Çizelge 4.2 : FEMA 356 ve ASCE 41-23 standartlarına göre performans seviyeleri.	95
Çizelge 4.3 : Farklı eksenel yük seviyeleri altında analiz durumları.	97
Çizelge 5.1 : Taş Model için P/P_{max} değerleri.	110
Çizelge 5.2 : Kenet Model P/P_{max} değerleri.	116
Çizelge 5.3 : Model 1 pim P/P_{max} değerleri.	122
Çizelge 5.4 : Model 1 hibrit P/P_{max} değerleri.	128
Çizelge 5.5 : Model 2 pim P/P_{max} değerleri.	135
Çizelge 5.6 : Model 2 hibrit P/P_{max} değerleri.	141
Çizelge 5.7 : Model 3 pim P/P_{max} değerleri.	147
Çizelge 5.8 : Model 3 hibrit P/P_{max} değerleri.	153
Çizelge 5.9 : Model 4 pim P/P_{max} değerleri.	159
Çizelge 5.10 : Model 4 hibrit P/P_{max} değerleri.	165
Çizelge 5.11 : Model 5 pim P/P_{max} değerleri.	171
Çizelge 5.12 : Model 5 hibrit P/P_{max} değerleri.	177
Çizelge 6.1 : Modellerin referans modele (Model 1 Hibrit) göre oransal karşılaştırılması.	185



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : 6 Şubat depremleri sonrasında yıkıma uğrayan Malatya Merkez Yeni Camide yüzeye çıkan kenetler (Ahmet BAL arşivinden).....	2
Şekil 1.2 : 6 Şubat 2023 depremleri sonrasında Adıyaman – Tut Camisinde gözlemlenen kenetli bağlantı detayları. Restore edilmiş olmasına rağmen yapı yıkılmış ve bazı taşıyıcı bağlantılar yüzeye çıkmıştır (Ahmet BAL arşivinden)	3
Şekil 2.1 : Zıvana ve kenet içeren taş duvarın yapım aşaması, (a) duvar alt sırası, (b) alt sıranın donatılandırılması, (c) duvar üst sırası, alttan bakış, (d) iki sıralı duvar örneği.	12
Şekil 2.2 : İnşasında kenet ve zıvananın kullanıldığı tarihi yapılar, (a), (b) ve (c) Dolmabahçe Camisi, (d), (e) ve (f) Nusretiye Camisi (Melika SALMAN arşivi).	13
Şekil 2.3 : Yığma yapılar için modelleme yöntemleri: (a) yığma duvar örneği, (b) detaylı mikro modelleme, (c) basitleştirilmiş mikro modelleme, (d) makro modelleme (Lourenço ve diğ., 1995’den uyarlanmıştır).	14
Şekil 2.4 : Modellemede kullanılan taş boyutları, (a), (b) ve (c) küfeki taşının katı modeli (Demir, 2012).	15
Şekil 2.5 : Modellemede referans alınan kenet boyutları (Demir, 2012).	16
Şekil 2.6 : Katı model, (a) ve (b) Sonlu elemanlardaki duvar modeli – ABAQUS, (Demir, 2012).	16
Şekil 2.7 : Sonlu elemanlar modelinde kenetleri temsil eden yay elemanlar (Demir, 2012).	17
Şekil 2.8 : Sonlu elemanlar ağ modeli (Demir, 2012).	17
Şekil 2.9 : Katı model (Bu çalışmada).	18
Şekil 2.10 : Modeldeki kenetler (Bu çalışmada).	18
Şekil 2.11 : Sonlu elemanlar ağ modeli (Bu çalışmada).	19
Şekil 2.12 : Yük ve sınır koşulları (Bu çalışmada).	19
Şekil 2.13 : Yığma duvarlardaki hasar/göçme modları (a) kayma, (b) dönme, (c) ezilme, (d) diagonal kayma çatlağı(Calderini ve diğ., 2010’dan uyarlanmıştır).	21
Şekil 2.14 : Geometri ve yükleme düzeneği (Lourenço ve diğ., 2000)	23
Şekil 2.15 : Deneysel göçme modları (a) 0.15 MPa düşey yük ve (b) 0.50 MPa düşey yük sahip duvarlardaki göçme anındaki görünümü (Lourenço ve diğ., 2000).	24
Şekil 2.16 : Duvarların deneysel ve sayısal model kullanılarak elde edilen yatay kuvvet- yerdeğiştirme grafikleri (a), 30 kN, (b) 100 kN, (c) 200 kN ve (d) 250 kN eksenel düşey yük seviyeleri için (Lourenço ve diğ., 2000).	25
Şekil 2.17 : Deney ve yükleme düzeneğinin şematik görünümü. (Demir, 2012).	27
Şekil 2.18 : Test edilecek mermer blokların şekil ve boyutları: (a) Kenetli blok, (b) zıvanalı(pimli) blok (Nikolić ve diğ., 2020).	28

Şekil 2.19 : Kenet ve zıvanalar için kullanılan malzeme ve geometrik özellikler, (a) demir ve bakır küçük kenetler, (b) demir büyük kenet, (c) demir ve bakır zıvanalar (Nikolić ve diğ., 2020).	28
Şekil 2.20 : İki tür numune için test modeli, (a) enstrümantasyon, (b) kurulum şeması (Nikolić ve diğ., 2020).	29
Şekil 3.1 : Genel eleman boyutları.....	32
Şekil 3.2 : Taş model.	33
Şekil 3.3 : Kenet model.....	34
Şekil 3.4 : Model 1 pim.	35
Şekil 3.5 : Model 1 hibrit.	36
Şekil 3.6 : Model 2 pim.	37
Şekil 3.7 : Model 2 hibrit.	38
Şekil 3.8 : Model 3 pim.	39
Şekil 3.9 : Model 3 hibrit.	40
Şekil 3.10 : Model 4 pim.	41
Şekil 3.11 : Model 4 hibrit.	42
Şekil 3.12 : Model 5 pim.	43
Şekil 3.13 : Model 5 hibrit.	44
Şekil 3.14 : Model Boyutları; (a) Taş model, (b) Kenet model.	45
Şekil 3.15 : Model Boyutları; (a) Model 1 Pim, (b) Model 1 Hibrit.	46
Şekil 3.16 : Model Boyutları; (a) Model 2 Pim, (b) Model 2 Hibrit.	47
Şekil 3.17 : Model Boyutları; (a) Model 3 Pim, (b) Model 3 Hibrit.	48
Şekil 3.18 : Model Boyutları; (a) Model 4 Pim, (b) Model 4 Hibrit.	49
Şekil 3.19 : Model Boyutları; (a) Model 5 Pim, (b) Model 5 Hibrit.	50
Şekil 3.20 : Küfeki taşında karbonatlaşma mekanizmasının beton davranışı ile karşılaştırılması (Arioğlu ve diğ. 1998'den uyarlanmıştır).....	52
Şekil 3.21 : Taş numunler için laboratuvar testleri; (a) basınç testi, (b) Elastisite modülü değerlendirilmesine basınç testi, (c) Yarma testi (Menteşe, 2018).	53
Şekil 3.22 : Basınç etkisi altında Concrete Damage Plasticity beton modelinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Hibbitt vd., 2011).....	55
Şekil 3.23 : Çekme gerilmesi altında Concrete Damage Plasticity beton modelinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Hibbitt vd., 2011).....	55
Şekil 3.24 : Küfeki taşı için gerilme şekil değiştirme eğrisi.	56
Şekil 3.25 : Küfeki taşı için gerilme plastik şekil değiştirme eğrisi.	57
Şekil 3.26 : Edirne II. Beyazid Camii'nden alınan kenetler (Demir, 2012).	58
Şekil 3.27 : Tipik bir dövme demir için gerilme – şekil değiştirme eğrisi (Bussell 1997)'den uyarlanmıştır.....	59
Şekil 3.28 : Gerçek gerilme şekil değiştirme ve mühendislik gerilme şekil değiştirme grafikleri.....	60
Şekil 3.29 : Taş-taş arası etkileşim yüzeyleri.....	61
Şekil 3.30 : Hard Contact (ABAQUS, 2020).....	62
Şekil 3.31 : C3D8R Eleman Ağ Yapısı.	65
Şekil 3.32 : Azaltılmış entegrasyonlu doğrusal bir elemanın eğilme deformasyonu.	66
Şekil 3.33 : Taş model arayüz etkileşimleri.	68
Şekil 3.34 : Taş model sonlu eleman ağ yapısı.	69
Şekil 3.35 : Kenet model arayüz etkileşimleri.	70
Şekil 3.36 : Kenet model sonlu eleman ağ yapısı.	71
Şekil 3.37 : Model 1 Pim arayüz etkileşimleri.....	72
Şekil 3.38 : Model 1 Pim sonlu eleman ağ yapısı.....	73

Şekil 3.39 : Model 1 Hibrit arayüz etkileşimleri.	74
Şekil 3.40 : Model 1 Hibrit sonlu eleman ağ yapısı.	75
Şekil 3.41 : Model 2 Pim arayüz etkileşimleri.	76
Şekil 3.42 : Model 2 Pim sonlu eleman ağ yapısı.....	77
Şekil 3.43 : Model 2 Hibrit arayüz etkileşimleri.	78
Şekil 3.44 : Model 2 Hibrit sonlu eleman ağ yapısı.	79
Şekil 3.45 : Model 3 Pim arayüz etkileşimleri.	80
Şekil 3.46 : Model 3 Pim sonlu eleman ağ yapısı.....	81
Şekil 3.47 : Model 3 Hibrit arayüz etkileşimleri.	82
Şekil 3.48 : Model 3 Hibrit sonlu eleman ağ yapısı.	83
Şekil 3.49 : Model 4 Pim arayüz etkileşimleri.	84
Şekil 3.50 : Model 4 Pim sonlu eleman ağ yapısı.....	85
Şekil 3.51 : Model 4 Hibrit arayüz etkileşimleri.	86
Şekil 3.52 : Model 4 Hibrit sonlu eleman ağ yapısı.	87
Şekil 3.53 : Model 5 Pim arayüz etkileşimleri.	88
Şekil 3.54 : Model 5 Pim sonlu eleman ağ yapısı.....	89
Şekil 3.55 : Model 5 Hibrit arayüz etkileşimleri.	90
Şekil 3.56 : Model 5 Hibrit sonlu eleman ağ yapısı.	91
Şekil 4.1 : Yükleme ve sınır koşulları.	94
Şekil 5.1 : Genel akma yöntemi ile akma noktasının tanımı. (Ling ve diğ, 2023'den uyarlanmıştır).....	101
Şekil 5.2 : Performans seviyelerine göre ikinci rijitlik hesaplama yaklaşımı.....	104
Şekil 5.3 : Taş model için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4 Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.	106
Şekil 5.4 : Taş Model için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.	107
Şekil 5.5 : Taş model için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.....	108
Şekil 5.6 : Taş model için süneklik değerleri.	108
Şekil 5.7 : Taş model için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017'ye göre rijitlik değerleri.....	109
Şekil 5.8 : Kenet model için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4 Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.....	111
Şekil 5.9 : Kenet modelde demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3 üst sırada; Yükleme 4 Yükleme 5 ve Yükleme 6 alt sırada sunulmuştur.	112
Şekil 5.10 : Kenet model için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.	113
Şekil 5.11 : Kenet model için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.....	114
Şekil 5.12 : Kenet model için süneklik değerleri.....	114
Şekil 5.13 : Kenet model için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017'ye göre rijitlik değerleri.....	115

Şekil 5.14 : Model 1 pim için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4 Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.....	117
Şekil 5.15 : Model 1 pimdeki demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri.....	118
Şekil 5.16 : Model 1 pim için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.	119
Şekil 5.17 : Model 1 pim için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.....	120
Şekil 5.18 : Model 1 pim için süneklik değerleri.....	120
Şekil 5.19 : Model 1 pim için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017'ye göre rijitlik değerleri.....	121
Şekil 5.20 : Model 1 hibrit için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4 Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.....	123
Şekil 5.21 : Model 1 hibritteki demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3 üst sırada; Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6 alt sırada sunulmuştur.	124
Şekil 5.22 : Model 1 hibrit için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.	125
Şekil 5.23 : Model 1 hibrit için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.	126
Şekil 5.24 : Model 1 hibrit için süneklik değerleri.	126
Şekil 5.25 : Model 1 hibrit için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017'ye göre rijitlik değerleri.....	127
Şekil 5.26 : Model 2 pim için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4 Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.....	129
Şekil 5.27 : Model 2 pim demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3 üst sırada; Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6 alt sırada sunulmuştur.....	130
Şekil 5.28 : Model 2 pim için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.	131
Şekil 5.29 : Model 2 pim için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.....	132
Şekil 5.30 : Model 2 pim için süneklik değerleri.....	133
Şekil 5.31 : Model 2 pim için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017'ye göre rijitlik değerleri.....	134
Şekil 5.32 : Model 2 hibrit için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.....	136

Şekil 5.33 : Model 2 hibritteki demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3 üst sırada; Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6 alt sırada sunulmuştur.	137
Şekil 5.34 : Model 2 hibrit için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.	138
Şekil 5.35 : Model 2 hibrit için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.	139
Şekil 5.36 : Model 2 hibrit için süneklik değerleri.	139
Şekil 5.37 : Model 2 hibrit için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017' ye göre rijitlik değerleri.....	140
Şekil 5.38 : Model 3 pim için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.....	142
Şekil 5.39 : Model 3 pim demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3 üst sırada; Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6 alt sırada sunulmuştur.	143
Şekil 5.40 : Model 3 pim için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.	144
Şekil 5.41.: Model 3 pim için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.....	145
Şekil 5.42 : Model 3 pim için süneklik değerleri.	145
Şekil 5.43 : Model 3 pim için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017' ye göre rijitlik değerleri.....	146
Şekil 5.44 : Model 3 hibrit için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.	148
Şekil 5.45 : Model 3 hibritteki demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3 üst sırada; Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6 alt sırada sunulmuştur.	149
Şekil 5.46 : Model 3 hibrit için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.	150
Şekil 5.47 : Model 3 hibrit için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.	151
Şekil 5.48 : Model 3 hibrit için süneklik değerleri.	151
Şekil 5.49 .: Model 3 hibrit için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017' ye göre rijitlik değerleri.....	152
Şekil 5.50 : Model 4 pim için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.....	154

Şekil 5.51 :	Model 4 pim demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3 üst sırada; Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6 alt sırada sunulmuştur.....	155
Şekil 5.52 :	Model 4 pim için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.	156
Şekil 5.53 :	Model 4 pim için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.....	157
Şekil 5.54 :	Model 4 pim için süneklik değerleri.....	157
Şekil 5.55 :	Model 4 pim için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017' ye göre rijitlik değerleri.....	158
Şekil 5.56 :	Model 4 hibrit için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.....	160
Şekil 5.57 :	Model 4 hibritteki demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3 üst sırada; Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6 alt sırada sunulmuştur.	161
Şekil 5.58 :	Model 4 hibrit için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.	162
Şekil 5.59 :	Model 4 hibrit için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.	163
Şekil 5.60 :	Model 4 hibrit için süneklik değerleri.	163
Şekil 5.61 :	Model 4 hibrit için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017' ye göre rijitlik değerleri.....	164
Şekil 5.62 :	Model 5 pim için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.....	166
Şekil 5.63 :	Model 5 pim demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3 üst sırada; Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6 alt sırada sunulmuştur.....	167
Şekil 5.64 :	Model 5 pim için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.	168
Şekil 5.65 :	Model 5 pim için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.....	169
Şekil 5.66 :	Model 5 pim için süneklik değerleri.....	169
Şekil 5.67 :	Model 5 pim için rijitlik değerleri elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017' ye göre rijitlik değerleri.	170
Şekil 5.68 :	Model 5 hibrit için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.....	172

Şekil 5.69 : Model 5 hibritteki demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3 üst sırada; Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6 alt sırada sunulmuştur.	173
Şekil 5.70 : Model 5 hibrit için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.	174
Şekil 5.71 : Model 5 hibrit için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.	175
Şekil 5.72 : Model 5 hibrit için süneklik değerleri.	175
Şekil 5.73 : Model 5 hibrit için rijitlik değerleri elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017' ye göre rijitlik değerleri.	176





DEMİR KENET VE ZIVANA İÇEREN TARİHİ TAŞ DUVARLARIN YAPISAL MODELLENMESİ VE DÜZLEM İÇİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Bugünün Türkiye coğrafyası, tarih boyunca birçok büyük uygarlığın doğuşuna, gelişimine ve etkileşimine sahne olmuş, bu medeniyetlerden geriye kalan zengin mimari ve kültürel miras sayesinde dünya kültür mirasının en önemli alanlarından biri hâline gelmiştir. Anadolu toprakları, Hititlerden Urartululara, Romalılardan Bizanslılara, Selçuklulardan Osmanlılara kadar çok sayıda medeniyetin izlerini barındırmaktadır. Bu medeniyetler, kendi dönemlerinin mimari anlayışını yansıtan camiler, kiliseler, köprüler, kervansaraylar, hamamlar ve çeşmeler gibi çok sayıda yığma/kârgir yapı inşa etmişlerdir. Bu eserler yalnızca estetik değer taşımamakta, aynı zamanda kullanılan yapı tekniği ve mühendislik açısından da dönemin koşullarını belgelemektedir.

Zamanla bu tarihi ve anıtsal yapıların birçoğu depremler, iklim koşulları (yağış, rüzgar, sıcaklık değişimleri), atmosferik kirleticiler, tuz etkileri, fiziksel aşınmalar, kimyasal tepkimeler ve insan kaynaklı müdahaleler (vandalizm, hatalı restorasyon vb.) nedeniyle çeşitli düzeylerde hasar görmüştür. Bu hasarlar çoğu zaman çatlaklar, malzeme kayıpları, yüzey bozulmaları ya da demir elemanlarda korozyon şeklinde kendini göstermektedir. Bu tür yapılar yalnızca birer yapı malzemesi yığını değil, aynı zamanda geçmişin bilgi, kültür ve yaşam tarzını bugüne taşıyan hafıza alanlarıdır. Bu nedenle, bu yapıların yapısal bütünlüğünün korunması ve gelecek nesillere aktarılması bir zorunluluk olarak ortaya çıkmaktadır.

Tarihi yapılarda kullanılan temel inşaat tekniklerinden biri olan kuru derzli taş duvar sistemi, bağlayıcı harç kullanılmadan taş blokların üst üste dizilmesiyle oluşturulur. Bu tür duvar sistemlerinde yapısal bütünlüğü arttırmak amacıyla metal bağlantı elemanları (kenet ve pim/zivana) kullanılmıştır. Taşları yatay düzlemde bir arada tutmak amacıyla kenetlerden, düşeyde ise taş blokların ayrılmasını önlemek için pimlerden yararlanılmıştır. Bu elemanların duvar davranışı üzerindeki etkileri oldukça karmaşık olup günümüzde hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle anlaşılmaya çalışılmaktadır. Ancak, literatürde bu konuda yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır ve mevcut çalışmalar genellikle sınırlı parametreler üzerinden yürütülmektedir.

Bu çalışma kapsamında, demir kenet ve pimlerin, kuru derzli taş duvarların yapısal davranışı üzerindeki etkilerini araştıran kapsamlı bir sayısal analiz sunulmuştur. Çalışmada, taş bloklar arasında herhangi bir harç kullanılmayan ve yalnızca kenet ve/ya da pim gibi bağlantı elemanlarıyla bir arada tutulan taş duvar modelleri oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Bu kapsamda dört ana grup altında toplam on iki farklı duvar modeli geliştirilmiştir: (1) yalnızca kuru derzli taş duvar, (2) yalnızca kenet içeren taş duvar, (3) yalnızca pim içeren taş duvarlar, (4) hem kenet hem de pim içeren taş duvarlar.

Sayısal analizlerde, farklı eksenel yük (gerilme) seviyeleri altında her modelin doğrusal olmayan statik itme (push-over) analizleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan malzeme modelleri arasında, taş ve beton gibi yarı gevrek malzemelerin davranışını

temsil eden Concrete Damage Plasticity (CDP) modeli ile demir bağlantı elemanlar için gerçek gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerini yansıtan elastoplastik modeller yer almaktadır. Taş-taş, taş-kenet ve taş-pim arayüzleri için temas modelleri detaylandırılmış, sonlu eleman ağı kalitesi, sınır koşulları ve temas etkileşimleri modellenmiştir.

Analiz sonuçları, farklı kenet ve pim konfigürasyonlarının taşıyıcı sistem davranışına olan etkilerini ortaya koymuş, kapasite eğrileri aracılığıyla her modelin süneklik, rijitlik kapasitesi değerlendirilmiştir. Elde edilen performans seviyeleri, ulusal TYDRYK, uluslararası FEMA ve ASCE yapı yönetmelikleri doğrultusunda yorumlanmıştır. Modellemeler duvarlar üzerindeki hasar gelişimini ve bağlantı elemanlarının yük aktarım mekanizmaları hakkında önemli bulgular sağlamıştır.

Tez altı ana bölümden oluşmaktadır:

Birinci Bölüm 'de konunun önemi, motivasyon ve çalışmanın kapsamı verilmiştir.

Modelleme teknikleri, göçme mekanizmaları ve literatür özetine *İkinci Bölüm* 'de yer verilmiştir.

Üçüncü Bölüm on iki modelin tanıtımına ayrılmıştır. Beton, taş gibi yarı gevrek malzemelerin davranışını temsil etmek adına geliştirilen Concrete Damage Plasticity (CDP) malzeme modeli ve demir elemanlar için gerçek gerilme-şekildeğiştirme malzeme modeli, taş-taş, taş-kenet ve taş-pim elemanlarının temas noktalarına tanımlanan arayüz modelleri ve modellerdeki sonlu elemanlar ağı, hakkında bilgi ve formülasyonlar verilmiştir.

Analiz prosedürleri, ulusal ve uluslararası yönetmelikler ve performans seviyelerinden *Dördüncü Bölüm* 'de bahsedilmiştir.

Beşinci Bölüm ise analizler sonucunda kapasite eğrilerine, ulusal ve uluslararası yönetmeliklerdeki performans seviyeleri için verilen hasar mekanizmalarına, duvarların sünekliklerine ve rijitliklerine ayrılmıştır.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar *Altıncı Bölüm* 'de özetlenmiş ve gelecekteki olası çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

STRUCTURAL MODELING AND IN-PLANE BEHAVIOR OF HISTORICAL STONE MASONRY WALLS WITH IRON CLAMPS AND DOWELS

SUMMARY

Throughout its long history, the geography of Anatolia has been a cradle of civilizations, giving rise to hosting and enabling interaction among many major cultures. These interactions created a rich and layered cultural heritage, one that is reflected most visibly in the region's architectural legacy. Anatolia is not merely a geographical location but a historical archive in itself, home to a sequence of civilizations from the Hittites and Urartians to the Romans, Byzantines, Seljuks, and Ottomans. Each of these societies has left behind architectural monuments that reflect their cultural, religious, and technological identities—structures such as mosques, churches, caravanserais, bridges, baths, and fountains that continue to speak to modern observers about the values, priorities, structural technologies used, and skills of their builders.

These historic structures are more than architectural achievements; they are vessels of memory that carry forward the accumulated knowledge and lived experiences of centuries. Their protection and scientific analysis are not only of cultural importance but are also vital to understanding historical construction methods, materials, and structural behavior. Yet, over time, many of these monumental buildings have suffered damage due to both natural and human factors. Earthquakes—especially given Turkey's seismically active geography—pose a major threat to their structural integrity. Alongside seismic activity, other environmental factors such as freeze-thaw cycles, temperature fluctuations, wind, and rainfall contribute to the progressive deterioration of these structures. Atmospheric pollutants, salt crystallization, biological agents like fungi and lichens, and chemical reactions within materials further lead to surface erosion, cracking, and material loss.

In addition to natural decay, human interventions have also played a role in their degradation. Inappropriate restorations, either due to lack of technical knowledge or disregard for historical authenticity, often do more harm than good. In some cases, well-intentioned but structurally incompatible repairs compromise the original load-bearing systems. Acts of vandalism, unregulated reuse, and treasure hunting also contribute to irreversible damage. For these reasons, the conservation of historical structures has become a scientific, technical, and ethical imperative. These efforts require not only structural preservation but also an in-depth understanding of the traditional construction techniques used in these buildings.

One of the most intriguing traditional construction systems used in Anatolia is the dry-joint stone masonry system. Unlike conventional masonry, this technique involves no mortar or binding agent between the stone blocks. Instead, large stone elements are carefully cut, smoothed, and assembled so precisely that they remain in place solely through gravity and friction. While this method may seem rudimentary at first glance, it actually requires an exceptionally high level of craftsmanship and planning. Due to the labor-intensive nature and material precision required, dry-joint masonry was not used in ordinary constructions. Rather, it was predominantly employed in high-status,

monumental buildings such as palaces, temples, and significant public structures.

These systems are not only technically sophisticated but also culturally prestigious, serving as indicators of elite architecture in their time. The entire process—from quarrying and cutting the stones to transporting and assembling them on-site—demanded skilled labor and significant economic investment. Each block had to be carefully tailored to fit the next with minimal tolerance for error. The outcome was a structure of both great durability and remarkable aesthetic harmony. As a result, dry-joint masonry structures are considered not only architectural masterpieces but also symbolic expressions of the knowledge and power of the civilizations that built them.

To further enhance the structural stability of these systems, especially in the absence of mortar, metal connectors were often used. These included clamps (also known as dowels or ties) and pins, which helped bind the stones together horizontally and vertically. Clamps were inserted laterally between stone blocks to resist sliding, while vertical pins were placed to prevent separation under vertical loads. Though these components might appear small in scale, their contribution to the structural behavior of the wall is significant. Their presence alters the mechanical performance of the masonry system by modifying load transfer paths and enhancing inter-block resistance.

Both experimental and numerical methods have been employed to better understand the behavior of these elements and their interaction with stone masonry under different load conditions. However, studies focusing on this subject remain limited, and existing research often addresses only a narrow set of variables. Investigating the mechanical function of clamps and pins in dry-joint masonry is essential not only for academic inquiry but also for practical conservation and retrofitting strategies. These connectors embody ancient engineering principles and provide insight into how historical builders achieved seismic resistance without modern materials.

The preservation of these heritage structures demands a multidisciplinary approach, one that integrates structural engineering, architecture, material science, and historical research (i.e. historical of architecture). By analyzing the original design logic and structural performance of dry-joint masonry systems, conservation professionals can develop interventions that are compatible, minimally invasive as per the 1964 Venice Charter, and respectful of the building's historical identity. Furthermore, understanding the materials and construction techniques used in the past allows modern engineers to learn from centuries-old practices and apply these lessons to contemporary sustainable construction. In this sense, each traditional building technique, including dry-joint stone masonry with metal connectors, forms a vital link between the wisdom of the past and the responsibilities of the present and future.

Research effects into these systems are not merely exercises in technical analysis. They represent acts of cultural stewardship—attempts to read, decode, and preserve the stories embedded in stone. Every architectural joint, every carved block, and every embedded clamp is a trace of human ingenuity. Documenting, analyzing, and disseminating this knowledge is an obligation toward future generations, ensuring that the architectural expressions of ancient civilizations continue to inspire and inform us today.

This thesis is composed of six main chapters:

In Chapter One, significance of the topic, motivation behind the study, and overall scope of the research are presented.

An overview of modeling techniques, collapse mechanisms, and a summary of the existing literature are presented in *Chapter Two*.

Chapter Three is devoted to twelve different models. The Concrete Damage Plasticity (CDP) material model—developed to represent the behavior of semi-brittle materials such as concrete and stone—is used, along with true stress-strain models for steel reinforcement elements. Additionally, interface models are defined at the contact surfaces between stone-to-stone, stone-to-clamp, and stone-to-pin elements. Detailed information and formulations regarding the finite element mesh used in the models are also presented.

Analysis procedures followed relevant national and international codes, and structural performance levels are discussed in *Chapter Four*.

Chapter Five delves into the capacity curves obtained from the numerical analyses. Damage mechanisms corresponding to performance levels defined in national and international codes are also demonstrated. Furthermore, ductility and stiffness of the walls are evaluated.

Finally, *Chapter Six* summarizes the findings obtained within the scope of this thesis and offers suggestions for possible future research.

1. GİRİŞ

1.1 Motivasyon

Türkiye toprakları, caddelerinde tarihi eserlerini sergileyen büyük bir müzedir. Tarihi ve anıtsal yapılar, kültürel miras olmasının yanı sıra bölgenin ekonomisini de besleyen ticari yapılardır. Tarihi yapılar, bir toplumun kültürel kimliğini ve tarihini yansıtan somut göstergelerdir. Toplumun kolektif hafızasını temsil eder. Toplumsal belleğin ve kültürel kimliğin korunması adına tarihi ve anıtsal yapılarda koruma ve restorasyon çalışmaları yapılmalıdır. Bu aynı zamanda toplumların geçmişlerine duydukları saygıyı da göstermektedir. Tarihi yapıların sürekliliğini sağlamak için ise mühendislik davranışının doğru olarak tahmin edilmesi gerekmektedir.

1.2 Amaç

Tarihi yapılar görkemli mimarilerinin yanında birçok belirsizlik barındırmaktadır. Bunlar, yapım dönemlerinden kaynaklı üslûp farklılığı, kullanılacak malzemenin temin edilen ocağa olan uzaklığı, yapının önemine bağlı işçilik ve ekonomik nedenler, yapının inşasında belirli bir standart olmaması gibi birçok etken içermektedir. Günümüze ulaşan yapıya ilişkin yapım detayı, kullanılan malzeme miktarı gibi verileri içeren asıl belgeler genelde çok azdır. Güncel olanlar genellikle restorasyon ya da deprem gibi yıkıcı etkilerden dolayı taşıyıcı sistemin açığa çıkmasıyla düzenlenen belgelerdir. Bu yapılar için salt bir varsayım yoktur.

6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Pazarcık (Mw 7.8) ve Ekinözü (Mw 7.6) merkezli depremler, Adıyaman ve Malatya'daki birçok tarihi yapıda ağır hasara neden olmuştur. Bu yıkıcı etkiler sonucunda, bazı yapılarda taşıyıcı sistemin özgün detayları özellikle kenet demirleri yüzeye çıkmıştır (Şekil 1.1). Bu durum, yapının inşaat tekniklerine dair daha önce belgelenmemiş bilgilerin elde edilmesine olanak tanımış olup ayrıca tarihi yapıların yapısal modellemesinde bu tür detayların dikkate alınmasının önemini bir kez daha ortaya koymuştur.



Şekil 1.1 : 6 Şubat 2023 depremleri sonrasında yıkıma uğrayan Malatya Merkez Yeni Cami de yüzeye çıkan kenetler (Ahmet BAL arşivinden).



Şekil 1.2 : 6 Şubat 2023 depremleri sonrasında Adıyaman – Tut Camisinde gözlemlenen kenetli bağlantı detayları. Restore edilmiş olmasına rağmen yapı yıkılmış ve bazı taşıyıcı bağlantılar yüzeye çıkmıştır (Ahmet BAL arşivinden).

Bu bağlamda, restorasyon ve koruma süreçlerinde salt mimari yaklaşımların yeterli olmayacağı, yapıların deprem etkisi altındaki davranışlarının da dikkate alınması gerektiği anlaşılmıştır. Yapıların mevcut durumunun doğru analiz edilmesi, sayısal modelleme tekniklerinin geliştirilmesi ve bilimsel verilerle desteklenen müdahalelerin uygulanması, günümüzde restorasyon uygulamalarında temel kriter haline gelmiştir. Bu çerçevede, hem geleneksel müdahale yöntemlerinin hem de modern mühendislik çözümlerinin birlikte değerlendirilmesi, yapıların özgünlüğünü bozmadan güvenli hale getirilmesini mümkün kılmaktadır.

Çelik (2024), tarihi yığma/kârgir yapıların deprem güvenliği açısından en riskli yapı gruplarından biri olduğunu, özellikle burulma düzensizliği (A1), döşeme süreksizlikleri (A2), düşük malzeme dayanımı ve rijitlik yetersizliklerinin yapısal performansı ciddi ölçüde düşürdüğünü belirtmektedir. TBDY-2018 kapsamında bu yapılar her ne kadar doğrudan yönetmelik kapsamı dışında tutulsa da, BKS-1 sınıfında değerlendirilmeleri nedeniyle, bina önem katsayısının ($I=1.5$) yüksek olması ve davranış katsayılarının ($R=2.5$, $D=1.5$) düşük tutulması nedeniyle, deprem etkisi altındaki en kırılgan sistemler olarak ön plana çıkmaktadır. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş merkezli depremler özelinde, hem zayıf zemin koşulları hem de 3-5 kata varan zemin büyütme, bu yapıların ciddi oranda hasar almasına ya da göçmesine neden olmuştur. Güçlendirme kapsamında, shotcrete ile donatılı püskürtme beton uygulamaları, CFRP/GFRP lifli polimerlerin yapıştırılması, çelik çapraz sistemlerin (/ , Δ , K tipleri) entegrasyonu, rijit diyafram oluşturmak için ahşap döşemelerde çelik profilli çapraz sistemler kullanımı, önerilmeli çelik ya da karbon çubuklarla duvarlara düşey eksenel kuvvet kazandırılması gibi yöntemler teknik olarak önerilmiştir. Ayrıca, kubbelerde çember sistemleri ve lifli polimer kombinasyonlarıyla çekme çatlaklarının sınırlandırılması, sismik izolatör ve sönümleyici (damper) kullanımının sınırlı da olsa bazı örneklerde başarı sağladığı aktarılmıştır. Yazar, restorasyon projelerinde yapısal müdahalelerin mimari bütünlüğü bozmadan, disiplinler arası koordinasyonla, zemin-üstü yapı ilişkisi gözetilerek projelendirilmesi gerektiğini; aksi takdirde restorasyonun, yapı güvenliğini sağlamada yetersiz kalacağını ve kültürel mirasın kaybıyla sonuçlanabileceğini ifade etmektedir.

Benzer şekilde, Celik, Mentese ve Salman (2021) tarafından sunulan çalışmada ise tarihi yığma kargir yapıların (özellikle cami minareleri) deprem davranışı ve yapısal

modelleme yaklaşımları detaylı şekilde ele alınmıştır. Tarihi yapıların özgün malzeme, örgü düzeni ve taşıyıcı sistem özelliklerinin heterojen yapısı nedeniyle, bu yapılarda uygulanacak müdahalelerin titizlikle planlanması gerektiği vurgulanmıştır. Yapısal elemanların (duvarlar, kemerler, kubbeler, gergiler vb.) tipik hasar mekanizmaları ve onarım teknikleri örneklerle açıklanmıştır. Özellikle çekme bölgelerinde oluşan çatlakların enjeksiyonla onarılması, gerektiğinde paslanmaz çelik, FRP ya da çelik çemberlerle güçlendirilmesi gibi yöntemlerin etkinliği vurgulanmıştır. Ayrıca minareler özelinde yapılan sınırlı tipolojik analizler, geometrik oranların (örneğin gövde çapı/çekirdek çapı) yapısal davranışa etkisini ortaya koymuş ve sonlu eleman modellemelerinin (ör. DIANA) hem mikro hem makro düzeyde uygulanabilirliği gösterilmiştir. Yapılan analizlerde, basitleştirilmiş mikro modelleme ve kompozit makro modelleme tekniklerinin deneysel sonuçlarla uyumlu sonuçlar verdiği raporlanmıştır. Tarihi yığma yapılarda çekme elemanlarının gerek mevcut durumda korunması gerekse uygun malzemeyle yenilenmesinin yapısal güvenlik açısından hayati olduğu, modern analiz yöntemlerinin (FEM tabanlı) tarihi yapıların davranışını anlamada ve müdahale stratejilerinin etkinliğini test etmede güçlü bir araç sunduğu anlaşılmaktadır.

Çelik, (2017), yapıların deprem etkileri altındaki davranışlarının yalnızca mühendislik hesaplamalarıyla sınırlı kalmadan, mimari tasarım, taşıyıcı sistem seçimi, malzeme özellikleri ve kullanım senaryoları gibi çok yönlü parametrelerin bir arada değerlendirildiği bütüncül (holistik) bir yaklaşımla ele alınması gerektiği anlayışından yola çıkılarak hazırlanmıştır. Özellikle yüksek deprem riski taşıyan bölgelerde yapı güvenliğinin artırılması, yalnızca statik analizlerle değil, mimarlık, mühendislik ve şehircilik disiplinlerinin ortak katkısıyla mümkündür. Bu bağlamda, Çelik (2017) tarafından ortaya konduğu üzere, deprem dayanımı yüksek yapıların tasarımında disiplinlerarası stratejilerin benimsenmesi büyük önem taşımaktadır. Söz konusu çalışmada, yapıların sismik davranışlarının yalnızca taşıyıcı sistem üzerinden değil, mimari biçimleniş, malzeme seçimi ve kullanıcı ihtiyaçları ile birlikte değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Yapının geometrisi, kat planı, taşıyıcı sistem düzeni ve malzeme seçimi gibi mimari kararların, yapıların sismik performansına doğrudan etki ettiği ortaya konmuş, yalnızca hesap temelli değil kullanım odaklı ve bağlama duyarlı tasarımların önemi ön plana çıkarılmıştır. Sonuç olarak, hem yeni yapıların tasarımı hem de mevcut yapıların performansa dayalı olarak

değerlendirilmesi süreçlerinde, bütüncül yaklaşımın benimsenmesinin hayati önemde olduğu görülmüştür. Deprem mühendisliğinde sadece teknik verilerle sınırlı kalmak yerine, yapının bir bütün olarak ele alınması, daha güvenli, dayanıklı ve sürdürülebilir yapıların oluşturulmasına olanak sağlayacaktır.

Yığma/kâgir duvar sistemlerinde karşılaşılan en temel yapısal sorunlar, genellikle düşük dayanımlı harçlar nedeniyle ortaya çıkan kesme (kayma) zayıflıkları ve yer yer gözlenen basınç dayanımı yetersizlikleridir. Bu tür yapılarda dayanımı artırmak amacıyla, özellikle kayma kuvvetlerine karşı güçlendirme yöntemlerinin uygulanması öncelik taşımaktadır. Çelik, (2023), bu tür duvarlarda kayma dayanımını artırmaya yönelik etkili uygulamaları detaylandırmış ve hasır donatılı püskürtme beton (shotcrete) ile iki yüzeyli kaplamaların oldukça başarılı sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Ayrıca lifli polimer malzemelerin X biçiminde ya da yüzeysel olarak kullanımı, karbon çubukların derzlere yerleştirilmesi ve düşey doğrultuda uygulanan art germe sistemlerinin de alternatif güçlendirme teknikleri olarak öne çıktığını ifade etmiştir. Ancak tarihi yapılarda bu müdahalelerin sınırlı ve geri döndürülebilir olması gerektiğinden, Venedik Tüzüğü'nün esasları doğrultusunda (1964) çelik çerçeveler gibi daha esnek ve müdahale seviyesi düşük çözümler tercih edilmektedir.

Çelik ve Sesigür (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışma, 6 Nisan 2009 tarihinde İtalya'nın L'Aquila kentinde meydana gelen $M_w=6.3$ büyüklüğündeki depremin, tarihi yığma yapı stoğu üzerindeki etkilerini incelemektedir. Depremin merkez üssüne yakın konumda yer alan ve önemli ölçüde tarihi yapıyı barındıran kentte, çok sayıda yapısal hasar ve göçme meydana gelmiştir. Yazarlar, afet sonrası gerçekleştirdikleri saha incelemelerinde, özellikle Orta Çağ'dan kalma yığma binalarda gözlenen hasarları detaylı biçimde sınıflandırmış ve yapıların sismik performansını değerlendirmiştir. Yapılan gözlemler neticesinde, taşıyıcı sistem düzenliliği, rijitlik ve kütle dağılımı, yapı malzemelerinin kalitesi, döşeme rijitliği, duvarlardaki açıklık oranları (kapı/pencere), bağlantı elemanlarının varlığı (örneğin demir gergiler ve bağ kirişleri) gibi faktörlerin yapı davranışında belirleyici olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca, uygunsuz müdahalelerin – örneğin taşıyıcı duvarların kaldırılması, yeni açıklıklar açılması ya da yetersiz malzeme kullanımı – ciddi hasar ve göçmelere yol açtığı tespit edilmiştir. Çalışmada, taş duvarlardaki malzeme zayıflıkları, yapısal düzensizlikler, esnek döşemeler, çarpışma etkisi, tarihi kubbelerde gözlenen çekme

çatlakları ve yalnızca geçici nitelikte alınan hasar önlemleri gibi sorunlar ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. Depreme dirençli davranış gösteren yapıların ise genellikle yeterli bağ elemanlarına ve rijit diyaframlara sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yazarlar, geçmiş depremlerden edinilen tecrübeler doğrultusunda çeşitli onarım ve güçlendirme yöntemleri önermektedir. Bu yöntemler arasında döşeme rijitliğinin artırılması, paslanmaz çelik gergi sistemleri, kubbeler için çevresel çekme halkaları, karbon ya da cam fiber takviyeli polimer (CFRP/GFRP) uygulamaları, ince shotcrete kaplamalar, yüzeye yakın yerleştirilen (NSM) CFRP çubuklar ve enjeksiyon yoluyla çatlak onarımı gibi müdahaleler yer almaktadır. Ayrıca, sismik izolasyon ve enerji sönümleyici sistemlerin tarihi yapılar üzerindeki potansiyel katkısı da tartışılmaktadır. Elde edilen bulgular, benzer yapı stoğuna sahip ve deprem tehlikesi altında bulunan diğer Avrupa şehirleri, özellikle İstanbul için, önemli teknik ve koruma odaklı çıkarımlar sunmaktadır.

Gedik vd. (2010), tarihi taş yığma tonozlu yapıların davranışı üzerine ahşap bağların etkisini incelemiştir. Çalışmada, Isparta'daki Firdevs Bey Bedesteni örneği üzerinden mevcut hasarlar (çatlaklar, malzeme bozulmaları, uygunsuz müdahaleler) tespit edilmiş ve yapı hem mevcut haliyle hem de önerilen güçlendirme senaryolarıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Güçlendirme kapsamında, eksik ahşap bağların yenilenmesi ve ağır çatı dolgularının kaldırılması önerilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, bu müdahaleler hem düşey hem de deprem yükleri altında yapıdaki gerilmeleri %53–60 oranında azaltmış, yapının davranışını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Ayrıca önerilen yöntem, yapının özgün mimarisini büyük ölçüde koruduğu için restorasyon uzmanları tarafından da uygun bulunmuştur.

Sesigur vd. (2005), esnek döşemeli tarihi yığma kâgir yapıların depreme karşı performansını artırmak amacıyla İzmit Sultan Abdülaziz Av Köşkü üzerinde bir güçlendirme çalışması gerçekleştirmiştir. Yapının taşıyıcı sisteminde zamanla oluşan çatlaklar, malzeme bozulmaları ve hatalı müdahaleler sonrası yapılan değerlendirmeler sonucunda çeşitli yapısal iyileştirme yöntemleri önerilmiştir. Bu kapsamda, çatlamış taş duvarların iç yapısını bütünleştirmek amacıyla, düşük basınç altında uygulanan ve özgün malzeme ile uyumlu olan hidrolik kireç esaslı harçla enjeksiyon yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, cephelerdeki açıklıkların artmasını önlemek ve yatay hareketleri sınırlamak amacıyla, paslanmaz çelikten imal edilmiş ankraj çubukları derz aralarına yerleştirilmiştir. Esnek davranışlı ahşap döşemelerin

rijitlik eksikliği nedeniyle yapıda oluşabilecek yatay ötelenmeleri sınırlamak için ise, mevcut döşeme sistemine ahşap çaprazlar eklenmiş ve döşeme düzleminde yatay süreklilik sağlanmıştır. Tüm bu müdahalelerde tarihi yapının özgünlüğünü korumaya özen gösterilmiş ve malzeme uyumu ile geri dönüşümlü teknikler tercih edilmiştir.

Tarihi ve anıtsal yapıların her ne kadar mimarisi ve kullanım amacı farklı olsa da kuru derzli kesme taş yapıyı oluşturan temel birimler taş ve demir bağlantı elemanları olan kenet ve pim/zıvanalardır. Literatürde harçlı yapılar üzerine yapılan kuramsal ve deneysel çalışmaların yoğun olmasına karşın, demir bağlantı elemanı içeren duvarlar için sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu tez kapsamında tarihi yapılardaki demir bağlantı elemanlarının duvar davranışına etkisi üzerine odaklanılmıştır. Tarihi yapılardaki en küçük anlamlı işlevsel birim olan duvar detaylı bir şekilde mikro modellenmiştir. Yukarıda sözü edilen belirsizlikler dikkate alınmış demir elemanlarının farklı konum/sayı kombinasyonlarına bağlı duvar davranışı ileri bir modelleme ile kapsamlı olarak incelenmiştir.

1.3 Kapsam ve Yöntem

Bu çalışmanın ana amacı, demir bağlantı elemanlarının kesme taş duvar davranışı üzerindeki etkisini araştırmaktır. Farklı demir bağlantı kombinasyonları içeren on iki modele, farklı eksenel yük/gerilme seviyelerinde statik itme analizi (push-over) yapılmış ve böylece göçmeye kadar doğrusal olmayan davranış incelenmiştir. Her duvar modeli için ulusal ve uluslararası yönetmeliklerdeki performans seviyelerine karşılık gelen hasar/göçme mekanizmaları belirlenmiştir. Tüm duvar modellerinin süneklik ve rijitlik değerleri bulunmuştur.

Her bir bölümün kapsamı aşağıda özetlenmiştir:

Bölüm 2’de kuru derzli tarihi yapılar, modelleme teknikleri, göçme mekanizmaları ve literatür özetine yer verilmiştir.

Bölüm 3, çalışma kapsamında ele alınan on iki model tanıtılmasına ayrılmıştır. Taş elemanlar için gevrek malzemelerin davranışını temsil etmek adına geliştirilen Concrete Damage Plasticity (CDP) malzeme modeli ve demir elemanlar için gerçek gerilme-şekildeğiştirme malzeme modeli, taş-taş, taş-kenet ve taş-pim elemanlarının temas noktalarına tanımlanan arayüzey modelleri ve modellerdeki sonlu elemanlar ağı hakkında bilgi ve formülasyonlar verilmiştir.

Analiz prosedürleri, ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde konuya ilişkin bilgiler ve performans seviyeleri Bölüm 4'te açıklanmıştır.

Tez kapsamında elde edilen sonuçlar için değerlendirmeler ve gelecekteki olası çalışmalar için öneriler Bölüm 5'te verilmiştir.

Bölüm 6'da çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve bu tezin çıktılarının kullanılması ile gelecekteki olası çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

Bu tez kapsamında üzerinde sınırlı çalışmaların bulunduğu demir bağlantı elemanı içeren kuru derzli taş duvarların, farklı eksenel yük seviyeleri altında doğrusal olmayan düzlem içi davranışı ve göçme mekanizması değerlendirilmiş ve bu doğrultuda bir literatür taramasına yer verilmiştir. İleri düzeyde modelleme ile davranışın doğru bir biçimde anlaşılmasına yoğunlaşmıştır.

1.4 Genel Değerlendirme

Bu tez çalışması, Türkiye gibi hem yüksek deprem riski taşıyan hem de zengin bir tarihi mirasa sahip coğrafyalarda yer alan yığma/kârgir yapıların özellikle kesme taş duvar sistemlerinin mühendislik bakış açısıyla değerlendirilmesi gerekliliğinden doğmuştur. Giriş bölümünde, tarihi yapıların taşıdığı kültürel ve mimari değerinin altı çizilmiş; buna karşılık bu yapıların mevcut durumlarının belirsizliklerle dolu olması, yapısal müdahale süreçlerini güçleştiren önemli bir unsur olarak ortaya konmuştur. Literatür taraması ışığında, mevcut yapı stoğunun deprem karşısındaki kırılganlığı kapsamlı biçimde değerlendirilmiş; geleneksel yapım tekniklerinin, çağdaş analiz yöntemleriyle birlikte ele alınmasının önemi vurgulanmıştır. Bu çalışmanın özgün yanı, demir bağlantı elemanlarının taş duvarların yapısal davranışı üzerindeki etkisini detaylı sayısal modellemelerle irdelemesi ve bu çerçevede geliştirilmiş çeşitli kombinasyonlara dayalı statik itme analizleri aracılığıyla ileri düzey mühendislik yaklaşımları sunmasıdır. Bu yönüyle çalışma, hem tarihi yapıların güvenliğinin sağlanmasına katkı sunmakta hem de geleneksel sistemlerin çağdaş mühendislik yöntemleriyle nasıl bütünleştirilebileceğine dair yeni açılımlar önermektedir.



2. TARİHİ KESME TAŞ DUVARLAR: GENEL BİR BAKIŞ

Doğal taşların/tuğlaların yapısal inşaat malzemesi olarak kullanımı antik çağlardan beri bilinmektedir. Yüzyıllar boyunca, kullanımları geliştirilmiş ve zamanla farklı kültürlerin yorumlamaları ile farklı formlarda dünya genelinde uygulanmıştır. Dünya genelindeki tarihi yapılara bakıldığında çoğunun taş ve tuğla kullanılarak kuru ya da harçla inşa edilmiş olduğu gözlemlenmektedir. Tarihi yapılardaki duvarların tasarımı ve üretimi bakımından birçok sınıflandırma mevcuttur. Bu çalışma kapsamında, harcın kullanılmadığı sıfır derz ya da akçe geçmez derz olarak bilinen, kuru derzli kesme taş duvarlar esas alınmıştır.

Kuru derzli kesme taş duvarlar, maliyeti yüksek, iş kalemi fazla ve üretimi uzun süren yapılardır. Genel olarak değerli yapılarda bu üretim tekniği tercih edilmiştir.

2.1 Kuru Derzli Kesme Taş Duvar Üretimi

Kuru derzli kesme taş duvar imalatında, ocaktan çıkarıldığında işlenmeye elverişli olan küfeki taşı çekiç ve keski gibi el aletleriyle duvarın tasarımına ve stabilitesine uygun bir biçimde yontularak şekillendirilir.

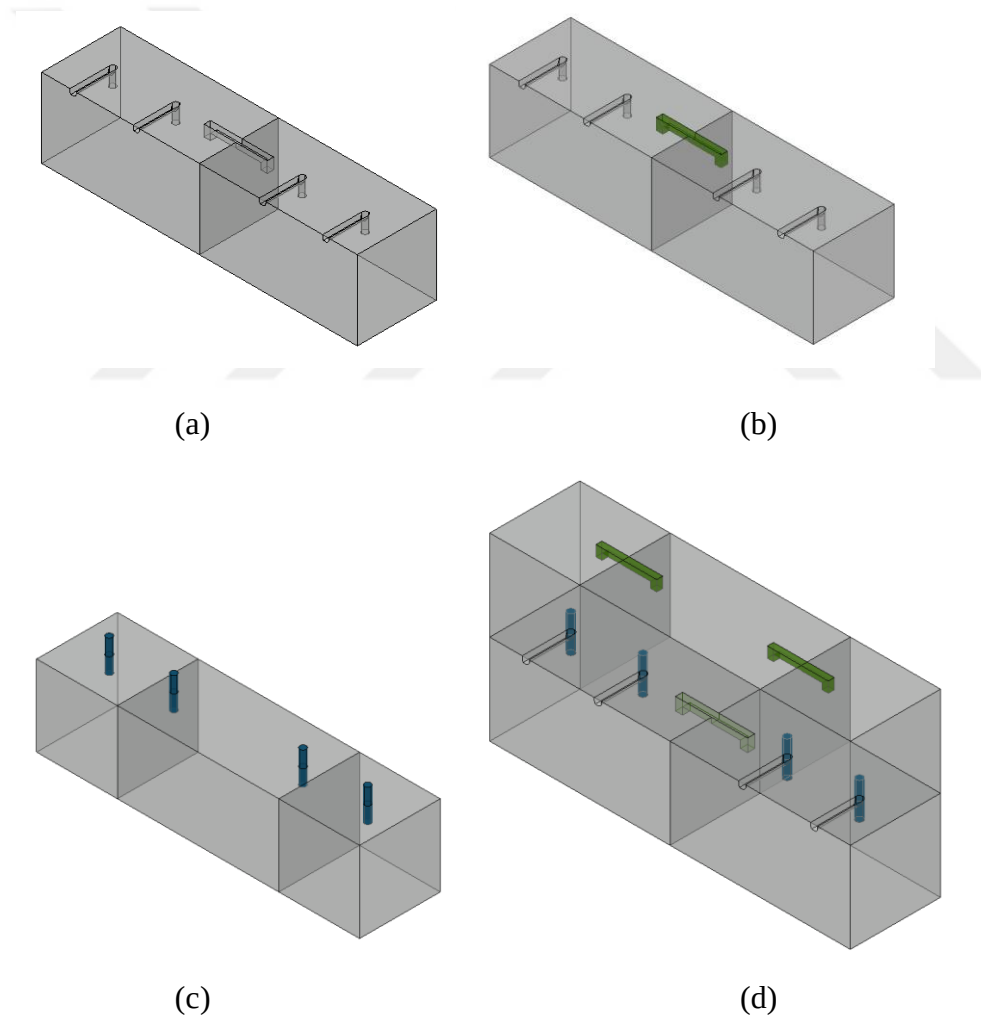
Taşlar, sıkı ve sağlam bir şekilde yerleştirilir. Her taş, alttaki taşların üzerine oturacak şekilde dikkatlice konumlandırılır, böylece yapı stabilite kazanır. Şekil 2.1’de görselleri verilen iki sıradan oluşan duvar için üretim şu şekildedir:

Duvarın alt sırası için:

Henüz şekil vermeye elverişli olan, ocaktan yeni çıkarılmış taşlar belirlenen boyutlarda yontularak şekillendirilir. Kenet ve zıvanalar için taşa yuvaları açılır ve ankraj için kurşun kanalı oluşturulur (Şekil 2.1a). Kenet yerleştirilip duvarın donatılma işlemi yapılır (Şekil 2.1b). Yatay örgüde kenetlerin yuvalarına erimiş kurşun dökülerek kenet için ankraj işlemi tamamlanır.

Duvar üst sırası için:

Düşeyde sürekliliği sağlayan zıvanaların üst duvardaki konumları belirlenip yuvaları açılır. Zıvanalar yerleştirilir ve erimiş kurşun ile ankre sağlanır (Şekil 2.1c). Üst sıra alt sıra ile birleştirilir. Üst duvar örgüsündeki zıvanalar referans alınarak alt örgüde açılan boşluklara oturacak şekilde dikkatlice konumlandırılır, üst sıra duvarları kenetlerle birleştirilir, böylece yapı stabilite kazanır. Alt ve üst duvarın birleşimi zıvanalar aracılığıyla yapılmıştır. Bu zıvanaların ankrajı için kurşun kanalından erimiş kurşun dökülerek ankre edilir; böylece duvar imalatı tamamlanır (Şekil 2.1d).



Şekil 2.1 : Zıvana ve kenet içeren taş duvarın yapım aşaması, (a) duvar alt sırası, (b) alt sıranın donatılандırılması, (c) duvar üst sırası, alttan bakış, (d) iki sıralı duvar örneği.

Dolmabahçe Sarayı, Dolmabahçe Camisi, Edirnekapı Mihrimah Sultan Camisi, Edirne Sarayı, Süleymaniye Camisi, Nusretiye Camisi gibi pek çok önemli eserde bu teknikle üretim gerçekleştirilmiştir. Örnek olması amacıyla Dolmabahçe Camisi ve Nusretiye Camisi'nin detay ve genel görselleri verilmiştir (Şekil 2.2).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

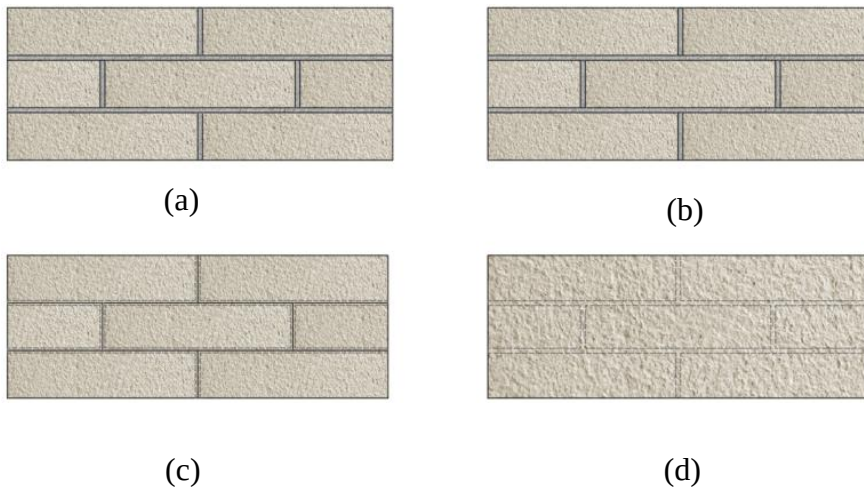
Şekil 2.2 : İnşasında kenet ve zıvananın kullanıldığı tarihi yapılar, (a), (b) ve (c) Dolmabahçe Camisi, (d), (e) ve (f) Nusretiye Camisi (Melika SALMAN arşivi).

Bu türden tarihi yapıların gerçek gerilme düzeylerinin belirlenmesinde kenet ve zıvanalı sistemin davranışının kapsamlı bir biçimde belirlenmesi önemli bir rol oynamaktadır.

2.2 Yığma/Kârgir Modelleme Teknikleri

Yığma yapıların sayısal modellenmesinde tercih edilecek modelleme tekniği birçok parametreye bağlıdır. Küçük ölçekli bileşenlerin, karmaşık geometriye sahip yapıların performans analizlerinde, doğrusal olmayan yapı davranışı, göçme anındaki hasar mekanizmalarını ayrıntılı bir şekilde gözlemlemek adına mikro modelleme tekniği tercih edilir. Bu modelleme tekniğinde her eleman ayrı ayrı modellenir, uygun arayüz modelleri oluşturulup birbirleri ile olan etkileşimi tanımlanmaktadır. Her bileşen için kendi malzeme modeli oluşturulur. Mikro modelleme malzemelerin mekanik özelliklerini, deformasyonlarını ve etkileşimlerini ayrıntılı olarak analiz ettiği için daha gerçekçi ve hassas sonuçlar elde edilir. Eleman bazında değerlendirme yapmakta olanaklıdır. Makro modelleme, büyük ölçekli bir modelleme yaklaşımıdır. Detaylar, modellemede ihmal edilir, homojen ve tek bir parçaymış gibi düşünülür. Yapıyı oluşturan her bir elemandaki davranış yerine sistemin genel yapısal davranışı ve performansı üzerine odaklanılır. Gerek modelleme gerekse analiz süresi bakımından mikro modellemeye göre daha pratiktir. Modellemeye ilişkin görseller Şekil 2.3'te verilmiştir.

Hangi modelleme yönteminin seçileceği, analizin amacı, yapı ölçeği, mevcut kaynaklar ve istenilen analiz çıktısına bağlı olarak belirlenir. Bu çalışmadaki araştırma parametresi demir bağlantı elemanlarının duvar davranışı üzerine etkisi olduğu için tüm modellerde detaylı mikro modelleme tekniği tercih edilmiştir.

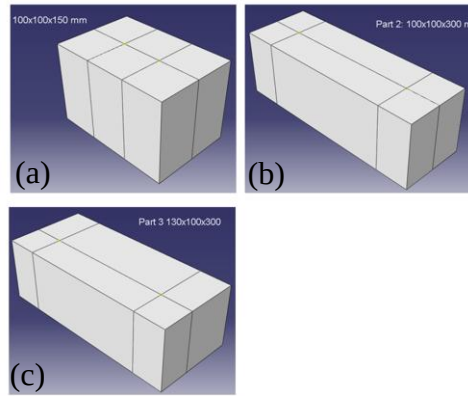


Şekil 2.3 : Yığma yapılar için modelleme yöntemleri: (a) yığma duvar örneği, (b) detaylı mikro modelleme, (c) basitleştirilmiş mikro modelleme, (d) makro modelleme (Lourenço ve diğ., 1995'den uyarlanmıştır).

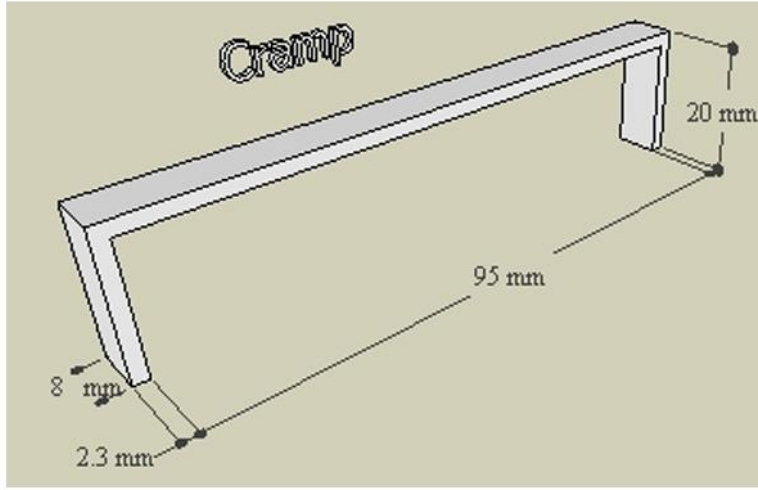
Lourenço ve diğ., (1995), tarihi yapıların modellenmesi üzerine geliştirdiği yöntemlerde, mikro-modelleme, yapı bileşenleri olan taşlar ve harç gibi malzemelerin ayrıntılı analizini içerir. Bu yaklaşım yüksek doğruluk sağlar, ancak aynı zamanda oldukça karmaşıktır ve yoğun hesaplama gücü ile hesaplama zamanı gerektirir. Basitleştirilmiş mikro-modelleme, tarihi yapıların davranışlarını anlamada detaylı bir inceleme sunarken, hesaplama süresini ve maliyetlerini azaltmak amacıyla bileşenlerin daha sadeleştirilmiş temsillerini kullanır. Bu yöntem, malzemelerin özelliklerini ayrıntılı bir şekilde modellemek yerine, daha genel parametrelerle bu özellikleri temsil eder. Böylece, yapıların karmaşık davranışları daha basit bir modelle analiz edilebilir. Bu, özellikle tarihi yapılar için üstünlük sağlar, çünkü bu tür yapılarda malzeme bilgisi genellikle sınırlıdır. Öte yandan, makro-modelleme, tüm yapıyı homojen bir malzeme olarak ele alır ve daha az detay sunar; bu da hesaplama sürecini hızlandırır ve daha az bilgi gerektirir.

2.3 Literatürdeki Yaygın Modelleme Yaklaşımı ve Bu Çalışmanın Katkısı

Kuru derzli taş duvarların sayısal olarak modellenmesine yönelik literatürde öne çıkan çalışmalardan biri Cem Demir'in (Demir, 2012) doktora tezidir. Bu çalışmada, basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi benimsenmiş olup, taş birimleri ayrı ayrı modellenmiş ve aralarındaki etkileşimler temas yüzeyleri aracılığıyla tanımlanmıştır. Demir'in çalışmasında kullanılan taş bloklara ait boyutlar ve geometri özellikleri, Şekil 2.2'de sunulmaktadır. Aynı şekilde, modelde idealize edilen kenet elemanlarının boyutları da Şekil 2.3'de gösterilmektedir.

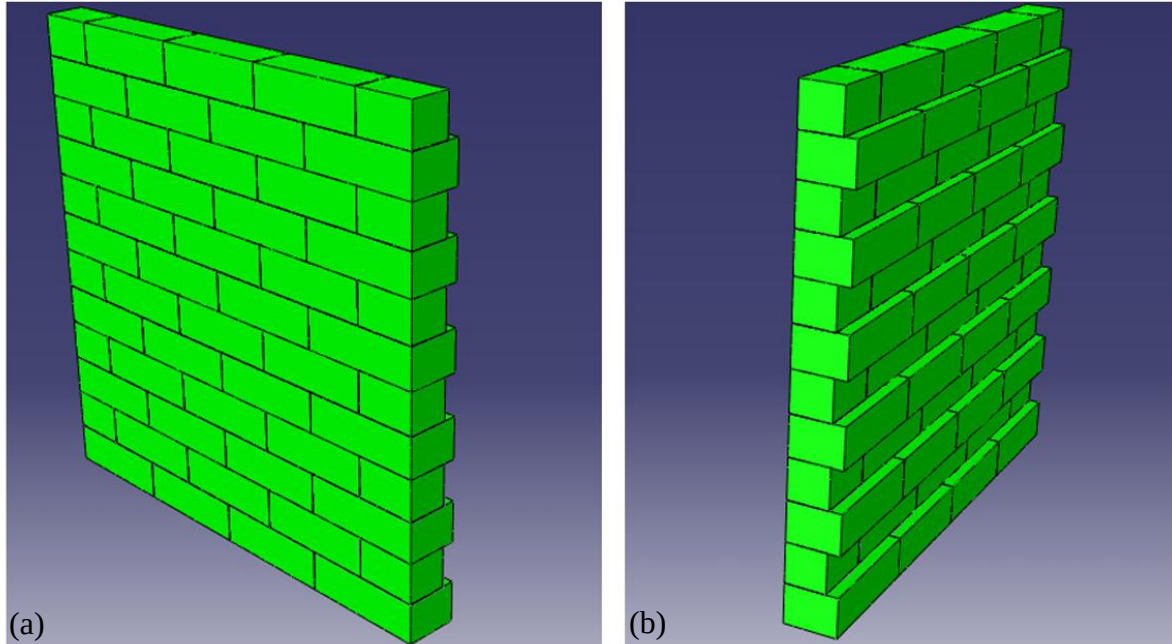


Şekil 2.4 : Modellemede kullanılan taş boyutları, (a), (b) ve (c) küfeki taşının katı modeli (Demir, 2012).

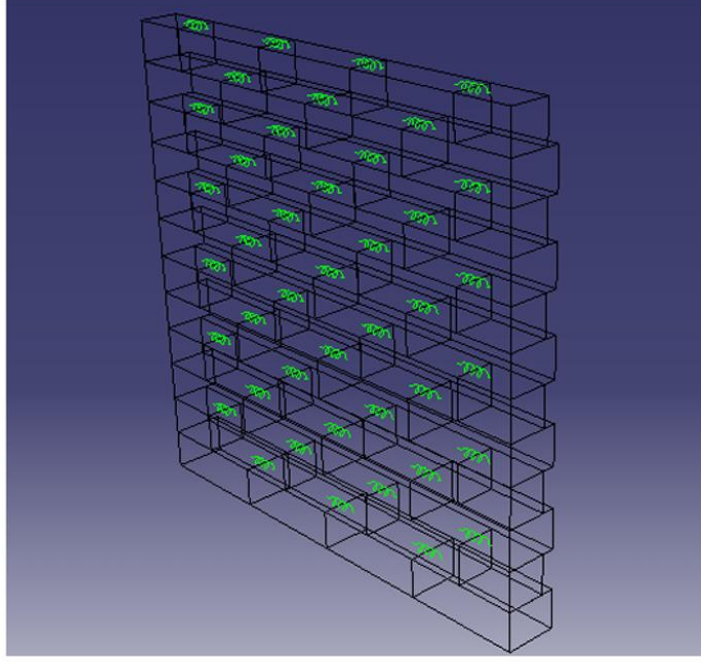


Şekil 2.5 : Modellemede referans alınan kenet boyutları (Demir, 2012).

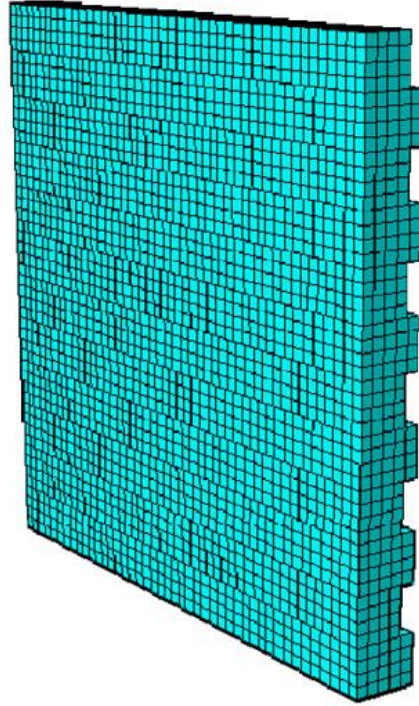
Modelleme sürecinde oluşturulan katı model ABAQUS ortamında hazırlanmış ve Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Bu modelde kenet bağlantıları doğrudan modellenmemiş, bunun yerine bu elemanların etkileri, doğrusal yay elemanları ile temsil edilmiştir. Bu idealize yaklaşımın uygulandığı örnek bir modelleme, Şekil 2.5'te sunulmaktadır. Modelin genel sonlu eleman ağı yapısı ise Şekil 2.6'da detaylı şekilde verilmiştir.



Şekil 2.6 : Katı model, (a) ve (b) Sonlu elemanlardaki duvar modeli – ABAQUS, (Demir, 2012).

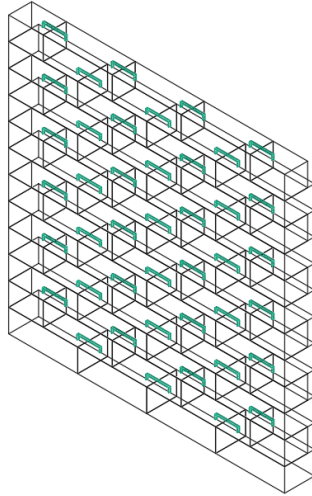


Şekil 2.7 : Sonlu elemanlar modelinde kenetleri temsil eden yay elemanlar (Demir, 2012).



Şekil 2.8 : Sonlu elemanlar ağ modeli (Demir, 2012).

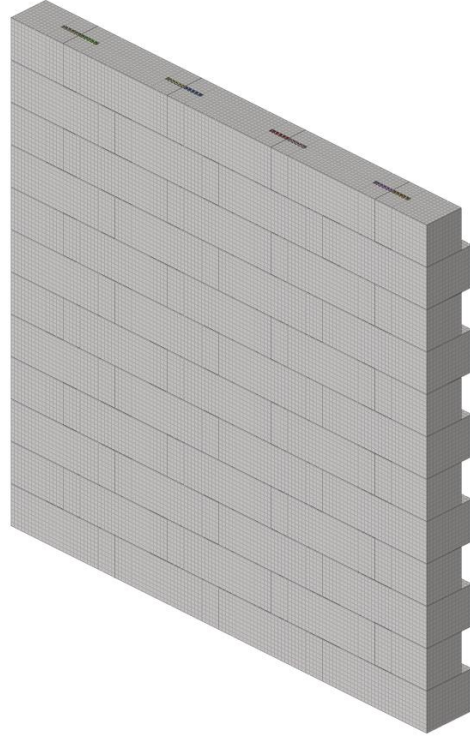
Bu çalışmada ise, yukarıda açıklanan modelleme yaklaşımı esas alınmakla birlikte, kenet elemanlarının fiziksel özellikleri doğrudan modellenmiş ve daha ayrıntılı bir mikro model geliştirilmiştir. Söz konusu katı model, Şekil 2.7’de gösterilmektedir. Bu modele ait kenetler, taş birimleri ile temas halinde fiziksel olarak tanımlanmış ve ayrı ayrı modellenmiştir (Şekil 2.8). Bu kapsamda oluşturulan yeni modelin sonlu eleman ağı da oldukça yoğundur ve Şekil 2.9’da gösterilmektedir. Bu yoğunluk, temas yüzeylerinin sayısının fazlalığı ve detaylı geometri tanımlarıyla doğrudan ilişkilidir. Yapısal modele uygulanan yükleme ve sınır koşulları ise hem deneysel düzenlemeden esinlenerek hem de literatürle tutarlı olacak şekilde belirlenmiş ve Şekil 2.10’da detaylı biçimde gösterilmiştir.



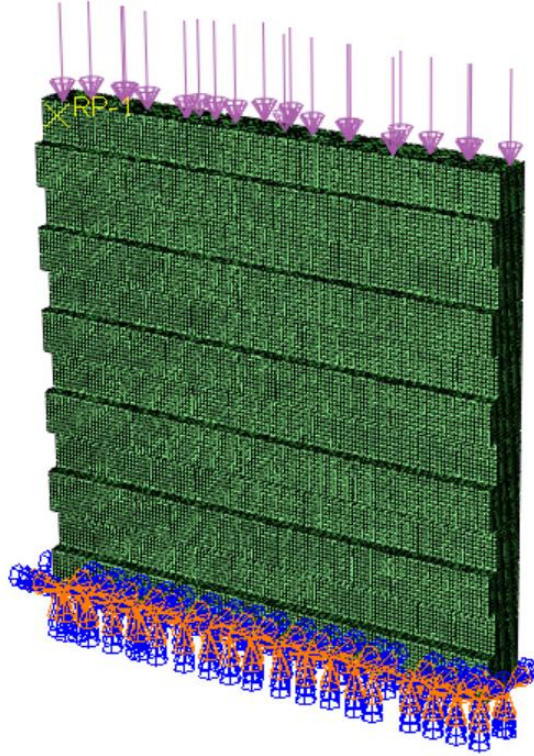
Şekil 2.9 : Katı model (Bu çalışmada).



Şekil 2.10 : Modeldeki kenetler (Bu çalışmada).



Şekil 2.11 : Sonlu elemanlar ağ modeli (Bu çalışmada).



Şekil 2.12 : Yük ve sınır koşulları (Bu çalışmada).

Bu yönüyle, çalışmamızda önerilen detaylı mikro model, literatürde yaygın olarak kullanılan idealize edilmiş kenet modellemesine alternatif bir yaklaşım sunmakta olup, kenetlerin yapısal davranışa etkilerini fiziksel temelde inceleme imkânı sağlamaktadır. Bu sayede, deneysel ve sayısal sonuçların daha tutarlı biçimde karşılaştırılmasına olanak tanınmış ve sistemin genel davranışına ilişkin daha yüksek doğrulukta öngörüler elde edilmiştir.

Ancak, bu detaylı modelleme yaklaşımı; yüksek sayıda temas yüzeyi, karmaşık kenet-taş etkileşimleri ve yoğun sonlu eleman ağı (mesh) nedeniyle ciddi bir hesaplama gücü gerektirmektedir. Bu kapsamda oluşturulan modelde toplam 298431 adet düğüm noktası (node) yer almakta olup, çözüm süreci önemli ölçüde donanımsal kaynaklara bağımlı hale gelmiştir. Özellikle kenet elemanlarının fiziksel olarak modele entegre edilmesi, temas algoritmalarının çözüm sürecini oldukça zorlaştırmakta ve analiz süresini uzatmaktadır.

Bu bağlamda, modelleme işlemleri eksiksiz biçimde tamamlanmış olsa da, mevcut sistemin işlemci çekirdek sayısı, bellek kapasitesi ve paralel işlem yeteneği, bu denli detaylı bir modelin analizi için yetersiz kalmıştır. Bu tür yüksek çözünürlüklü mikro modellerin başarıyla analiz edilebilmesi için, en az 128 GB RAM, 64 çekirdekli yüksek frekanslı bir işlemci (örneğin AMD Threadripper veya Intel Xeon serisi) ve gelişmiş paralel çözüm desteğine sahip bir analiz altyapısı (örneğin HPC destekli Abaqus, ANSYS veya LS-DYNA ortamları) gerekmektedir.

2.4 Göçme Mekanizmaları

Düzlem içi kayma/kesme kuvvetleri etkisindeki yığma duvalarda hasar modları, duvar geometrisine, sınır koşullarına, eksenel yük seviyesi ve yatay yük kombinasyonuna, duvarı oluşturan elemanların mekanik özelliklerine, varsa donatı konfigürasyonuna bağlıdır. Genel bir açıdan hasar modları değerlendirildiğinde duvar üç farklı göçme moduyla dayanımını yitirir. Eğilme etkisi altında oluşan ezilmeler, kesme etkisiyle oluşan diyagonal çekme ve basınç ve son olarak yatay derzlerde oluşan kayma davranışdır.

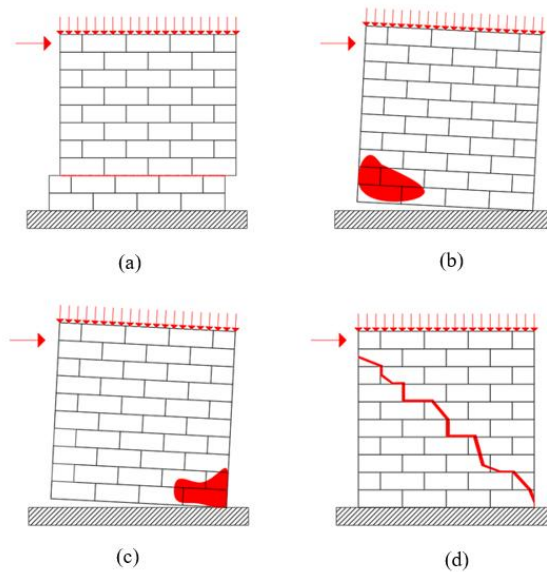
Şekil 2.4a kayma (sliding) davranışını temsil etmektedir. Genellikle kohezyonun az olduğu, düşük sürtünme katsayısına sahip duvarlarda ya da düşük seviyelerdeki eksenel yük ve yüksek seviyelerdeki yatay yük kombinasyonlarının bulunduğu

duvarlarda gözlemlenen düzlem içi göçme modunu temsil eder. Kayma düzlemi, yatak derzinin tek bir sırasında ya da birkaç sırada olabilir.

Şekil 2.4b'deki hasar modu ise deprem gibi yatay yükler altında daha çok düşük ve orta ön seviyedeki ön basınç durumunda meydana gelen yatay eğilme çatlaklarıdır. Topuk bölgesinde dönme (rocking) davranışı gözlemlenir. Duvar rijit bir cisim gibi davranarak topuk bölgesinde döner.

Şekil 2.4c'deki eğilme etkisinden kaynaklanan ezilme durumu, gerilme birikimlerinin duvarın burun bölgesinde toplanmasıyla ortaya çıkar. Bu durumda, kesme kuvveti ezilen bölgelerdeki taşlar tarafından basınç etkisiyle taşınır. Ayrıca, duvarın yükseklik/genişlik oranı arttıkça, ezilme türündeki göçme davranışı daha belirgin hale gelir.

Diyagonal kayma çatlakları Şekil 2.4d'de, yüksek seviyelerde ön basınç altında ortaya çıkan çatlaklardır ve nihai limit durumlarına neden olabilirler. Bu çatlaklar genellikle çekme gerilmesi yönünde gelişir ve malzeme kalitesi ile birimlerin geometrisine bağlı olarak baş ve yatak derzlerinde merdiven benzeri ayrılmalar/kırılma çizgisi şeklinde olabilir. Diyagonal çatlaklar, düşey ve yatay derzleri takip ederek ya da doğrudan taş birimleri üzerinde birim dayanımının çok düşük olduğu durumlarda ilerleyebilir. Bu çatlakların oluşumu, harç dayanımı, donatı durumu ve taşların mekanik özelliklerine çok bağlıdır.



Şekil 2.13 : Yığma duvarlardaki hasar/göçme modları (a) kayma, (b) dönme, (c) ezilme, (d) diagonal kayma çatlakları(Calderini ve diğ., 2010'dan uyarlanmıştır).

2.5 Literatür Çalışması/Önceki Çalışmaların Özeti

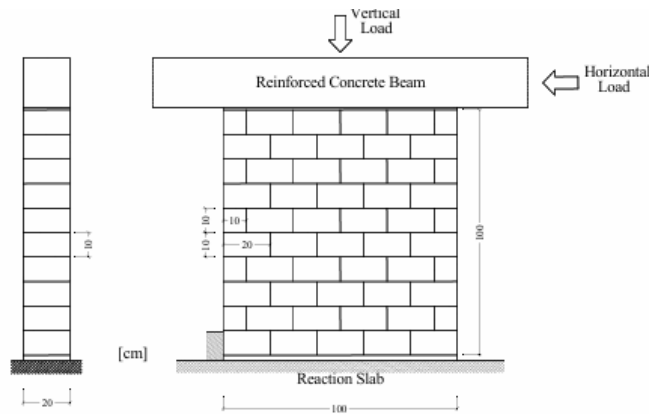
Bu tez çalışmasına en yakın kapsamda/içerikte olan bazı öncü çalışmalara burada kısaca değinilmiştir.

Tarihi taş kemer köprülerin taşıma kapasitesini değerlendirmek amacıyla yapılan bir çalışmada, üç boyutlu sonlu eleman modellemesi (3D FEM) yöntemi kullanılarak Bizans dönemine ait I. Justinianus Köprüsü DIANA yazılımı ile detaylı bir şekilde incelenmiştir. Modelleme sürecinde, köprünün geometrisi ve malzeme özellikleri dikkate alınarak doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiş, çeşitli yükleme senaryoları uygulanmıştır. Yapıda kullanılan küfeki taşı ve harç malzemeleri tanımlanmış, ayrıca taş bloklar arasındaki arayüz eleman bağlantıları modellenerek yapının gerçekçi bir temsilinin oluşturulması hedeflenmiştir. Analiz sonuçları, köprünün mevcut durumda belirli bir dayanım gösterdiğini, ancak uzun vadede malzeme bozulmaları ve artan yüklerin yapısal bütünlüğü tehdit edebileceğini ortaya koymuştur. Özellikle orta açıklıklarda gerilme yoğunlaşmaları ve çatlak oluşumları gözlemlenmiş, dinamik yükler altında bu riskin arttığı belirlenmiştir. Çalışma, köprünün korunması ve güvenliğinin sağlanması için düzenli bakım ve uygun güçlendirme önlemlerinin alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Sonuçlar, yalnızca I. Justinianus Köprüsü için değil, benzer tarihi yapılar için de önemli bir yol gösterici olabilecek niteliktedir (Menteşe, 2018).

Tuğla duvarların yapısal davranışını modellemek amacıyla yapılan bir çalışmada, basitleştirilmiş bir mikro-modelleme yöntemi geliştirilmiştir. Bu çalışmada, yüzey bazlı kohezyon modeli kullanılarak harç-tuğla arayüzündeki çekme ve kayma çatlakları simüle edilmiş; ayrıca, genişletilmiş sonlu elemanlar yöntemi (XFEM) ile çatlak ilerlemesi önceden tanımlamaya gerek kalmadan modellenmiştir. Drucker-Prager plastisite modeli sayesinde tuğlaların basınç altındaki ezilmesi başarıyla yakalanmıştır. Geliştirilen model, düzlem içi, düzlem dışı ve döngüsel yükler altında test edilerek deneysel verilerle doğrulanmıştır. Deneysel çalışmalarla karşılaştırıldığında, modelin yük-deformasyon ilişkilerini ve çatlak desenlerini başarılı bir şekilde öngördüğü görülmüştür. Özellikle XFEM'in kullanımı sayesinde, tuğlalardaki çatlak ilerlemesinin önceden belirlenmiş çatlak yollarına bağlı kalmadan

modellenebilmesi, önceki yöntemlere göre önemli bir üstünlük olarak öne çıkmıştır (Abdulla ve diğ., 2017).

Literatürdeki değerli çalışmalardan biri olarak, kuru derzli taş duvarların mekanik davranışlarını incelemek ve mevcut analitik yöntemleri değerlendirmek amacıyla bir dizi deneysel ve sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. (Lourenço ve diğ., 2000) Bu kapsamda, kuru derzli taş duvarların düşey ve yatay yüklere karşı gösterdiği mekanik tepkiler laboratuvar ortamında incelenmiş ve bu yapıların davranışlarını doğru şekilde modellemek amacıyla çeşitli sayısal modelleme teknikleri test edilmiştir. Kuru derzli taş duvarlar, kimi yapılarda başlangıçta bu şekilde inşa edilmekteyken, bazı harçlı duvarlar ise zamanla harcın aşınması ya da kaybı sonucu kuru derzli hale gelebilmektedir. Deneylerde kullanılan taş bloklar kumtaşından yapılmış olup boyutları 20×20×10 cm'dir ve aralarında harç bulunmamaktadır. Çalışmada toplam yedi adet kuru derzli taş duvar test edilmiş, deneyler Universitat Politècnica de Catalunya ile Universidade do Minho'nun ortak laboratuvarlarında yürütülmüştür. Duvarlara önce sabit bir dikey yük uygulanmış, ardından kademeli olarak yatay yükler verilerek taş blokların mekanik tepkileri gözlemlenmiştir. Uygulanan düşey yük seviyeleri 30 kN (0.15 MPa), 100 kN (0.50 MPa), 200 kN (1.00 MPa) ve 250 kN (1.25 MPa) olarak belirlenmiştir. Yükleme düzeneği ve geometrik özellikler verilmiştir (Şekil 2.5).

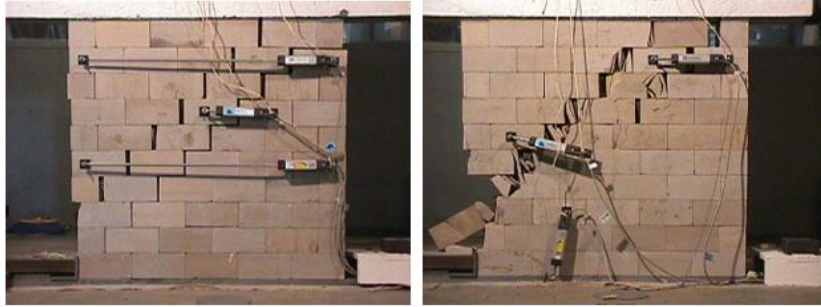


Şekil 2.14 : Geometri ve yükleme düzeneği (Lourenço ve diğ., 2000)

Deneylerden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri incelendiğinde, iki farklı bölgenin olduğu görülmüştür. İlk aşamada bloklar arasında kayma olmadan büyük bir rijitlik gözlenmiş, taşıma kapasitesinin %30'una kadar bu rijitlik korunmuştur. İkinci

aşamada bloklar arasında görece hareket başlamış ve rijitlik kaybı yaşanmıştır. Düşük düşey yük durumunda (0.15 MPa), duvarın göçmesi blokların dönmesiyle gerçekleşmiş ve derzlerde eğik bir ayrılma hattı oluşmuştur. Orta seviyedeki düşey yüklerde (0.50 MPa), bloklarda çatlaklar oluşmaya başlamış, adım adım ilerleyen ayrılma hattı yerini daha düz bir kayma hattına bırakmıştır. Yüksek düşey yüklerde (1.25 MPa ve üzeri), duvarlar yatay yük uygulanmadan önce bile burkulma belirtileri göstermiş ve bazı numuneler burkulma nedeniyle beklenenden erken göçmüştür. Ayrıca taş blokların yüzeyleri çok pürüzsüz olup yapılan testler taş bloklar arasındaki sürtünme açısının 31° olduğunu göstermiştir. Kuru derzli taş duvarların basınç dayanımı, harçlı duvarlara göre daha düşük bulunmuştur.

Uygulanan en düşük düşey gerilme seviyesi (0.15 MPa) için duvarın bir kısmının dönmesiyle birlikte taş derzlerini çapraz takip eden basamaklı bir ayrılma hattı oluşmuş, ancak bloklarda görünür çatlaklar gözlemlenmemiştir (Şekil 2.6.b). Bununla birlikte, daha yüksek düşey gerilmelerde bloklarda çatlakların belirginleşmeye başladığı ve basamaklı hattın kısmen daha düz bir diyagonal bant ile yer değiştirdiği görülmüştür. Dönme yerine, diyagonal bant boyunca yatay yer değiştirmeler meydana gelmiştir (Şekil 2.6.a). Bloklardaki çatlakların, yalnızca 0.5 MPa düşey gerilme uygulanan duvarlarda bile oluştuğu belirtilmelidir.



(a)

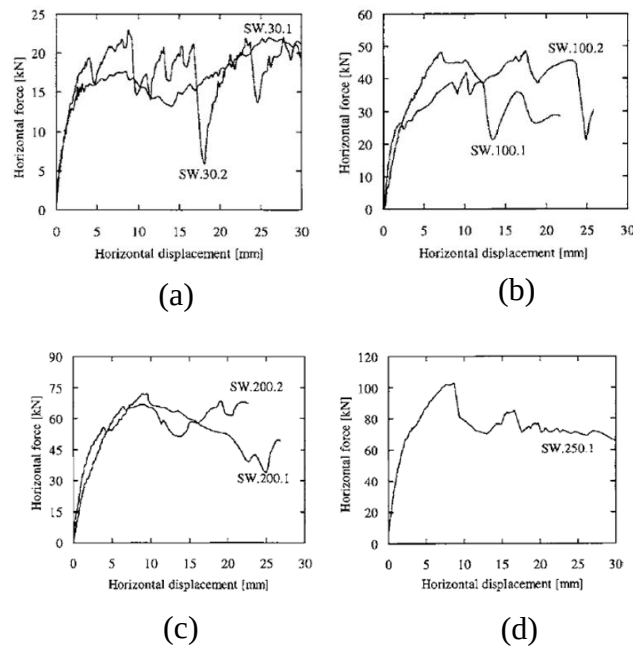
(b)

Şekil 2.15 : Deneysel göçme modları (a) 0.15 MPa düşey yük ve (b) 0.50 MPa düşey yük sahip duvarlardaki göçme anındaki görünümü (Lourenço ve diğ., 2000).

Sayısal analizlerde, kuru derzli taş duvarların mekanik davranışlarını modellemek için iki farklı yöntem kullanılmıştır. Birinci yöntem olan Carol ve López modeli, çatlak oluşumunu ve gelişimini simüle etmek için geliştirilmiş olup sıfır kalınlıklı bağlantı

elemanlarıyla bloklar arasındaki sürtünme modellenmiştir. Bu modelde, bloklar arasında kohezyon olmadığı ve çekme dayanımının sıfır olduğu varsayılmıştır. Yük taşıma kapasitesi başarılı bir şekilde tahmin edilse de kırılma mekanizmasının geometrisi tam olarak modellenememiştir. Simülasyon, deneylerde gözlenen eğik çatlak oluşumunu tam olarak yansıtamamıştır. İkinci model olan Lourenço ve Rots modeli ise özellikle kagir yapılar için geliştirilmiş olup plastik deformasyonların yalnızca derz bölgelerine yoğunlaştırıldığı bir yaklaşımı benimsemiştir. Bu model, deneysel yük-yerdeğiştirme eğrileri ile büyük ölçüde uyum sağlamış ve duvarların nihai taşıma kapasitesi ile göçme mekanizmasını daha doğru bir şekilde tahmin edebilmiştir.

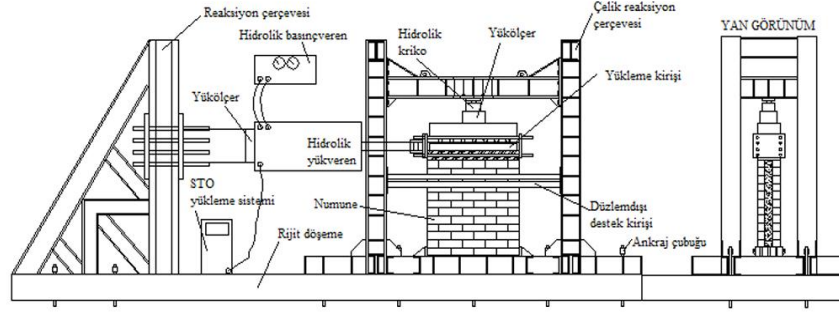
Düşey ve yatay yüklerin birlikte uygulandığı duvarlarda elde edilen yatay yük–yerdeğiştirme diyagramları, yükün maksimum değerinin yaklaşık %30'una kadar doğrusal bir davranış sergilemiştir. Bu noktadan sonra, deformasyonun artmasıyla birlikte sürekli bir rijitlik kaybı gözlemlenmiş ve taş birimlerinin ani hareketleri nedeniyle yatay yükte dalgalanmalara yol açılmıştır (Şekil 2.7). Deneysel sonuçlarla sayısal modelin uyumu dikkatle incelendiğinde, sayısal modelin göçme yükünü tahmin etme ve göçme modlarını belirleme açısından deneysel verilerle tutarlı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2.16 : Duvarların deneysel ve sayısal model kullanılarak elde edilen yatay kuvvet- yerdeğiştirme grafikleri (a), 30 kN, (b) 100 kN, (c) 200 kN ve (d) 250 kN eksenel düşey yük seviyeleri için (Lourenço ve diğ., 2000).

Deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde, kuru derzli taş duvarların taşıma kapasitesinin harçlı duvarlara kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Orta seviyedeki düşey yüklerde kırılma, doğrusal bir kayma gerilmesi-normal gerilme ilişkisi göstermiştir. Yüksek düşey yüklerde ise duvarlar burkulma nedeniyle daha erken göçmüştür. Deney sonuçları, kuru derzli duvarların mekanik dayanımının yüzey sürtünmesine ve taş bloklarının düzenine büyük ölçüde bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Sayısal modelleme sonuçları incelendiğinde, Carol ve López modelinin taşıma kapasitesini iyi tahmin ettiği, ancak kırılma mekanizmasını doğru modelleyemediği, Lourenço ve Rots modelinin ise deneysel verilerle daha iyi eşleştiği ve kırılma mekanizmasını daha doğru tahmin ettiği görülmüştür. Bu çalışma, kuru derzli taş duvarların davranışını anlamaya yönelik literatürdeki önemli katkılardan biri olmuştur (Roca ve diğ., 2010).

Yığma taş duvarlara yönelik literatürdeki kayda değer araştırmalardan biri Dr. Cem Demir'in 2012 yılında tamamladığı doktora çalışmasıdır (Demir, 2012). Bu tezde, çok tabakalı taş yığma duvarların düzlem içi tekrarlı yükler altındaki yapısal tepkisi hem deneysel hem de kuramsal olarak kapsamlı şekilde ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, tarihi yapılarda kullanılan taş ve harç gibi malzemelerin mekanik özellikleri detaylı bir biçimde analiz edilmiştir. Deneysel süreçte taş, harç ve taş-moloz karışımı gibi farklı yapı elemanları değerlendirilmiş, bu malzemelere ait basınç ve çekme dayanımları, elastisite modülleri ve sürtünme katsayıları ölçülerek karşılaştırılmıştır. Bulgular, küfeki taşı örneklerinin ortalama basınç dayanımının 18.0 MPa civarında olduğunu, ancak taş yığma elemanların bu değerin yaklaşık yarısı kadar bir dayanım sergilediğini ortaya koymuştur. Bunun yanı sıra, kuru derzli sistemlerin kayma davranışı ile yüzey pürüzlülüğünün sürtünme direncine etkileri incelenmiş, kesilerek düzeltilmiş taşlarda sürtünme katsayısının 0.76, yüzeyi pürüzlendirilmiş taşlarda ise 0.74 olduğu belirlenmiştir. Deneysel bölümde, 1/3 ölçekli sekiz adet taş duvar numunesi yerdeğiştirme kontrollü tekrarlı yatay yüklere maruz bırakılmıştır. Bu numunelerden ikisi yalnızca dış kabuklardan oluşmakta ve iç dolguda moloz bulunmamaktadır. Numuneler, 0.25, 0.50, 0.75 ve 1.00 MPa düzeylerinde farklı eksenel gerilmelerle test edilmiştir. Bu çalışma, çok tabakalı taş yığma duvarların göçme mekanizmaları, yatay yük taşıma kapasiteleri, süneklik düzeyleri ve enerji sönmeme yetenekleri hakkında önemli bulgular sunmaktadır. Kullanılan deney düzeneği ise Şekil 2.8'da ayrıntılı şekilde gösterilmiştir.

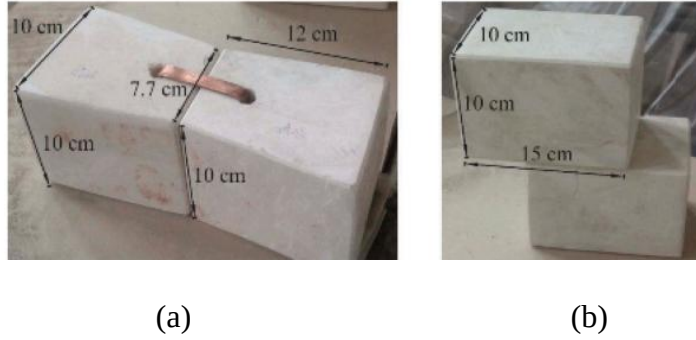


Şekil 2.17 : Deney ve yükleme düzeneğinin şematik görünümü. (Demir, 2012)

Yığma taş duvarlar üzerinde yapılan deneysel çalışmalar, bu yapı elemanlarının kesme etkilerine karşı oldukça duyarlı olduğunu, ancak aksel gerilme seviyelerine bağlı olarak eğilme etkilerinin de belirginleştiğini ortaya koymuştur. Hasarın oluşumu genellikle taş bloklar ile komşu tabakalar arasındaki ara yüzeylerde başlamakta, bu bölgelerde oluşan ince düşey çatlaklar zamanla çapraz çatlaklara dönüşerek daha görünür hale gelmektedir. Yatay yerdeğiştirmelerin artmasıyla birlikte çatlak açıklıkları da genişlemiş ve bazı kenet ankrajlarının etkisini kaybetmesi sonucu, duvarlar özellikle alt köşe bölgelerinde devrilme eğilimi göstermiştir. Her ne kadar kenetler çatlak oluşumlarının yönünü ve yayılımını kısmen etkilemiş olsa da taşların düşük çekme dayanımı nedeniyle bu elemanların sağladığı katkı sınırlı kalmıştır. Buna karşın, zıvana kullanımı, hem dayanım kapasitesinde hem de yerdeğiştirme kabiliyetinde gözle görülür bir artış sağlamıştır. Uygulanan tekrarlı yükler altında elde edilen çevrimsel eğrileri; numunelerin doğrusal elastik sınırlarını önemli ölçüde aştığını ve her bir yük döngüsünde kalıcı deformasyonların oluştuğunu göstermiştir. Elde edilen bulgular, yığma taş duvarların yön değiştiren tekrarlı yatay yüklere karşı sergilediği yapısal davranışları ve dayanım sınırlarını net biçimde ortaya koymuştur.

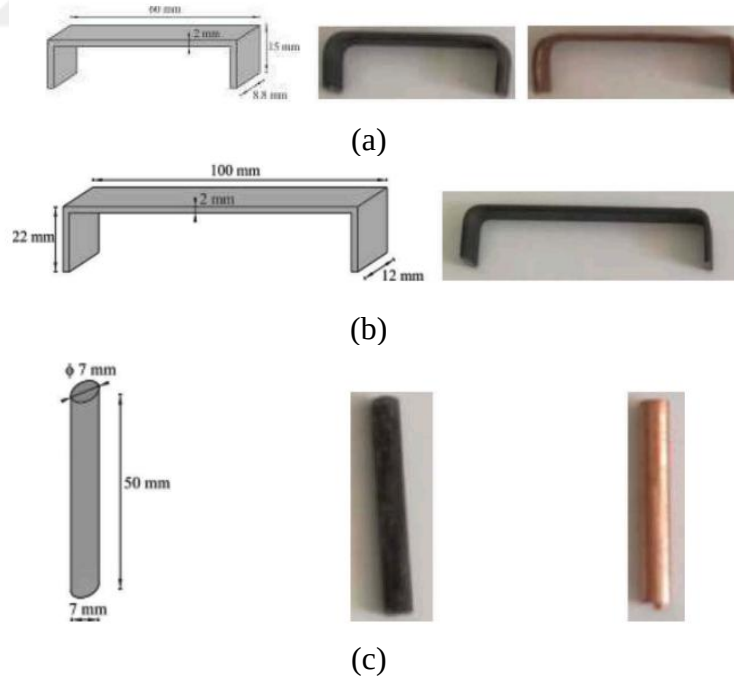
Tarihi kuru taş duvarlar üzerinde metal bağlantı elemanlarının (kenet ve pimlerin) etkisini inceleyen önemli çalışmalardan biri de Nikolić ve diğ., (2020) deneysel çalışmasıdır. Çalışma, özellikle kenetler ve pimlerin yapısal direnci nasıl arttırdığını ve bu bağlantı elemanlarının çeşitli dinamik yükler, özellikle depremler karşısında nasıl davrandığını ele almaktadır. Araştırmada, bu tür yapıların restorasyonu ve güçlendirilmesi için yeni bir sayısal model geliştirmeyi amaçlanmıştır. Deneylerde, kenet testleri için 100 mm x 100 mm x 120 mm boyutlarında mermer blok

kullanılırken, pim testleri 100 mm x 100 mm x 150 mm boyutlarında mermer blok kullanılmıştır. Bu bloklar, farklı metal bağlantı elemanları (demir ve bakır kenetler, demir ve bakır pimler) ile birleştirilmiştir (Şekil 2.9). Bağlantı elemanlarının boyutları ve yerleştirildikleri konumlar, çeşitli kombinasyonlar halinde test edilmiştir.



Şekil 2.18 : Test edilecek mermer blokların şekil ve boyutları: (a) Kenetli blok, (b) zıvanalı(pimli) blok (Nikolić ve diğ., 2020).

Kenetler ve pimler demir ve bakır olmak üzere iki farklı malzemeden üretilmiştir. Her iki malzeme için kenet boyutları, 60 mm x 15 mm x 8.8 mm ve 100 mm x 22 mm x 12 mm olmak üzere üretim yapılmıştır. Pim elemanlar için de benzer şekilde her iki farklı malzeme için 7 mm çapında 50 mm yüksekliğinde pimler üretilmiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2.19 : Kenet ve zıvanalar için kullanılan malzeme ve geometrik özellikler, (a) demir ve bakır küçük kenetler, (b) demir büyük kenet, (c) demir ve bakır zıvanalar (Nikolić ve diğ., 2020).

Araştırmada, kenetler ve pimler için bir sayısal model geliştirilmiştir. Bu model, bağlantı elemanlarının taş bloklarla etkileşimini ve kuvvet-deplasman davranışını simüle etmektedir. Model, deneysel sonuçlarla kalibre edilmiştir (Şekil 2.11). Geliştirilen sayısal model ile bağlantı elemanlarının performansı ve taş bloklar arasındaki gerilme dağılımı analiz edilmiştir. Model, deneysel verilerle uyumlu sonuçlar vermiş ve tarihi yapıları güçlendirmek için kullanılabilecek güvenilir bir araç olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 2.20 : İki tür numune için test modeli, (a) enstrümantasyon, (b) kurulum şeması(Nikolić ve diğ., 2020).

Demir kenetler, bakır kenetlere göre daha yüksek taşıma kapasitesine sahiptir. Her iki malzemedeki kenetler için ise büyük boyutlu kenetler küçük boyutlu kenetlere göre daha fazla kuvvet taşımıştır.

Demir pimler, bakır pimlere göre daha yüksek kuvvetler taşımakta ve kısıtlanmış taş blok sistemlerinde daha yüksek performans göstermektedir.

Tüm kombinasyonlarda, bağlantı elemanlarının kurşun dolgusundan çekilmesi sonucu göçmeler meydana gelmiş ve mermer bloklarda herhangi bir hasar oluşmamıştır.

Bu ilişkiler, kenet ve pimlerin kuru taş duvarlı yapıların restorasyonu konusunda tercih edilebileceğini göstermektedir.

Bu tez çalışması, kenet ve zıvanların modele somut olarak dahil edilmesi, detaylı mikro modellenmesi, her bir temas noktası için arayüz tanımlanması bakımından diğer çalışmalardan ayrılmakta ve özgün olmaktadır.

2.6 Genel Değerlendirme

Bu tez çalışmasında, tarihi kesme taş duvar sistemlerinin mekanik davranışları mikro modelleme yaklaşımı kullanılarak ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Çalışmada, taş ve derz malzemelerinin birebir temsil edilmesi sayesinde, yapının heterojen yapısı ve bileşenler arası etkileşimler detaylı olarak modellenmiştir. Bu yaklaşım, geleneksel makro modellemelere kıyasla lokal göçme mekanizmalarının ve çatlak gelişiminin daha gerçekçi şekilde ortaya konmasına olanak sağlamıştır.

Sayısal analizler doğrusal elastik davranışların ötesinde, plastik deformasyon ve hasar gelişimi gibi doğrusal olmayan süreçleri de kapsayacak biçimde gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, kuru derzli taş duvarların taşıma kapasitesi ve zayıf bölgeleri ayrıntılı olarak tespit edilmiştir. Modelleme çalışmaları, yapının özgün malzeme özellikleri ve üretim tekniklerine uygun parametrelerle tasarlanmış, böylelikle yapısal davranışların gerçekçi bir şekilde simüle edilmesi sağlanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, sayısal modellemenin tarihi taş duvar sistemlerinin performansını anlamada etkin bir araç olduğunu göstermiştir. Ayrıca, çalışma kapsamında ortaya konan göçme mekanizmaları ve hasar modelleri, yapısal değerlendirme ve güçlendirme uygulamalarında yol gösterici niteliktedir. Genel olarak, bu çalışma tarihi taş yapıların korunması ve mühendislik müdahalelerinin planlanması açısından mikro modelleme tekniklerinin kullanımının önemini vurgulamaktadır.

3. MODEL BİLGİLERİ, MALZEME MODELLERİ, ARAYÜZ ETKİLEŞİM MODELLERİ VE SONLU ELEMAN AĞLARI

3.1 Model Bilgileri

Tarihi yapılardaki kenet ve zıvanaların boyut, konum, miktar gibi çok belirgin bir standardı olmadığı için belirsizlikler mevcuttur. Bu tez kapsamında, farklı demir kombinasyonlarını barındıran on iki model ele alınmıştır. Bunlar; kuru derzli taş duvar, yalnızca kenet içeren taş duvar, yalnızca pim içeren taş duvarlar ve hem kenet hem de pim içeren taş duvarlardan oluşan modellerdir. Modellerdeki tüm elemanlar AutoCAD Mechanical programında solid (katı) olarak modellenmiştir. Tüm duvar modellerinde, aksenal yükü ve yanal yerdeğiştirmeyi aktarmak amacıyla duvar üstüne fiktif betonarme kiriş dahil edilmiştir.

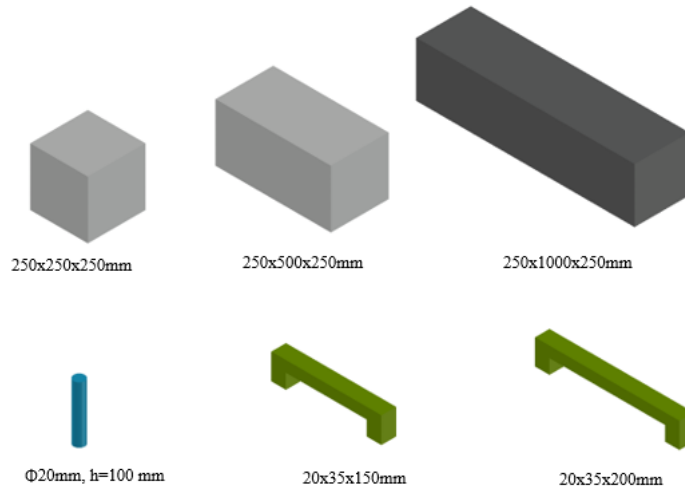
Dikkat edilmesi gereken bir nokta; Şekil 3.1'deki taş kenet ve zıvana görselleri temsildir ve genel eleman boyutlarını içermektedir. Her model konfigürasyonu için demir elemanlarının konum ve sayısına göre taşa yuvalar açılmıştır. Gerekli sayısal ve görsel bilgiye her model konfigürasyonunun alt başlığında detaylı bir şekilde yer verilmiştir. Bu çalışmada kenetler yeşil, zıvanalar ise mavi renklidir.

Kenetler, kullanım amaçlarına göre üç ayrı şekilde gruplandırılır: Taşı-taşa bağlayan kenetler, taşı ahşaba bağlayan kenetler ve taşı mermere bağlayan kenetlerdir. Taşı-taşa bağlayan kenetlerde Osmanlı yapılarında yalnızca “U” biçimli olan klasik ve yalın tipine rastlanır. Pim ya da diğer bilinen adıyla zıvanalar, taşlar arasında düşey ve eğik düzlemde bağlantı görevi görmektedir. Biçim olarak neredeyse bir çeşitlilik yoktur, boyut farklılıkları mevcuttur. (Tanyeli,1990)

Demir bağlantı elemanlarının boyutlarını belirlemek için literatürden faydalanılmıştır. Araştırma sonucu elde edilen bilgiler Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1 : Tarihi yapılarda kullanılan kenet ve zivana boyutları.

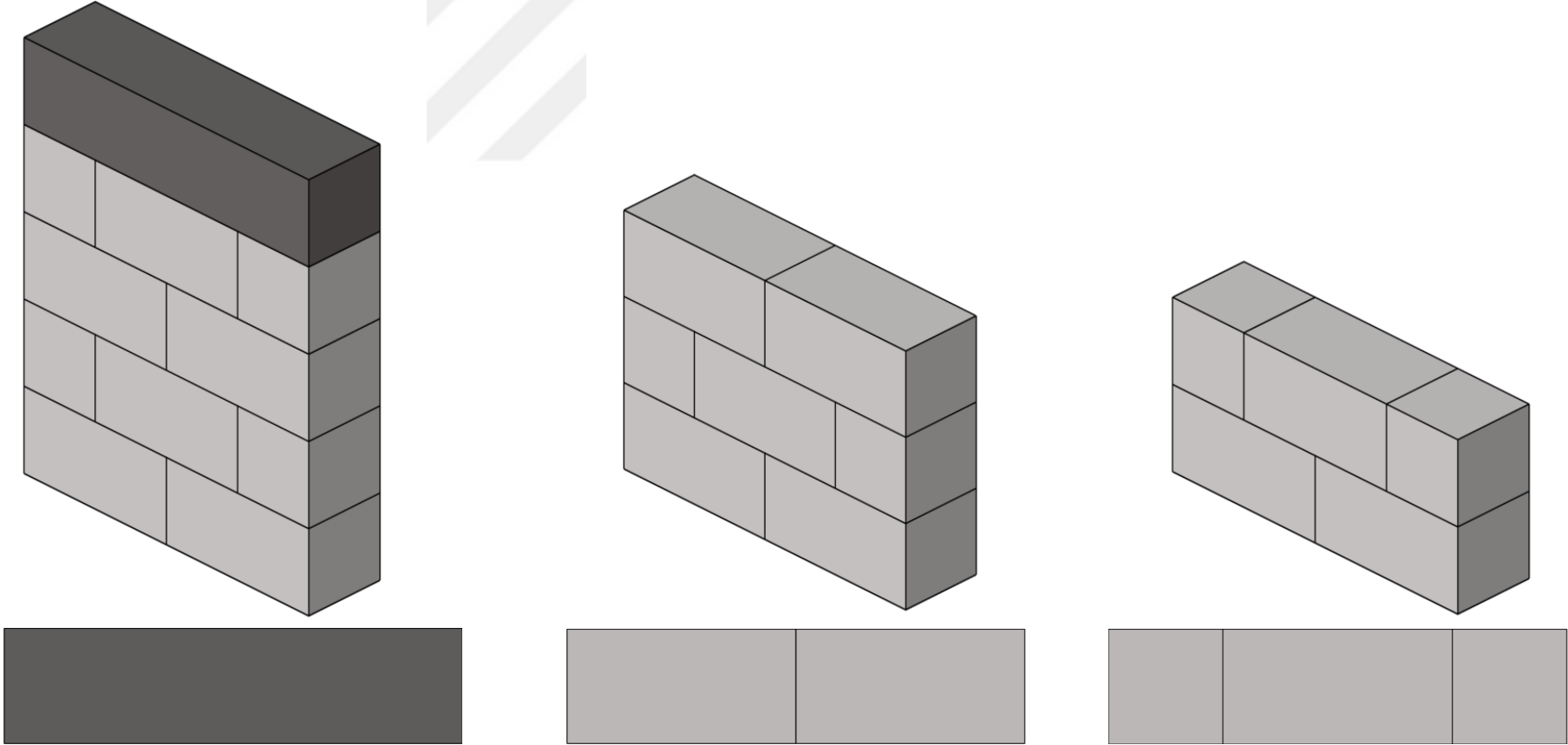
Yapı/Dönem	Eleman	Geometrik özellikler
Edirne Saray Mutfakları [15.yy. 3. Çeyreği] (Tanyeli 1990)	Kenet	19~22 cm uzunluk 1.8~2.1 cm genişlik 3.5 cm uç kıvrımı
Edirne Arifağa Camisi [15.yy. 2.çeyreği] (Tanyeli 1990)	Kenet	17~20cm uzunluk 2 cm genişlik
Mimar Sinan Dönemi (Tanyeli 1990)	Kenet	30~55 cm uzunluk 2.5~5 cm genişlik
Edirne Selimiye Cami [1569-1575] (Tanyeli 1990)	Kenet	54 cm uzunluk, 3.5~4 cm genişlik 1.0~1.2 cm kalınlık 6 cm uç kıvrım
Edirne II.Bayezid Cami [15.yy.] (Demir 2012)	Kenet	35~37 cm uzunluk 3~4 cm genişlik 0.9~1.0 cm kalınlık 4.2~5.5 cm uç kıvrım
Sultanahmet Cami [1609-1617] (Tanyeli 1990)	Pim/zivana	6~12 cm uzunluk



Şekil 3.1 : Genel eleman boyutları.

3.1.1 Taş model

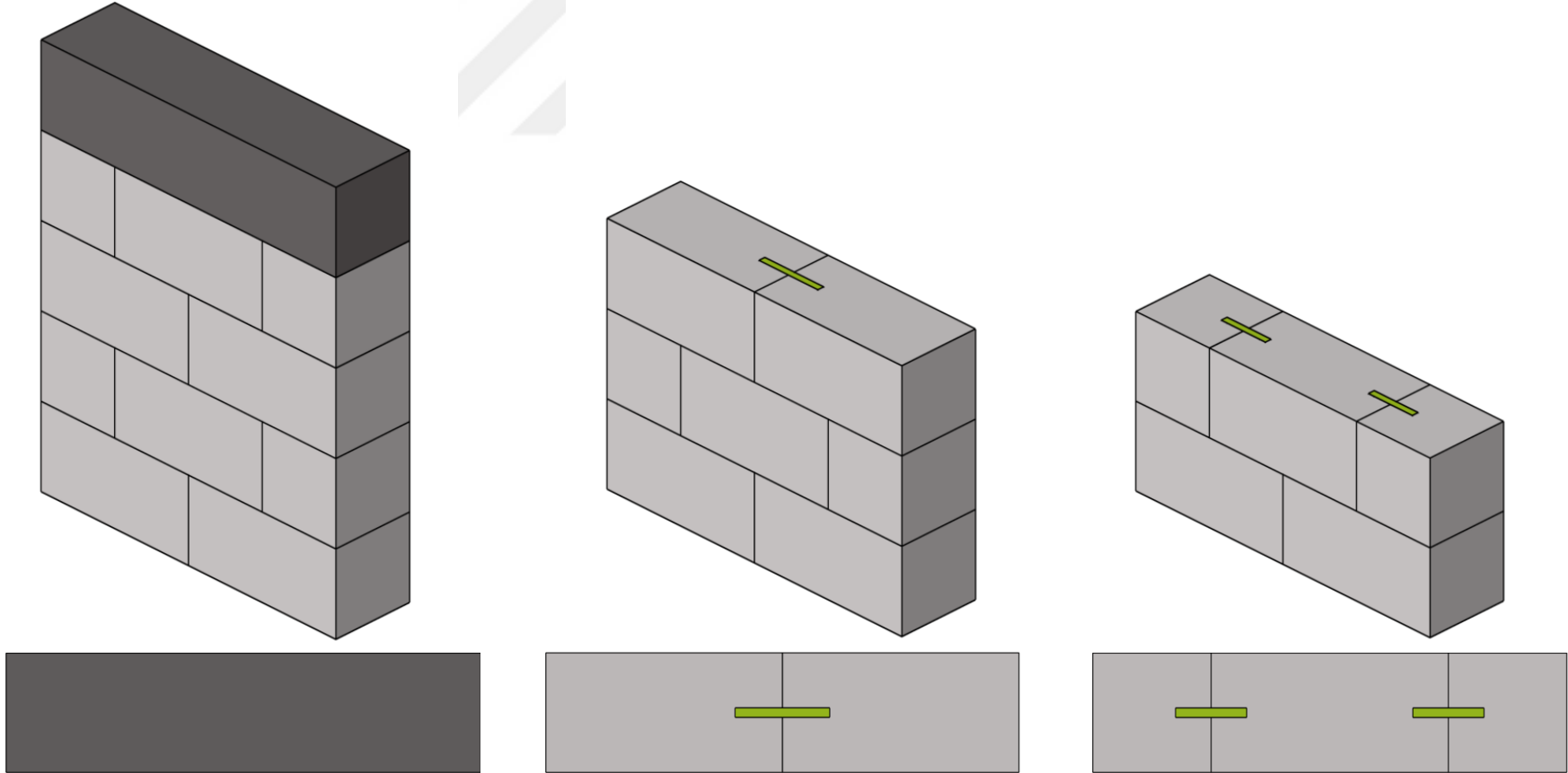
Taş modele ait katı model Şekil 3.2’ de sunulmuştur.



Şekil 3.2 : Taş model.

3.1.2 Kenet model

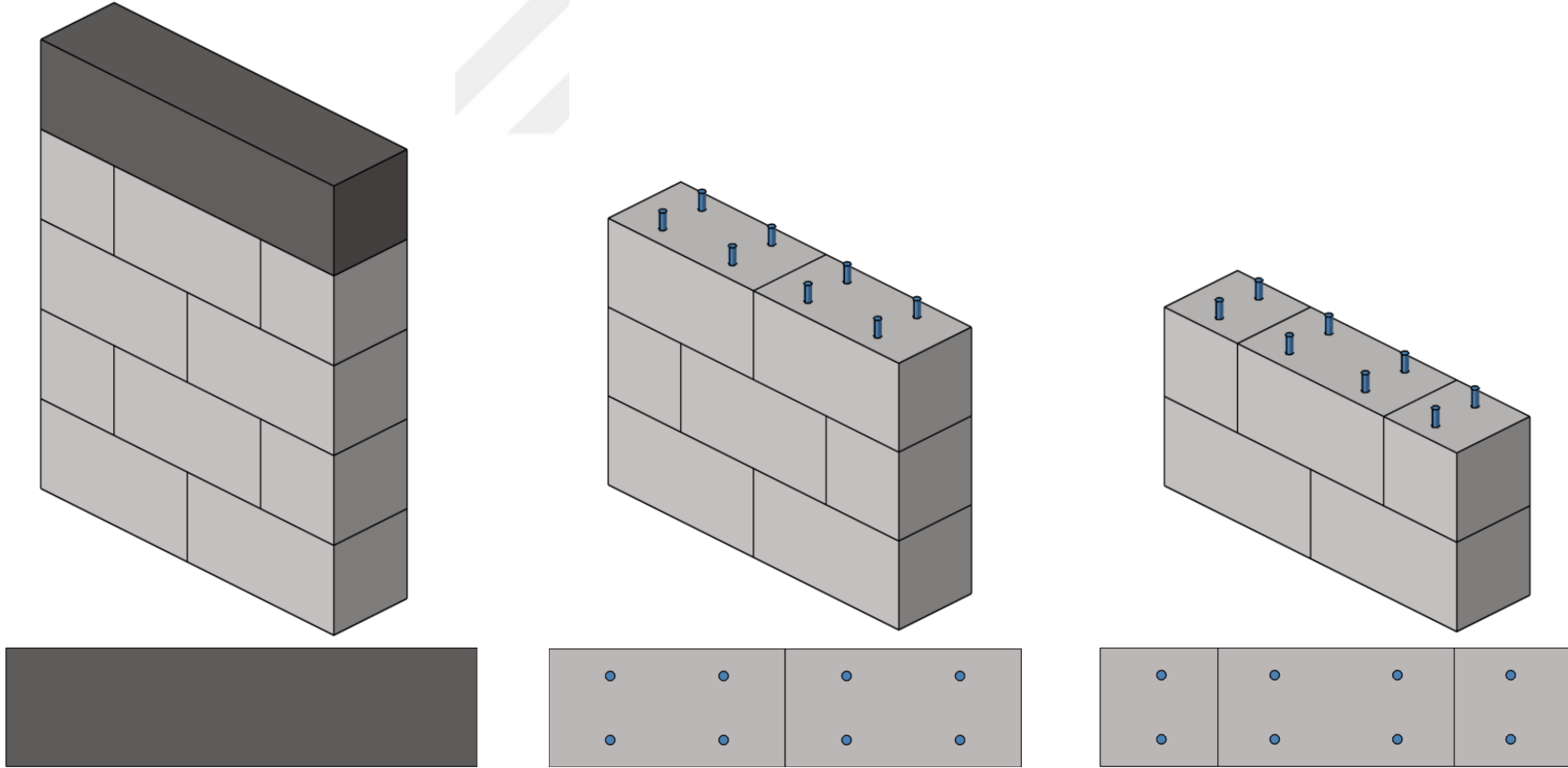
Kenet modele ait katı model Şekil 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.3 : Kenet model.

3.1.3 Model 1 pim

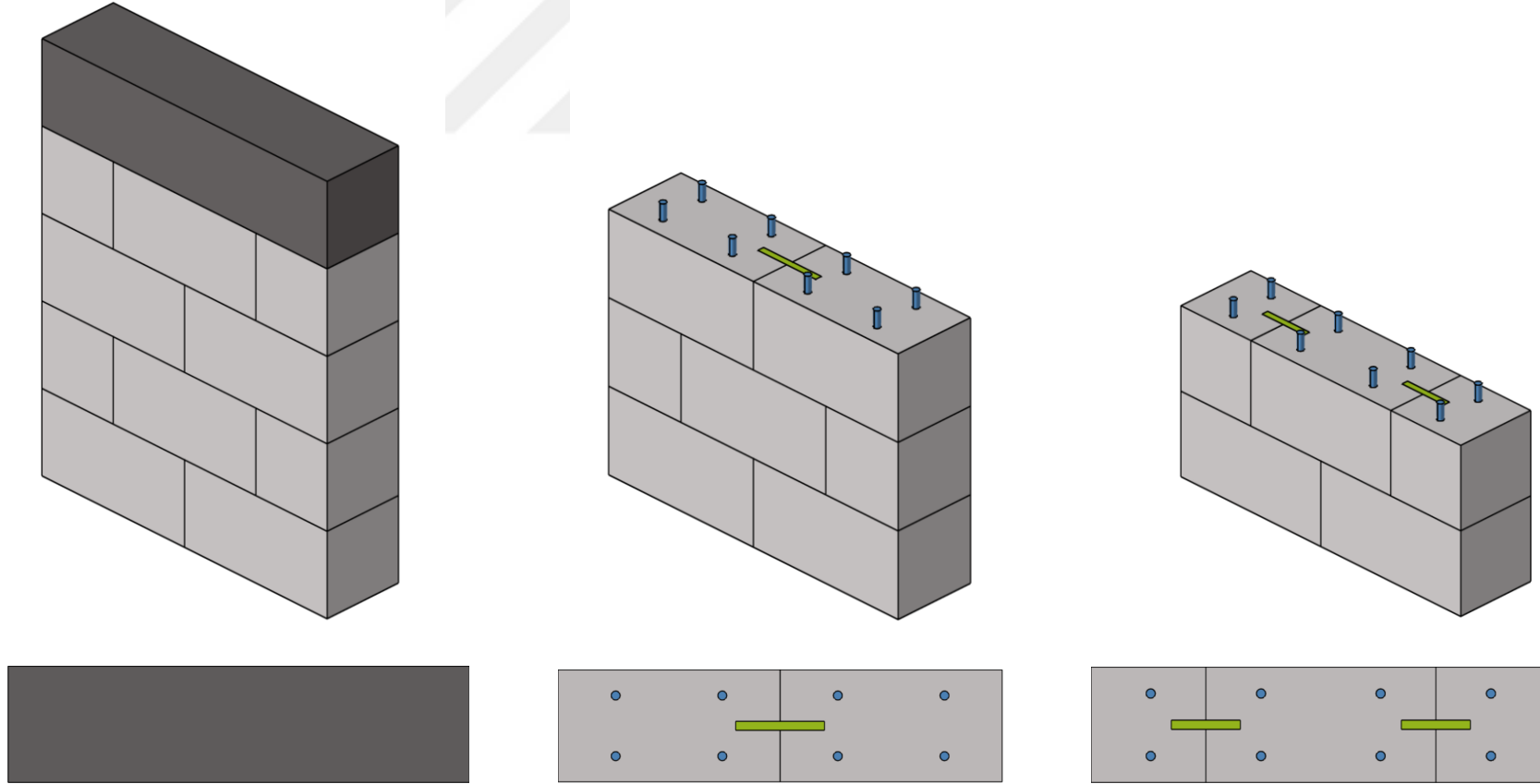
Model 1 pim katı modeli Şekil 3.4' de sunulmuştur.



Şekil 3.4 : Model 1 pim.

3.1.4 Model 1 hibrit

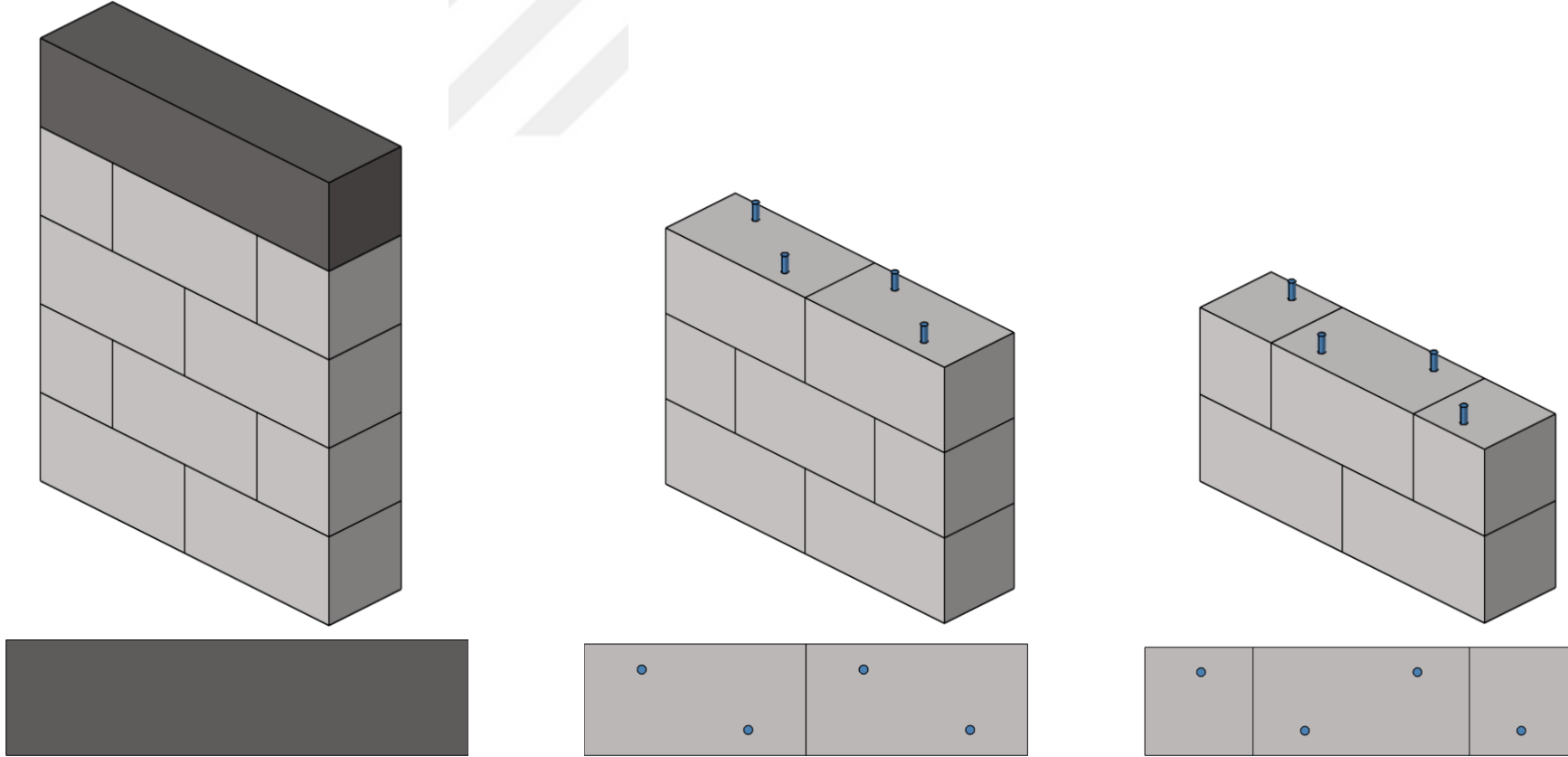
Model 1 hibrit katı modeli Şekil 3.5'te sunulmuştur.



Şekil 3.5 : Model 1 hibrit.

3.1.5 Model 2 pim

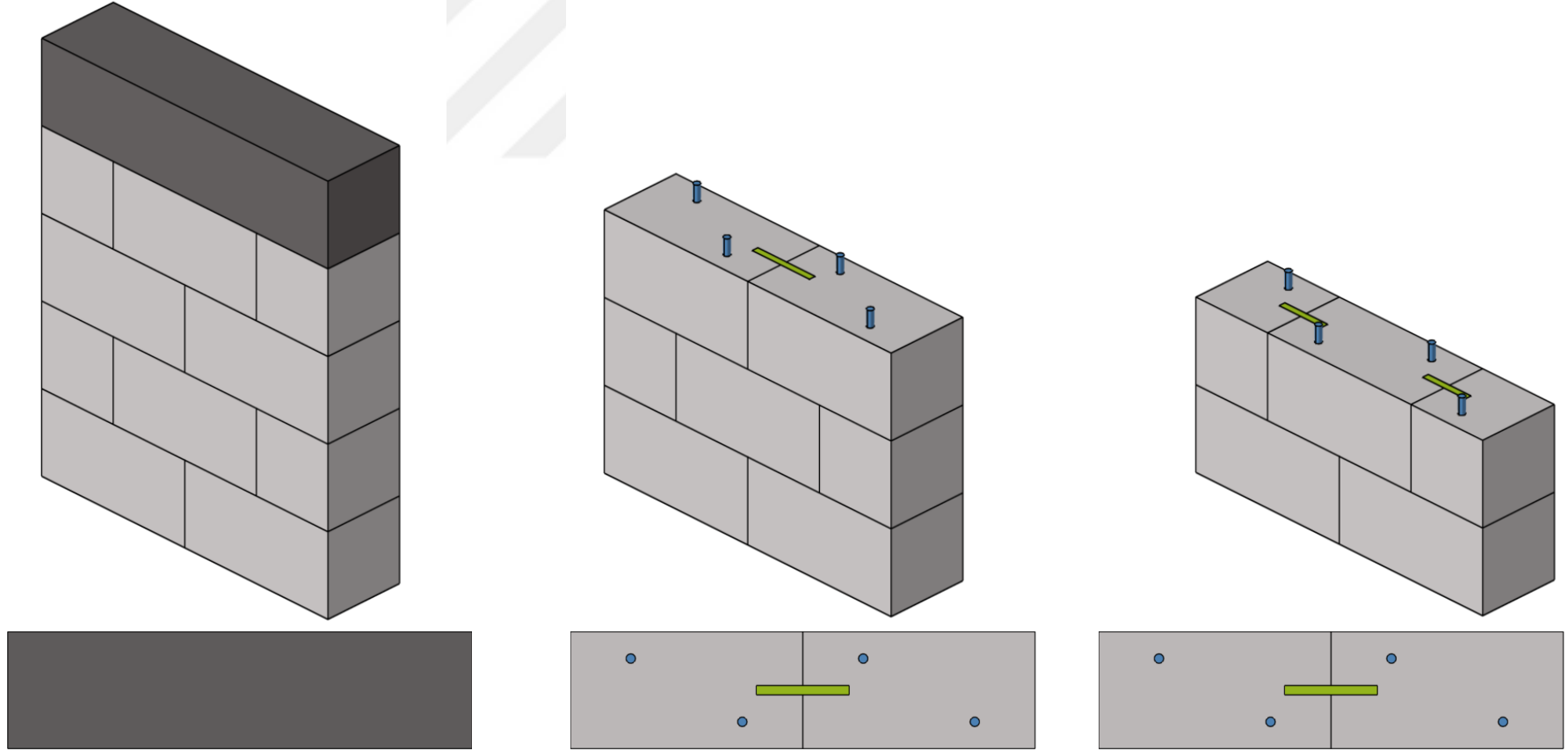
Model 2 pim katı modeli Şekil 3.6'da sunulmuştur.



Şekil 3.6 : Model 2 pim.

3.1.6 Model 2 hibrit

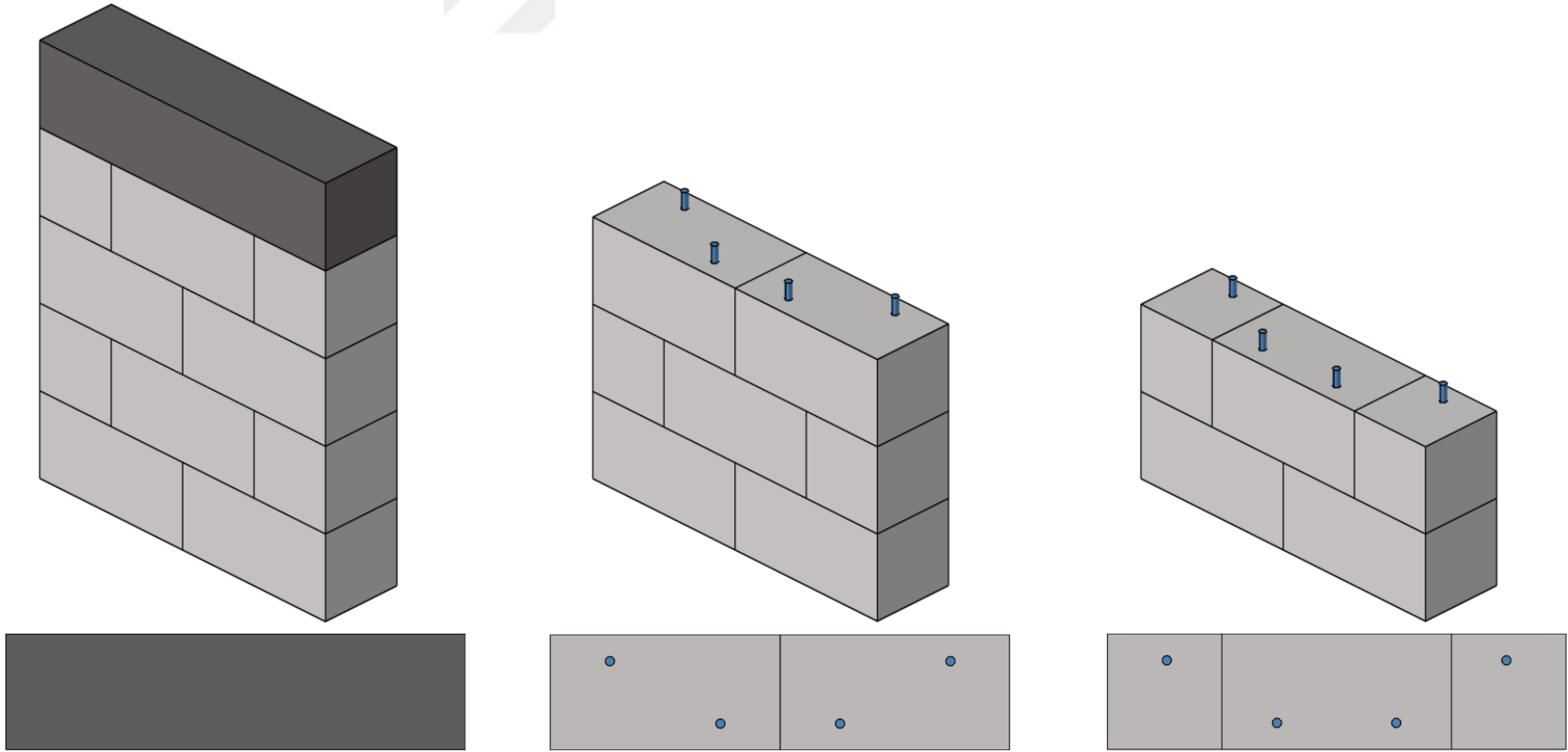
Model 2 hibrit katı modeli Şekil 3.7’de sunulmuştur.



Şekil 3.7 : Model 2 hibrit.

3.1.7 Model 3 pim

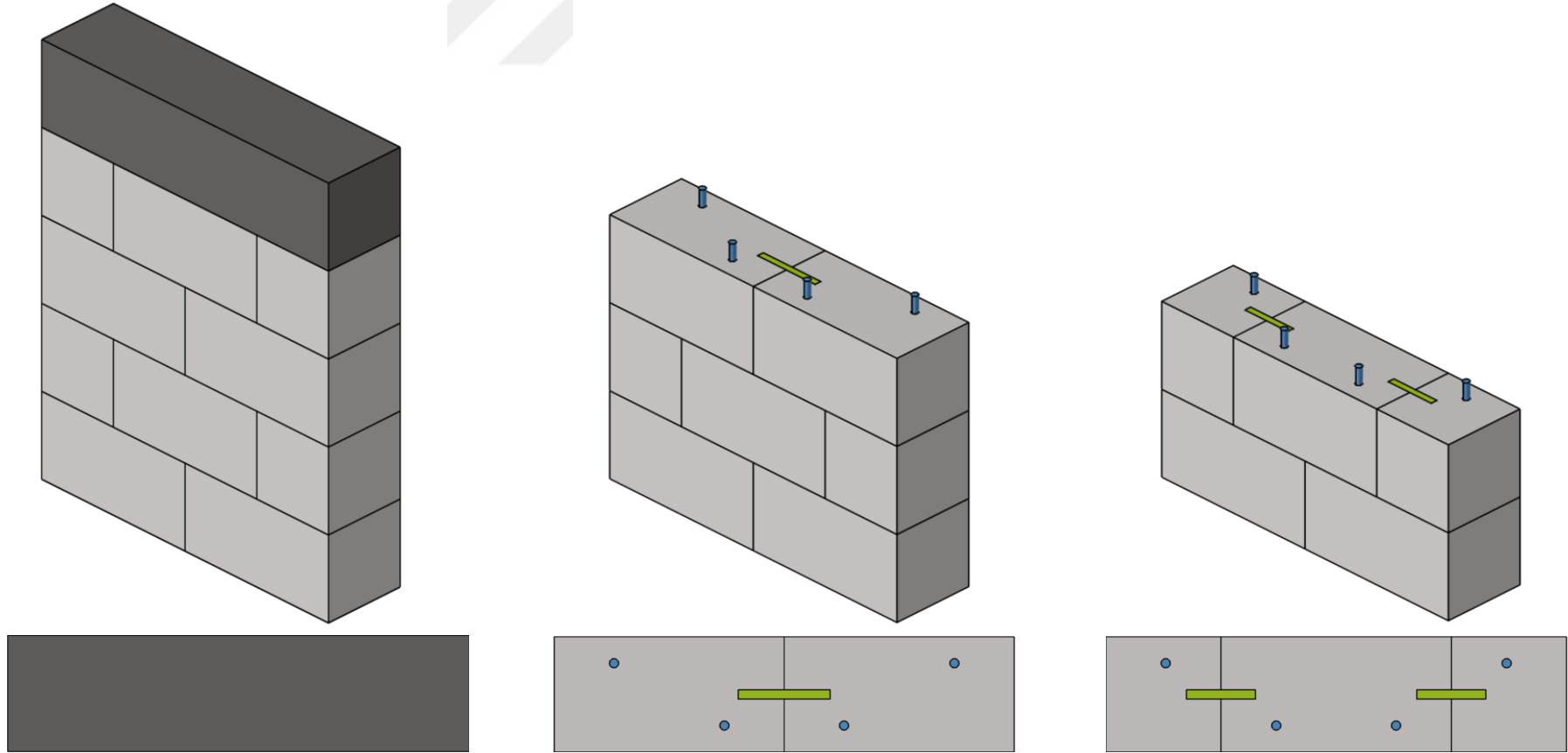
Model 3 pim katı modeli Şekil 3.8’de sunulmuştur.



Şekil 3.8 : Model 3 pim.

3.1.8 Model 3 hibrit

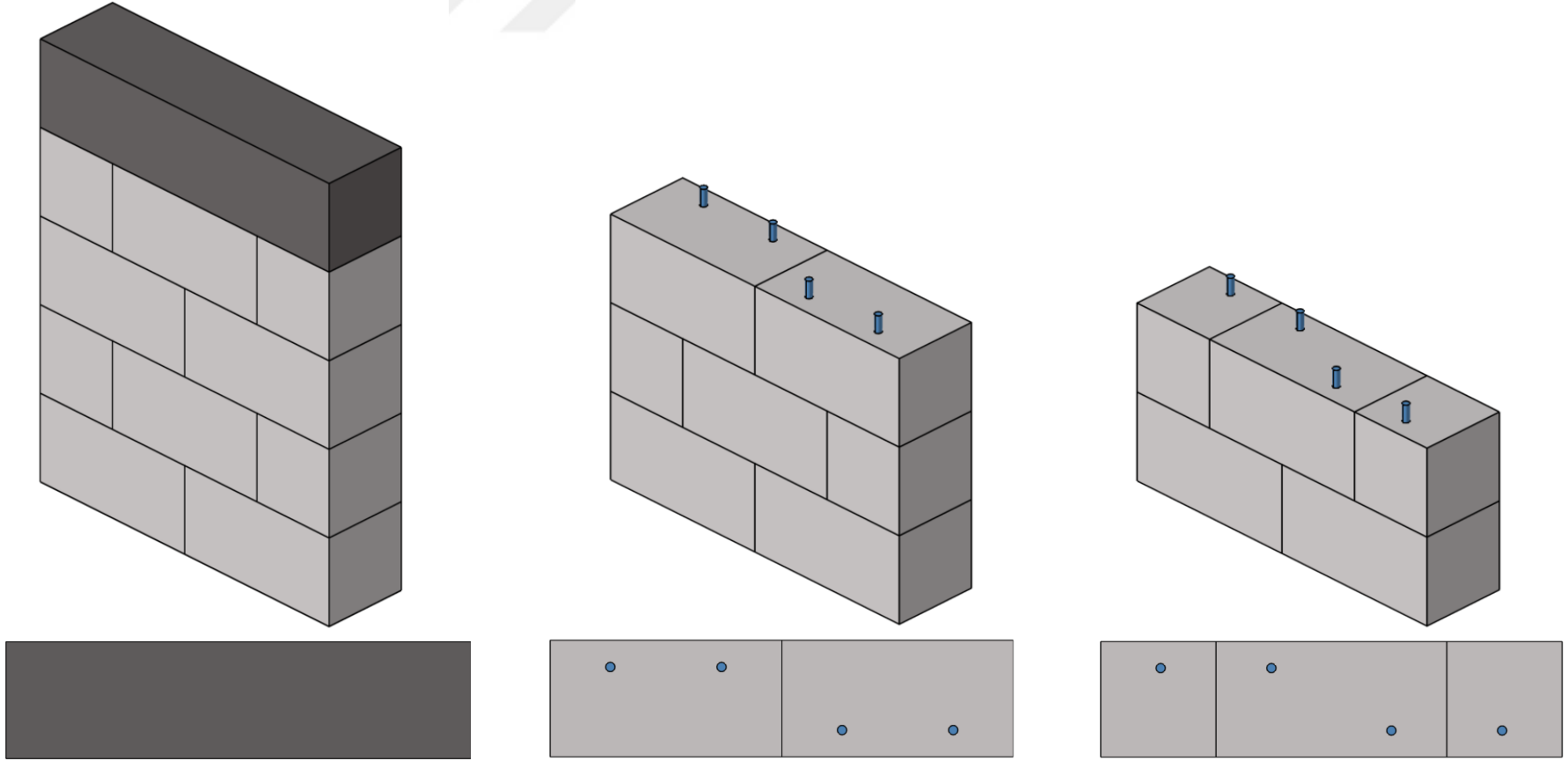
Model 3 hibrit katı modeli Şekil 3.9’da sunulmuştur.



Şekil 3.9 : Model 3 hibrit.

3.1.9 Model 4 pim

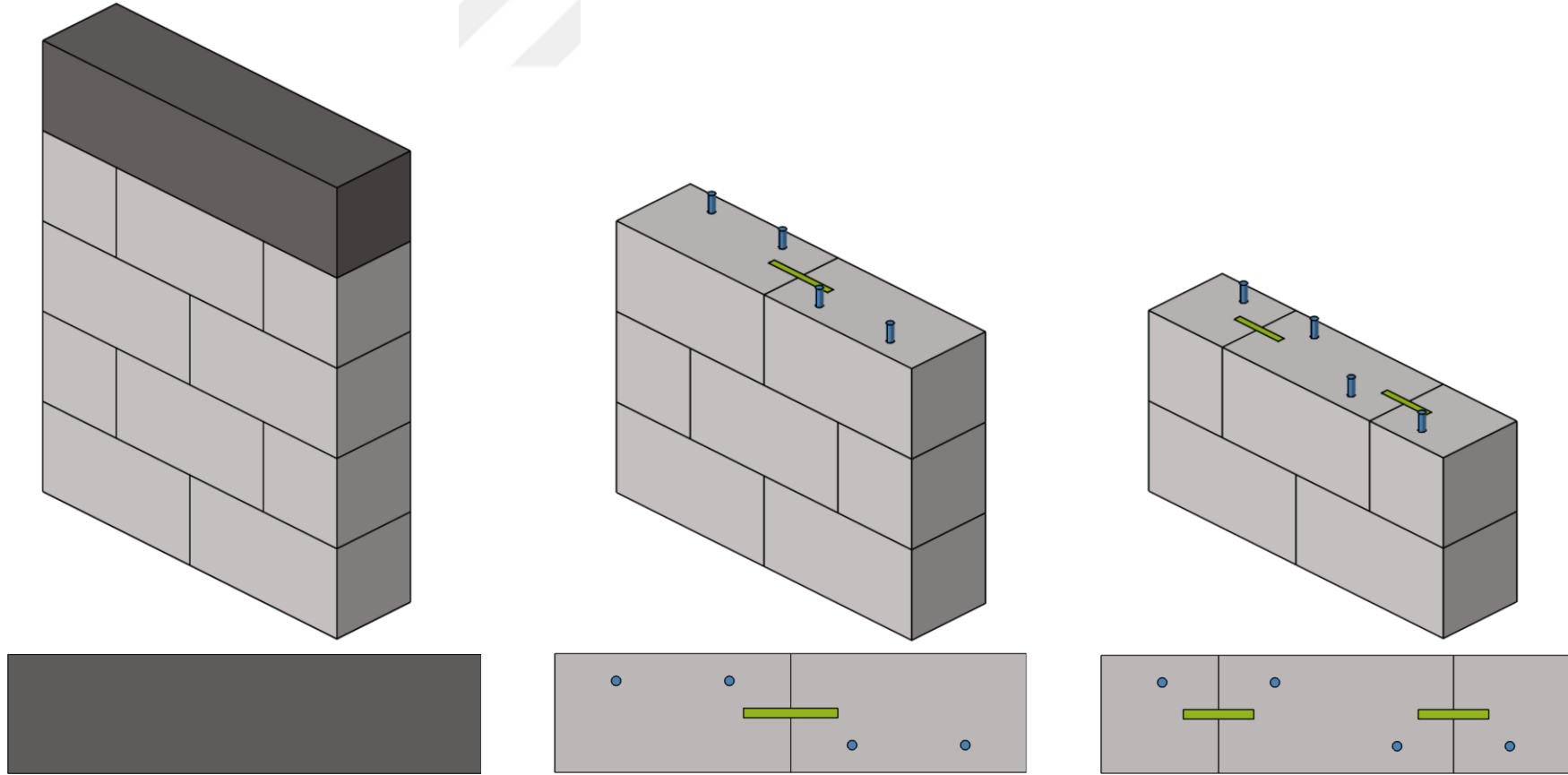
Model 4 pim katı modeli Şekil 3.10’da sunulmuştur.



Şekil 3.10 : Model 4 pim.

3.1.10 Model 4 hibrit

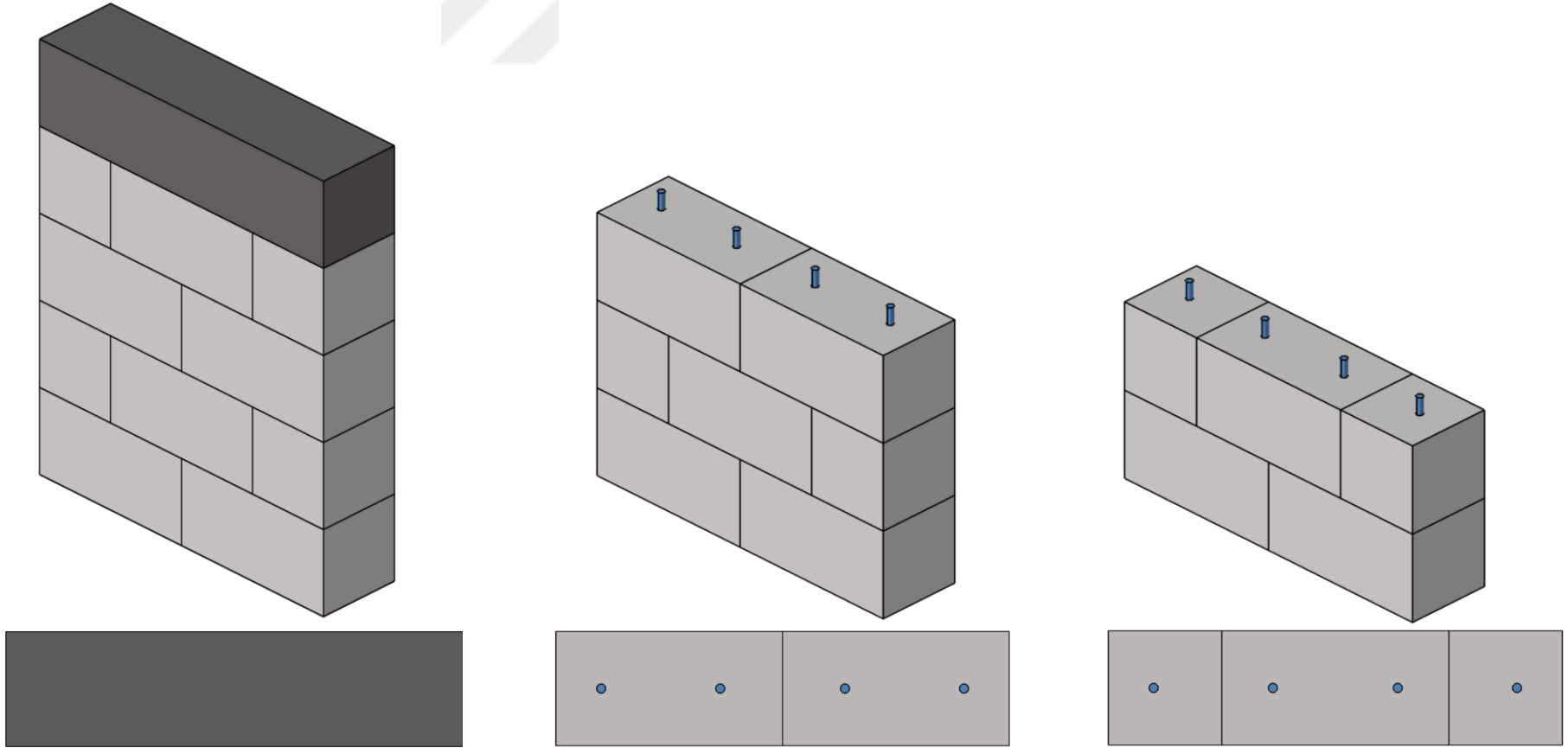
Model 4 hibrit katı modeli Şekil 3.11’de sunulmuştur.



Şekil 3.11 : Model 4 hibrit.

3.1.11 Model 5 pim

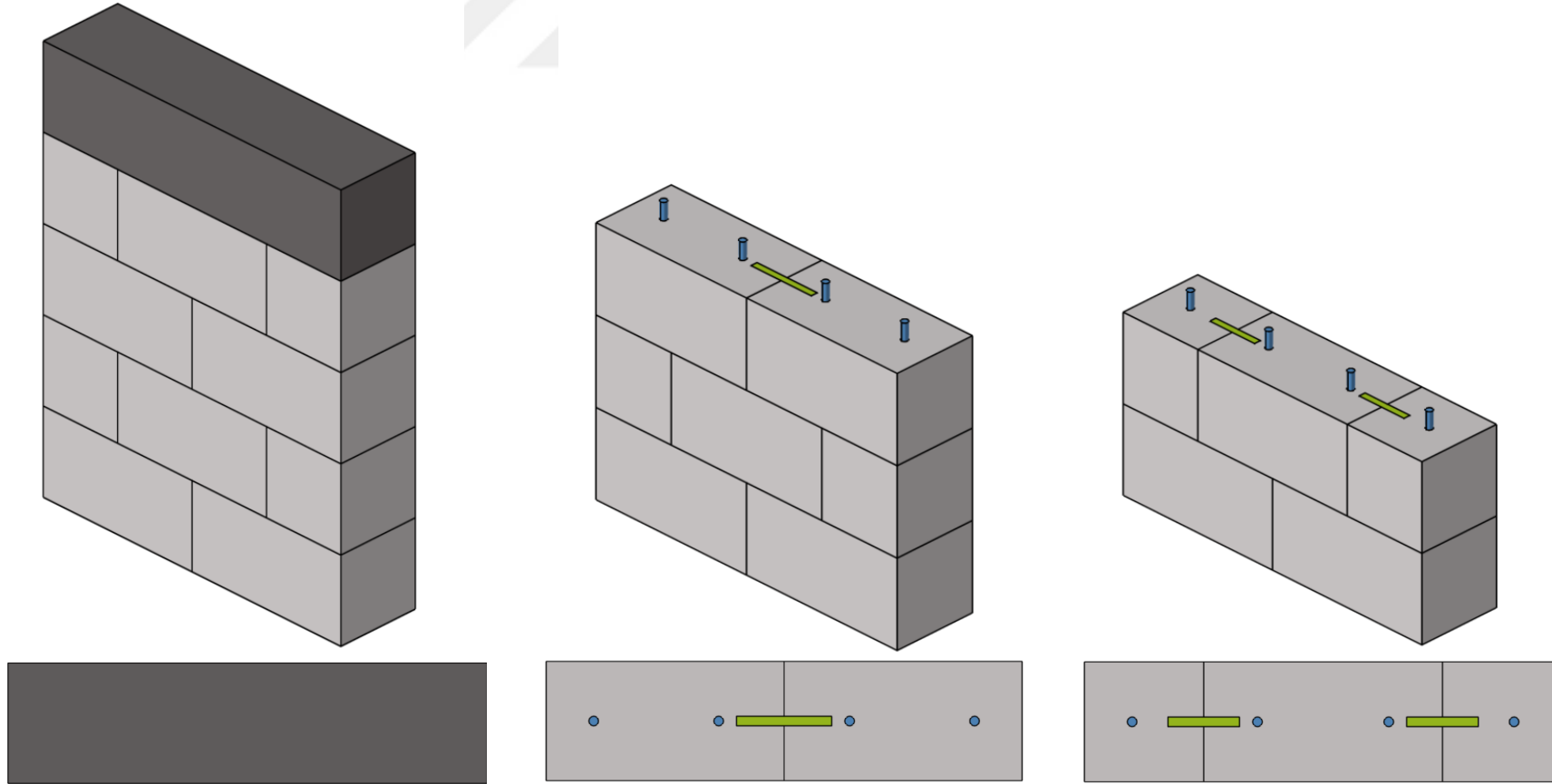
Model 5 pim katı modeli Şekil 3.12’de sunulmuştur.



Şekil 3.12 : Model 5 pim.

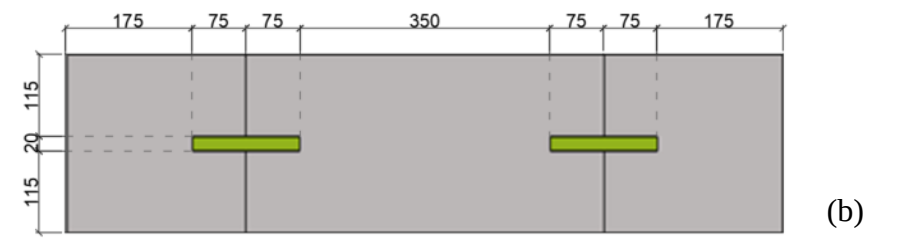
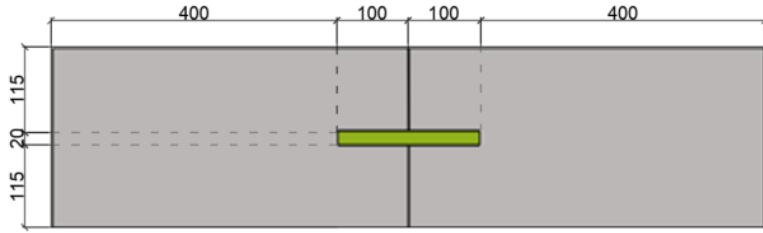
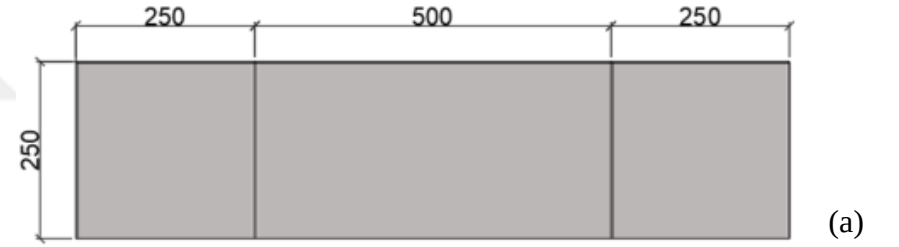
3.1.12 Model 5 hibrit

Model 5 hibrit katı modeli Şekil 3.13'te sunulmuştur.



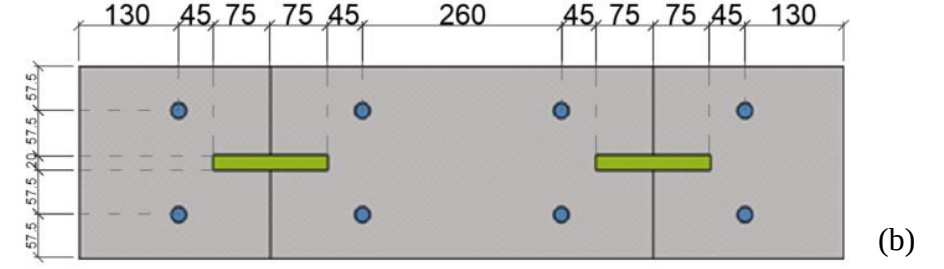
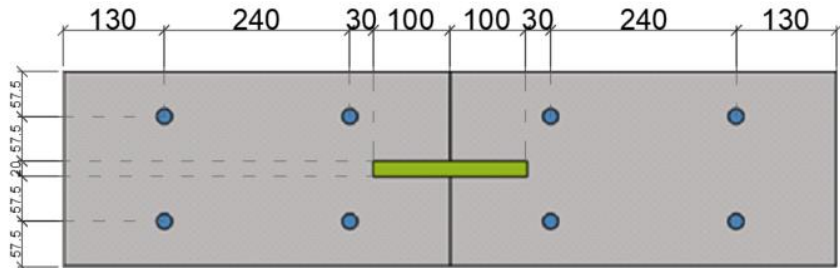
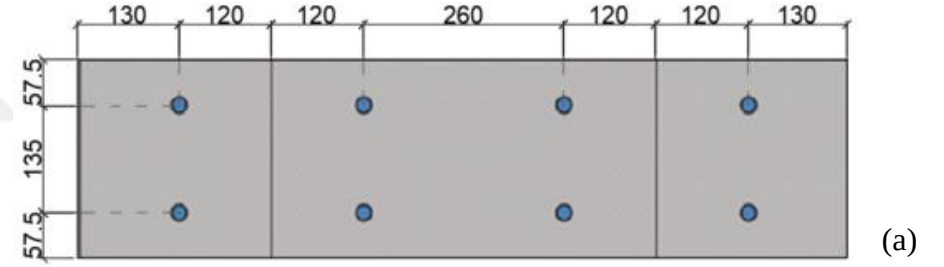
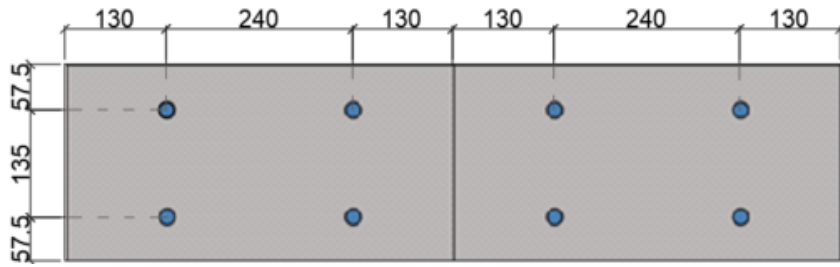
Şekil 3.13 : Model 5 hibrit.

Taş ve kenet modelin geometrik boyutları Şekil 3.14’de sunulmuştur.



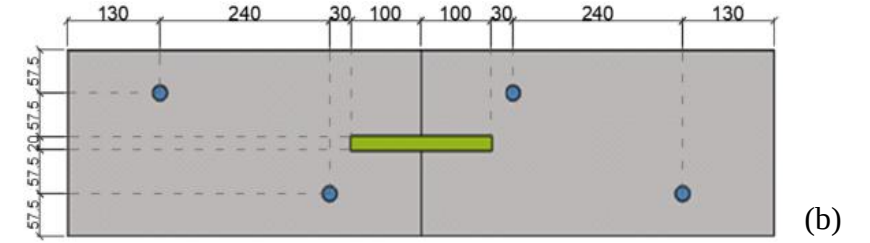
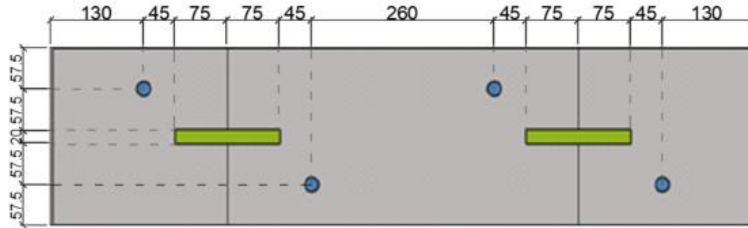
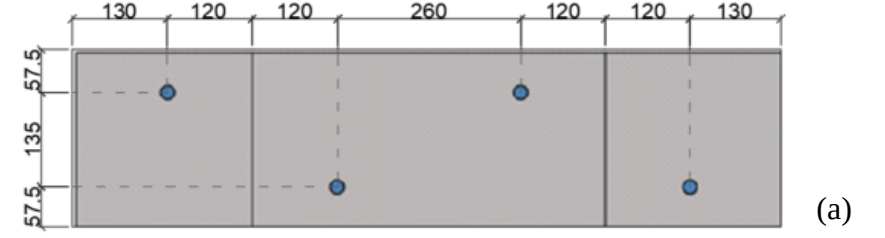
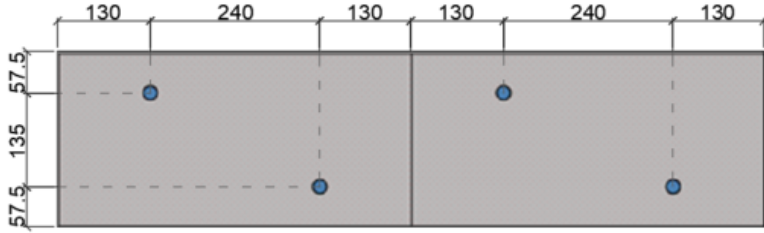
Şekil 3.14 : Model Boyutları; (a) Taş model, (b) Kenet model.

Model 1 pim ve model 1 hibritin geometrik boyutları Şekil 3.15'te sunulmuştur.



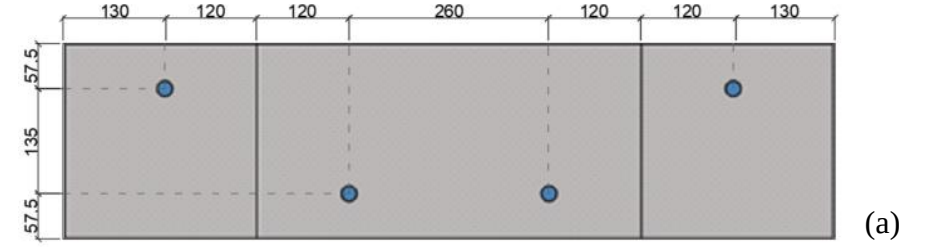
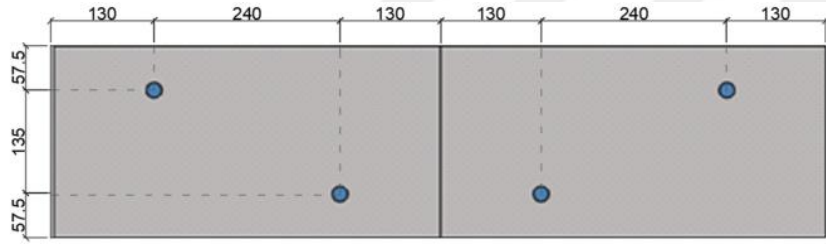
Şekil 3.15 : Model Boyutları; (a) Model 1 Pim, (b) Model 1 Hibrit.

Model 2 pim ve model 2 hibritin geometrik boyutları Şekil 3.16’da sunulmuştur.

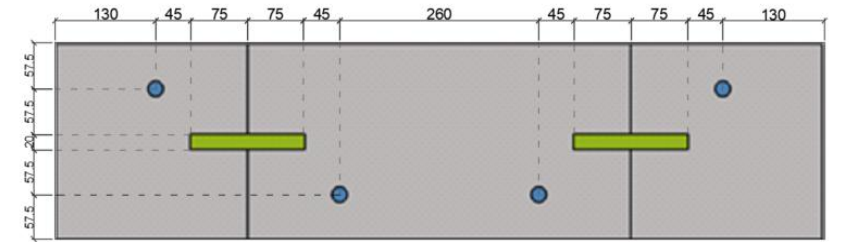
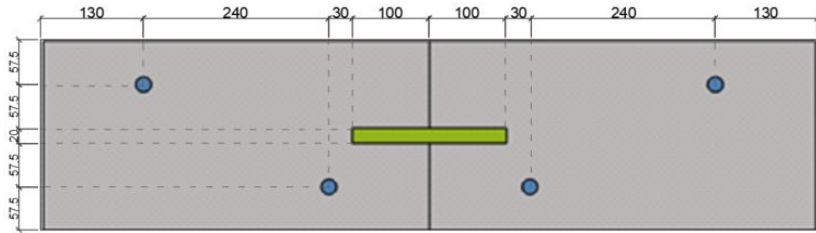


Şekil 3.16 : Model Boyutları; (a) Model 2 Pim, (b) Model 2 Hibrit.

Model 3 pim ve model 3 hibritin geometrik boyutları Şekil 3.17’de sunulmuştur.



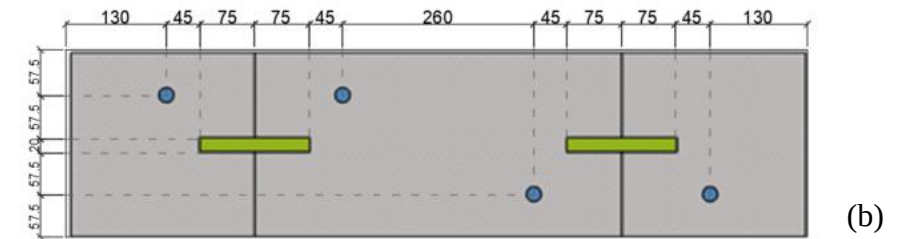
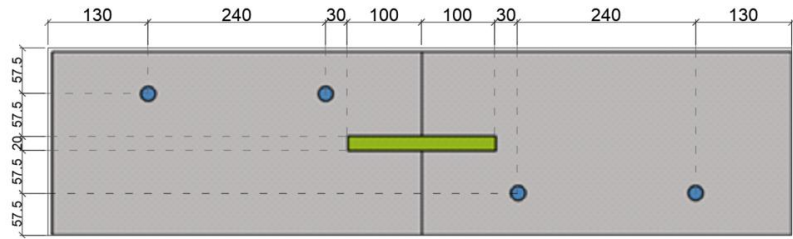
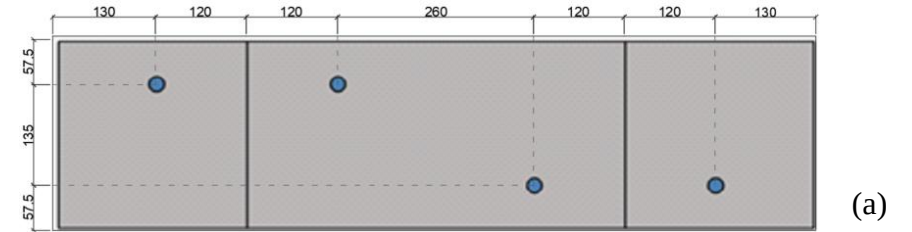
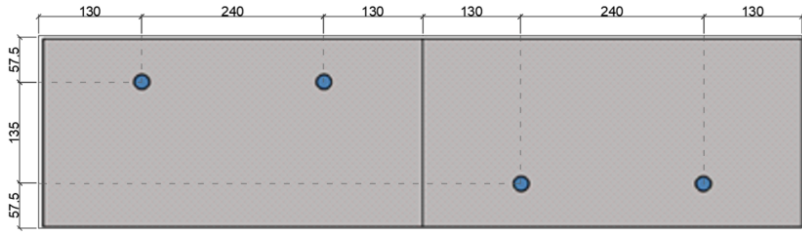
(a)



(b)

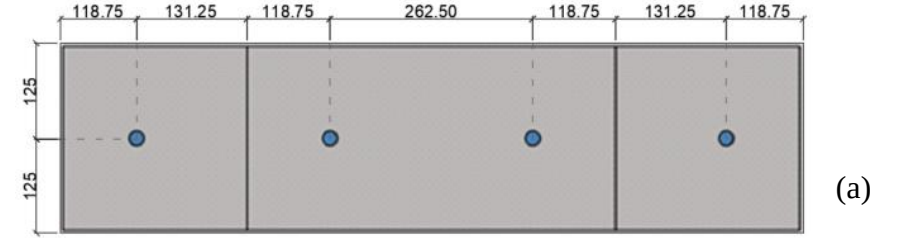
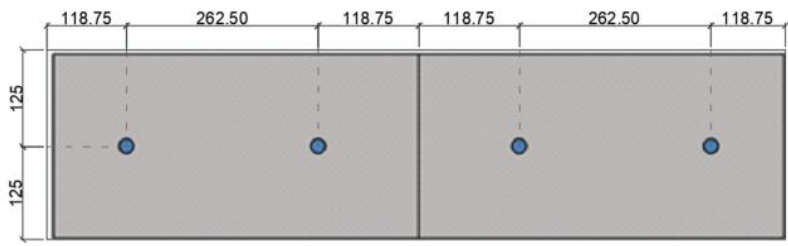
Şekil 3.17 : Model Boyutları; (a) Model 3 Pim, (b) Model 3 Hibrit.

Model 4vpim ve model 4 hibritin geometrik boyutları Şekil 3.18’de sunulmuştur.

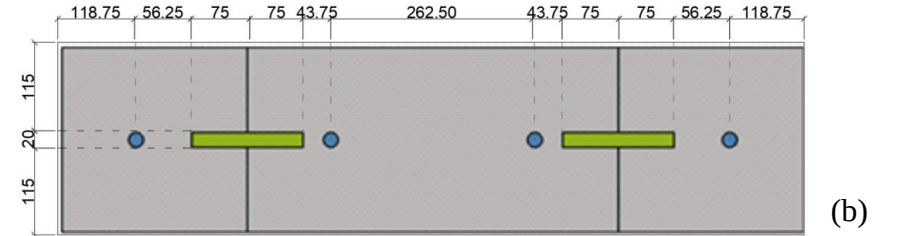
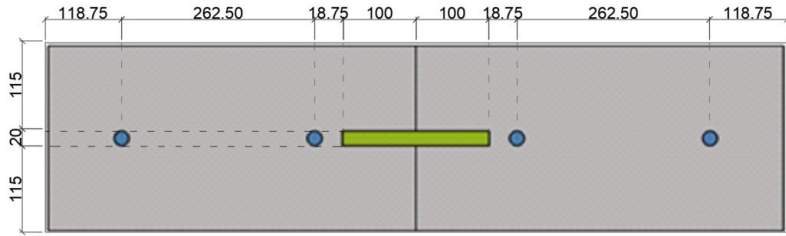


Şekil 3.18 : Model Boyutları; (a) Model 4 Pim, (b) Model 4 Hibrit.

Model 5 pim ve model 5 hibritin geometrik boyutları Şekil 3.19’da sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 3.19 : Model Boyutları; (a) Model 5 Pim, (b) Model 5 Hibrit.

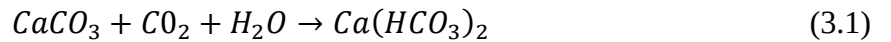
3.2 Malzeme Modelleri

Analiz sonuçlarının gerçekçi davranışı temsil edebilmesi için doğru malzeme modeli seçimi en önemli etkenler arasındadır. Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek adına numunelere çeşitli deneysel prosedürler uygulanmaktadır. Tarihi ve anıtsal yapılar için bu durum çok olası değildir. Bu nedenle modellerde kullanılan malzemelerin mekanik parametreleri için literatürdeki deneysel çalışma verileri dikkate alınmıştır.

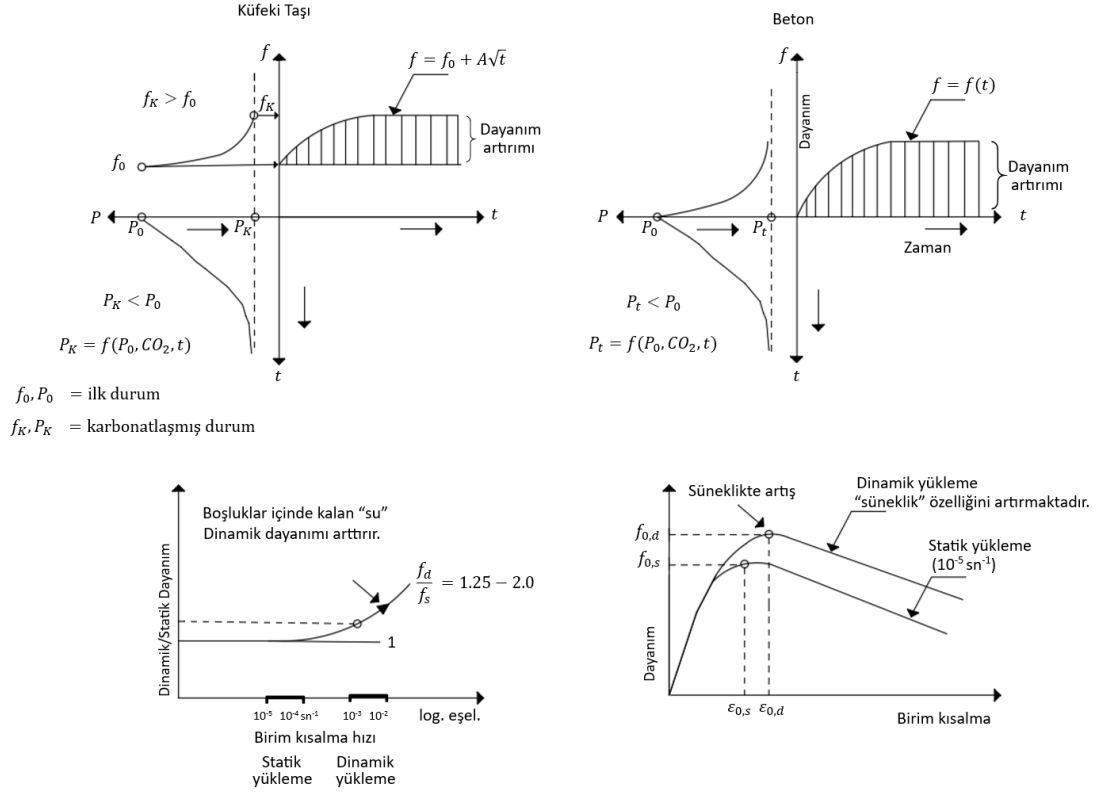
3.2.1 Küfeki taşı

Roma ve Osmanlı İmparatorluğu'nda başkentin İstanbul olması, küfeki taş ocaklarının bu bölgedeki yoğunluğu malzeme olarak tercih edilme nedenlerinden biridir. Küfeki taşı, İstanbul taşı, Bakırköy taşı olarak da bilinmektedir. Ocaktan ilk çıktığındaki birim hacim ağırlığı yaklaşık 22 kN/m³, başlangıç basınç dayanımı $f=f_0= 20\sim30$ MPa'dır. Taşın atmosfer koşullarında CO₂ ile reaksiyona girmesi sonucu "karbonatlaşma" olayı başlar (Denklemler 3.1). 30 gün sonunda taşın birim hacim ağırlığı yaklaşık %14 artarken, dayanımı 45 MPa'a ulaşabilmektedir. Ocaktan çıkarıldığında daha hafif olması taşıma kolaylığı sağlarken, taşın daha yumuşak olması işleme kolaylığı sağlamaktadır. Çekme dayanımının basınç dayanımına oranı yaklaşık %9'dur. Şekil 3.20'de de verildiği gibi, Küfeki taşının zamanla dayanımının artması beton davranışına benzemektedir. Aralarındaki en önemli fark beton için $t=0$ anında $f=0$ iken taş için $t=0$ anında $f=f_0$ gibi bir başlangıç dayanımına sahip olmasıdır. (Arioğlu ve diğ., 1998)

Karbonatlaşma mekanizması aşağıda verilmiştir:

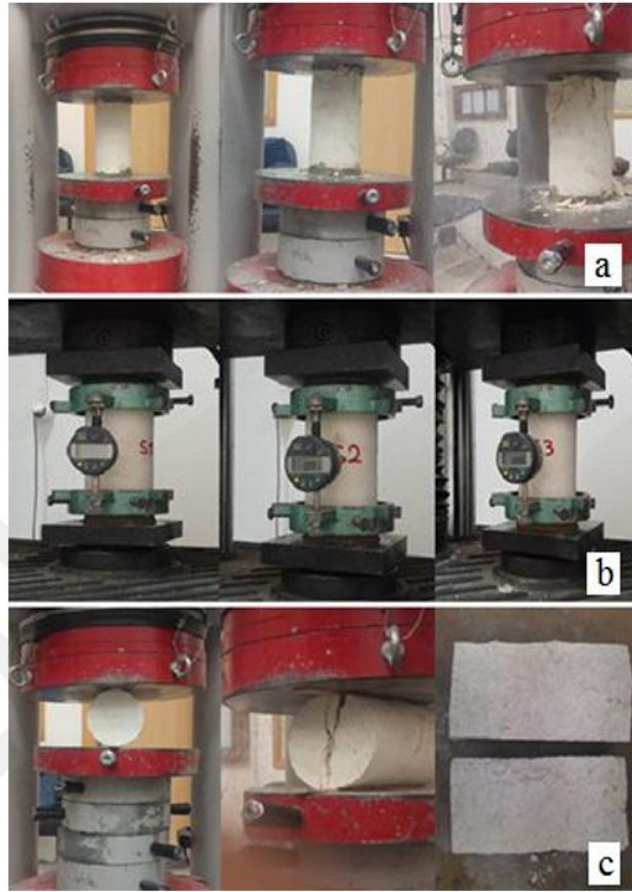


Burada $CaCO_3$ Küfeki taşı, CO_2 karbondioksit, H_2O yağmur ve boşluklardaki su, $Ca(HCO_3)_2$ ise kalsiyumbikarbonattır.



Şekil 3.20 : Küfeki taşta karbonatlaşma mekanizmasının beton davranışı ile karşılaştırılması (Arioğlu ve diğ. 1998'den uyarlanmıştır).

Küfeki taşı için mekanik parametreler (Menteşe, 2018) çalışmasından alınmıştır. Bu çalışmada küfeki taşının malzeme özellikleri laboratuvar testleri ile belirlenmiştir. Küfeki taşı için 20 cm yüksekliğinde ve 10 cm çapında 9 adet silindir numunesi kullanılmıştır. Dokuz numuneden altısı basınç dayanımını belirlemek için basınç testlerine tabi tutulmuştur. Altı numuneden üçü 0,2 mm/dakikalık yükleme hızında test edilip elastisite modülü belirlenmiştir. Geriye kalan üç numuneye ise çekme dayanımını belirlemek için yarma testi uygulanmıştır (Şekil 3.21). Deneyler sonucunda elde edilen küfeki taşına ait mekanik parametreler Çizelge 3.2'de sunulmuştur.



Şekil 3.21 : Taş numunler için laboratuvar testleri; (a) basınç testi, (b) Elastisite modülü değerlendirilmesine basınç testi, (c) Yarma testi (Menteşe, 2018).

Çizelge 3.2 : Küfeki taşı örneklerinin laboratuvar test sonuçları. (Menteşe, 2018)

Mekanik Özellikler	Numune	Test Sonuçları (N/mm ²)	Ortalama (N/mm ²)	Numune Tipi
Basınç dayanımı	C1	10.2	17	100x200mm silindir
	C2	19.2		
	C3	11.2		
	M1	23.8		
	M2	22.5		
	M3	17.2		
Elastisite Modülü	M1	17340	17500	100x200mm silindir
	M2	16800		
	M3	18533		
Çekme dayanımı	T1	1.60	1.7	100x200mm silindir
	T2	2.08		
	T3	1.44		

3.2.1.1 Concrete damaged plasticity model (CDP)

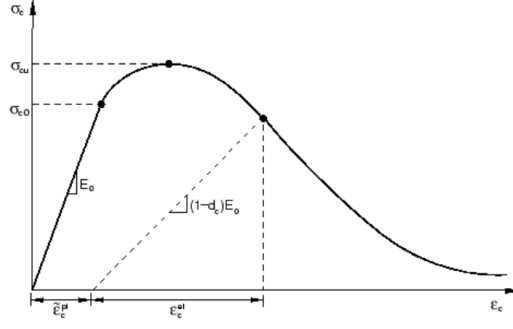
Küfeki taşının beton davranışına benzerliği Şekil 3.20’de gösterilmiş bir önceki bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Yapısal performansın daha doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi amacıyla, taşın doğrusal olmayan davranışı için (Menteşe, 2018) verileriyle concrete damage plasticity malzeme modeli oluşturulmuştur. CDP (Concrete Damage Plasticity) modeli, betonun çatlama ve ezilme gibi hasar süreçlerini ve bu süreçlerin plastik deformasyonla olan ilişkisini daha iyi anlayabilmek için kullanılan bir malzeme modelidir. Betonun karmaşık mekanik davranışlarını daha hassas bir şekilde simüle etmek amacıyla geliştirilmiş olan bu model, başlangıçta (Lubliner ve diğ., 1998) tarafından betonun monotonik tepkilerini modellemek için oluşturulmuş, ardından Lee ve Fenves 1998 tarafından genişletilmiştir. Concrete damage plasticity şu temel unsurlardan oluşur:

Plastik deformasyon: Beton belirli bir yükten sonra elastik davranışını kaybeder ve plastik deformasyon gösterir. Betonun kalıcı şekil değiştirmeye uğraması demektir.

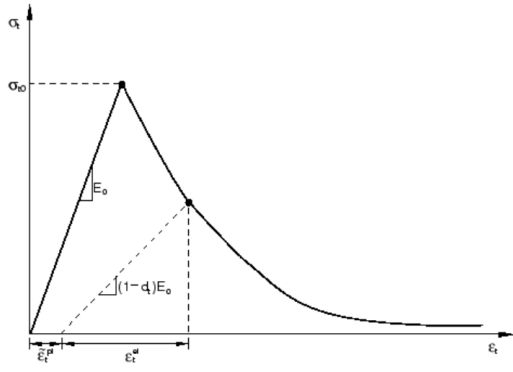
Çatlama ve ezilme: Betonun iki ana hasar modu vardır: Çekme dayanımının aşılmasından kaynaklı çatlama ve basınç dayanımının aşılmasından kaynaklı ezilme durumudur.

Detaylı mikro model için kullanılan CDP parametreleri Çizelge 3.4’ te verilmiştir. Hasar parametreleri: Betondaki hasar durumunu tanımlamak için kullanılır. Betonun çatlama ve ezilme derecesini gösterir. Skaler bir büyüklüktür. 0~1 arasında değer almaktadır.

CDP modeli Şekil 3.22’de verilen betonun basınç davranışında σ_{c0} değerine kadar doğrusal bir davranış göstermektedir ve başlangıç elastisite modülü E_0 ’dır. Bu bölgede malzemenin davranışı elastiktir ve hasar yoktur. σ_{c0} değerinin aşılmasıyla plastik şekil değiştirmeler başlamıştır. $\sigma_{c0} - \sigma_{cu}$ arasındaki davranış dayanım pekleşmesini temsil ederken, σ_{cu} değerinin aşılmasından sonraki davranış ise dayanım yumuşamasını temsil etmektedir. Şekil 3.23’te verilen betonun çekme davranışında ise σ_{t0} noktasına kadar başlangıç elastisite modülüne sahip ve elastik davranış göstermektedir. Mikro çatlakların oluştuğu noktadır. Bu noktadan sonra gerilmenin artması mikro çatlakların belirginleşmesi ve taşıma kapasitesinin azalmasıyla yumuşama davranışı gözlemlenir. Gerilme şekil değiştirme arasındaki bağıntı basınç davranışı için denklem 3.2 ile çekme davranışı için denklem 3.3 ile ifade edilmektedir.



Şekil 3.22 : Basınç etkisi altında Concrete Damage Plasticity beton modelinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Hibbitt vd., 2011).



Şekil 3.23 : Çekme gerilmesi altında Concrete Damage Plasticity beton modelinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Hibbitt vd., 2011).

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl}) \quad (3.2)$$

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl}) \quad (3.3)$$

Burada, ε_c^{pl} basınç plastik şekildeğiştirmesini, ε_t^{pl} çekme plastik şekildeğiştirmesini ifade etmektedir. Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de gösterilen betonun aksenal basınç ve aksenal çekme gerilmeleri altındaki elastik rijitliği, d_c ve d_t bağımsız değişkenlerine bağlıdır. Hasar parametreleri olan, d_c ve d_t $0 < d_c, d_t < 1$ aralığındadır.

$$E = (1 - d_{c,t})E_0 \quad (3.4)$$

$d_{c,t} = 0$ durumunda $E = E_0$ ’dır. Elastik bölgededir ve hasar yoktur. $d_{c,t} = 1$ olması durumunda “ $d_{c,t}$ ” parametresi elastik rijitliği kontrol edememektedir. $d_{c,t} = 0$ ve $d_{c,t} = 1$ durumunda betonun doğrusal olmayan davranışı tanımlanamamaktadır. Buradaki d_c ve d_t ise sırasıyla elastik rijitliği kontrol eden basınç ve hasar

parametreleridir (Birtel ve Mark, 2006). Bu çalışmada küfeki taşı için basınç ve çekme hasar parametreleri %80 olarak tanımlanmıştır.

$$d_{c,t} = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_{max}} \quad (3.5)$$

Beton malzeme için gerilme-şekildeğiştirme davranışı literatürdeki verilerle ya da deneysel çalışmalar ile modellenebilir. Elde edilen gerilme-şekildeğiştirme değerlerinden aşağıdaki bağıntılar aracılığıyla gerilme-plastik şekildeğiştirme değerleri hesaplanır. Yazılımın malzeme kütüphanesine bu eğri tanımlanır.

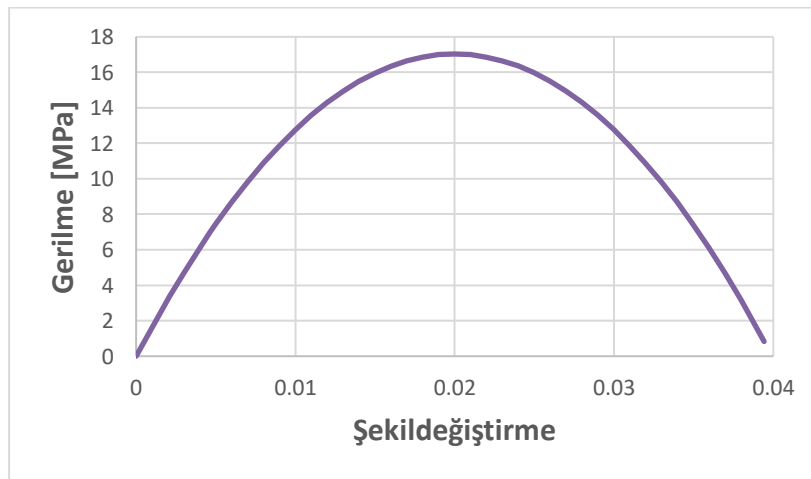
$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_c^{\sim pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (3.7)$$

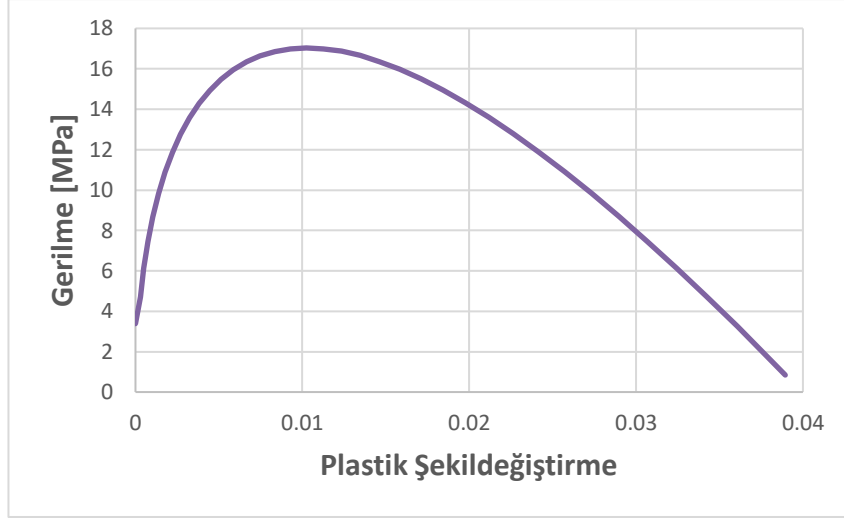
$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_c^{\sim pl} = \varepsilon_c^{ck} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (3.9)$$

Küfeki taşı için CDP modeli formülasyonları kullanılarak oluşturulan küfeki taşına ait gerilme-şekildeğiştirme ve plastik gerilme-şekildeğiştirme eğrileri Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'te sunulmuştur. ABAQUS programının malzeme kütüphanesine tanımlanmak üzere oluşturulan CDP parametreleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.24 : Küfeki taşı için gerilme şekildeğiştirme eğrisi.



Şekil 3.25 : Küfeki taşı için gerilme plastik şekil değiştirme eğrisi.

Çizelge 3.3 : Detaylı mikro modelde taş malzeme için mekanik parametreler.

Küfeki Taşı			
γ	2100	[kg/m ³]	Yoğunluk
E	17500	[N/mm ²]	Elastisite modülü
ν	0.20	[-]	Poisson oranı
f_b	17	[N/mm ²]	Basınç dayanımı
f_t	1.7	[N/mm ²]	Çekme dayanımı
ψ	35	[derece]	Ayrılma açısı
f_{bo}/f_{co}	1.16	[-]	
ϵ	0.10	[-]	Dışmerkezlik
K	0.67	[-]	Gerilme sabiti

3.2.2 Dövme demir

Demir, kuru derzli taş duvarlarda bağlayıcı eleman olarak kullanılmaktadır. Düşeydeki süreklilik ve bağlanma zıvanalar sayesinde, yataydaki ise kenetler sayesinde olmaktadır.

Tanyeli (1990), yapılarda pencere parmaklık toplarında dökme tekniğiyle, kiriş, gergi, kenet ve zıvana gibi yapısal elemanlarda dövme tekniğiyle üretilmiş demir kullanıldığını belirtmiştir. Kenet zıvana gibi elemanlar üretim merkezinde ya da yapı alanındaki demir ocağında kızıl sıcaklığa kadar ısıtılıp, el çekici ile dövülerek şekillendirilmiştir.

Demir (2012) çalışmasında Edirne II. Bayezid Cami restorasyon sahasından iki adet orijinal kenet temin etmiştir (Şekil 3.26). Bu kenetler üzerinde kimyasal deneyler

yapılmıştır ve kenet elemanların içerdği element oranları Çizelge 3.4’te verilmiştir. Kenetlerde aşırı korozyona bağlı derin çatlaklarının olması nedeniyle mekanik testler yapılamamıştır. Malzemenin çekme dayanımı için Vickers sertlik testleri uygulanmıştır. Elde edilen çekme dayanımlarını 300~350 MPa arasında bulmuştur; bu değerler oldukça yüksektir.



Şekil 3.26 : Edirne II. Beyazid Cami’den alınan kenetler (Demir, 2012).

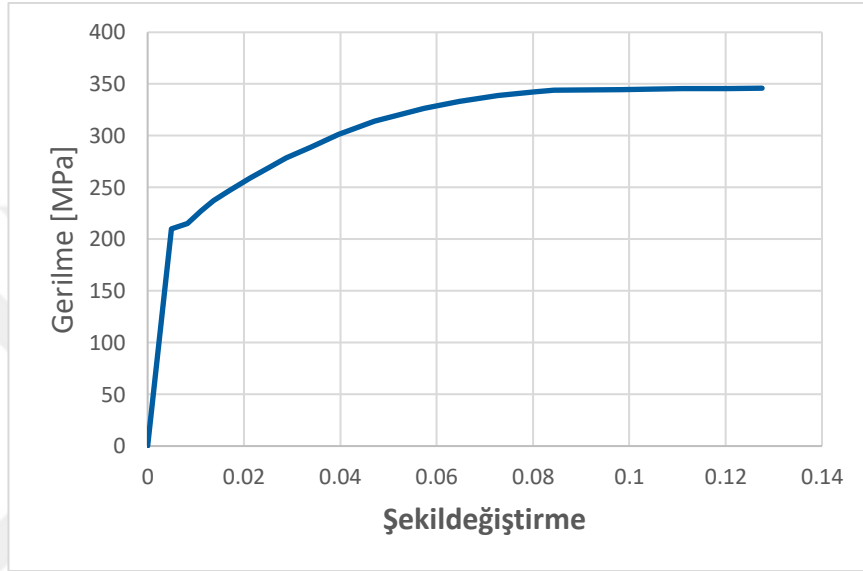
Çizelge 3.4 : Alınan kenetlerin kimyasal test sonuçları (% olarak) (Demir, 2012).

Numune	C	Si	S	P	Mn	Ni	Mo	Cu
#1	0.0029	0.0077	0.0040	0.0542	0.0000	0.0007	0.0006	0.0145
#2	0.033	0.1077	0.0033	0.0590	0.0033	0.0000	0.0009	0.0116
Numune	Ti	As	Sn	Co	Al	Pb	Nb	Fe
#1	0.0027	0.0002	0.0005	0.0227	0.0059	0.0001	0.0002	99.88
#2	0.0218	0.0010	0.0009	0.0079	0.0296	0.0006	0.0009	99.70

Bussell (1997), deneysel çalışmalarında dövme demirin saf demire yakın olduğunu içeriğindeki karbon element miktarının azlığının (genellikle 0-%0,2) süneklik ve yumuşaklık sağladığını belirtmiştir. Bu durum demirin hem kolay işlenebildiği hem

de kopmadan önce yüksek deformasyon yapabileceği anlamına gelmektedir. Deney sonuçlarından elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrisi Şekil 3.27’de verilmiştir.

Dövme demir için Şekil 3.27’de verilen gerilme-şekildeğiştirme eğrisinde demirin davranışı akma noktasına kadar lineer elastiktir. Artan gerilme ile %15’den büyük deformasyon kapasitesi göstererek sünek bir davranış sergiler. ABAQUS programına dövme demir için tanımlanacak olan mekanik parametreler Çizelge 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.27 : Tipik bir dövme demir için gerilme – şekildeğiştirme eğrisi (Bussell 1997)’den uyarlanmıştır.

Çizelge 3.5 : Detaylı mikro model demir malzeme için mekanik parametreler (Bussell 1997).

Dövme Demir			
γ	7750	[kg/m ³]	Yoğunluk
E	200000	[N/mm ²]	Elastisite modülü
ν	0.25	[-]	Poisson oranı
f_y	210	[N/mm ²]	Akma dayanımı
σ_u	346	[N/mm ²]	Maksimum çekme dayanımı

3.2.2.1 Genel metal plastisite modeli

Dövme demir davranış olarak yapısal çeliğe benzemektedir. Demirin doğrusal olmayan modeli için mühendislik gerilme-şekildeğiştirme verileri gerçek gerilme-

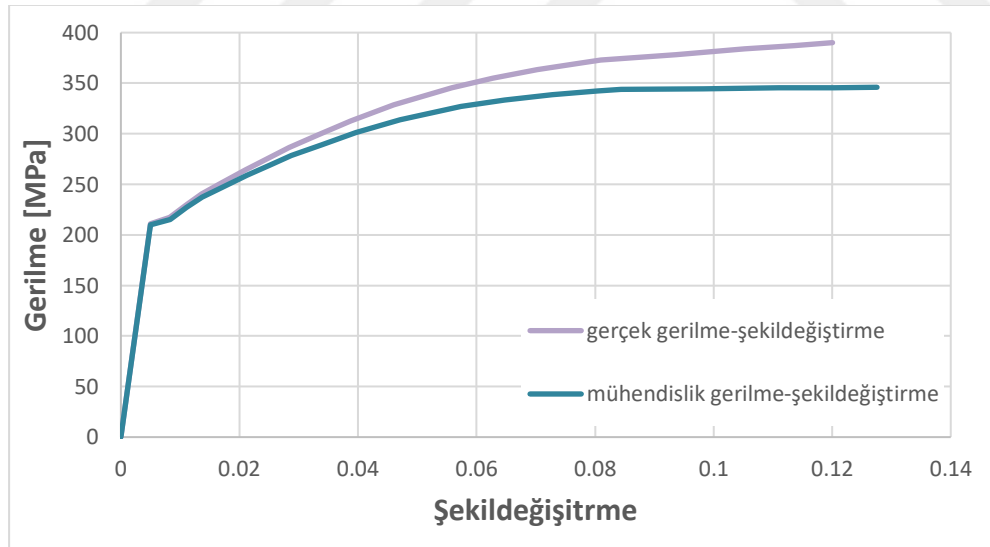
şekildeğiştirme verilerine dönüştürülmelidir (Şekil 3.28). Mühendislik gerilme-şekildeğiştirme eğrisi, başlangıç geometrisini dikkate alındığından genellikle düşük deformasyonlar için kullanılır. Gerçek gerilme-şekildeğiştirme, anlık geometrik değişiklikleri de dikkate alır, yüksek deformasyonlar için daha doğru bir yaklaşımdır.

ABAQUS sonlu eleman programında yapısal çelikte olduğu gibi dövme demir malzemesinin elastik ve plastik özellikleri ayrı ayrı tanımlanmaktadır. Malzemenin elastik davranışını tanımlamak için programa elastisite modülü (E) ve poisson oranını (ν) tanımlamak yeterlidir. Plastik davranış için ise gerçek gerilme (σ_{True}) ve plastik şekildeğiştirme (ε_{pla}) değerlerinin tanımlanması gerekir. Mühendislik ve gerçek gerilme-şekildeğiştirme arasındaki ilişkiler 3.10~3.12 bağıntılarında verilmiştir.

$$\sigma_{True} = \sigma_{Eng}(1 + \varepsilon_{Eng}) \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_{True} = \ln(1 + \varepsilon_{Eng}) \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_{pla} = \varepsilon_{True} - \frac{\sigma_{True}}{E} \quad (3.12)$$



Şekil 3.28 : Gerçek gerilme şekildeğiştirme ve mühendislik gerilme şekildeğiştirme grafikleri.

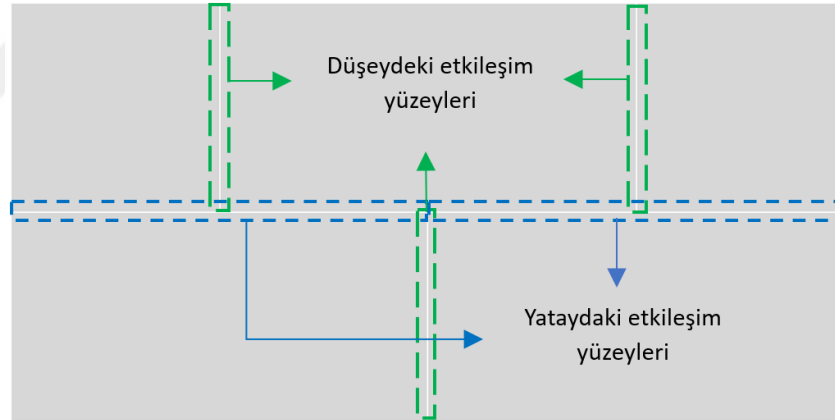
3.3 Arayüz Etkileşim Modelleri

Duvarı oluşturan her bir elemanın ayrı ayrı modellendiği detaylı mikro model daha önce Bölüm 2’de detaylı olarak açıklanmıştır. Detaylı modeldeki amaç yapısal çözüm

sonucunda her bileşendeki değişimi gözlemlemektir. Elemanların birbirleriyle temas ettiği noktalarda bir etkileşim vardır. Bu çalışmada dört etkileşim tanımlanmıştır: Bunlar taş blokların birbirine temas ettiği düşey ve yatay etkileşimler, taş-kenet ve taş-zıvana arasındaki etkileşimlerdir. Tüm etkileşim yüzeyleri Hypermesh 2019 programında modellenmiş, ABAQUS sonlu elemanlar programında gruplandırılmıştır.

3.3.1 Taş-taş arası etkileşimler

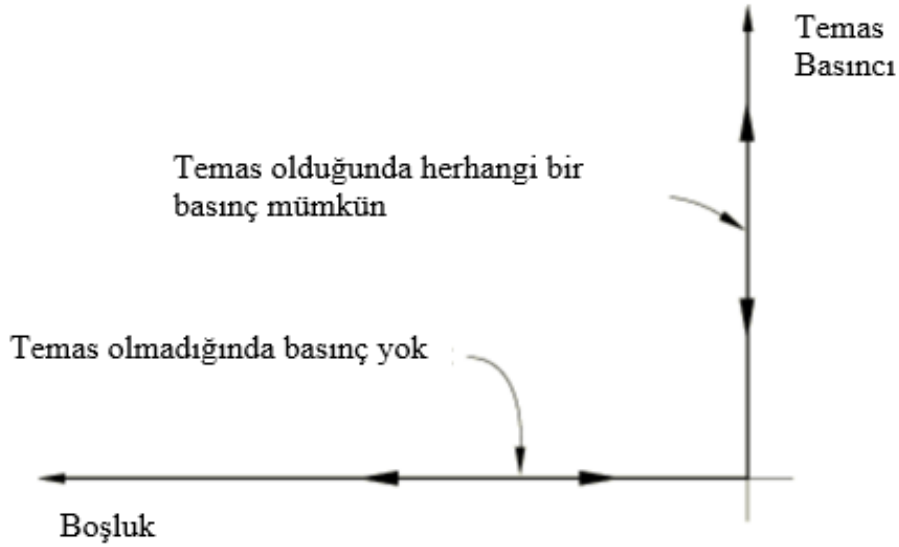
Kuru derz duvarlar harcın bulunmadığı duvarlardır. Taşın taş ile temas ettiği arayüzlerde bir etkileşim mevcuttur. Yatay doğrultu için bu bir sürtünme kuvvetidir (Şekil 3.29). Bu etkileşimi belirleyen en önemli unsur taşın pürüzlü yüzeyidir. Oliveria (2003), yaptığı deneysel çalışmada 8x5x4 cm boyutlarında iki taş blok için üç farklı eksenel yük seviyesi altında kayma testleri yapmıştır. Sürtünme katsayısını 0.62 olarak bulmuştur.



Şekil 3.29 : Taş-taş arası etkileşim yüzeyleri.

Taş birimler arasındaki etkileşim ABAQUS'te bulunan "general contact" seçeneği kullanılarak tanımlanmıştır. Normal (düşey) doğrultudaki temas yüzeylerinin davranışı için "hard contact" etkileşim modeli kullanılmıştır. Bu etkileşim modelinde basınç gerilmelerinin sıfırdan büyük olduğu durumlarda elemanların birbirine girişiminin engellendiği etkileşim modelidir; bu durum Şekil 3.30'da verilmiştir. Teğetsel (yatay) doğrultudaki temas yüzeyleri davranışı için ise rölatif kayma şeklindeki etkileşim olan "penalty" tanımı uygulanmıştır. Bu etkileşimde Coulomb

sürtünme modeli sürtünme davranışını tanımlar. Bu etkileşim özelliği tipinde, yaygın Coulomb sürtünme modeli sürtünme davranışını tanımlar.



Şekil 3.30 : Hard Contact (ABAQUS, 2020).

3.3.2 Taş-kenet ve taş-zıvana arası etkileşimler

Yapıda demir elemanların taş ankrāj edilebilmesi için erimiş kurşun kullanılmaktadır. ABAQUS'te bu davranışı en iyi temsil eden etkileşim “tie constraint”dir. Tie constraint iki farklı eleman ya da yüzey arasındaki bağlantıyı sağlamak için kullanılmaktadır. Bu etkileşim tipinde “master surface” ve “slave surface” seçimi vardır. Master surface, sabitlenmiş, kontrol edilmiş yüzeydir. Slave surface, “master surface”deki değişikliklere uyum sağlayan, reaksiyon gösteren yüzeydir.

Demir elemanların taş elemanlara göre rijitliğinin yüksek olması, daha yüksek gerilmelerde deformasyona uğraması bakımından demir elemanlara “master surface” etkileşimi tanımlanırken, taş elemanlara “slave surface” etkileşimi tanımlanmıştır. Bu sayede yapıdaki demir elemanın taş eleman üzerindeki etkisi gözlemlenebilmektedir. Modellerde kullanılan etkileşimler Çizelge 3.6’da özetlenmiştir.

Çizelge 3.6 : Modellerde kullanılan etkileşim tipleri.

Arayüzeyler	Etkileşim Tipi		
Taş-taş	General contact	Normal yön	Hard contact
		Teğetsel yön	Penalty, $\mu = 0.62$
Taş-kenet	Tie constraint	Master surface	Kenet eleman
		Slave surface	Taş eleman
Taş-zıvana	Tie constraint	Master surface	Zıvana eleman
		Slave surface	Taş eleman
Duvar- betonarme kiriş	Rigid body	*	*

* Bu etkileşimde rijit kabul edilecek cisim (kiriş) ve duvara bağlanacağı yüzey olan duvar üst yüzü tanımlanmaktadır. Yükleme kirişinin rijit body olarak tanımlanması, kirişin şekildeğiştirmelerinin ve içsel kuvvetlerinin göz ardı edildiği, yalnızca kirişin yük taşıma ve iletme işlevinin dikkate alındığı bir modelleme yaklaşımıdır. Yükleme kirişi, üzerine etkiyen yükleri düzgün bir şekilde dağıtarak alt yapıya ya da duvara aktarır. Bu dağılım sırasında, kirişin deformasyonu terk edilir. Rijit body olarak modellenen kiriş, etkileşime girdiği yapılarla hareket edebilir, ancak şekli değişmez. Başka bir deyişle, kiriş üzerinde herhangi bir deformasyon oluşmaz. Kirişin taşıyıcı özellikleriyle ilgili yalnızca kinematik davranışlar (yerdeğiştirme, dönme) dikkate alınır.

3.4 Sonlu Elemanlar Ağı

Analiz sonuçlarının gerçeği yansıtmasındaki kritik faktörlerden biri de kullanılan sonlu elemanlar ağıdır. Sonlu elemanlar yöntemi analizlerinde, eleman ağ yapısı fiziksel bir modelin sayısal çözümünü sağlamak için kullanılır. Bu en basit haliyle bir modelin geometrisinin küçük, basit elemanlara (genellikle üçgenler ya da dörtgenler gibi) bölünmesiyle oluşan yapı olarak ifade edilebilir.

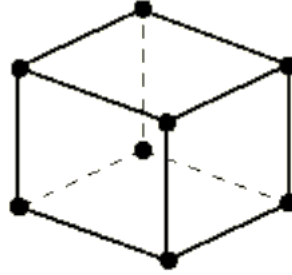
Sonlu eleman ağının yapısı, modelin karmaşıklığını ve sonucun doğruluğunu doğrudan etkiler. Küçük ve yoğun ağ yapıları daha doğru sonuçlar sağlarken, daha az sayıda elemanla yapılan analizler hızlı sonuçlar verebilir, ancak bu durum doğruluk kaybı riski taşır. Eleman ağının düzgün ve doğru şekilde oluşturulması, çözümün stabilitesini, doğruluğunu ve çözüm süresini etkileyen önemli bir parametredir.

Katı eleman ağı (3D solid meshing), özellikle katı cisimlerin davranışlarını analiz etmek için tercih edilen bir tekniktir. Bu tür ağ yapılarında, her bir eleman içinde kuvvetler, gerilmeler ve deformasyonlar hesaplanarak, nesnelerin fiziksel davranışları sayısal olarak modellenir. Bu işlem, özellikle mühendislik analizlerinde önemli sonuçlar elde etmek için gereklidir. Sonuç olarak, ağ yapısının kalitesi ve doğru seçilmesi, sonlu elemanlar analizinin başarısı için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, modelleme tekniği olarak detaylı mikro modelin tercih edilmesi, elemanlar arasındaki sürekliliğin düğüm noktaları aracılığıyla sağlanmasını (node to node) ve bu doğrultuda arayüzlerin oluşturulmasıyla mümkün kılınmaktadır.

Bu bağlamda, HyperMesh programında manuel olarak sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Söz konusu ağ, kritik öneme sahip noktalarda yoğunlaştırılarak, ağ kalite parametrelerinin istenilen doğruluk seviyesinde oluşturulmasına olanak tanımıştır.

Sonlu eleman modellemesinde, tüm elemanlar üç boyutlu (katı) elemanlar olarak temsil edilmiştir. Bu amaçla, ABAQUS yazılımında C3D8R tipi sonlu eleman kullanılmıştır (Şekil 3.31). Eleman tipindeki harfler, modelin özelliklerini tanımlar. 'C' harfi, elemanın 'continuum' yani sürekli ortam elemanı olduğunu belirtirken, '3D' ifadesi, elemanın üç boyutlu yapısını ifade eder. '8' sayısı, elemanın sekiz düğüm

noktasına sahip olduğunu gösterirken, 'R' harfi ise bu elemanın 'azaltılmış entegrasyon' yöntemini kullandığını belirtmektedir.



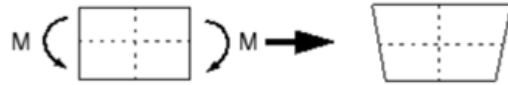
Şekil 3.31 : C3D8R Eleman Ağ Yapısı.

Bu aşamada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, azaltılmış entegrasyon ('R') özelliğine sahip ağ elemanları kullanıldığında 'hourglass' etkisinin kontrol edilmesidir. Hourglass etkisi, elemanların aşırı deformasyona uğramasına neden olabilen bir durumdur ve genellikle modelde istenmeyen sonuçlara yol açabilir. Bu etki, elemanların şekildeğiştirme davranışlarını doğru şekilde yansıtmak için dikkatle izlenmeli ve uygun önlemler alınmalıdır.

ABAQUS'taki entegrasyon yöntemleri, sonlu eleman analizinde kullanılan sayısal entegrasyon teknikleridir. Bu yöntemler, elemanlar üzerindeki gerilme, deformasyon ve kuvvet hesaplamalarını gerçekleştirebilmek için gerekli olan entegrasyon noktalarının belirlenmesine dayanır. Temelde iki ana entegrasyon yöntemi vardır: Tam entegrasyon ve azaltılmış entegrasyon. Entegrasyon noktaları, gerilme ve şekildeğiştirme hesaplamalarının yapıldığı yerlerdir. Her iki yöntem, sayısal çözümde farklı hassasiyet seviyeleri ve hesaplama maliyetleri ile çalışır. Tam entegrasyon daha yüksek hassasiyet sunarken, azaltılmış entegrasyon genellikle hesaplama süresini kısaltır, ancak doğruluk kayıplarına yol açabilir. Tam entegrasyon yönteminde, elemanın her yönü için olası tüm entegrasyon noktaları kullanılır. Bu yöntem, yüksek hassasiyet sağlamakla birlikte, daha fazla entegrasyon noktası kullanılması nedeniyle hesaplama maliyetini ve süresini artırır. Azaltılmış entegrasyon yöntemi ise daha az entegrasyon noktası kullanarak hesaplama maliyetini azaltır. Bu yöntemde genellikle doğrusal elemanlar için her yönde bir entegrasyon noktası yerleştirilir ve bu nokta elemanın merkezine konumlandırılır. Ancak, özellikle eğilme deformasyonları altında

bu yaklaşım, elemanın yeterli rijitlik göstermemesi gibi problemlere yol açabilir. Bu tür sorunlar, bazı çözüm teknikleri ve hourglass kontrolü gibi yöntemlerle aşılabılır.

Azaltılmış entegrasyon yöntemini kullanan C3D8R elemanı basit eğilmeye maruz bırakıldığında, elemanın kenarlarında eğilme gözlemlenmez. Ortada bir entegrasyon noktası bulunduğu için, bu noktadaki eleman ne çekmeye ne de basınca çalışır. Bu noktada düşey ve yatay liflerin uzunlukları değişmez aralarındaki açı da sabittir. Oluşan bu davranışa kayma kilitlenmesi (shear locking) denilmektedir. Bu durum, elemanın deformasyonunu yanlış bir şekilde simüle eder. Eleman gerilme üretmeden deforme olur, ancak bu deformasyon gerçekte bir enerjiye yol açmaz ve bu da sıfır enerji modu (zero energy mode) olarak adlandırılır. Bu durum, gerilme enerjisinin oluşmadığı ve elemanın eğilmeye karşı rijitlik göstermediği anlamına gelir. Sonuç olarak, eleman deformasyona uğrar, ancak bu deformasyon gerçekte yokmuş gibi kabul edilir ve "hourglass" denilen problem ortaya çıkar (Şekil 3.32). Bu sorun, model boyunca yayılan ve anlamsız sonuçlara yol açan hourglass elemanları oluşturur. Eğer kaba bir mesh yapısı ve azaltılmış entegrasyon elemanları kullanılırsa, analiz sonuçları güvenilir olmayacaktır. Bu tür elemanlar kullanıldığında, sıkı bir mesh yapısı tercih edilmeli ve hourglass etkisi mutlaka kontrol edilmelidir. Azaltılmış entegrasyonlu elemanlarda hourglass etkisinin önlenmesi için eleman kalınlığı boyunca birden fazla eleman kullanılması gereklidir.



Şekil 3.32 : Azaltılmış entegrasyonlu doğrusal bir elemanın eğilme deformasyonu.

Bu nedenle çalışmada, bu duvar analizlerinde eğilme deformasyonlarının kayma deformasyonlarına göre daha sınırlı tutulması ve ağ yapısında ince mesh kullanılması sonucu hesaplama maliyetini düşürmek ve kayma kilitlenmesinden kaçınmak amacıyla, azaltılmış entegrasyonlu ve hourglass kontrolüne sahip C3D8R türü elemanlar tercih edilmiştir.

Bu kapsamda, çalışma süresince farklı modelleme senaryolarına göre oluşturulan detaylı mikro modeller aşağıda listelenmiştir. Modellerde kullanılan sonlu eleman ağı oldukça yoğundur ve her bir modelin düğüm (node) sayısı aşağıda belirtilmiştir:

Taş model: 125531 node

Kenet modeli: 149718 node

Model 1 pim: 256522 node

Model 1 hibrit: 264332 node

Model 2 pim: 245398 node

Model 2 hibrit: 248265 node

Model 3 pim: 212471 node

Model 3 hibrit: 216632 node

Model 4 pim: 226248 node

Model 4 hibrit: 234388 node

Model 5 pim: 171.960 node

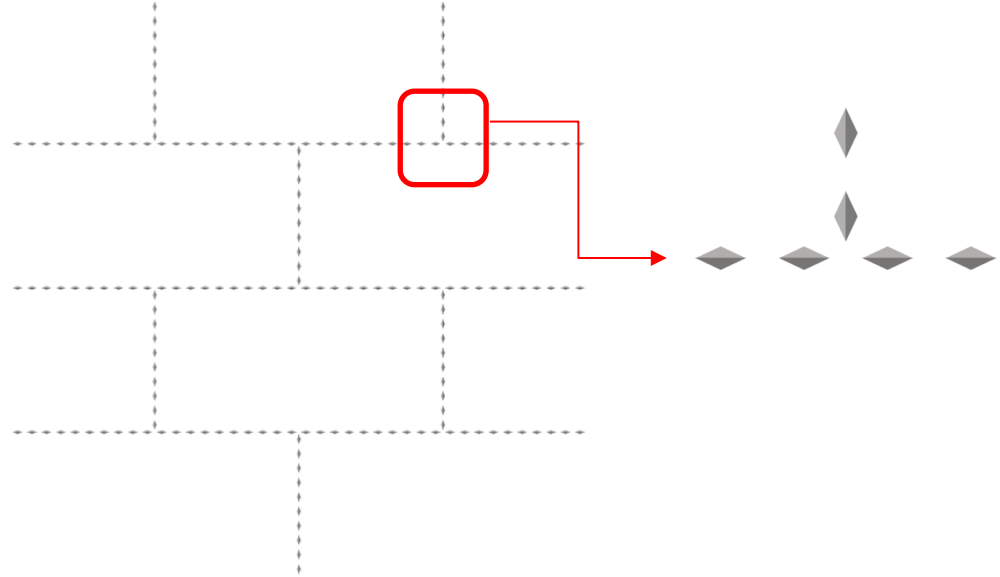
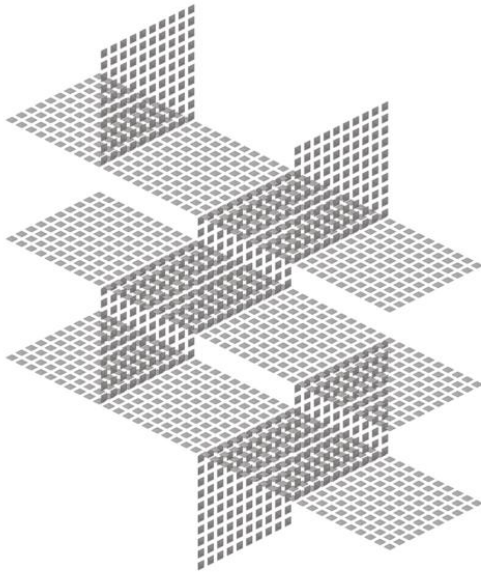
Model 5 hibrit: 170878 node

Bu yüksek çözünürlüklü modellerin sayısal çözüm süreçleri, 64 GB RAM kapasitesine sahip, 32 çekirdekli yüksek frekanslı bir işlemci (çok çekirdekli paralel işlem destekli bir sistem) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler 3~8 saat arası sürmüştür. Özellikle hibrit modellerde yer alan kenet-taş ve pim etkileşim bölgeleri, temas çözüm algoritmalarını daha karmaşık hale getirdiği için donanımsal yeterlilik çözüm sürelerinin optimize edilmesinde belirleyici bir rol oynamıştır.

3.5 Arayüz Etkileşim ve Sonlu Eleman Ağ modelleri

3.5.1 Taş model

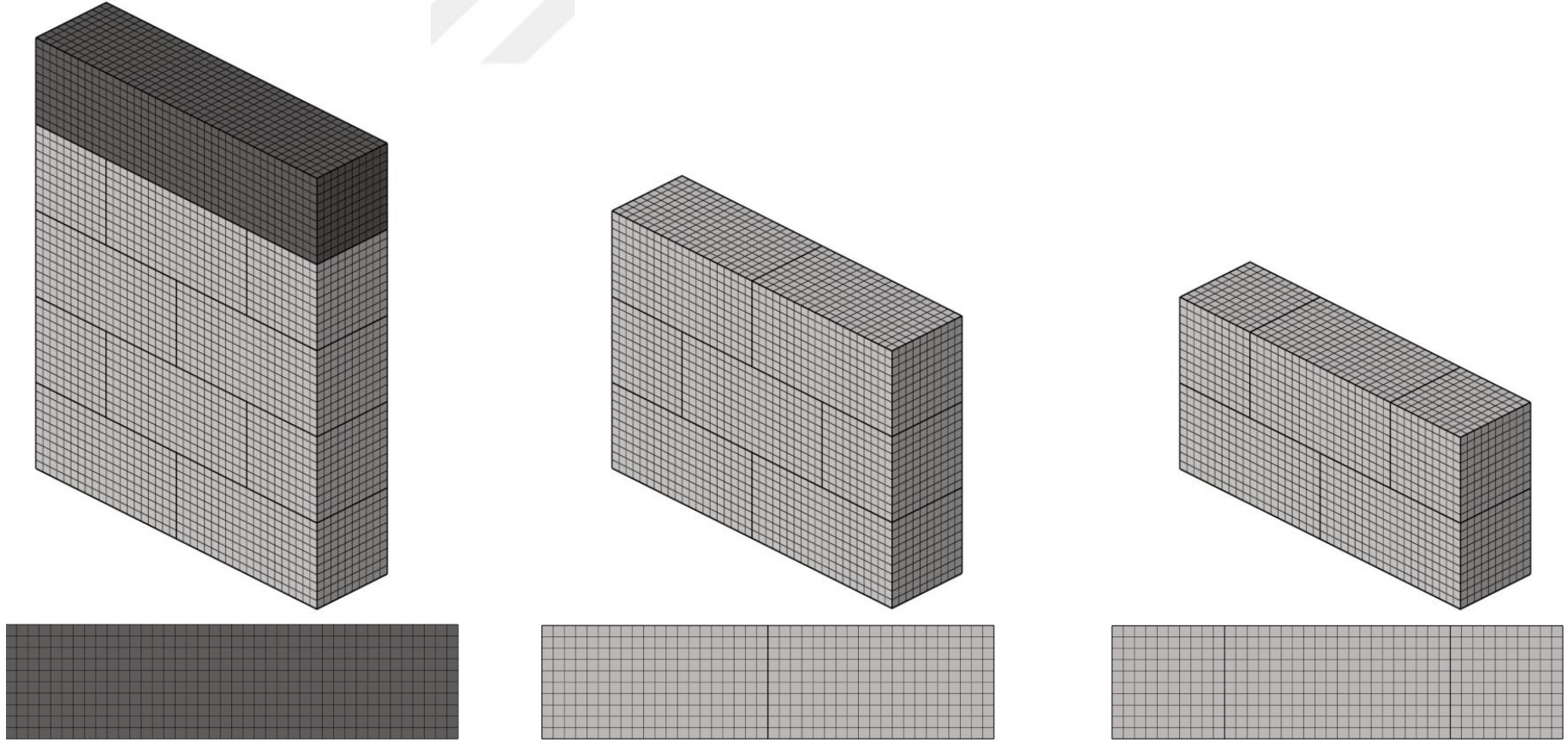
Taş modele ait arayüz etkileşim modeli Şekil 3.33’te sunulmuştur.



Şekil 3.33 : Taş model arayüz etkileşimleri.

3.5.2 Taş model

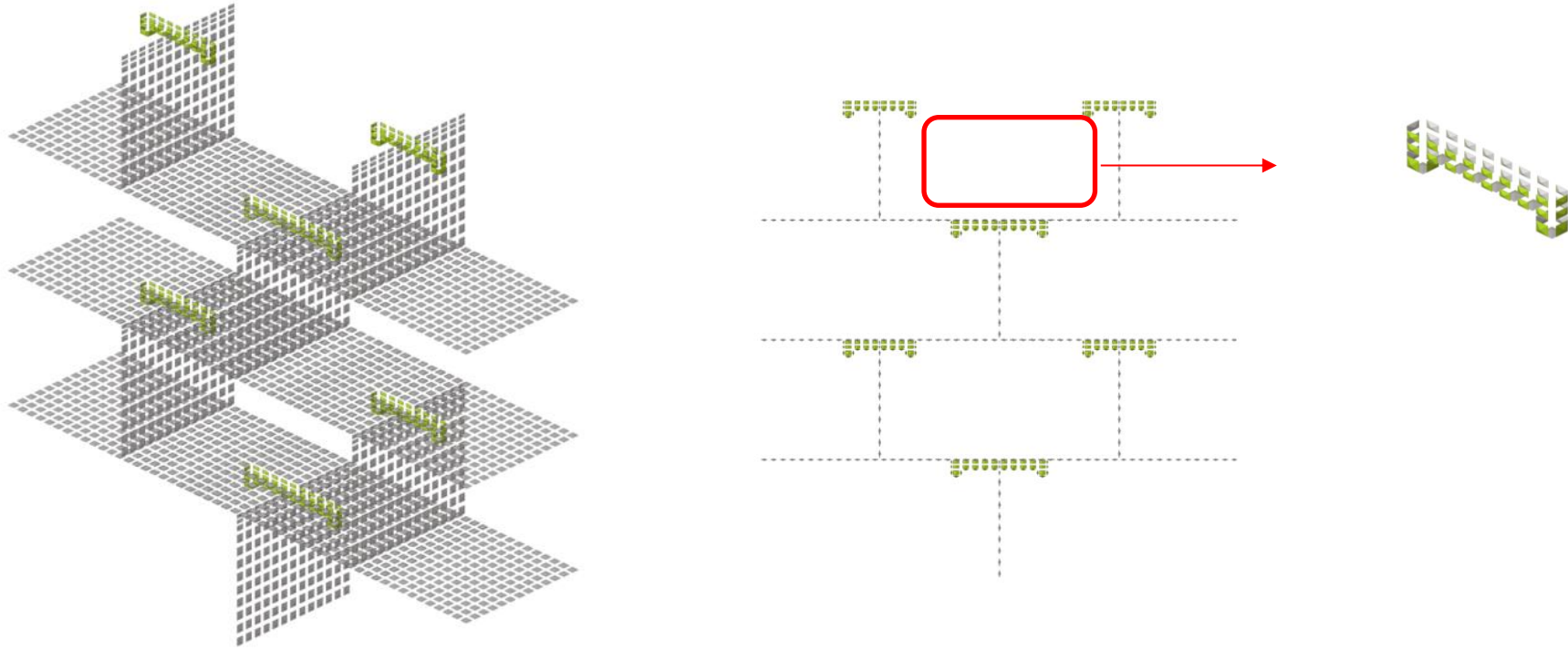
Taş modele ait sonlu elemanlar ağ modeli Şekil 3.34’te sunulmuştur.



Şekil 3.34 : Taş model sonlu eleman ağ yapısı.

3.5.3 Kenet model

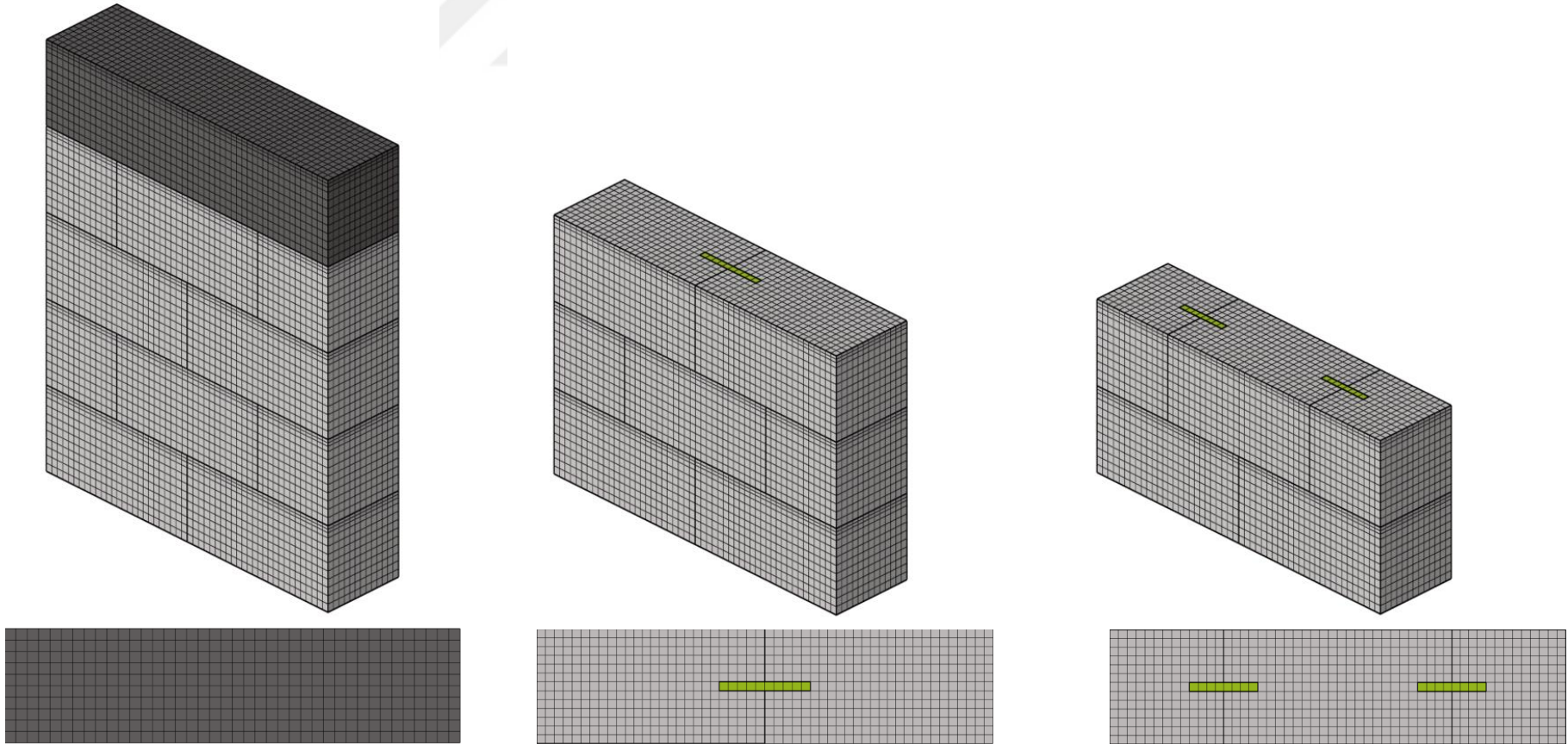
Kenet modele ait arayüz etkileşim modeli Şekil 3.35’te sunulmuştur.



Şekil 3.35 : Kenet model arayüz etkileşimleri.

3.5.4 Kenet model

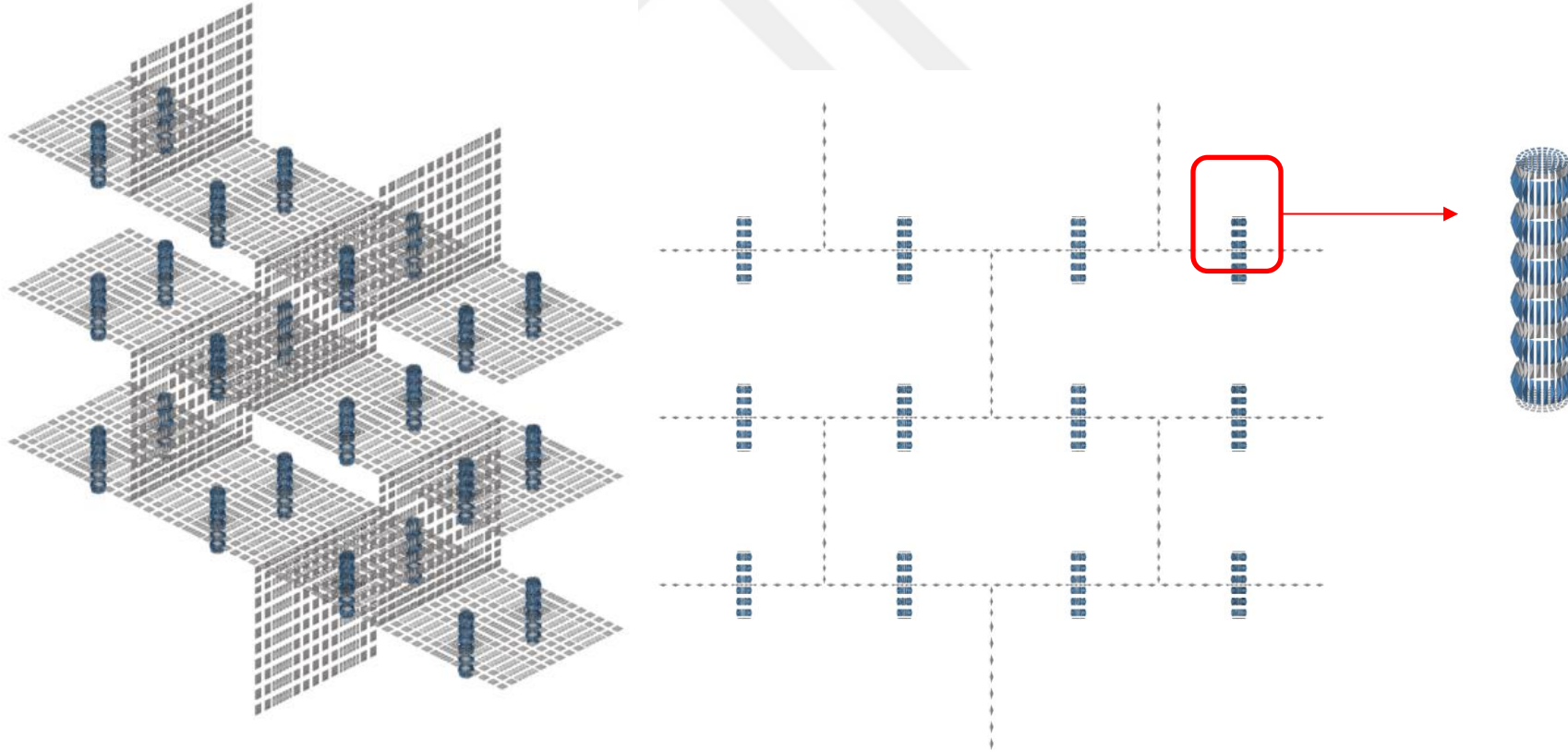
Kenet modele ait sonlu elemanlar ağ modeli Şekil 3.36’da sunulmuştur.



Şekil 3.36 : Kenet model sonlu eleman ağ yapısı.

3.5.5 Model 1 pim

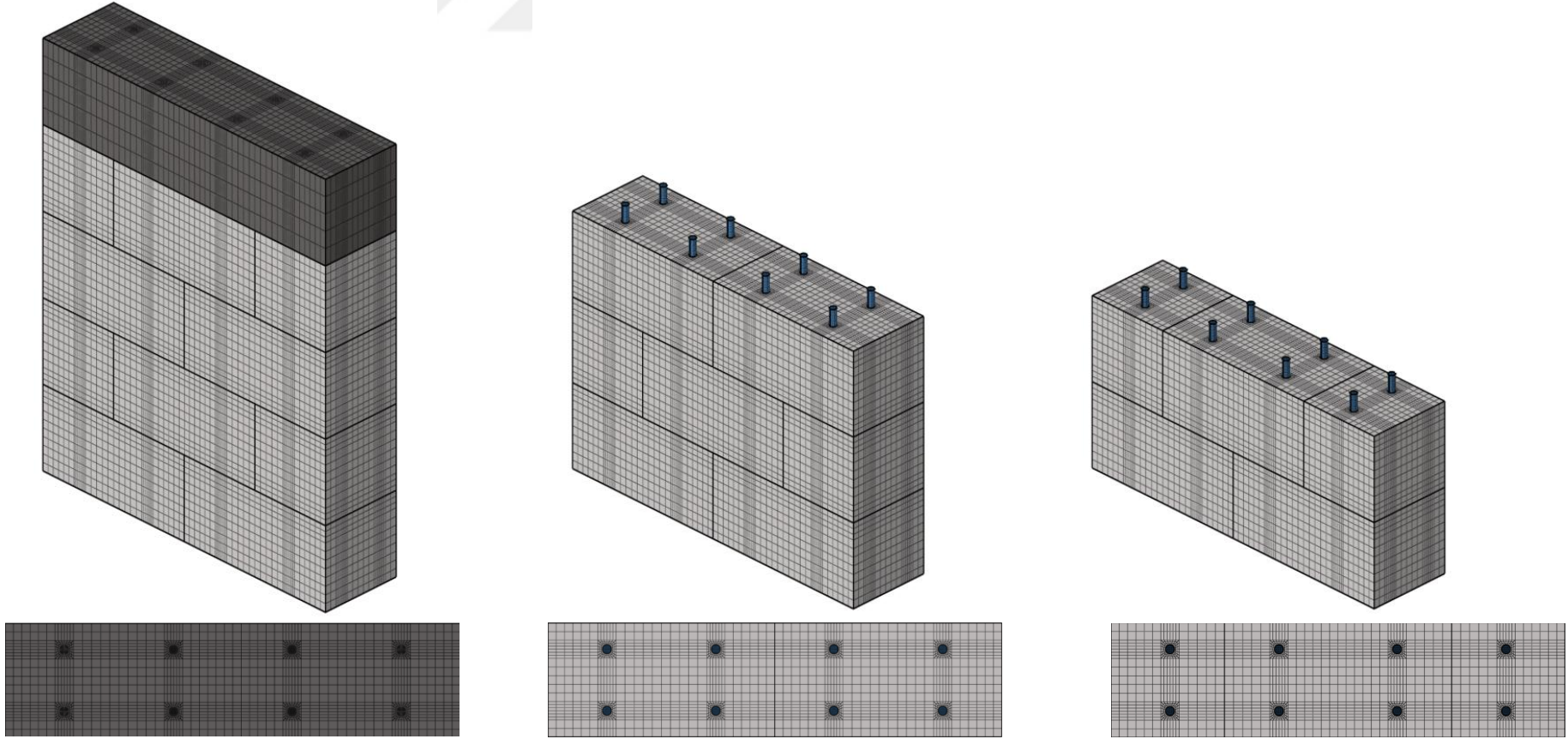
Model 1 pime ait arayüz etkileşim modeli Şekil 3.37’de sunulmuştur.



Şekil 3.37 : Model 1 Pim arayüz etkileşimleri.

3.5.6 Model 1 pim

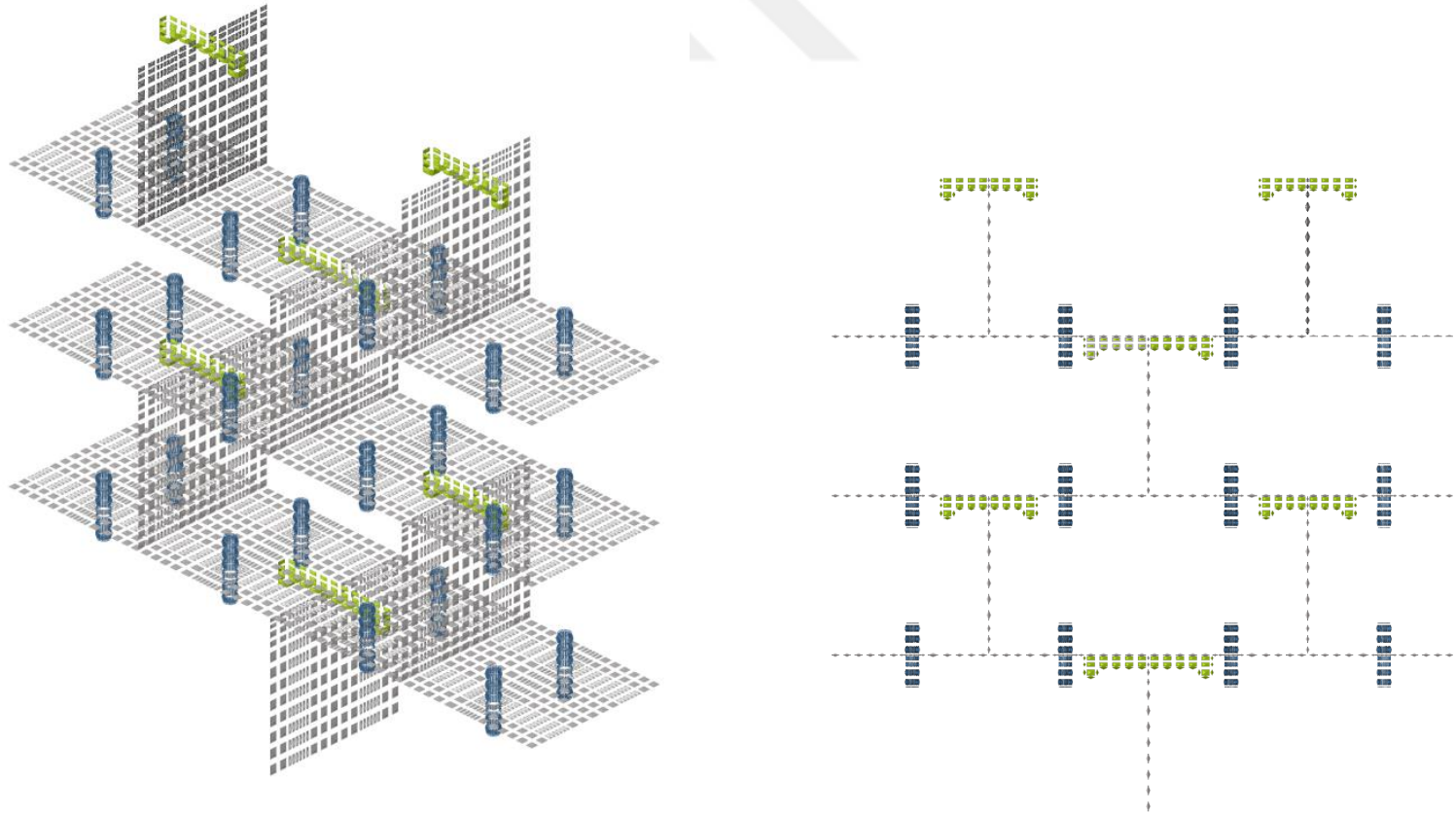
Model 1 pime ait sonlu elemanlar ağ modeli Şekil 3.38’de sunulmuştur.



Şekil 3.38 : Model 1 Pim sonlu eleman ağ yapısı.

3.5.7 Model 1 hibrit

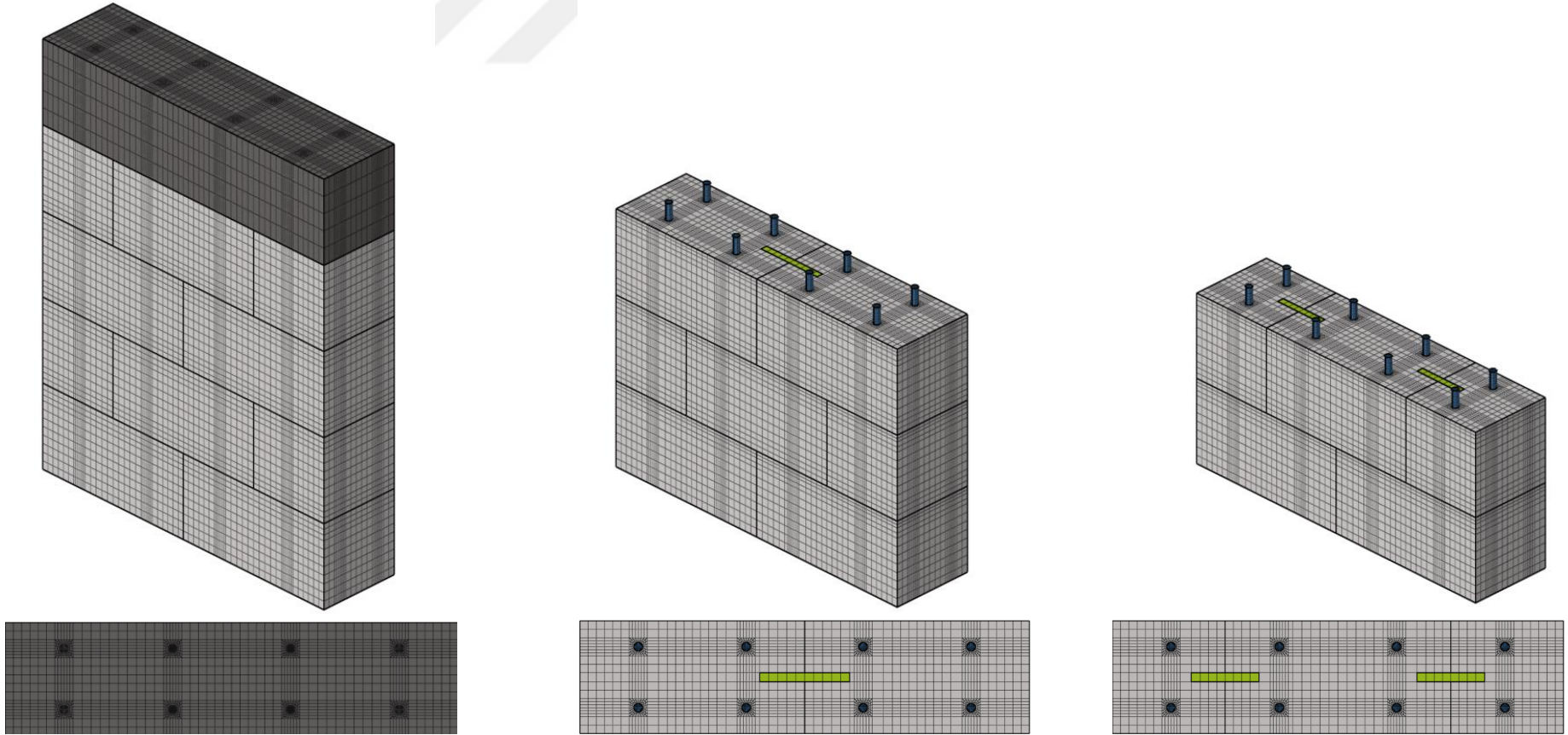
Model 1 hibrite ait arayüz etkileşim modeli Şekil 3.39’da sunulmuştur.



Şekil 3.39 : Model 1 Hibrit arayüz etkileşimleri.

3.5.8 Model 1 hibrit

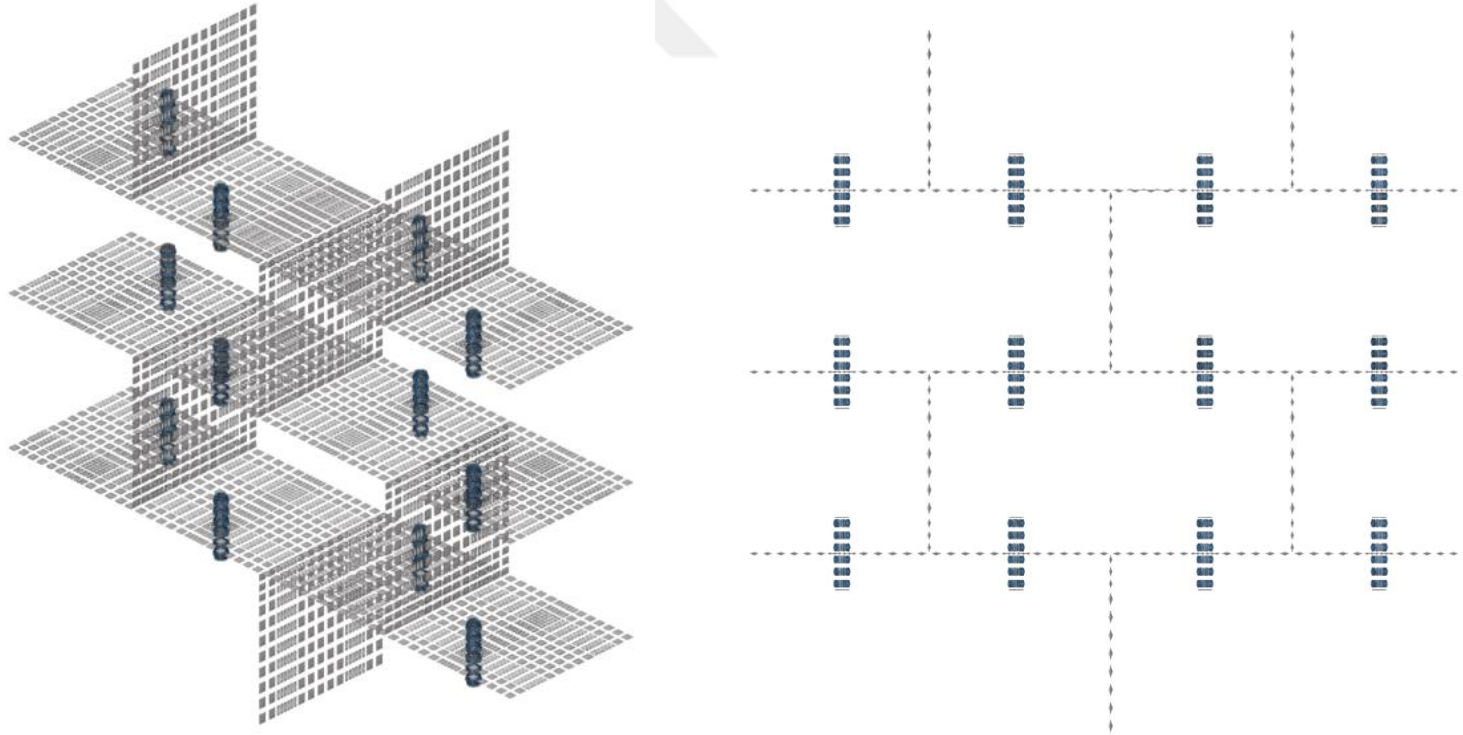
Model 1 hibrite ait sonlu elemanlar ağ modeli Şekil 3.40'ta sunulmuştur.



Şekil 3.40 : Model 1 Hibrit sonlu eleman ağ yapısı.

3.5.9 Model 2 pim

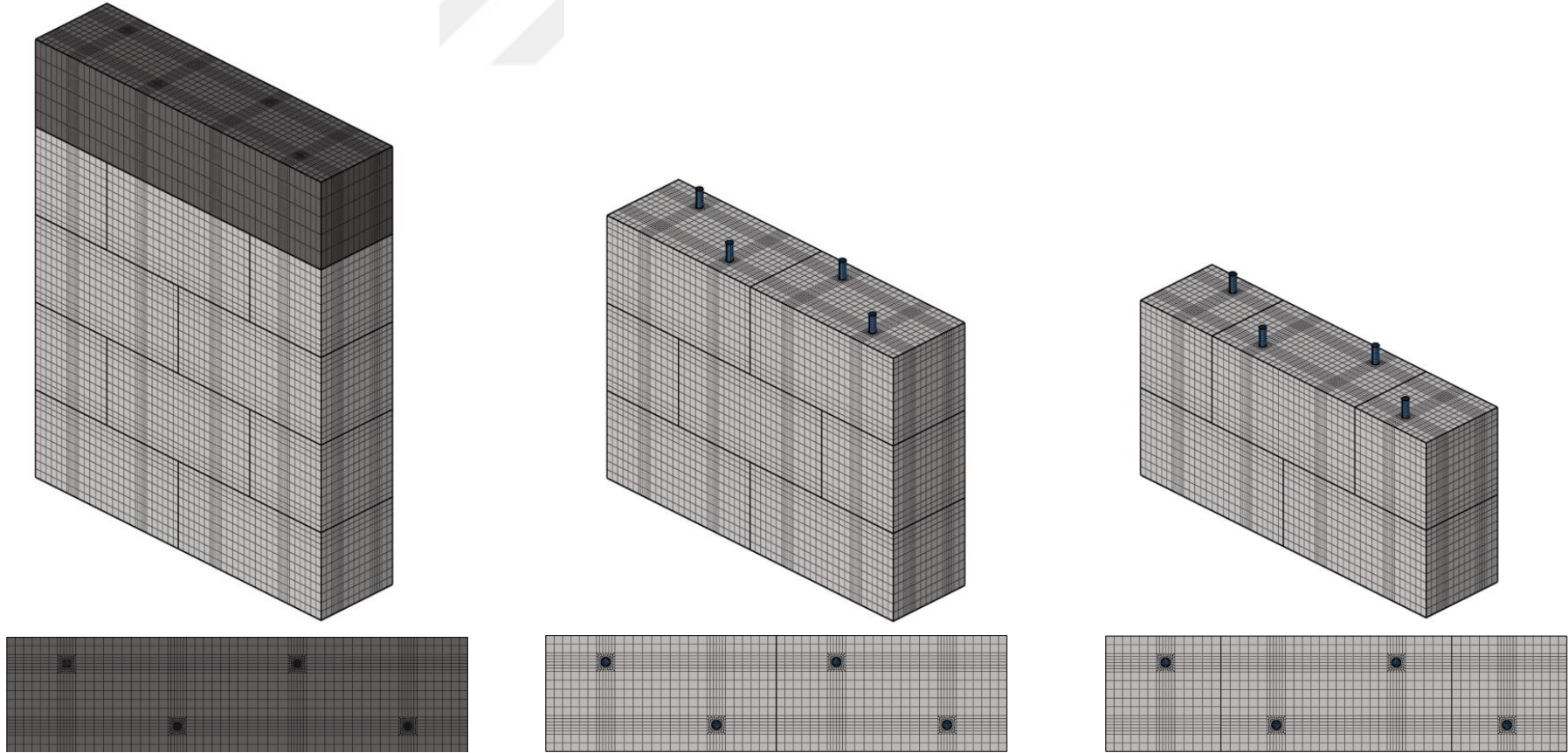
Model 2 pime ait arayüz etkileşim modeli Şekil 3.41’de sunulmuştur.



Şekil 3.41 : Model 2 Pim arayüz etkileşimleri.

3.5.10 Model 2 pim

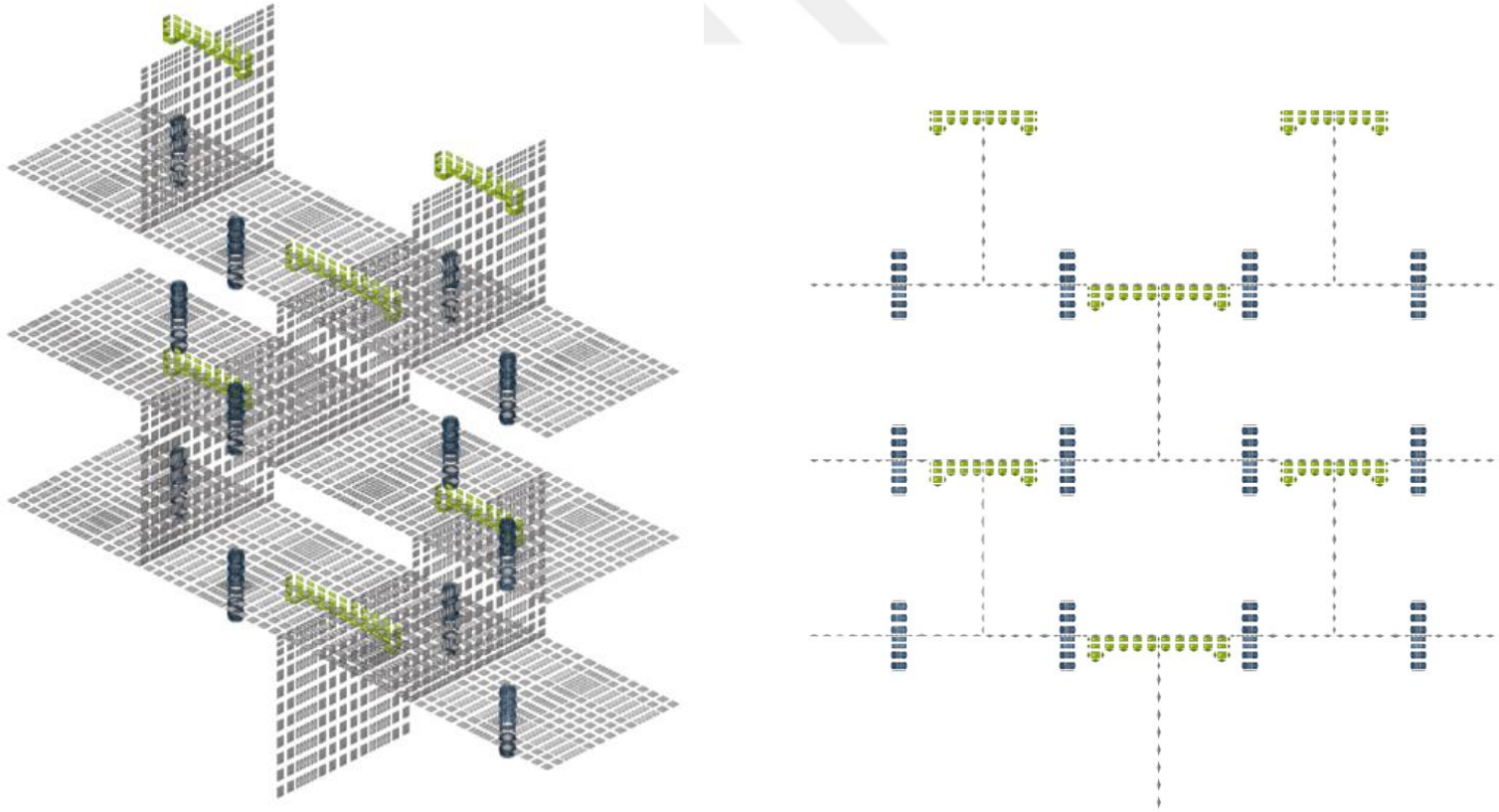
Model 2 pime ait sonlu elemanlar ağ modeli Şekil 3.42’de sunulmuştur.



Şekil 3.42 : Model 2 Pim sonlu eleman ağ yapısı.

3.5.11 Model 2 hibrit

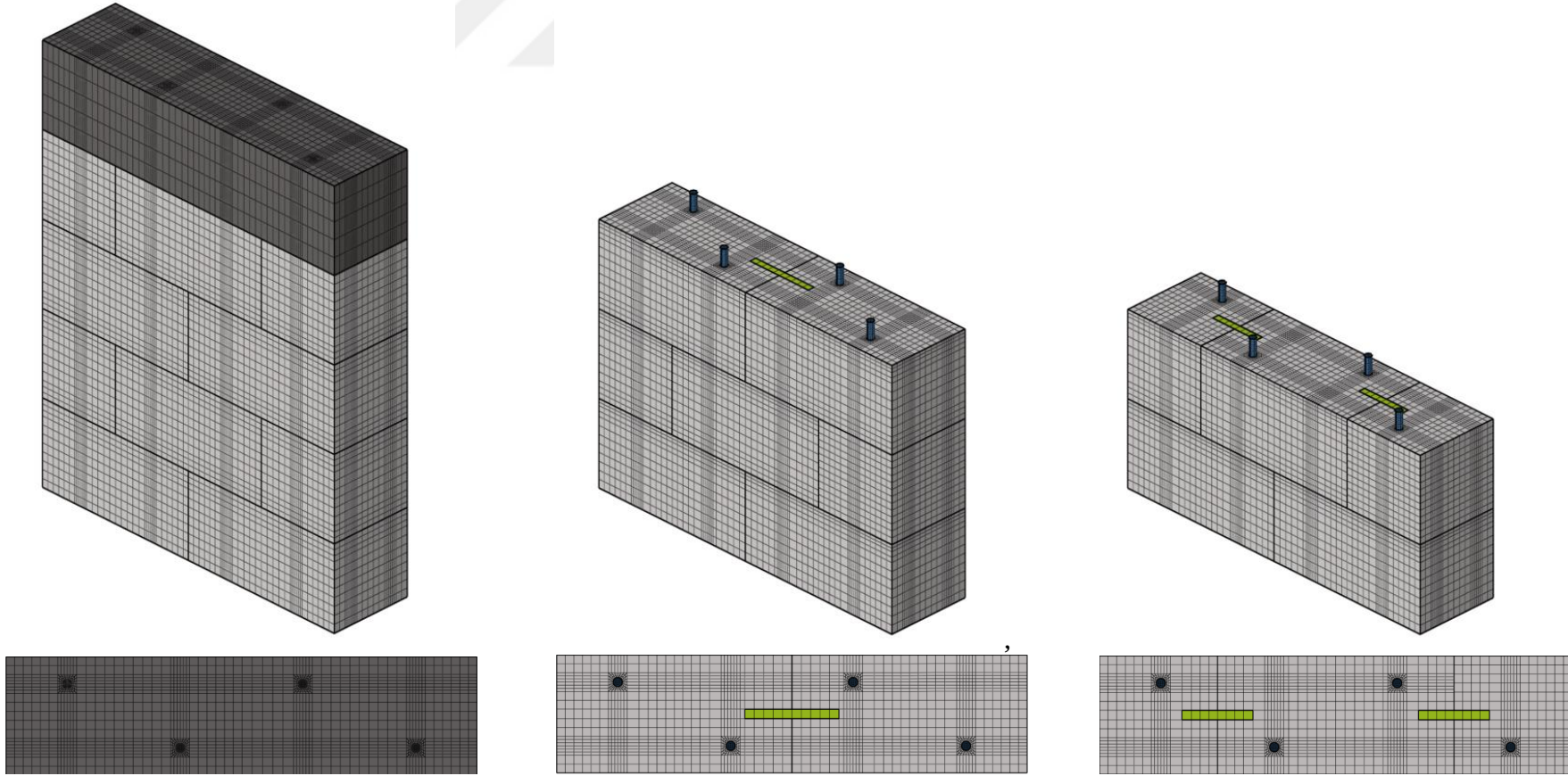
Model 2 hibrite ait arayüz etkileşim modeli Şekil 3.43’te sunulmuştur.



Şekil 3.43 : Model 2 Hibrit arayüz etkileşimleri.

3.5.12 Model 2 hibrit

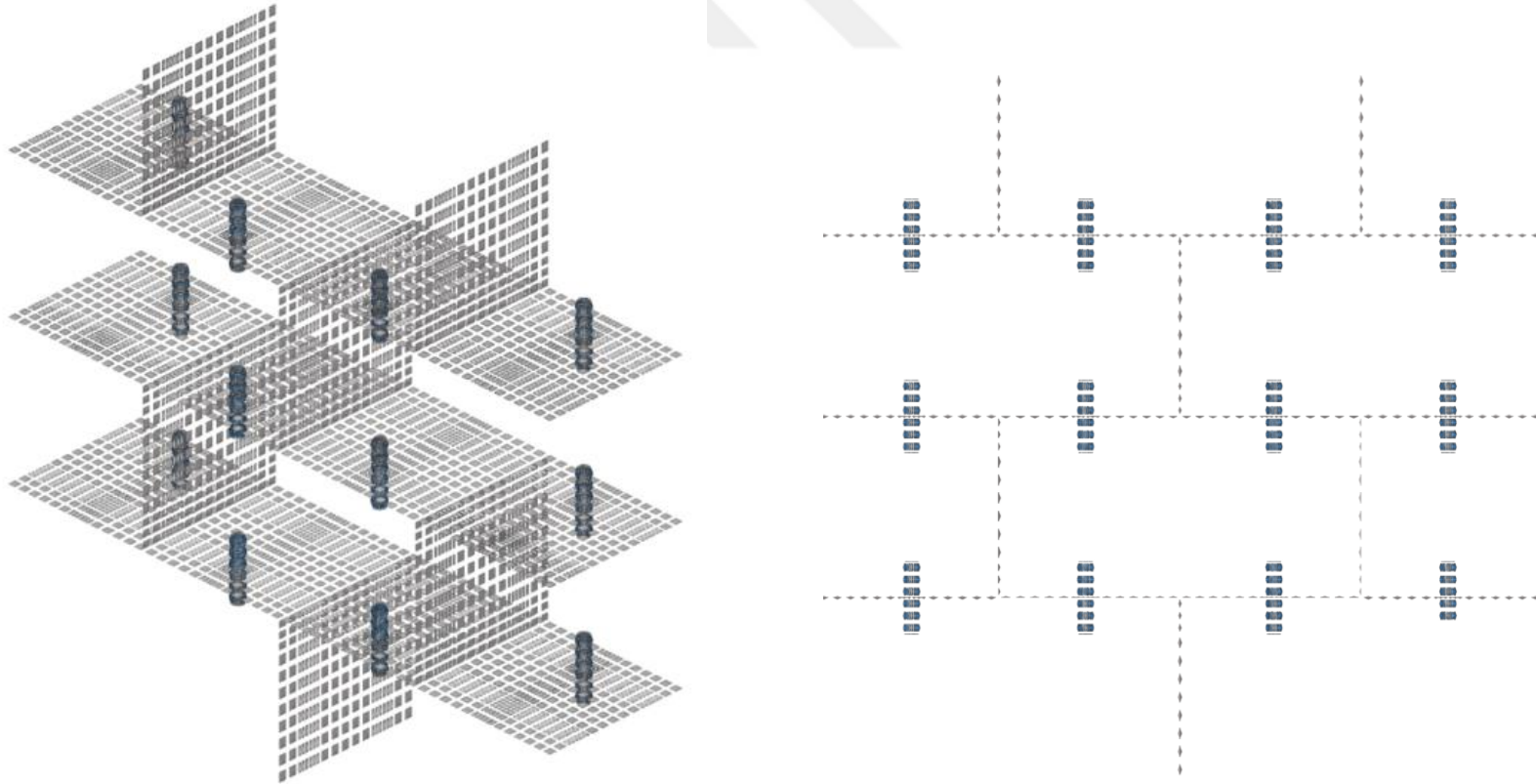
Model 2 hibrite ait sonlu elemanlar ağ modeli Şekil 3.44’te sunulmuştur.



Şekil 3.44 : Model 2 Hibrit sonlu eleman ağ yapısı.

3.5.13 Model 3 pim

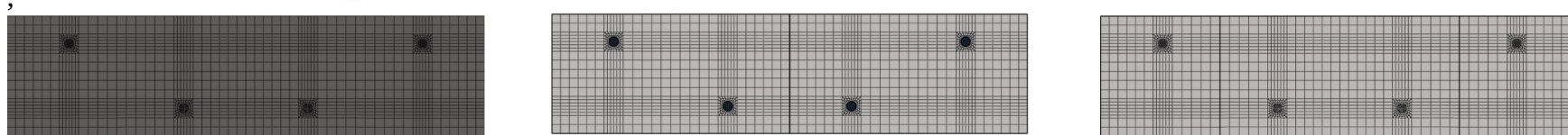
Model 3 pime ait arayüz etkileşim modeli Şekil 3.45’te sunulmuştur.



Şekil 3.45 : Model 3 Pim arayüz etkileşimleri.

Model 3 pim

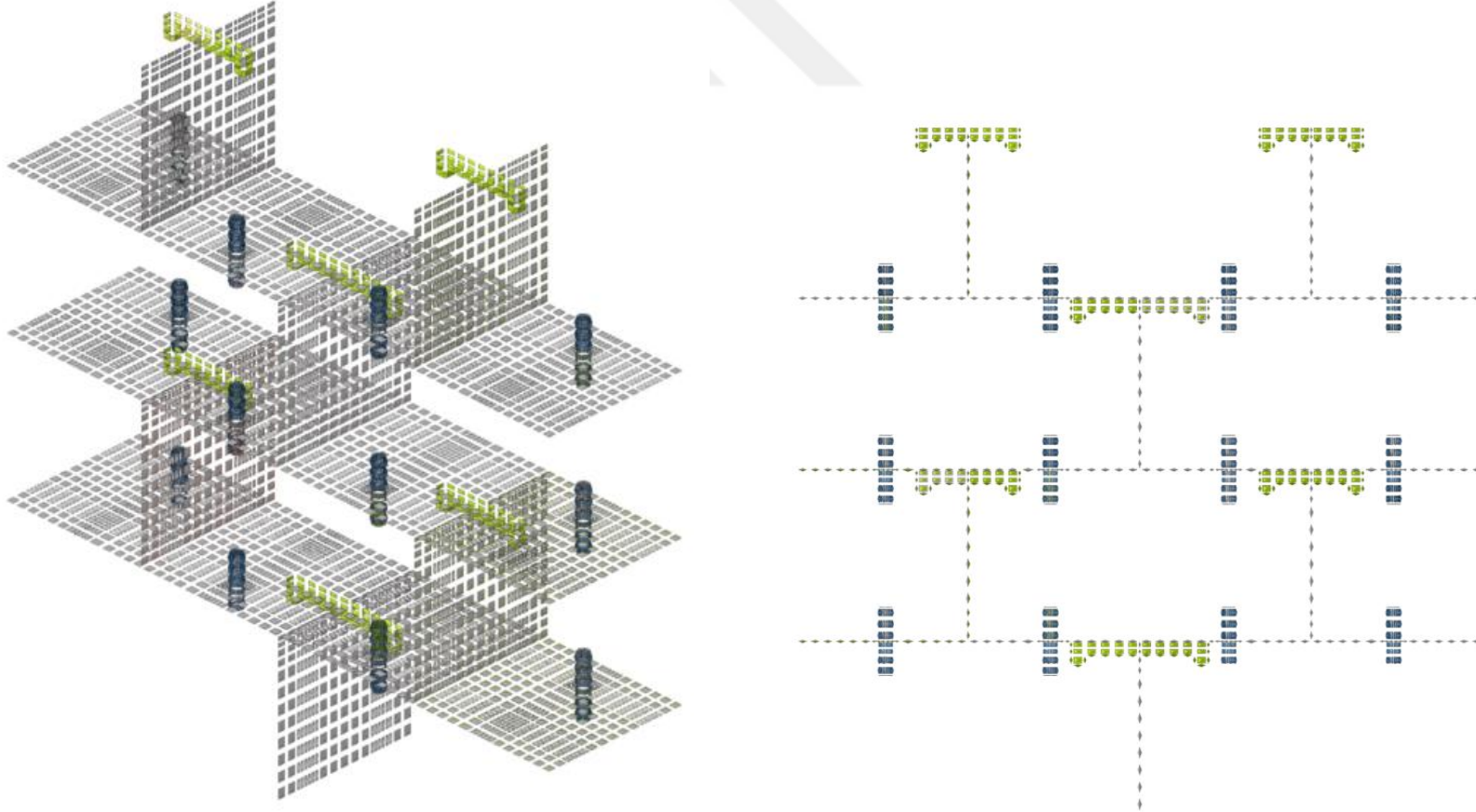
Model 3 pime ait sonlu elemanlar ağ modeli Şekil 3.46'da sunulmuştur.



Şekil 3.46 : Model 3 Pim sonlu eleman ağ yapısı.

3.5.15 Model 3 hibrit

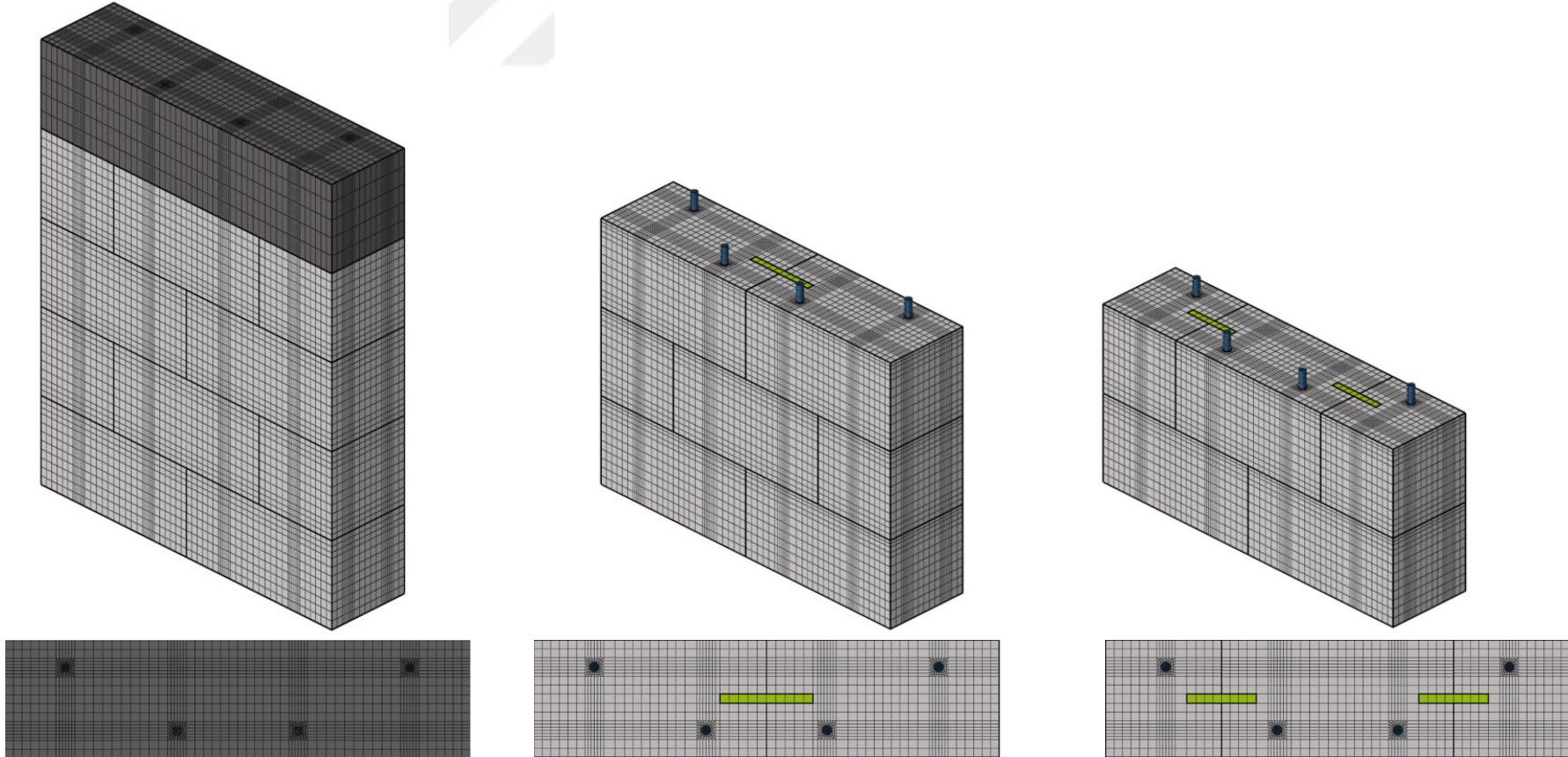
Model 3 hibrite ait arayüz etkileşim modeli Şekil 3.47’de sunulmuştur.



Şekil 3.47 : Model 3 Hibrit arayüz etkileşimleri.

3.5.16 Model 3 hibrit

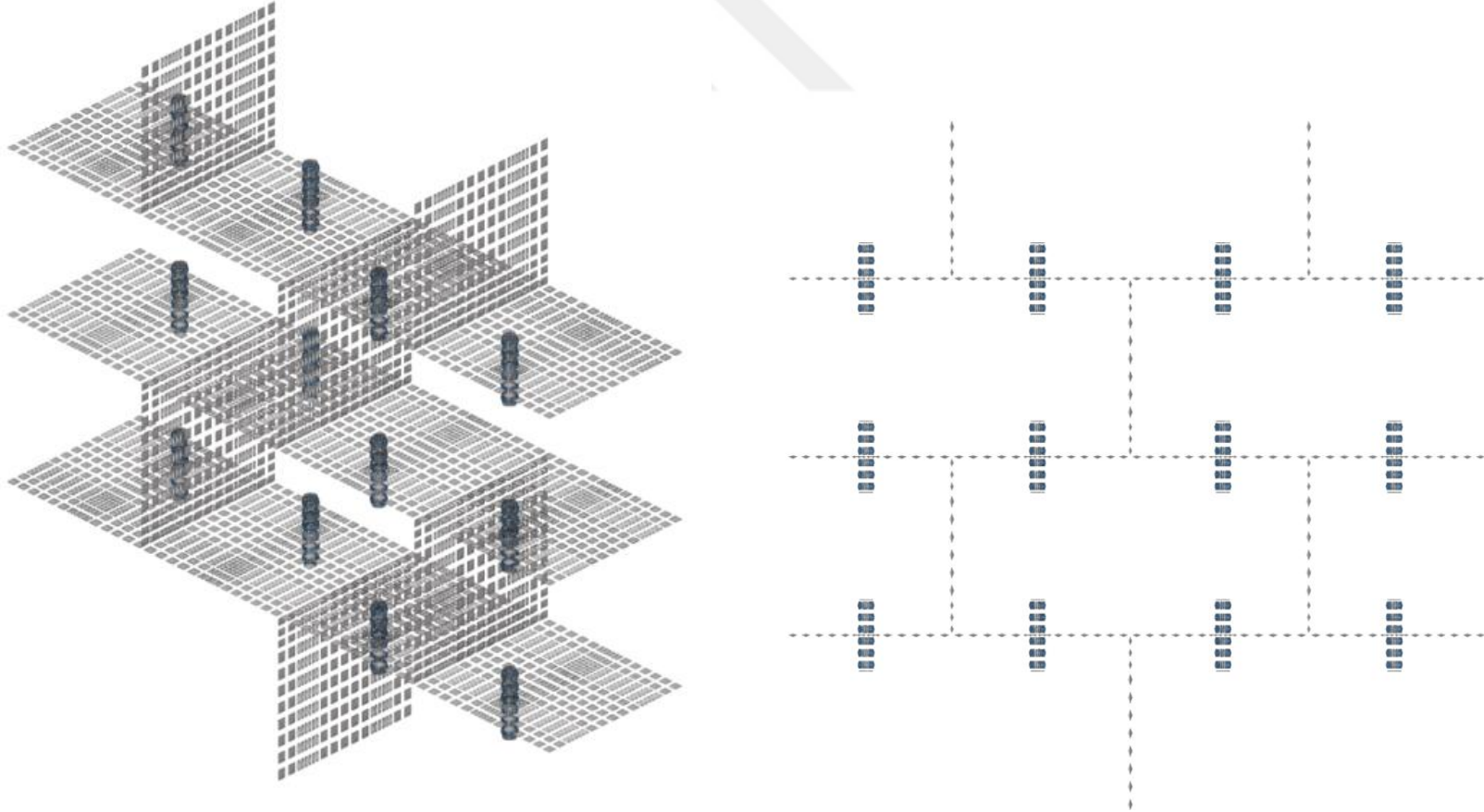
Model 3 hibrite ait sonlu elemanlar ağ modeli Şekil 3.48’de sunulmuştur.



Şekil 3.48 : Model 3 Hibrit sonlu eleman ağ yapısı.

3.5.17 Model 4 pim

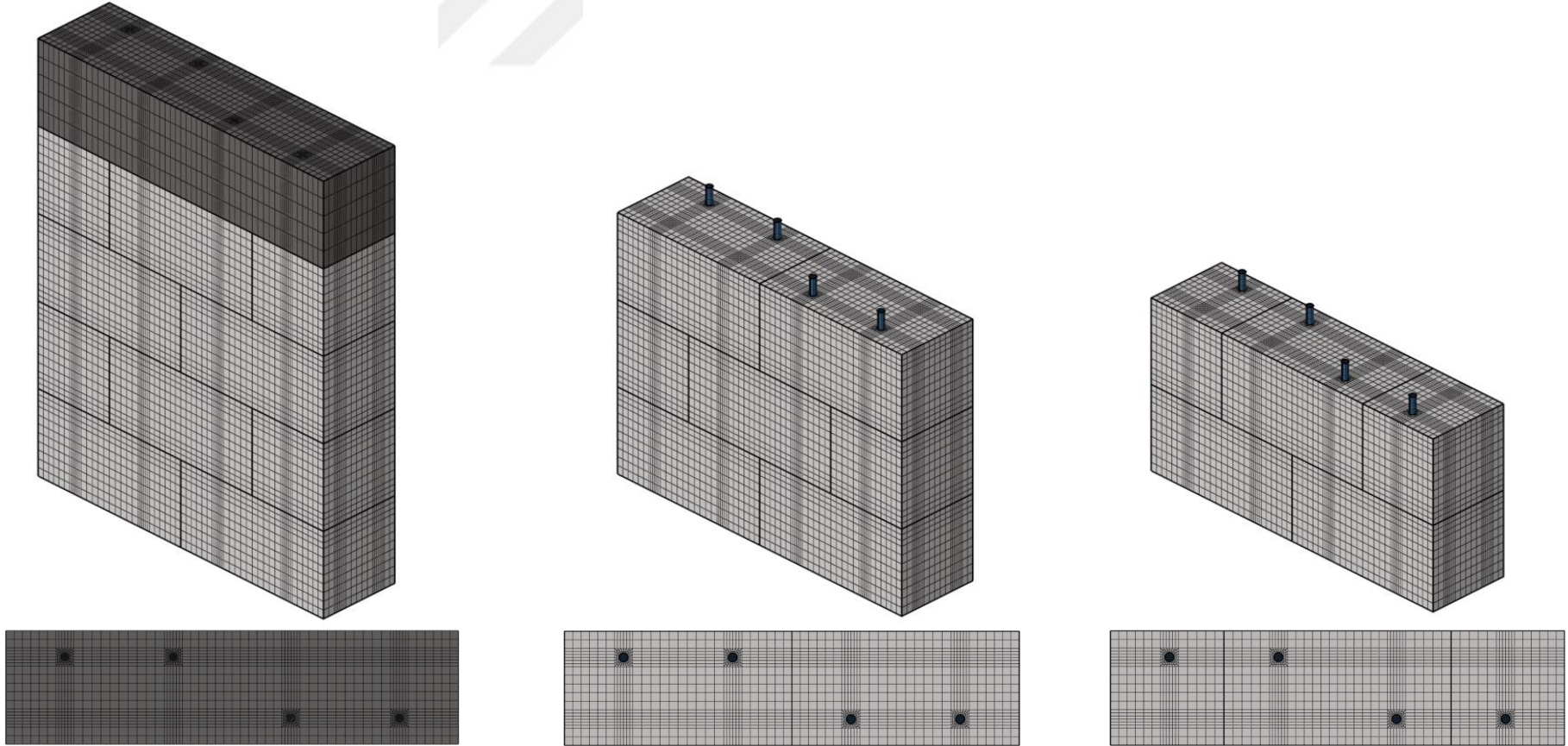
Model 4 pime ait arayüz etkileşim modeli Şekil 3.49’da sunulmuştur.



Şekil 3.49 : Model 4 Pim arayüz etkileşimleri.

3.5.18 Model 4 pim

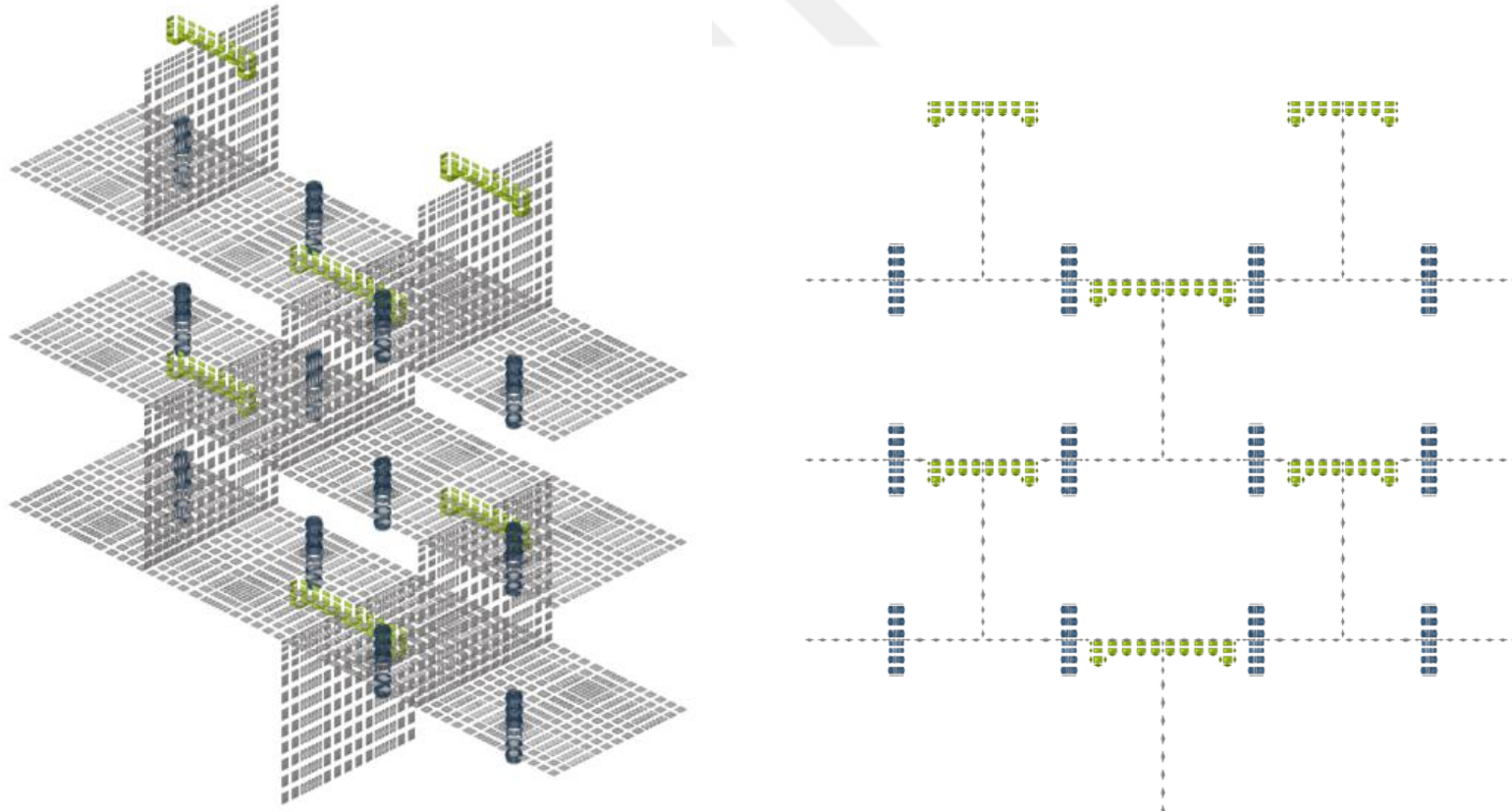
Model 4 pime ait arayüz etkileşim modeli Şekil 3.50’de sunulmuştur.



Şekil 3.50 : Model 4 Pim sonlu eleman ağ yapısı.

3.5.19 Model 4 hibrit

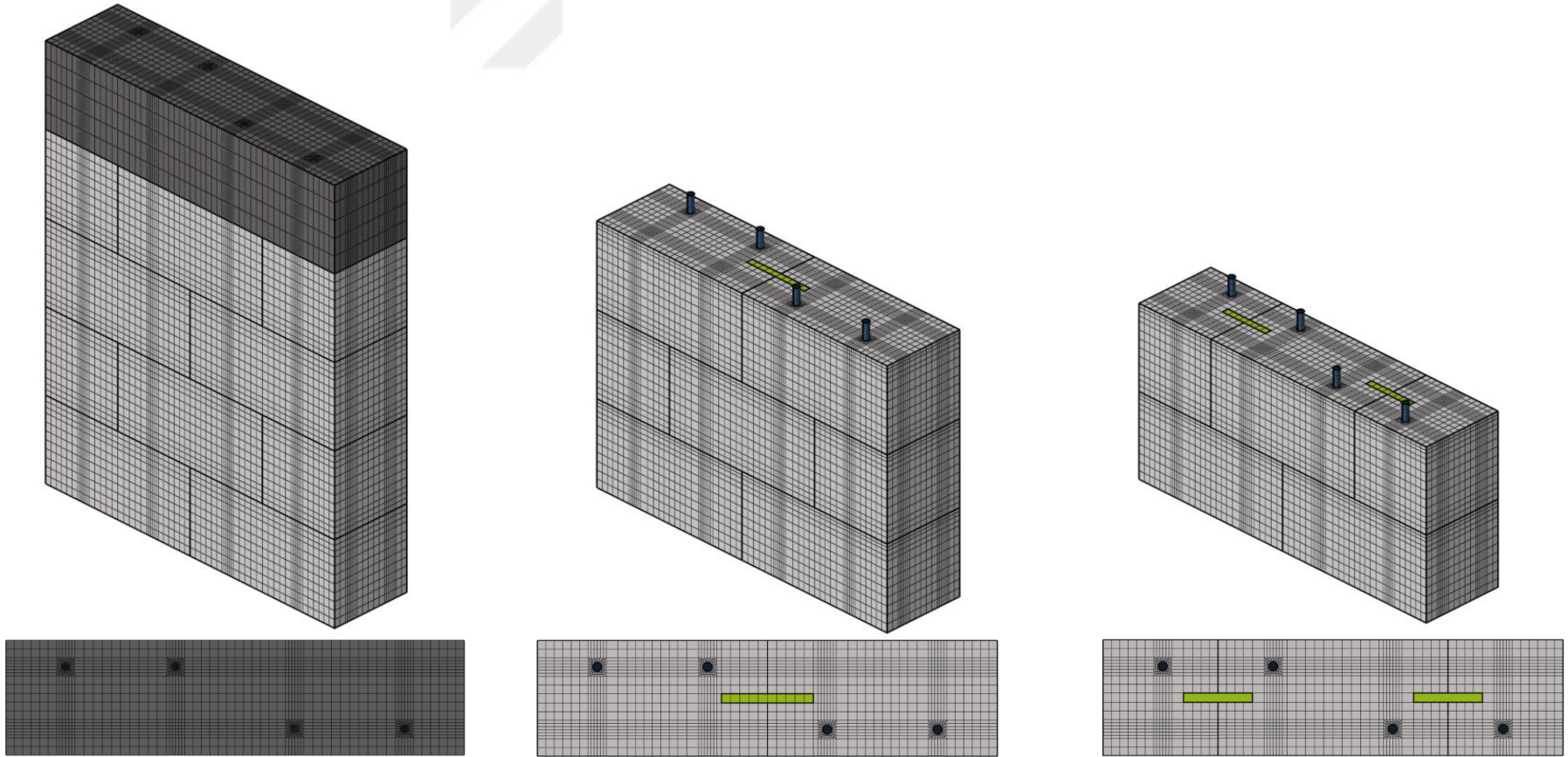
Model 4 hibrite ait arayüz etkileşim modeli Şekil 3.51’de sunulmuştur.



Şekil 3.51 : Model 4 Hibrit arayüz etkileşimleri.

3.5.20 Model 4 hibrit

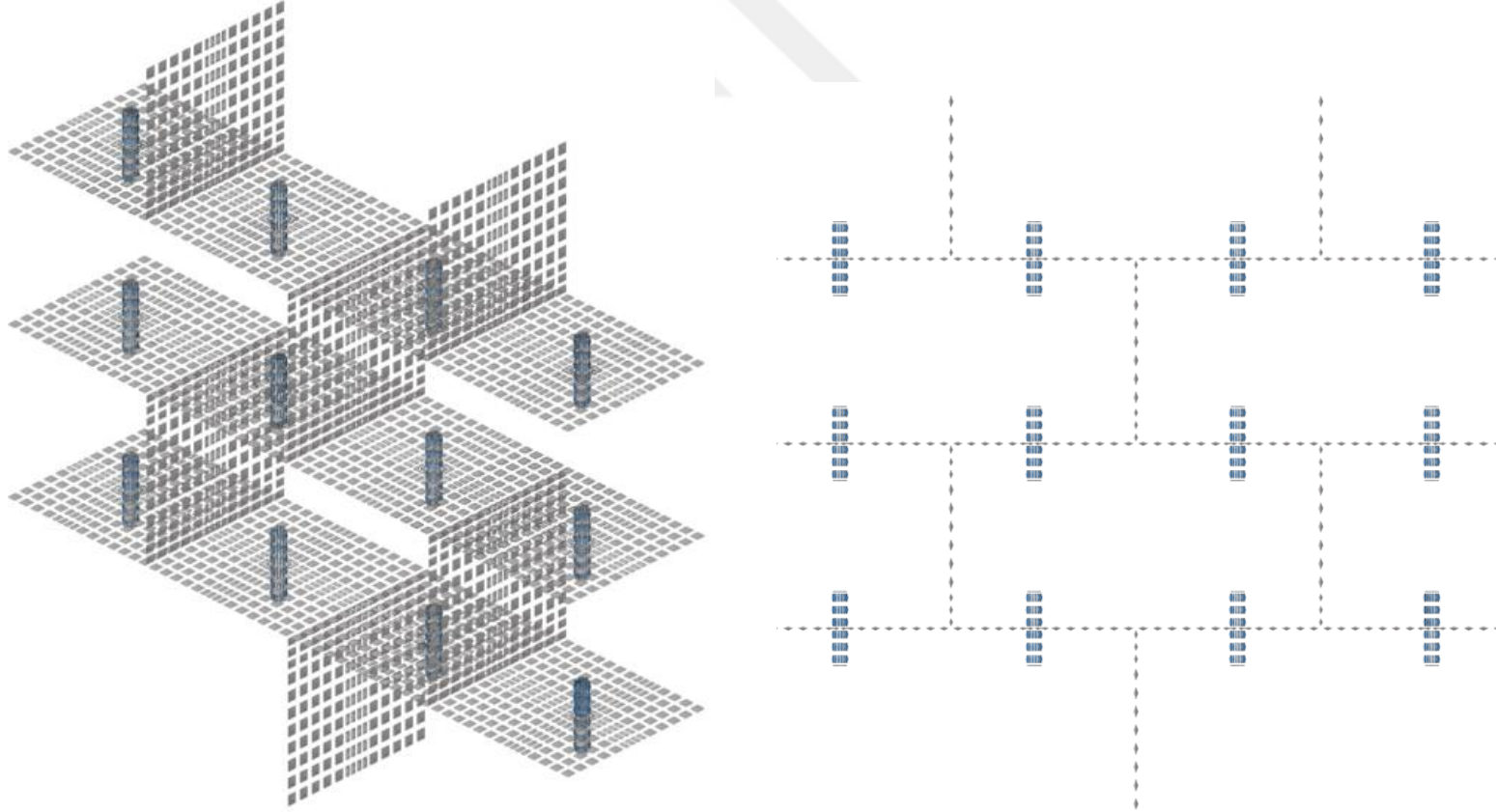
Model 4 hibrite ait sonlu elemanlar ağ modeli Şekil 3.52’de sunulmuştur.



Şekil 3.52 : Model 4 Hibrit sonlu eleman ağ yapısı.

3.5.21 Model 5 pim

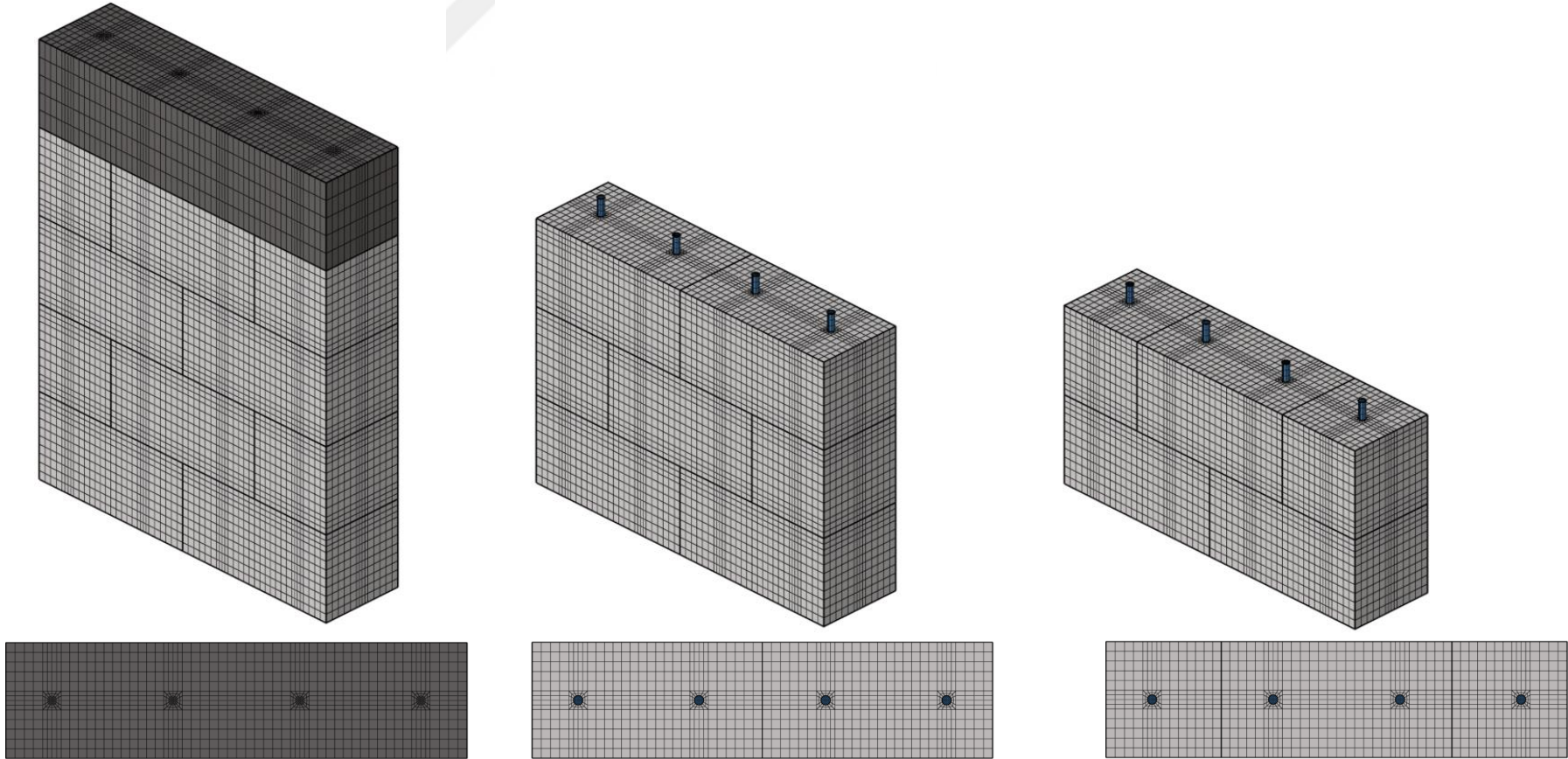
Model 5 pime ait arayüz etkileşim modeli Şekil 3.53'te sunulmuştur.



Şekil 3.53 : Model 5 Pim arayüz etkileşimleri.

3.5.22 Model 5 pim

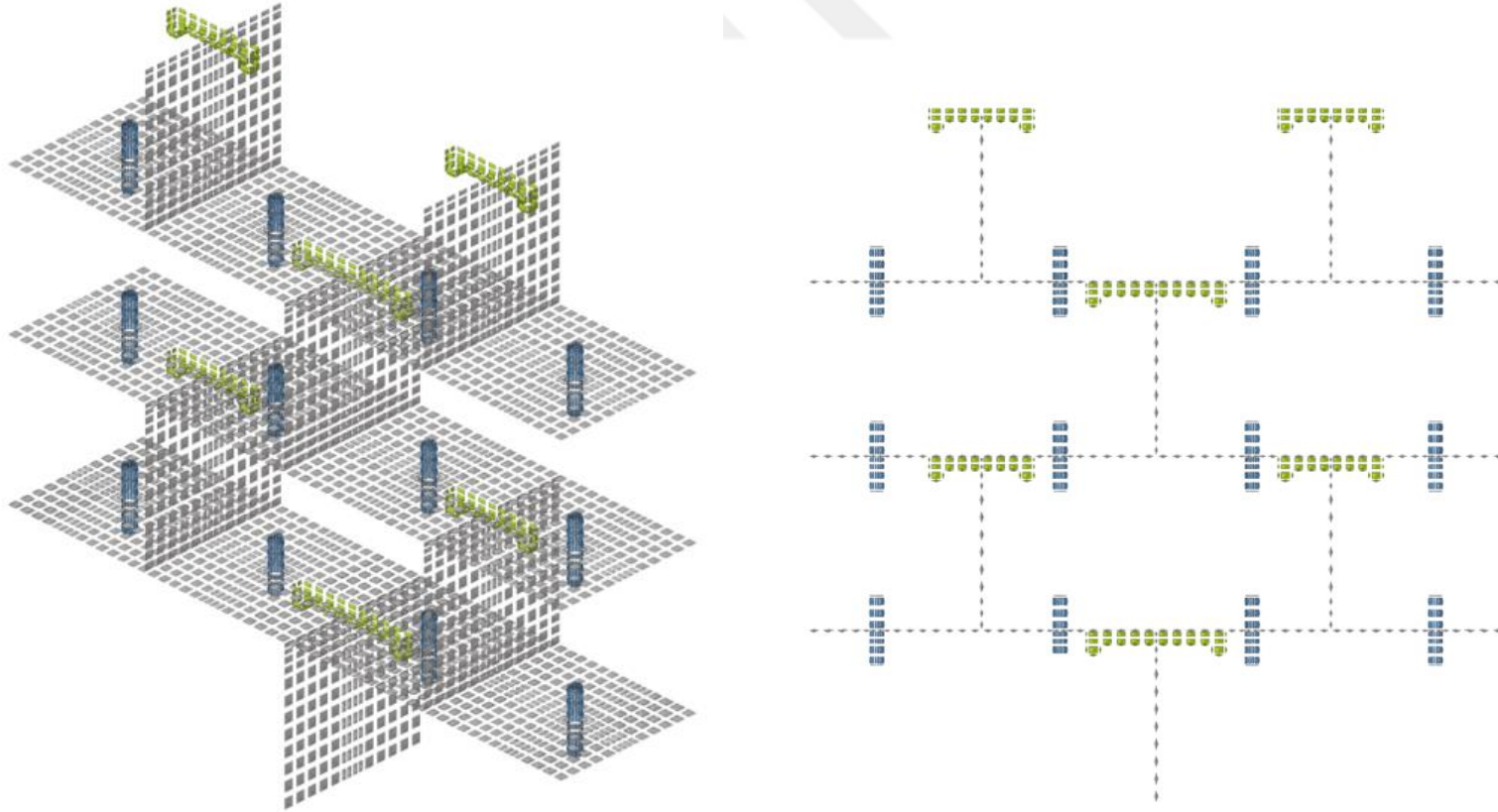
Model 5 pime ait sonlu elemanlar ağ modeli Şekil 3.54'te sunulmuştur.



Şekil 3.54 : Model 5 Pim sonlu eleman ağ yapısı.

3.5.23 Model 5 hibrit

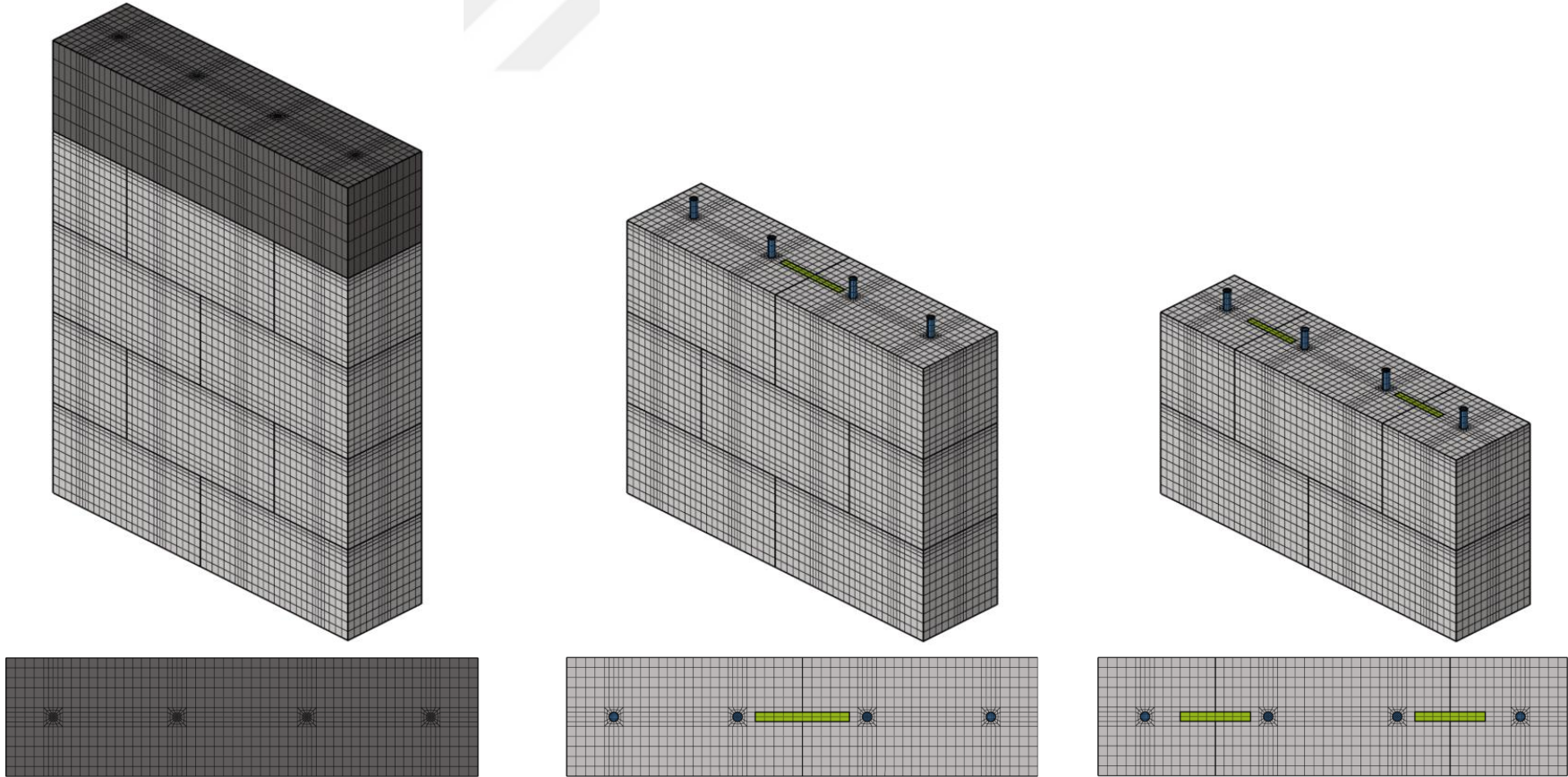
Model 5 hibrite ait arayüz etkileşim modeli Şekil 3.55’te sunulmuştur.



Şekil 3.55 : Model 5 Hibrit arayüz etkileşimleri.

3.5.24 Model 5 hibrit

Model 5 hibrite ait sonlu elemanlar ağ modeli Şekil 3.56’da sunulmuştur.



Şekil 3.56 : Model 5 Hibrit sonlu eleman ağ yapısı.

3.6 Genel Değerlendirme

Bu bölümde, çalışma kapsamında kullanılan sayısal modelin kurulumu ve temel özellikleri detaylı olarak açıklanmıştır. Model, AutoCAD programı kullanılarak oluşturulmuş; geometrisi ve boyutları literatürdeki kaynaklardan alınarak güvenilirliği sağlanmıştır. Modelin görsel temsilinde arayüz etkileşim yapıları, temas noktaları ve sonlu elemanlar sistematik şekilde gösterilmiş, modelin mekanik davranışı doğru şekilde yansıtacak yapılar oluşturulmuştur.

Malzeme modeli seçiminde, küfeki taşının betonla benzer mekanik özellikler gösterdiği ve beton için kullanılan CDP modelinin küfeki taşı için de uygulanabilir olduğu gösterilmiştir. Literatürdeki deneysel veriler ve model parametreleri kalibre edilerek malzeme davranışı gerçekçi ve güvenilir biçimde temsil edilmiştir. CDP malzeme modeline ilişkin formülasyonlar açıkça sunulmuş; demir bağlantı elemanları için ise mühendislik gerilme-şekil değiştirme diyagramlarından gerçek gerilme-şekil değiştirme diyagramlarına geçiş yapılarak modelin gerçekçi sonuçlar vermesi hedeflenmiştir. Ayrıca, gerçekteki davranışı benzetebilmek amacıyla uygun temas koşulları tanımlanarak modeldeki arayüzler gösterilmiştir.

Bu yaklaşımlar sayesinde yapısal davranış ayrıntılı olarak incelenebilmiş ve modelin hassasiyeti artırılmıştır. Genel olarak, Bölüm 3'te yapılan çalışmalar modelin güvenilirliği, gerçekliği ve literatürle uyumu açısından sağlam bir temel oluşturmuş, malzeme davranışlarının doğru simülasyonu ve sonlu elemanlar modellemesinin etkinliği açısından önemli katkılar sağlamıştır.

4. SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

Bu çalışmanın odak noktası olan zıvana ve kenetlerin yapısal davranış üzerindeki etkisini gözlemlemek, plastik deformasyonları ve hasar mekanizmaları detaylı bir şekilde inceleyebilmek amacıyla doğrusal olmayan analiz yöntemi tercih edilmiştir. Bu analiz yönteminde her bir model için malzemenin doğrusal olmayan davranışı, arayüzün doğrusal olmayan davranışı ve geometrinin doğrusal olmayan davranışı tanımlanmıştır.

Malzemenin doğrusal olmayan davranışı modellenerek plastik deformasyonlar, arayüzün doğrusal olmayan davranışı modellenerek elemanlar arası sürtünmeler, arayüzün ayrılması ve geometrinin doğrusal olmayan davranışı tanımlanarak ezilme, kırılma gibi elastik olmayan davranışları elde etmek için doğrusal olmayan çözümler yapılmıştır.

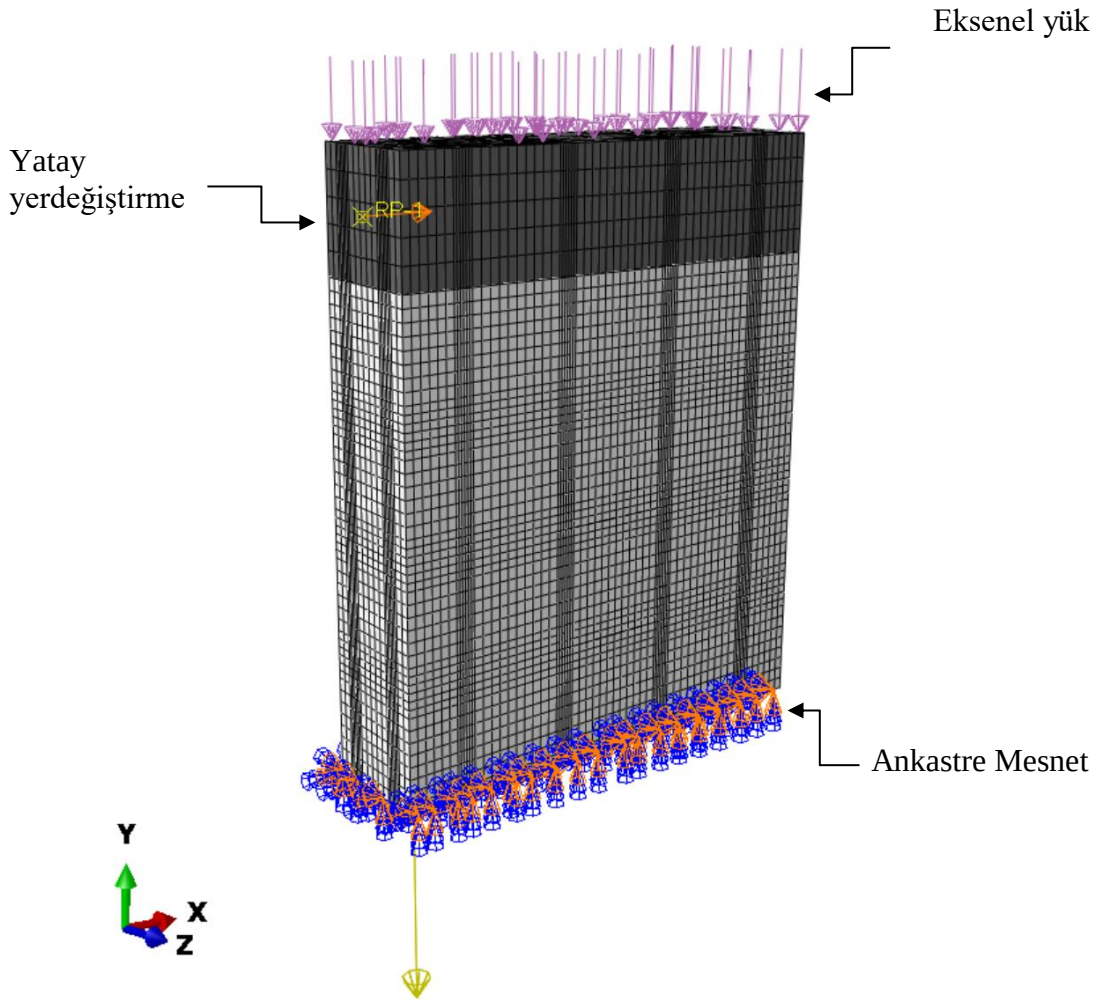
4.1 Analiz Prosedürleri

Duvar modellerinin sayısal çözümünde, sonlu elemanlar analizleri için ABAQUS yazılımı tercih edilmiştir. ABAQUS'te doğrusal olmayan problem çözümü için iki analiz türü bulunmaktadır: Bunlar implicit (ABAQUS/Standard) ve Explicit (ABAQUS/Explicit) analizleridir. Bu tez kapsamında duvar modellerine uygulanacak yük bakımından doğrusal olmayan statik analiz tercih edilmiştir. Abaqus Implicit analizlerde, doğrusal olmayan problemlerin çözümü için genellikle Newton-Raphson yöntemini kullanır. Doğrusal olmayan bir analizde, çözüm doğrudan tek bir denklem sistemi çözülerek elde edilemez. Bunun yerine, çözüm süreci kademeli olarak ilerler; diğer bir deyişle, belirli bir yük, adım adım arttırılır ve her adımda çözüm biraz daha güncellenir. Bu yaklaşım, nihai çözüm noktasına doğru bir dizi adımda ilerlemeyi gerektirir. ABAQUS, simülasyonu yük artışlarına böler ve her artışta sistemin dengeye yaklaşan bir konfigürasyonunu bulur. Her yük artışı için, çözümün doğru bir şekilde bulunduğundan emin olunması amacıyla birkaç iterasyon yapılması gerekebilir. Bu iterasyonlar, çözümün her adımda doğrusal olmayan denklemler dikkate alınarak

iyileştirilmesini sağlar. Sonuç olarak, tüm bu artımlı yanıtların toplamı, doğrusal olmayan analiz için yaklaşık çözümü oluşturur.

Analizler iki aşamada gerçekleştirilmiştir ve iki farklı yükleme prosedürleri yer almaktadır. Modellere tüm yüklemeler yükleme kirişi aracılığı ile yapılmıştır. Bu kiriş, duvarın üzerine uygulanan yükleri daha geniş bir alana yayarak, duvarın üzerindeki yük dağılımını iyileştirir ve yapının stabilitesini artırır (Şekil 4.1).

İlk aşamada 0 ile %25 f_b MPa arasında duvar üzerindeki yükleme kirişine düşey ön yükleme yapılmıştır. Yatay yüklemeden önce, her numune istenilen eksenel gerilme seviyesine kadar eksenel olarak yüklenmiştir. 1. Aşama olan eksenel yükleme tamamlandıktan sonra, ikinci prosedür olan yatay düzlemde duvar göçme moduna ulaşıncaya kadar monotonik olarak artan yanal yerdeğiştirme uygulanmıştır.



Şekil 4.1 : Yükleme ve sınır koşulları.

4.2 Yükleme Protokolü

Sonlu elemanlar modeli hazırlanan altı farklı demir kombinasyonu içeren detaylı mikro model için Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu (TYDRYK), ASCE41-23 ve FEMA 356'ya (URM) performans seviyeleri belirlenmiştir (Çizelge 4.1) ve (Çizelge 4.2). Bu performans seviyelerine göre süneklik, rijitlik ve hasar mekanizmaları incelenmiştir.

Çizelge 4.1 : TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.

Yönetmelik	SH [%]	KH[%]	GÖ[%]
Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu	0.30	0.70	1.00

Çizelge 4.2 : FEMA 356 ve ASCE 41-23 standartlarına göre performans seviyeleri.

Yönetmelik	HK [%]	CG[%]	GÖ [%]
FEMA 356 [Kayma]	0.10	0.30	0.40
FEMA 356 [Dönme]*	0.10	0.27	0.36
ASCE 41-23 [Kayma]	0.10	0.75	1.00
ASCE 41-23 [Dönme]*	0.10	0.36	0.54

* $h_{eff}/L=0.90$

Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda, sınırlı hasar (SH) performans seviyesi, yapının taşıyıcı sistem elemanlarında sınırlı düzeyde hasar meydana geldiği ve doğrusal olmayan davranışın yalnızca sınırlı kaldığı hasar seviyesini ifade etmektedir. Kontrollü hasar (KH) performans seviyesi ise yapının taşıyıcı sistem elemanlarında genellikle onarılabilir düzeyde kontrollü hasarın olduğu durumları tanımlar. Göçmenin önlenmesi (GÖ) performans seviyesi ise taşıyıcı sistem elemanlarında ileri düzeyde ağır hasar meydana geldiği, yapının kısmi ya da tam göçme riski taşıdığı ancak göçmenin önlenmediği durumu karşılamaktadır.

FEMA 356 ve ASCE 41-23 standartlarındaki performans düzeyleri ve hasar seviyeleri şu şekildedir:

Hemen Kullanım (HK) performans seviyesinde yapısal olarak bir hasar oluşmaz. Yüzeysel hasarlar meydana gelebilir, yapının güvenliğini tehlikeye atmaz. Yapı, güvenlik açısından bir risk barındırmaz.

Can güvenliği (CG) performans seviyesinde yapısal hasar mevcuttur, ancak göçme riski yoktur. Yapının kullanımı geçici olarak sınırlanabilir ve onarım gerekebilir.

Göçmenin önlenmesi (GÖ) performans seviyesinde ise taşıyıcı sistemde büyük hasar meydana gelir. Yapının önemli taşıyıcı elemanları zarar görür ve yapısal bütünlük ciddi şekilde bozulur.

Kullanılan standartlar referans alınarak duvar modellerine uygulanacak olan maksimum öteleme oranı göçmenin önlenmesi performans seviyesine karşı gelen %1'dir. Öteleme, kirişin orta noktasından etki etmektedir. Eksenel gerilme kiriş üzerine düzgün yayılı yük olarak uygulanmıştır.

Duvar yapımında kullanılacak kargir birim ve harcın basınç dayanımına eşit dayanımda yapılmış duvar parçacıklarının basınç dayanım deneylerinden hesaplanan duvar dayanımının 0.25'i duvar basınç emniyet gerilmesidir. (DBYBHY 2007)

Tüm duvar modellerinin analizleri iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, model yalnızca eksenel yükler altında incelenmiş ve bu yüklemeyle ilgili çözüm tamamlanmıştır. Yükleme işlemi tamamlandıktan sonra, ikinci aşamaya geçilerek, modelde ötelenme oranına bağlı yanal yerdeğiştirme uygulanmıştır. İkinci aşamadaki analiz sırasında, birinci aşamadaki nihai eksenel yük devam ettirilmiş ve bu yükleme etkisi altında yanal yer değiştirme incelenmiştir. Böylece, ilk aşamada uygulanan eksenel yüklemenin etkileri ikinci aşama çözümüne taşınarak, yapının daha gerçekçi bir davranış sergilemesi sağlanmıştır (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3 : Farklı eksenel yük seviyeleri altında analiz durumları.

Analiz Durumu	Yönler ve Dış Yükler	Yükün Uygulandığı Analiz Aşaması	Analiz Prosedürü
Durum 1	Düşey -	1. Aşama	Statik/Doğrusal Olmayan Analiz
	Yatay %1.0 Öteleme	2. Aşama	
Durum 2	Düşey $0.05*f_b$	1. Aşama	Statik/Doğrusal Olmayan Analiz
	Yatay %1.0 Öteleme	2. Aşama	
Durum 3	Düşey $0.10*f_b$	1. Aşama	Statik/Doğrusal Olmayan Analiz
	Yatay %1.0 Öteleme	2. Aşama	
Durum 4	Düşey $0.15*f_b$	1. Aşama	Statik/Doğrusal Olmayan Analiz
	Yatay %1.0 Öteleme	2. Aşama	
Durum 5	Düşey $0.20*f_b$	1. Aşama	Statik/Doğrusal Olmayan Analiz
	Yatay %1.0 Öteleme	2. Aşama	
Durum 6	Düşey $0.25*f_b$	1. Aşama	Statik/Doğrusal Olmayan Analiz
	Yatay %1.0 Öteleme	2. Aşama	

4.3 Genel Değerlendirme

Bu tez çalışmasında, tarihi kargir duvarların zıvana ve kenet detaylarının yapısal davranışları, malzeme, arayüz ve geometrinin doğrusal olmayan özellikleri dikkate alınarak kapsamlı bir biçimde incelenmiştir. Sonlu eleman analizleri, ulusal ve uluslararası yönetmelikler referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Özellikle Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu (TYDRYK), ASCE 41-23 ve FEMA 356 gibi standartlar doğrultusunda performans seviyeleri tanımlanmış ve bu seviyelere göre yapıların süneklik, rijitlik ve hasar mekanizmaları değerlendirilmiştir. Analizler, ABAQUS yazılımında implicit çözüm yöntemleri kullanılarak iki aşamalı bir yükleme prosedürüyle yürütülmüştür. İlk aşamada duvarlar eksenel yük altında değerlendirilmiş, ikinci aşamada ise yatay yer değiştirmelerle göçme modlarına ulaşılması hedeflenmiştir. Bu yöntem sayesinde, malzemenin plastik deformasyonları, arayüz ayrılması ve yapının elastik olmayan davranışları gerçekçi şekilde modellenmiş, taşıyıcı sistemin farklı yükleme koşullarındaki performansı ayrıntılı olarak ortaya konmuştur. Sonuçlar, tarihi yapıların deprem güvenliği açısından kritik bilgi sağlamasının yanı sıra, benzer yapıların onarım ve güçlendirme stratejilerinin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.

5. SAYISAL HESAP SONUÇLARININ İNCELENMESİ

Yükleme koşulları, sabit yükler ve yanal yerdeğiştirme yükü gibi çeşitli yükleme türlerini içermektedir. Sınır koşulları olarak, modelin tabanında ankastre mesnetli bir sistem kullanılmıştır. Bu mesnetleme, yapının tabanındaki hareketleri sınırlayarak, bağlantı elemanlarının taşıma kapasitesi ve yapısal bütünlük üzerindeki etkilerini doğru bir şekilde incelemeye olanak tanımaktadır.

Analiz sonuçları, bağlantı elemanlarının gerilme, deformasyon ve hasar mekanizmaları gibi önemli parametreler açısından nasıl davrandığını ayrıntılı olarak ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, demir bağlantı elemanlarının taş duvarlar üzerindeki performansını değerlendirerek, tasarımda yapılması gereken iyileştirmeleri ve optimizasyon adımlarını belirlemeye yardımcı olmaktadır. Aşağıda, elde edilen ana bulguların kapsamlı bir şekilde sunulması ve her bir parametrenin nasıl etkileşimde bulunduğu, sistemin genel davranışına olan etkileri üzerinde detaylı bir yorum yapılmıştır.

5.1 Süneklik

Yığma yapıların deprem davranışlarının değerlendirilmesinde süneklik donatısız duvarlarda (sınırlı da olsa) önemli bir parametredir. Süneklik, bir yapının elastik sınırın ötesine geçtikten sonra şekil değiştirebilme kapasitesini ifade eder ve genellikle maksimum yerdeğiştirme (Δ_u) ile akma yerdeğiştirmesi (Δ_y) oranı olarak tanımlanır:

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \quad (5.1)$$

Bu çalışmada süneklik hesabı yapılırken, göçme noktası yerine maksimum taşıma kapasitesine ulaşılan nokta olan P_{max} dikkate alınmıştır. Çünkü, göçme anındaki yerdeğiştirme değerleri, yığma yapılarda birçok değişkene bağlı olarak geniş bir aralıkta ortaya çıkabilmektedir. Özellikle malzemenin kırılğan yapısı, ani gevrek davranışlar, bağlayıcı harcın zayıf kalitesi ve birleşim bölgelerindeki düzensizlikler gibi faktörler göçme noktasını hem deneysel hem de analitik olarak belirsiz hale

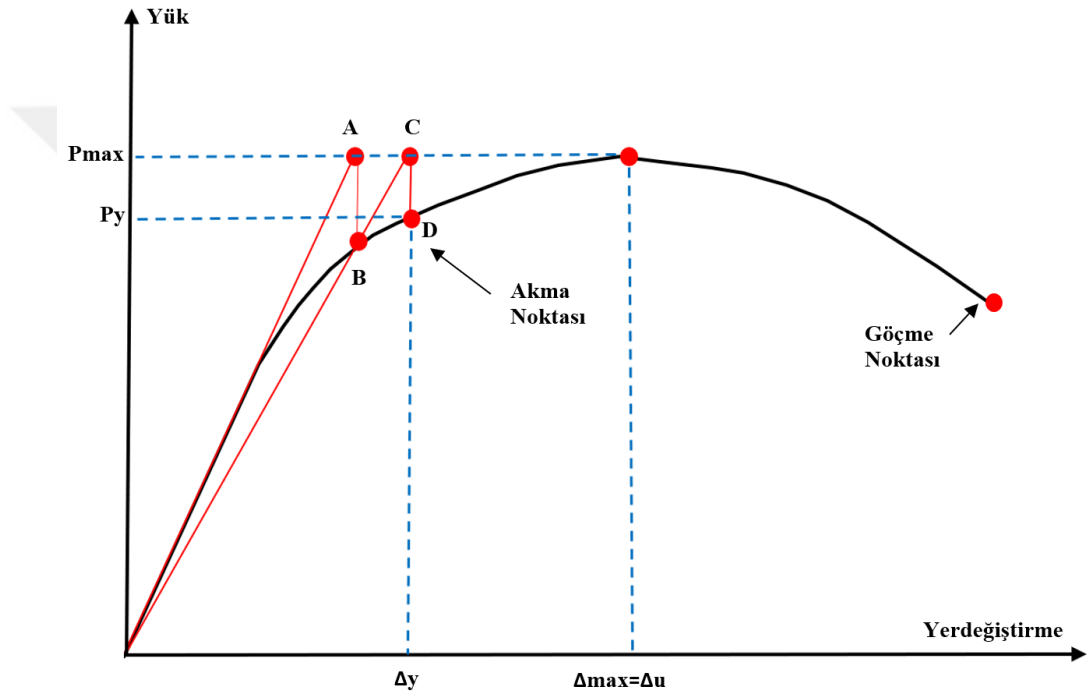
getirmektedir. Bu durumda göçme anında elde edilen yerdeğiştirme değeri, yapının gerçek süneklik kapasitesini olduğundan yüksek gösterebilir ve yanıltıcı olabilir. Bu belirsizlikler, gme anındaki deplasmana dayalı süneklik hesaplamalarının yapı davranışını olduğundan daha sünek gösterme riskini taşır. Bu nedenle, yük-deplasman eğrisinde açık şekilde tanımlanabilen ve llebilen bir nokta olan maksimum taşıma kapasitesine ulaşılan (P_{max}) andaki deplasman, yığma yapılar için daha güvenilir bir değerlendirme imkanı sunar. Bu yaklaşımla yapılan $\Delta u/\Delta y$ oranı, yapı elemanının sünekliğini daha tutarlı bir şekilde temsil eder. Sonuç olarak, yığma yapılarda sünekliğin değerlendirilmesinde, gme yerine P_{max} noktasının esas alınması hem analitik hem deneysel açıdan en uygun yntem olarak önerilmektedir.

Örneğin, Silva ve diğ., (2023) tarafından yapılan çalışmada, sabit akma yerdeğiştirmesi varsayımı altında süneklik ve dayanım ilişkileri analiz edilmiştir. Bu çalışmada, süneklik oranının P_{max} noktasına kadar olan yer değiştirme kullanılarak hesaplanmasının, yapının enerji yutma kapasitesini daha doğru yansıttığı ifade edilmiştir.

Benzer şekilde, Foroughi ve Yüksel (2019), betonarme perdeler üzerinde yaptıkları deneysel çalışmalarda, plastik yerdeğiştirme kapasitesinin değerlendirilmesinde maksimum kuvvet noktası baz alınarak süneklik hesabı yapılmasının daha güvenilir sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Ling ve diğ., (2023) süneklik kavramının yapı güvenliği açısından taşıdığı kritik öneme dikkat çekmekte ve literatürde bu amaçla kullanılan çeşitli yöntemleri kapsamlı şekilde sınıflandırmaktadır. Süneklik, yapıların özellikle deprem gibi ani ve tekrarlı yüklemelere karşı dayanımını artıran ve gme öncesi enerji yutmasını sağlayan bir özellik olarak tanımlanmakta, bu nedenle en gerçekçi bir yolla hesaplanması hayati önem taşımaktadır. Çalışmada süneklik tanımları genel olarak üç ana kategori altında toplanmıştır: Bunlar konvansiyonel (deplasman temelli), deformasyon temelli ve enerji temelli yaklaşımlardır. Kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri üzerinden yapılan tanımlamalarda özellikle dikkat çeken yöntem, maksimum taşıma kapasitesine ulaşılan noktadaki yerdeğiştirme değerinin P_{max} noktasındaki Δu kullanıldığı yöntemidir.

Akma noktasını belirlemek için izlenmesi gereken yol şu şekildedir: (Ling ve diğ., 2023). Elastik davranış bölgesi için, başlangıç noktasından itibaren yük–yer değiştirme eğrisinin doğrusal bölümüne denk gelen bir teğet çizilir ve bu doğru, maksimum yük seviyesinde A noktası ile kesişir. A noktasından aşağıya doğru dik bir hat çizilerek, bu doğrunun yük–yerdeğiştirme eğrisiyle kesiştiği yer B noktası olarak belirlenir. Başlangıç noktasından B noktasına ve maksimum yük seviyesine uzanan doğru boyunca ilerlenerek, bu doğrunun eğriyle kesiştiği yer C noktası olarak tanımlanır. C noktasından düşey bir çizgi çizildiğinde, bu çizgi akma yüküne karşılık gelen D noktasını ve akma yerdeğiştirmesi olan Δ_y değerini verir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 : Genel akma yöntemi ile akma noktasının tanımı. (Ling ve diğ., 2023'den uyarlanmıştır).

Yığma yapılarda göçme anı malzeme heterojenliği, harç kalitesi, derzlerin zayıf bağlanması ve kırılğan davranış nedeniyle net olarak belirlenemez ve ölçümler sırasında ciddi belirsizliklere neden olabilir. Bu belirsizlikler, göçme anındaki deplasmana dayalı süneklik hesaplamalarının yapı davranışını olduğundan daha sünek gösterme riskini taşır. Bu nedenle, yük-deplasman eğrisinde açık şekilde tanımlanabilen ve ölçülebilen bir nokta olan maksimum taşıma kapasitesine ulaşılan (P_{max}) andaki deplasman, yığma yapılar için daha güvenilir bir değerlendirme imkânı sunar.

Dolayısıyla, daha tutarlı ve karşılaştırılabilir bir değerlendirme yapabilmek için, yapının maksimum taşıma kapasitesine ulaştığı andaki yerdeğiştirme değeri (P_{max} 'a karşılık gelen Δ_u) esas alınmıştır. Bu yöntem, literatürde de yaygın olarak benimsenmiştir. Yığma yapılarda bu yaklaşımın benimsenmesi, yapıların doğrusal olmayan davranışlarının daha gerçekçi şekilde değerlendirilmesini sağlamakta ve yapı güvenliği açısından daha tutarlı sonuçlar vermektedir. Bu nedenle bu çalışmada, süneklik kapasitesi belirlenirken kuvvet-yerdeğiştirme eğrisinde maksimum taşıma kuvvetine ulaşılan andaki yerdeğiştirme (Δ_u), akma yer değiştirmesine (Δ_y) oranlanarak süneklik hesaplanmıştır.

5.2 Rijitlik

Rijitlik, bir yapının ya da yapısal elemanın dış yükler altında şekil değiştirmeye karşı gösterdiği dirençtir. Başka bir ifadeyle, bir elemanın birim kuvvet başına ne kadar az yer değiştirdiğini gösteren mekanik bir özelliktir. Matematiksel olarak rijitlik, uygulanan kuvvetin, meydana gelen yer değiştirmeye oranı olarak tanımlanır. Rijitlik hesaplanmasında aşağıdaki bağıntıdan yararlanılmıştır:

$$k=F/\Delta \quad (5.2)$$

Yığma duvarlar, genellikle gevrek davranış gösterdiğinden, rijitlikleri ilk çatlama sonrasında hızla azalır. Bu nedenle, yığma yapılarda rijitlik yalnızca malzeme özelliklerine (örneğin elastik modül, duvar kalınlığı) değil, aynı zamanda çatlak oluşumu, malzeme bütünlüğü ve yükleme geçmişine bağlı olarak değişir.

Lourenço (1996), doktora tezinde, yığma yapıların mekanik davranışını doğrusal olmayan analiz yöntemleri ile ele alınmıştır. Lourenço, rijitlik hesaplarında hem elastik hem de elasto-plastik davranış biçimlerini dikkate almış ve mikro-makro modelleme tekniklerini kullanmıştır. Çalışmada, yığma yapıların çatlamamış (elastik) durumda yüksek rijitliğe sahip olduğu, ancak çatlama sonrası bu rijitliğin önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Deneysel ve sayısal analizlere dayanan bulgulara göre, çatlama sonrası rijitlikte %30 ila %50 oranında azalma gözlemlenmiştir. Lourenço, çatlama etkisinin yapıların yatay yükler altındaki davranışına olan etkisini detaylıca incelemiş ve rijitlik kaybının yapı güvenliği açısından belirleyici bir parametre olduğunu vurgulamıştır. Bu bağlamda, yapısal analizlerde çatlamış kesitlere özgü efektif rijitlik değerlerinin kullanılmasının gerekliliğine dikkat çekmiştir.

Çalışma, rijitlik kavramının yalnızca kesit özelliklerine değil, aynı zamanda malzemenin hasar geçmişine ve yükleme geçmişine göre değiştiğini ortaya koyarak yığma yapıların daha doğru modellenmesine katkı sağlamaktadır.

Vanin ve diğ., (2017) çalışmasında yığma duvarların rijitliği, kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışmada, 123 adet taş yığma duvar üzerinde yapılan quasi-statik kesme ve basınç testleri kullanılmıştır. Bu testler, duvarların farklı yük koşullarında nasıl davrandığını ve rijitliklerinin nasıl değiştiğini anlamaya yöneliktir. Her bir duvar elemanı üzerinde uygulanan kuvvetler ile oluşan yerdeğiştirmeler kaydedilmiştir. Testler sırasında, yapılar genellikle yatay kuvvetler altında test edilmiştir ve bu kuvvetler, duvarların hem elastik deformasyonunu hem de plastik davranışlarını gözlemlemek amacıyla kullanılmıştır.

Çalışmada rijitlik, elastik rijitlik ve efektif (etkin) rijitlik olarak iki ana kategoride ele alınmıştır. Elastik rijitlik, yapının doğrusal elastik bölgedeki, diğer bir deyişle düşük yüklerdeki davranışını temsil ederken, efektif rijitlik, plastik deformasyon başladığında yapının gösterdiği dirençtir. Yığma duvarlarda elastik bölgede rijitlik yüksekken, yük arttıkça ve plastik deformasyon başladıkça rijitlik azalır. Bu rijitlik değişimi, kuvvet-yerdeğiştirme eğrisinde açıkça görülür; ilk başta doğrusal, ardından doğrusal olmayan bir davranış sergilenir.

Yığma duvarlar, çatlama ve hasar durumları gibi limit durumlarda (inelastik davranış) rijitlikte belirgin bir azalma gösterir. Çalışma ayrıca, mevcut rijitlik hesaplama yöntemlerinin genellikle düşük doğruluğa sahip olduğunu ve daha güvenilir modellerin geliştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Bu tez kapsamında elastik rijitlikler hesaplanmıştır. D noktasına karşılık gelen P_y yükü ve Δ_y yerdeğiştirme değeri kullanılmıştır (Şekil5.1).

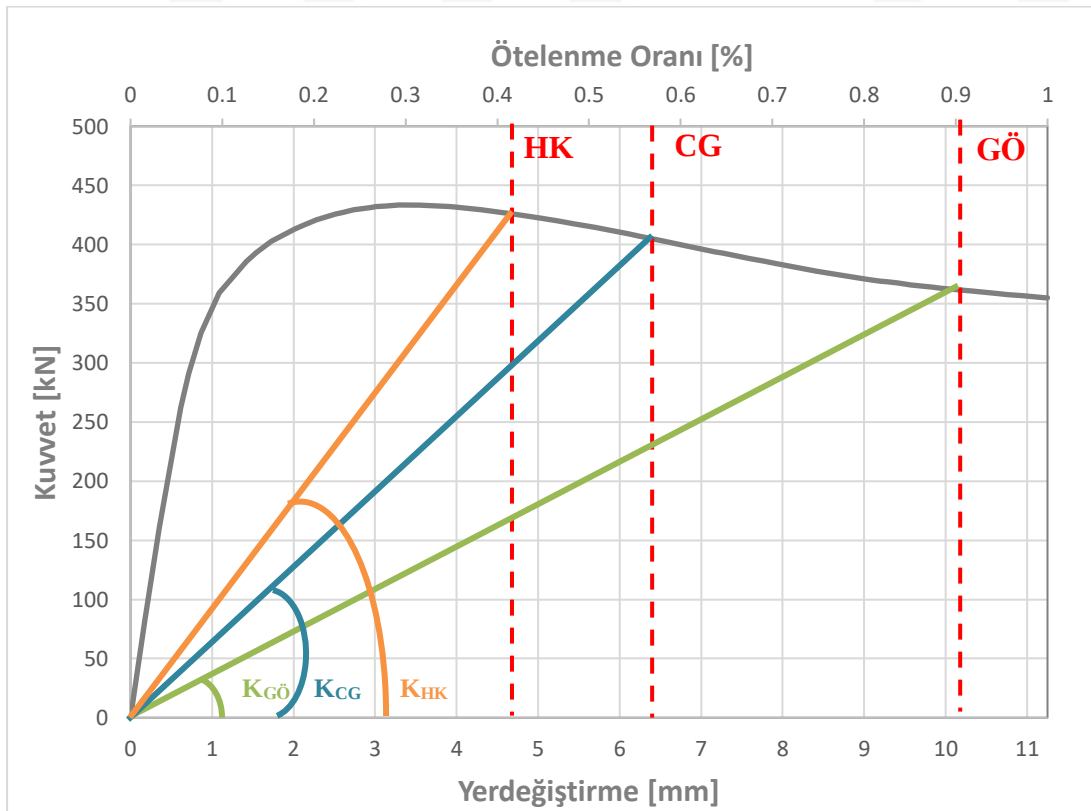
Yukarıda söz edilen birinci rijitlik değerleri, sistemin elastik davranış aralığında Hooke kanununa göre tanımlanmış ve ilk rijitlik karakteristiğini ortaya koymuştur. Ancak yapıların gerçek deprem davranışı doğrusal olmayan (nonlinear) etkilerle birlikte değerlendirilmelidir. Bu kapsamda, FEMA 356, ASCE 41-23 ve TYDRYK çerçevesinde tanımlanan performans seviyeleri dikkate alınarak, yapının plastikleştiği bölgelere karşılık gelen ikinci rijitlik değerleri hesaplanmıştır. Bunlar bir bakıma öngörülen performans düzeyine karşı gelen efektif rijitliklerdir.

İkinci rijitlik (secant stiffness), yapı elemanlarının doğrusal elastik bölgeden çıkarak plastikleşmeye başladığı, yani enerji sönmüleme kapasitesinin ve rijitliğinin azalmaya

başladığı noktalardaki lokal eğimleri ifade etmektedir. Bu çalışmada, her bir performans seviyesi: HK, CG, GÖ, SH, KH için elde edilen yük-deplasman eğrileri üzerinden, ilgili aralıklardaki türevsel rijitlikler belirlenmiştir. Böylece, sistemin yalnızca ilk tepki davranışı değil, aynı zamanda artan deformasyonlarla birlikte ortaya çıkan mekanik özellik değişimleri de ortaya konmuştur.

Söz konusu performans seviyeleri, her bir yapı elemanının maruz kalabileceği maksimum hasar düzeyine göre tanımlandığından, bu seviyelere ait ikinci rijitlik değerleri, sistemin mevcut dayanım kapasitesinin ve deformasyon kabiliyetinin değerlendirilmesinde önemli bir ölçüt oluşturmaktadır. Özellikle tarihi yapılarda malzeme özelliklerinin ve detaylandırmaların farklılık göstermesi nedeniyle, bu rijitlik geçişlerinin doğru tanımlanması, performansa dayalı analizlerin doğruluğu açısından kritik önemdedir. Bu nedenle, rijitlik değerleri her performans seviyesi için ayrı ayrı değerlendirilmiş ve yapı davranışı etap etap analiz edilmiştir.

Bu hesaplama mantığını açıklamak amacıyla aşağıda, kuvvet-yer değiştirme ilişkisine dayalı temsili bir grafik sunulmuş, grafik üzerinde birinci rijitlik, plastikleşme sonrası idealize edilen ikinci rijitlikler ve her bir performans seviyesi için karakteristik noktalar gösterilmiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 : Performans seviyelerine göre ikinci rijitlik hesaplama yaklaşımı.

Rijitlik grafiklerinde, yapının elastik davranış bölgesine ait rijitlik değeri ile farklı performans seviyelerinde tanımlanan ikinci rijitlik (sekant rijitlik) değerleri birlikte sunulmaktadır. Her bir yükleme adımında sistemin rijitliği, en üstte elastik rijitlik ($K_{elastik}$) olmak üzere, ilgili yönetmelikteki performans seviyelerine karşılık gelen sekant rijitlikler ile kademeli biçimde gösterilmiştir. Bu gösterim yükleme düzeyine ve hedef performans seviyesine bağlı olarak rijitlikte meydana gelen azalmaların izlenmesini sağlamaktadır.

Dikkat edilmesi gereken nokta, grafikte kullanılan renk skalası, rijitlik bileşenlerini açık renkten koyuya doğru sıralı biçimde göstermektedir. Bu renk geçişi, hem rijitlik düzeyini hem de yapının performans seviyelerine göre geçirdiği yapısal değişimi temsil etmektedir.

Açık ton: Kelastik (Elastik Rijitlik).

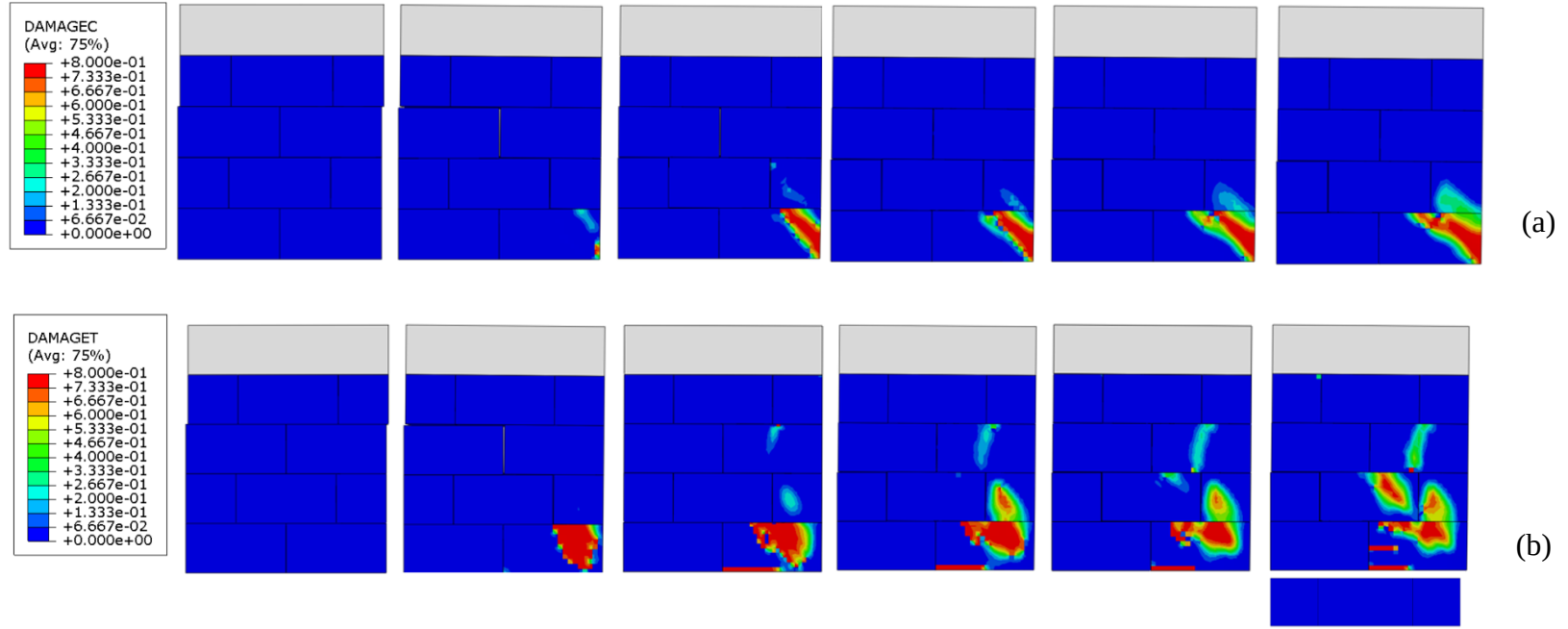
Orta açık ton: KHK / KSH (Hemen Kullanım / Sınırlı Hasar Performans Seviyesi Rijitliği).

Orta koyu ton: KCG / KKH (Can Güvenliği / Kontrollü Hasar Performans Seviyesi Rijitliği).

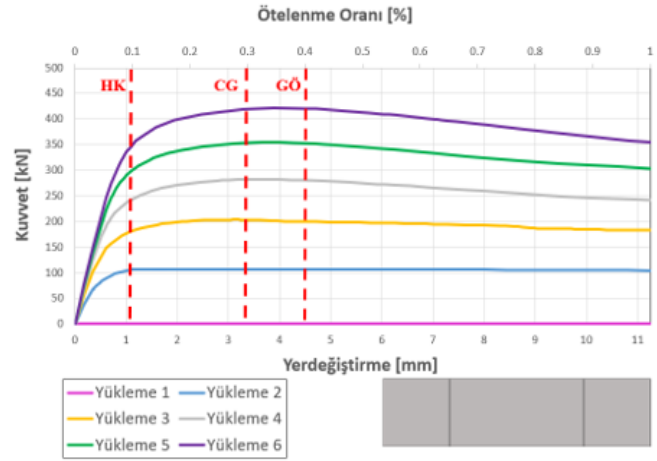
Koyu ton: KGÖ (Göçmenin Önlenmesi Performans Seviyesi Rijitliği).

5.3 Performans Seviyeleri ve Hasar Gelişimi İncelenmesi: 12 Model Üzerinden Değerlendirme

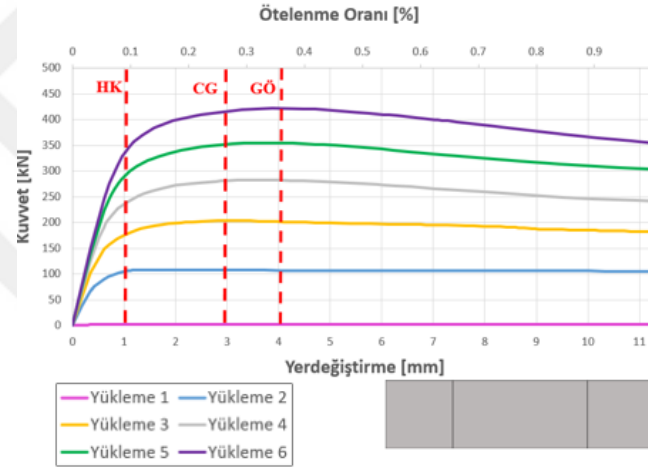
5.3.1 Taş model



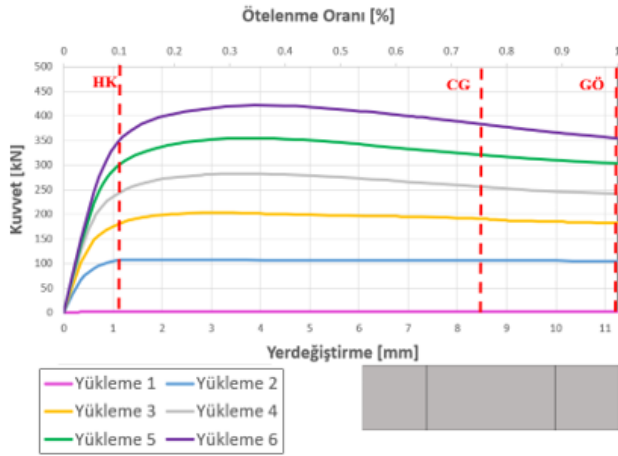
Şekil 5.3 : Taş model için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yüklemeler 1, Yüklemeler 2, Yüklemeler 3, Yüklemeler 4, Yüklemeler 5 ve Yüklemeler 6'ya karşılık gelmektedir.



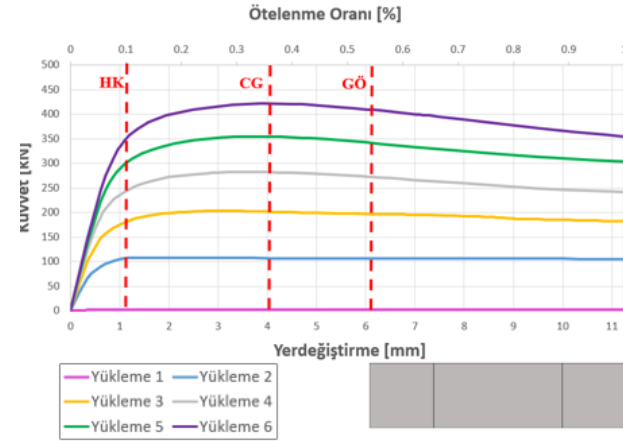
(a)



(b)

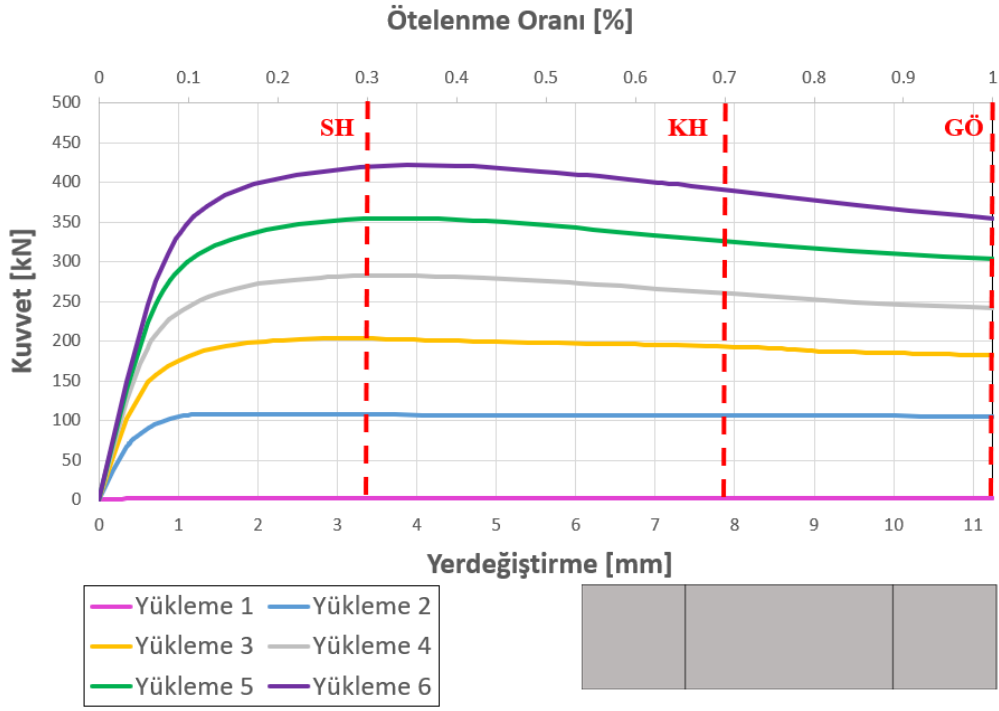


(c)

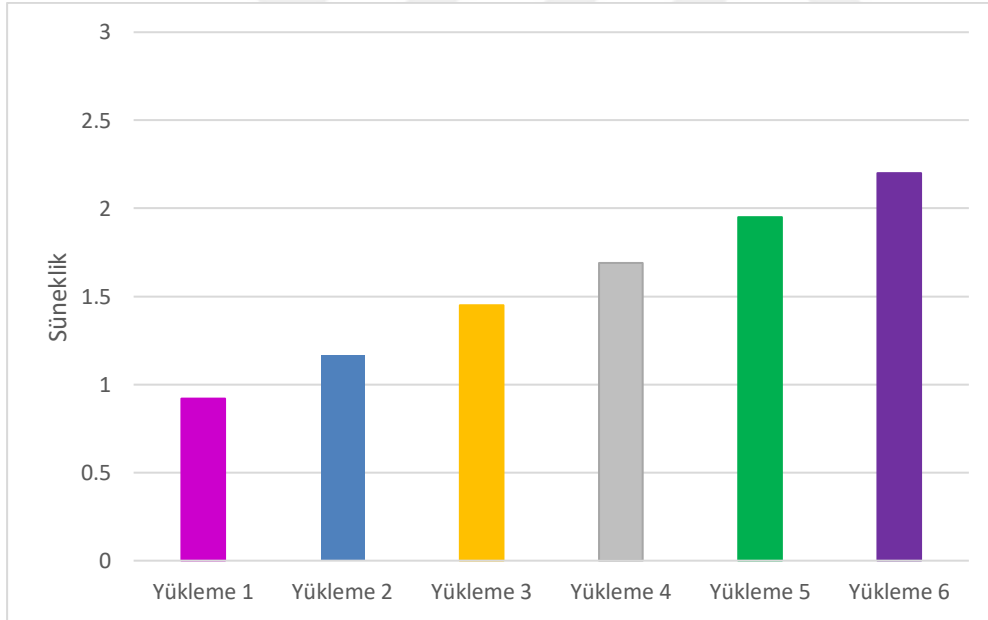


(d)

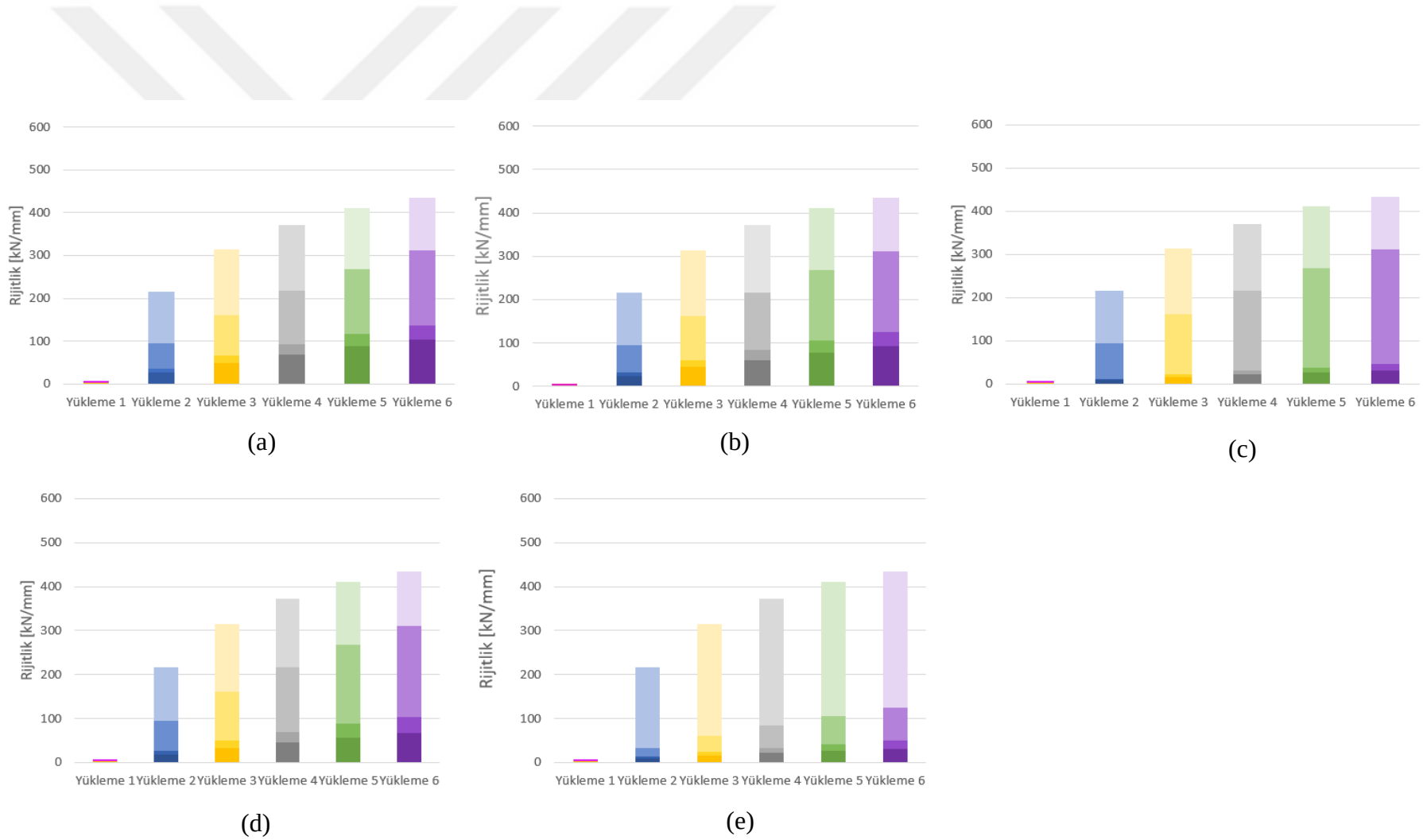
Şekil 5.4 : Taş Model için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.



Şekil 5.5 : Taş model için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.



Şekil 5.6 : Taş model için süneklik değerleri.



Şekil 5.7 : Taş model için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017'ye göre rijitlik değerleri.

Çizelge 5.1 : Taş Model için $P/P_{\max}$ değerleri.

FEMA 356 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.999	0.999	0.999
Yükleme 2	0.993	0.996	0.995
Yükleme 3	0.890	0.997	0.992
Yükleme 4	0.861	0.998	0.981
Yükleme 5	0.847	0.998	0.995
Yükleme 6	0.829	0.995	0.998

FEMA 356 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.999	0.999	0.999
Yükleme 2	0.992	0.996	0.999
Yükleme 3	0.890	0.999	0.997
Yükleme 4	0.861	0.995	0.987
Yükleme 5	0.847	0.992	0.987
Yükleme 6	0.829	0.987	0.999

ASCE 41- 23 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.999	0.999	0.999
Yükleme 2	0.992	0.987	0.973
Yükleme 3	0.890	0.938	0.906
Yükleme 4	0.862	0.906	0.857
Yükleme 5	0.847	0.906	0.857
Yükleme 6	0.829	0.911	0.840

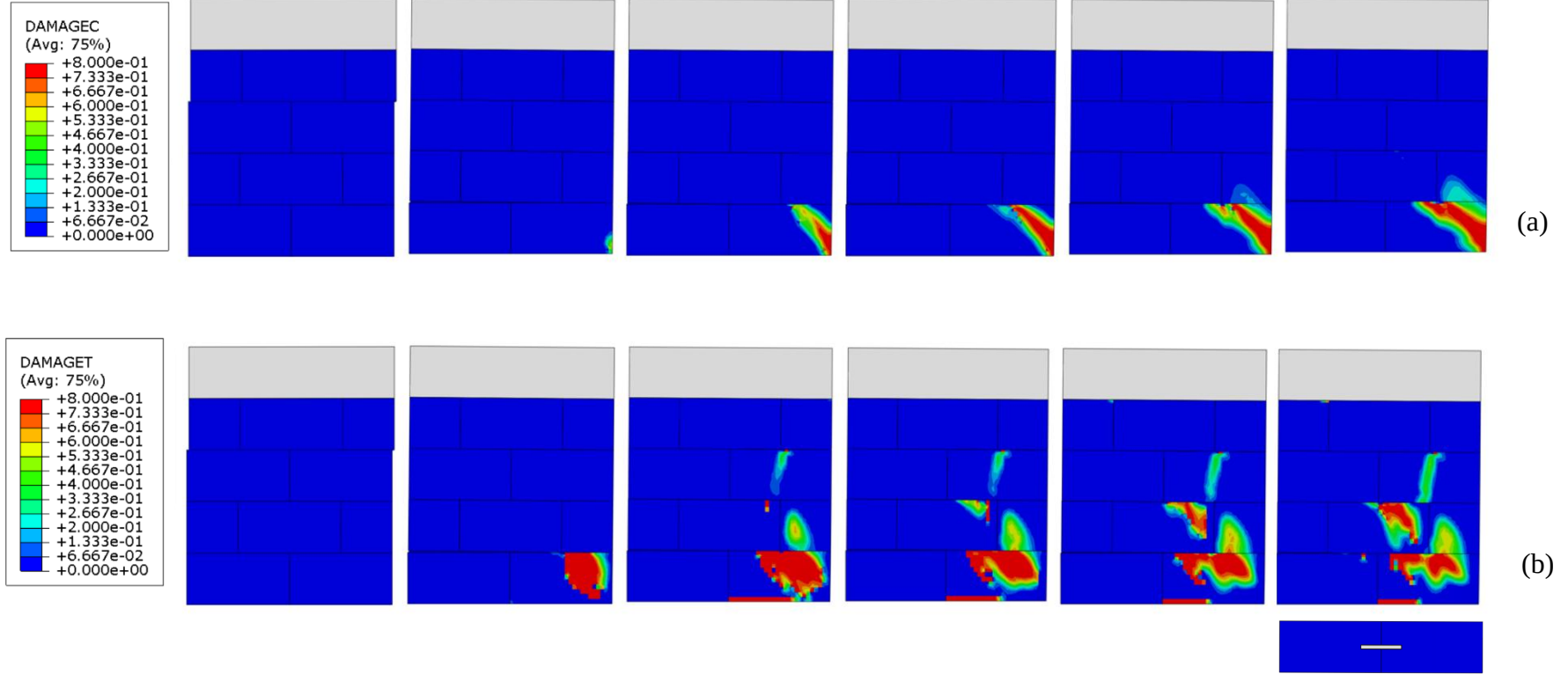
ASCE 41-23 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.999	0.999	0.999
Yükleme 2	0.992	0.996	0.992
Yükleme 3	0.890	0.987	0.967
Yükleme 4	0.862	0.997	0.964
Yükleme 5	0.847	0.999	0.963
Yükleme 6	0.829	0.999	0.999

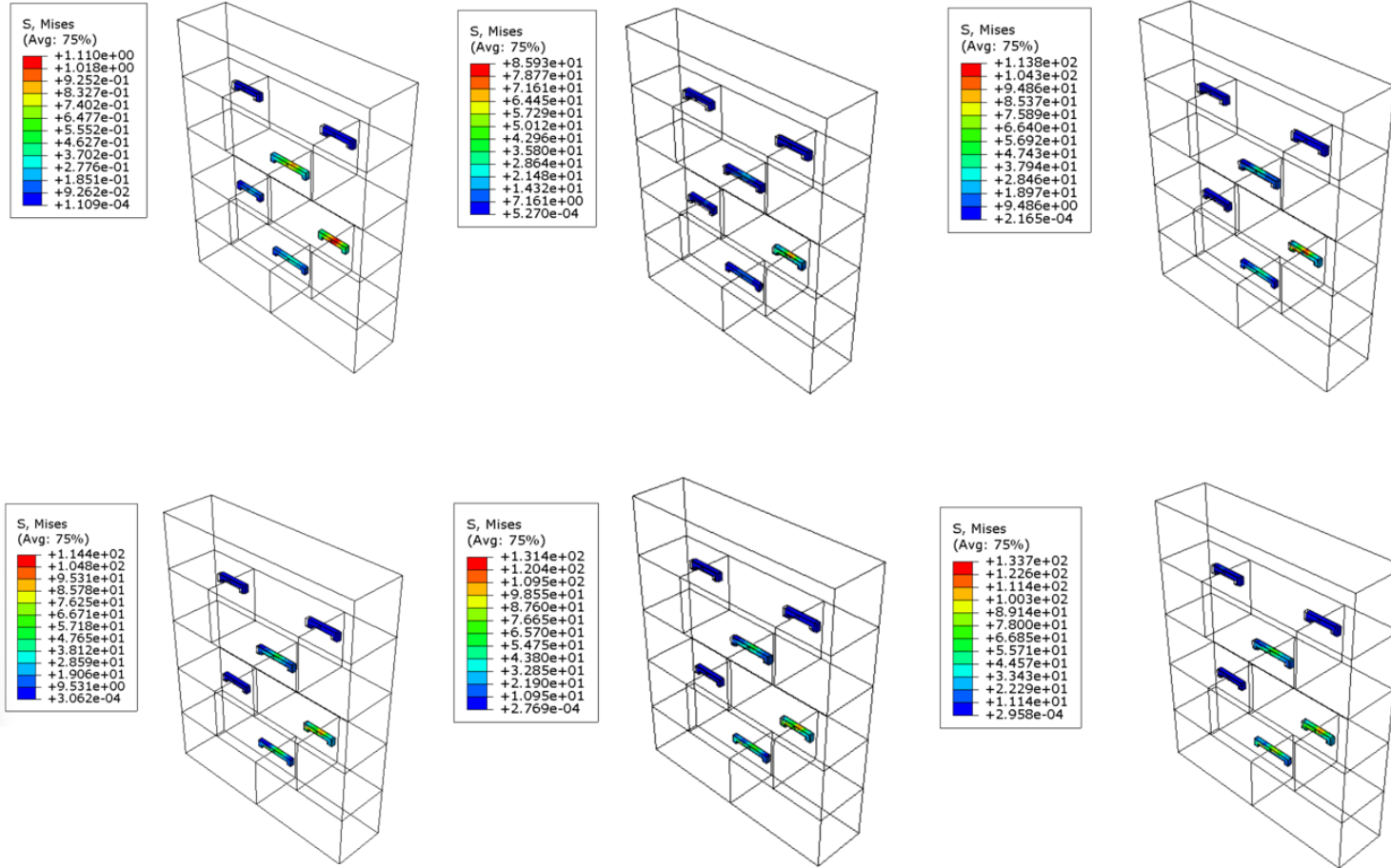
TYDRYK 2017

Yükleme	SH	KH	GÖ
Yükleme 1	0.999	0.999	0.999
Yükleme 2	0.996	0.988	0.973
Yükleme 3	0.997	0.947	0.804
Yükleme 4	0.998	0.920	0.856
Yükleme 5	0.997	0.919	0.857
Yükleme 6	0.995	0.927	0.840

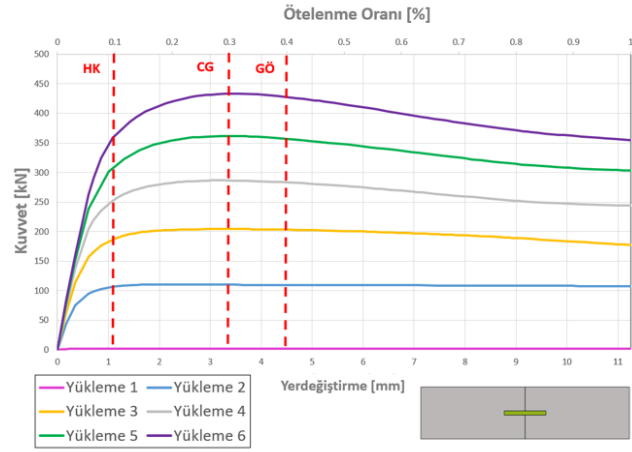
5.3.2 Kenet model



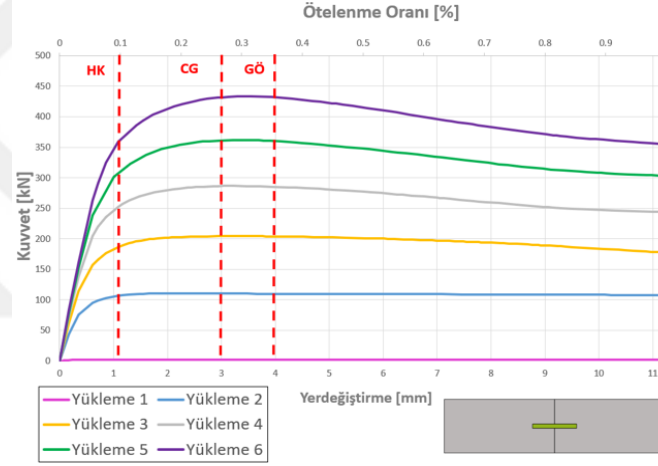
Şekil 5.8 : Kenet model için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4 Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.



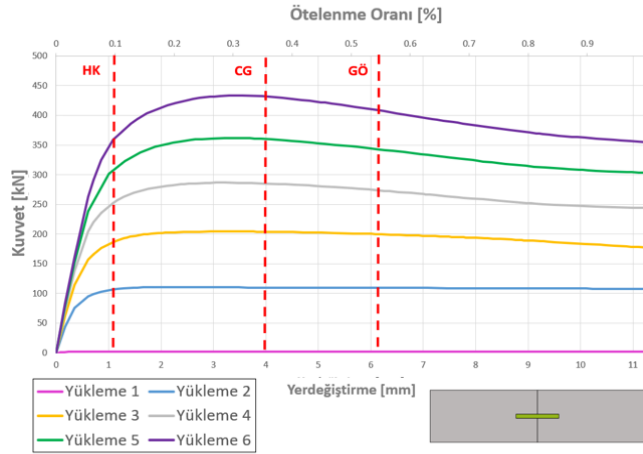
Şekil 5.9 : Kenet modelde demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3 üst sırada; Yükleme 4 Yükleme 5 ve Yükleme 6 alt sırada sunulmuştur.



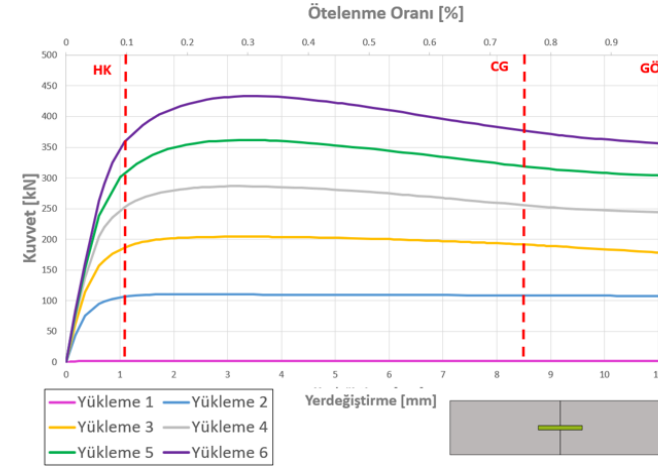
(a)



(b)

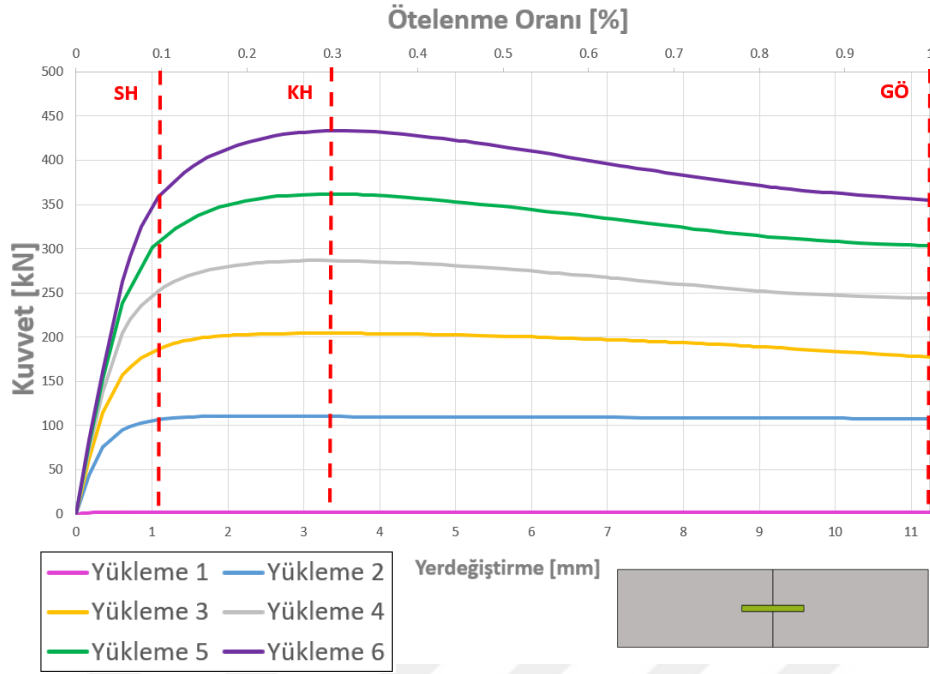


(c)

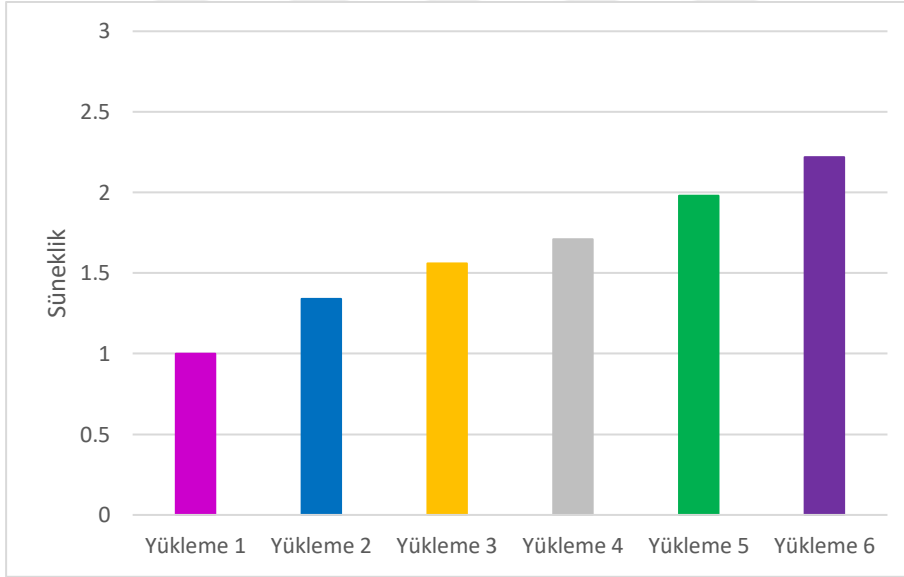


(d)

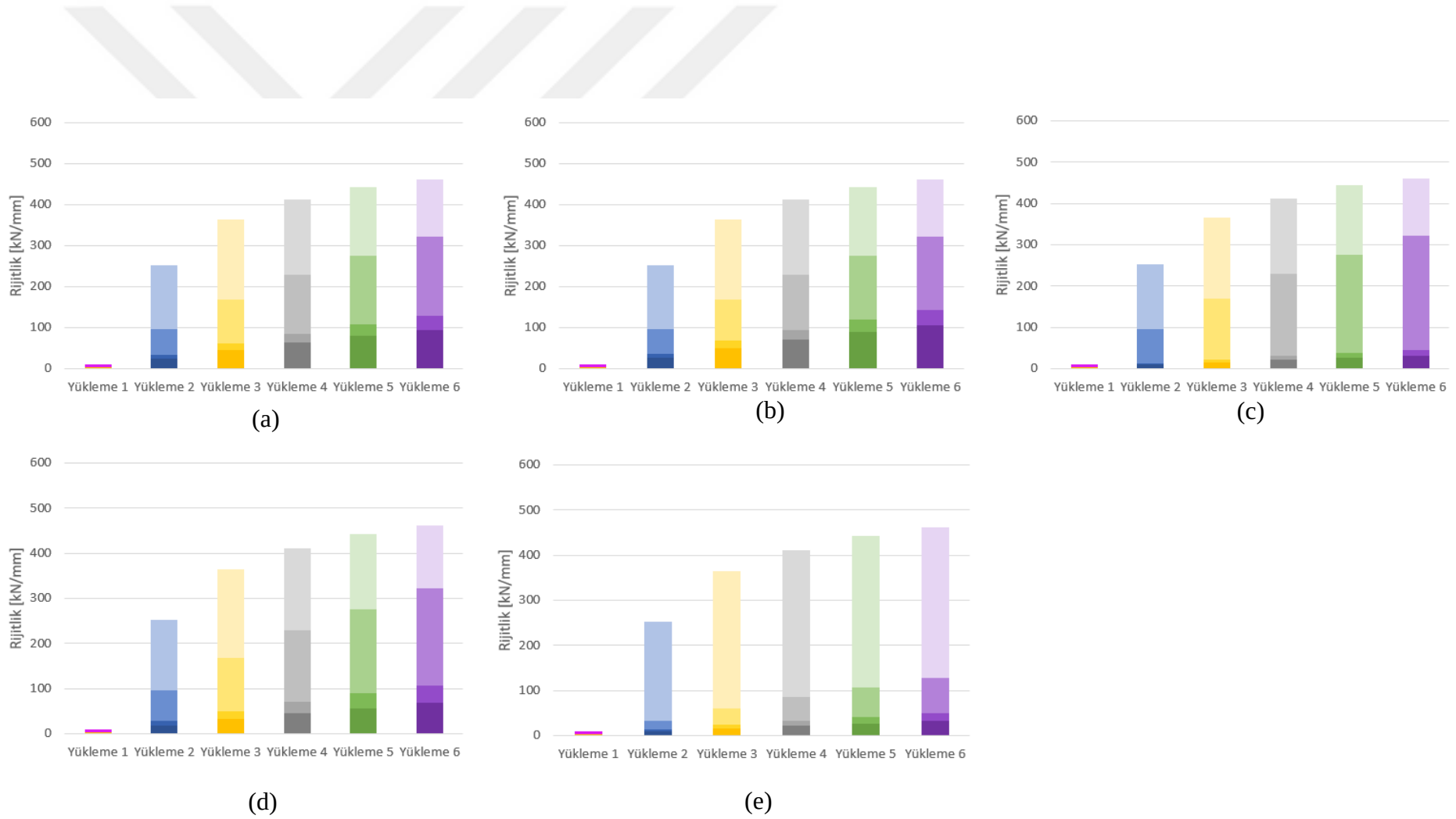
Şekil 5.10 : Kenet model için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.



Şekil 5.11 : Kenet model için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.



Şekil 5.12 : Kenet model için süneklik değerleri.



Şekil 5.13 : Kenet model için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017'ye göre rijitlik değerleri.

Çizelge 5.2 : Kenet Model $P/P_{\max}$ değerleri.

FEMA 356 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.990	0.989	0.989
Yükleme 2	0.972	0.998	0.995
Yükleme 3	0.927	0.999	0.995
Yükleme 4	0.897	0.999	0.988
Yükleme 5	0.856	0.999	0.987
Yükleme 6	0.835	0.999	0.987

FEMA 356 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.990	0.989	0.989
Yükleme 2	0.972	0.998	0.996
Yükleme 3	0.927	0.999	0.998
Yükleme 4	0.897	0.999	0.994
Yükleme 5	0.856	0.998	0.994
Yükleme 6	0.835	0.997	0.995

ASCE 41- 23 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.990	0.988	0.987
Yükleme 2	0.972	0.986	0.975
Yükleme 3	0.927	0.949	0.868
Yükleme 4	0.897	0.908	0.851
Yükleme 5	0.856	0.898	0.838
Yükleme 6	0.835	0.887	0.818

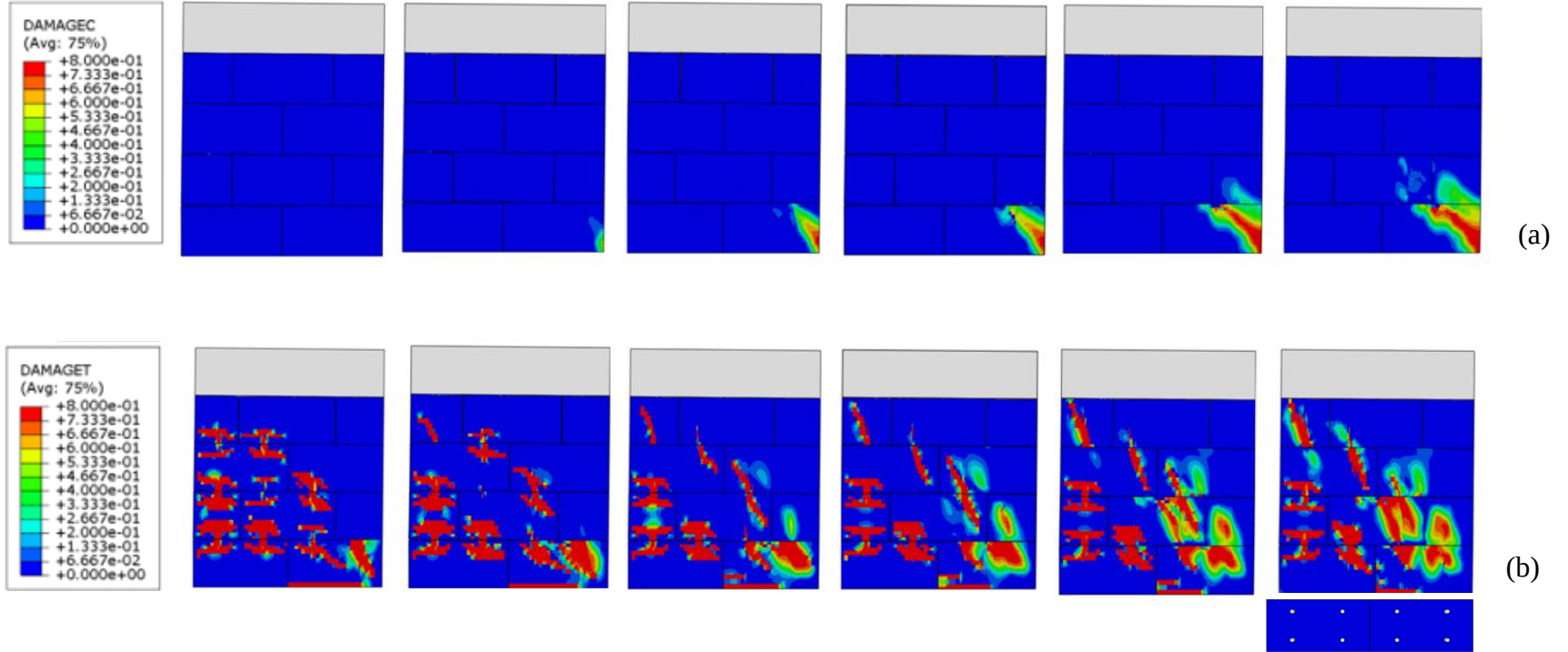
ASCE 41-23 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.990	0.989	0.988
Yükleme 2	0.972	0.996	0.991
Yükleme 3	0.927	0.998	0.977
Yükleme 4	0.897	0.994	0.956
Yükleme 5	0.856	0.994	0.949
Yükleme 6	0.835	0.995	0.944

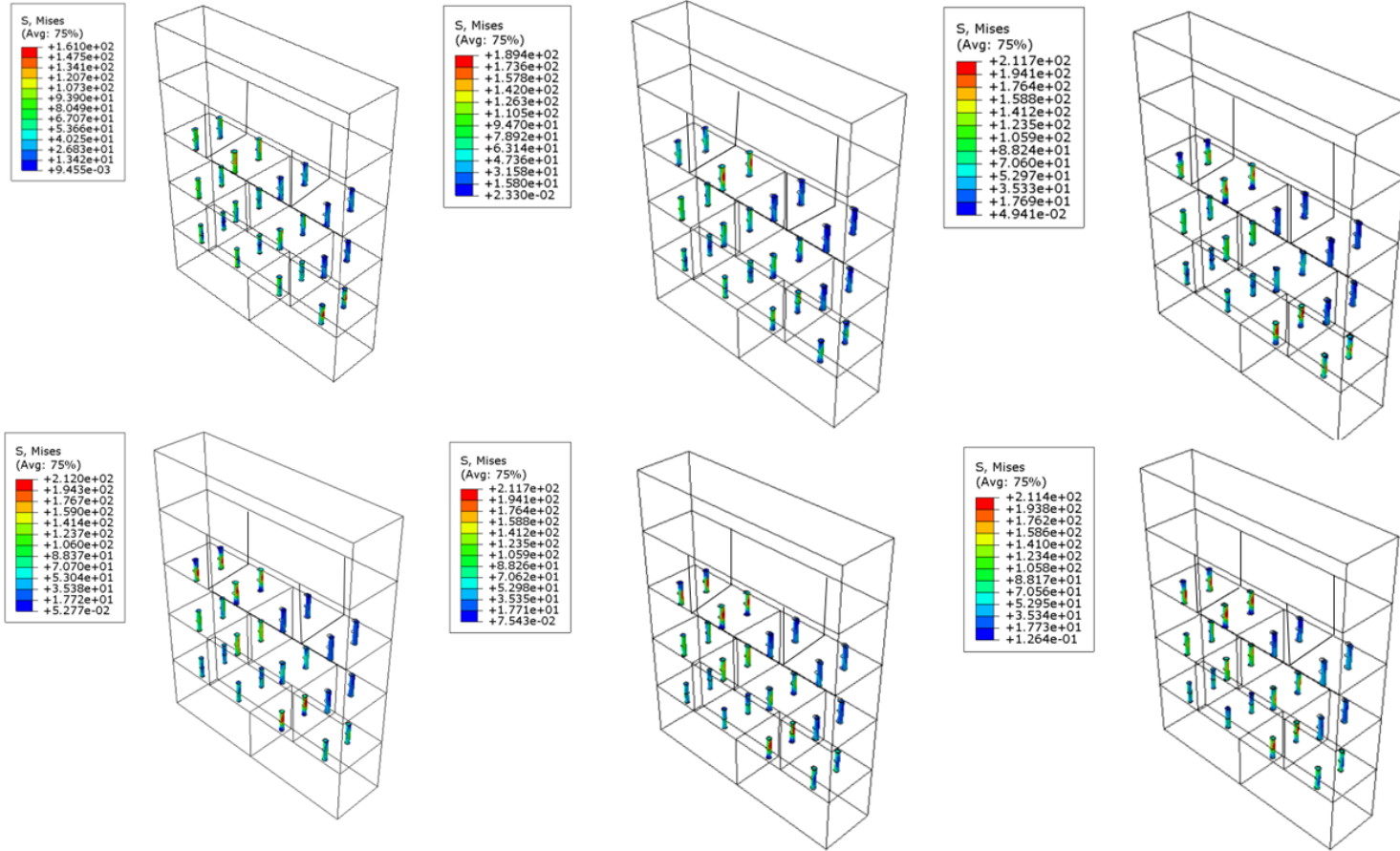
TYDRYK 2017

Yükleme	SH	KH	GÖ
Yükleme 1	0.999	0.988	0.987
Yükleme 2	0.996	0.986	0.975
Yükleme 3	0.997	0.949	0.868
Yükleme 4	0.998	0.908	0.851
Yükleme 5	0.997	0.898	0.838
Yükleme 6	0.995	0.887	0.818

5.3.3 Model 1 pim

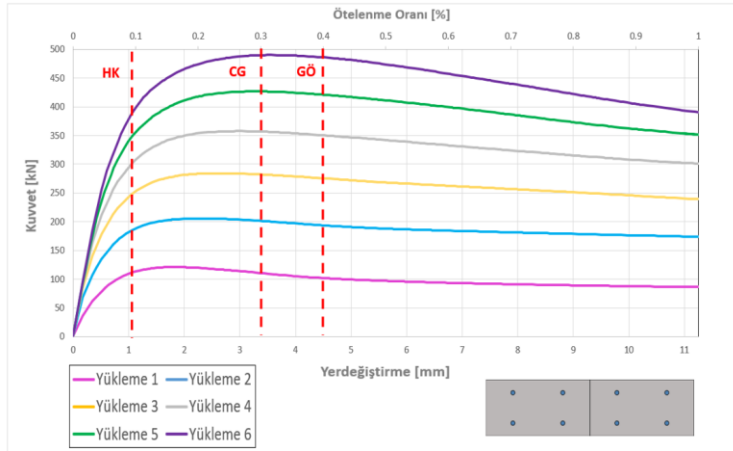


Şekil 5.14 : Model 1 pim için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yüklem 1, Yüklem 2, Yüklem 3, Yüklem 4, Yüklem 5 ve Yüklem 6'ya karşılık gelmektedir.

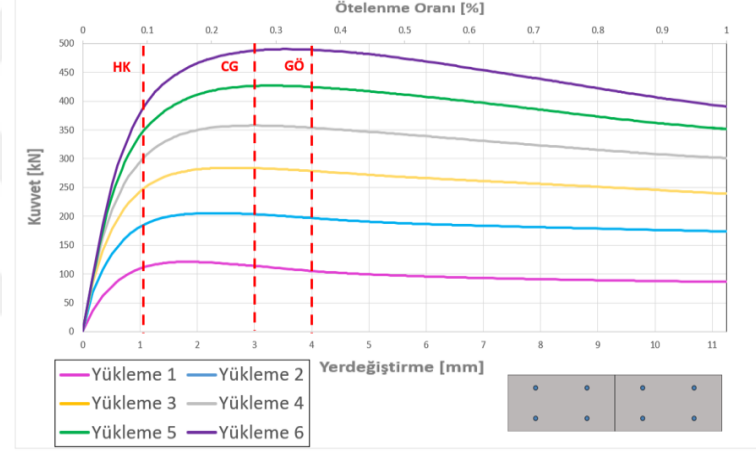


Şekil 5.15 : Model 1 pimdeki demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri.

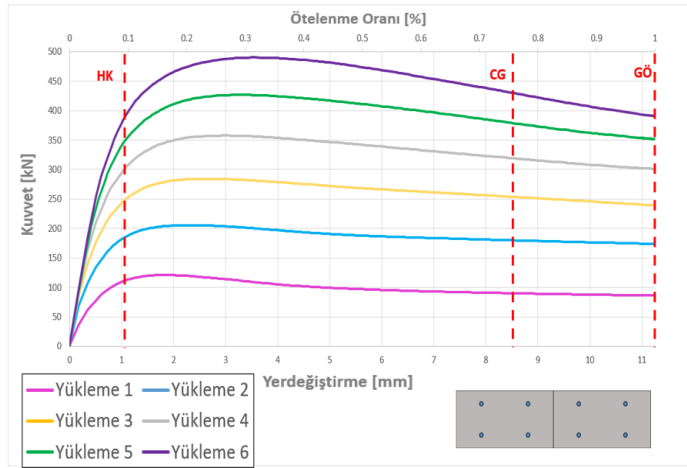
**Sırasıyla Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3 üst sırada; Yükleme 4 Yükleme 5 ve Yükleme 6 alt sırada sunulmuştur.*



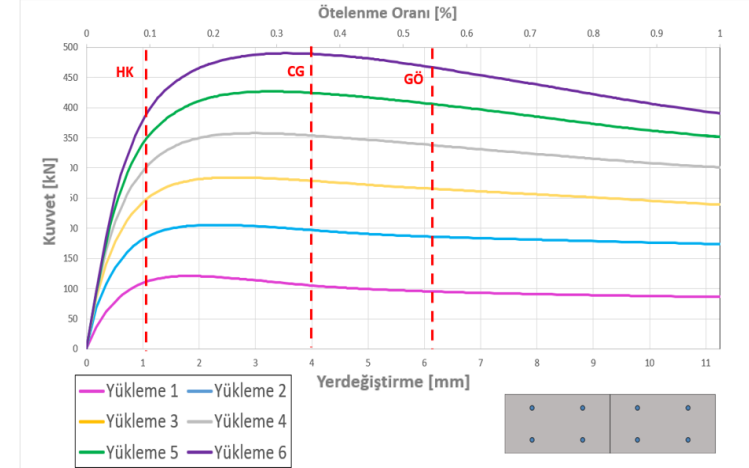
(a)



(b)

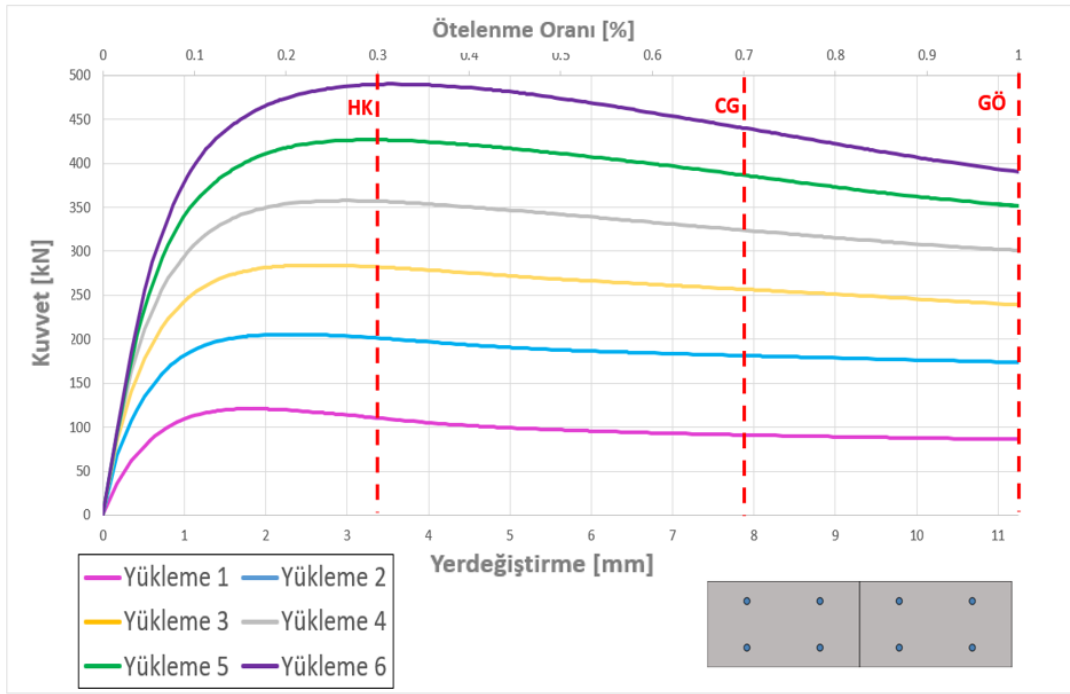


(c)

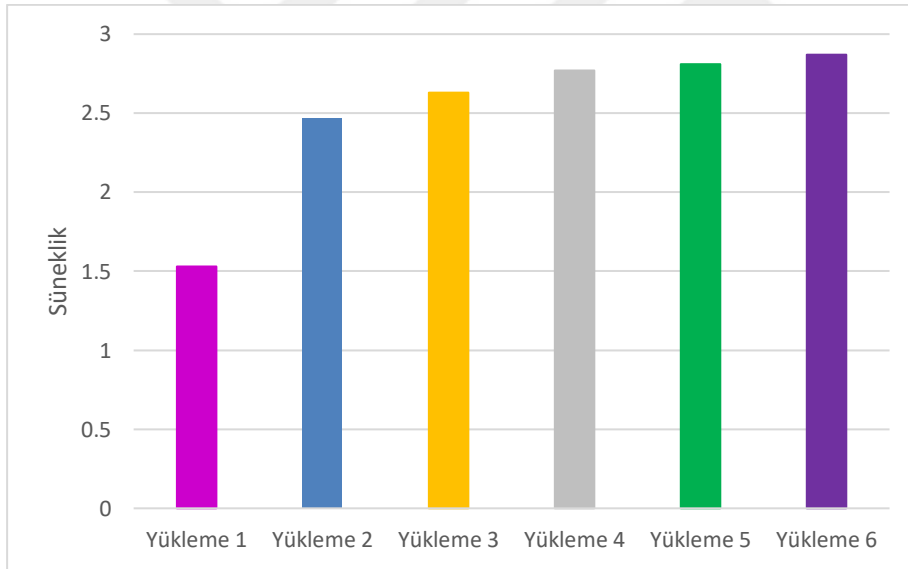


(d)

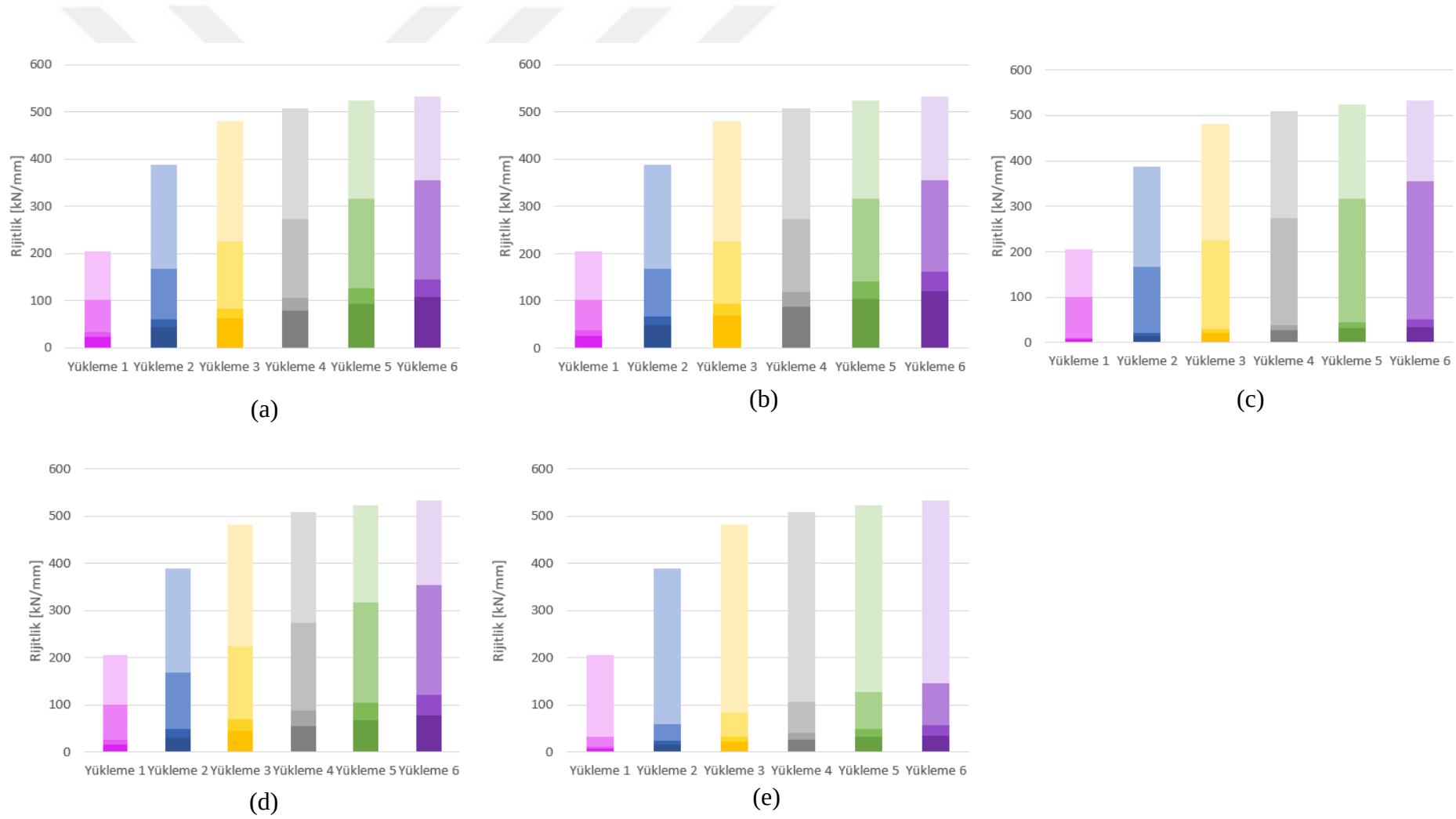
Şekil 5.16 : Model 1 pim için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.



Şekil 5.17 : Model 1 pim için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.



Şekil 5.18 : Model 1 pim için süneklik değerleri.

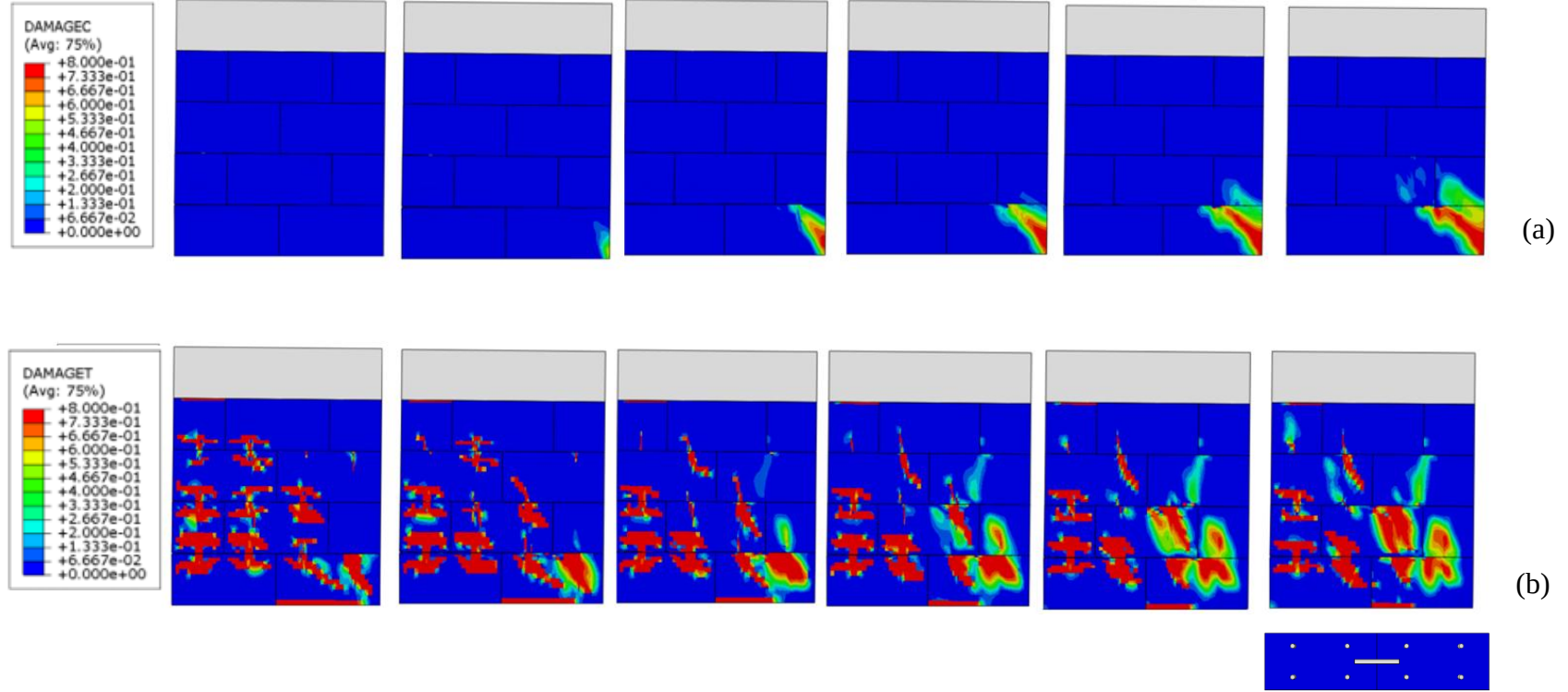


Şekil 5.19 : Model 1 pim için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017'ye göre rijitlik değerleri.

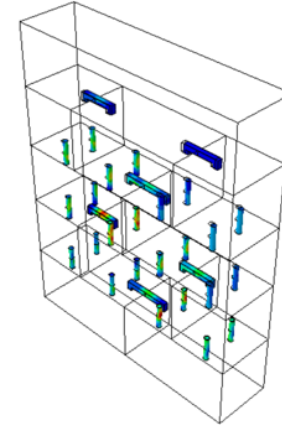
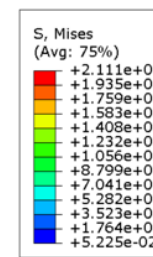
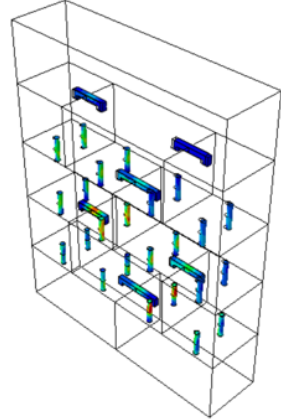
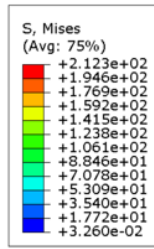
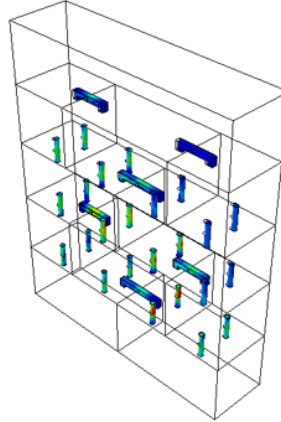
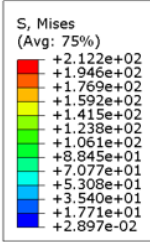
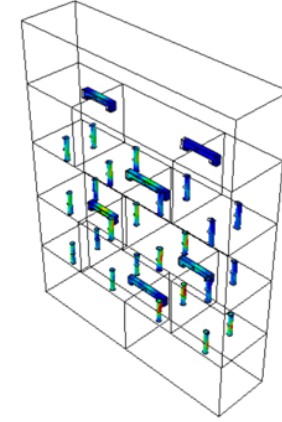
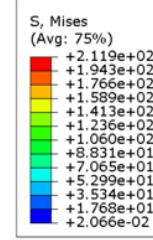
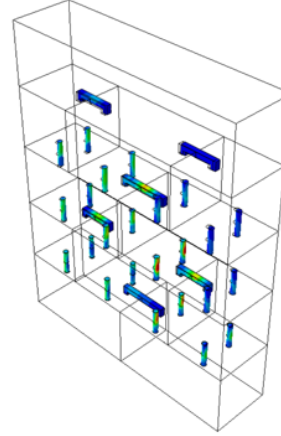
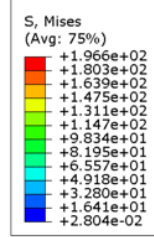
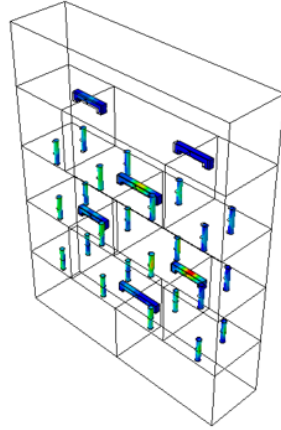
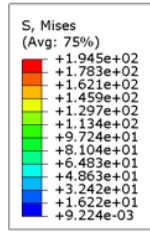
Çizelge 5.3 : Model 1 pim $P/P_{\max}$ değerleri.

FEMA 356 – Kayma Davranışı			
Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.937	0.915	0.842
Yükleme 2	0.915	0.981	0.942
Yükleme 3	0.888	0.992	0.979
Yükleme 4	0.859	0.998	0.980
Yükleme 5	0.833	0.999	0.987
Yükleme 6	0.813	0.999	0.991
FEMA 356 – Dönme Davranışı			
Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.937	0.939	0.867
Yükleme 2	0.915	0.989	0.956
Yükleme 3	0.888	0.998	0.980
Yükleme 4	0.859	0.999	0.988
Yükleme 5	0.833	0.999	0.994
Yükleme 6	0.813	0.996	0.997
ASCE 41- 23 – Kayma Davranışı			
Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.937	0.745	0.712
Yükleme 2	0.915	0.875	0.845
Yükleme 3	0.888	0.894	0.843
Yükleme 4	0.859	0.894	0.842
Yükleme 5	0.833	0.890	0.824
Yükleme 6	0.813	0.881	0.796
ASCE 41-23 – Dönme Davranışı			
Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.937	0.867	0.789
Yükleme 2	0.915	0.956	0.906
Yükleme 3	0.888	0.980	0.934
Yükleme 4	0.859	0.988	0.946
Yükleme 5	0.833	0.994	0.953
Yükleme 6	0.813	0.997	0.952
TYDRYK 2017			
Yükleme	SH	KH	GÖ
Yükleme 1	0.915	0.754	0.712
Yükleme 2	0.981	0.882	0.845
Yükleme 3	0.992	0.904	0.841
Yükleme 4	0.998	0.905	0.842
Yükleme 5	0.999	0.907	0.824
Yükleme 6	0.999	0.898	0.796

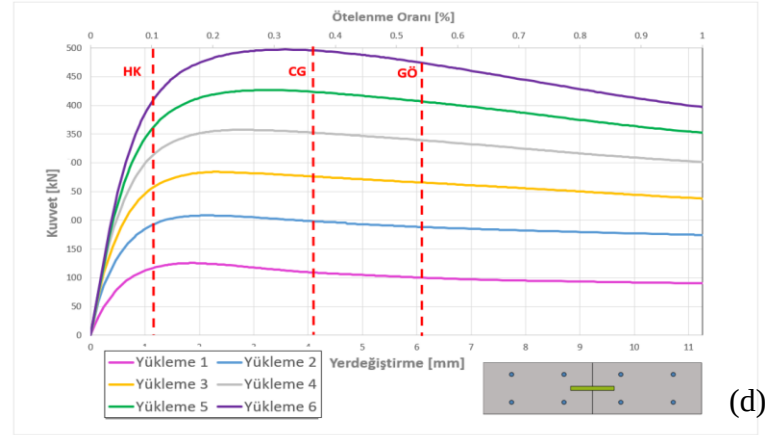
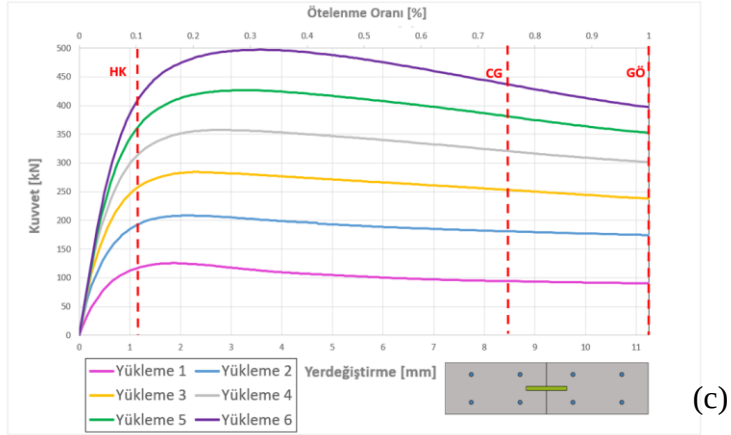
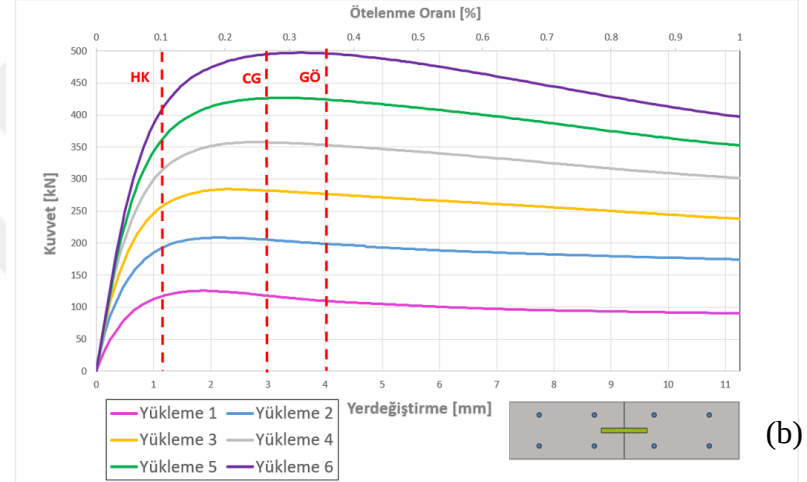
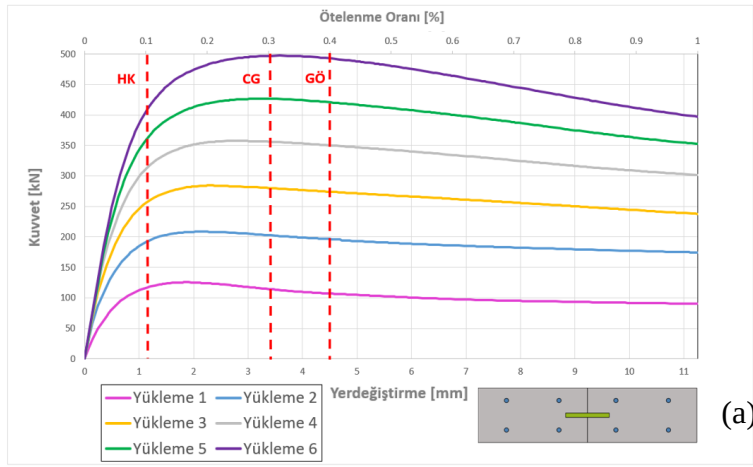
5.3.4 Model 1 hibrit



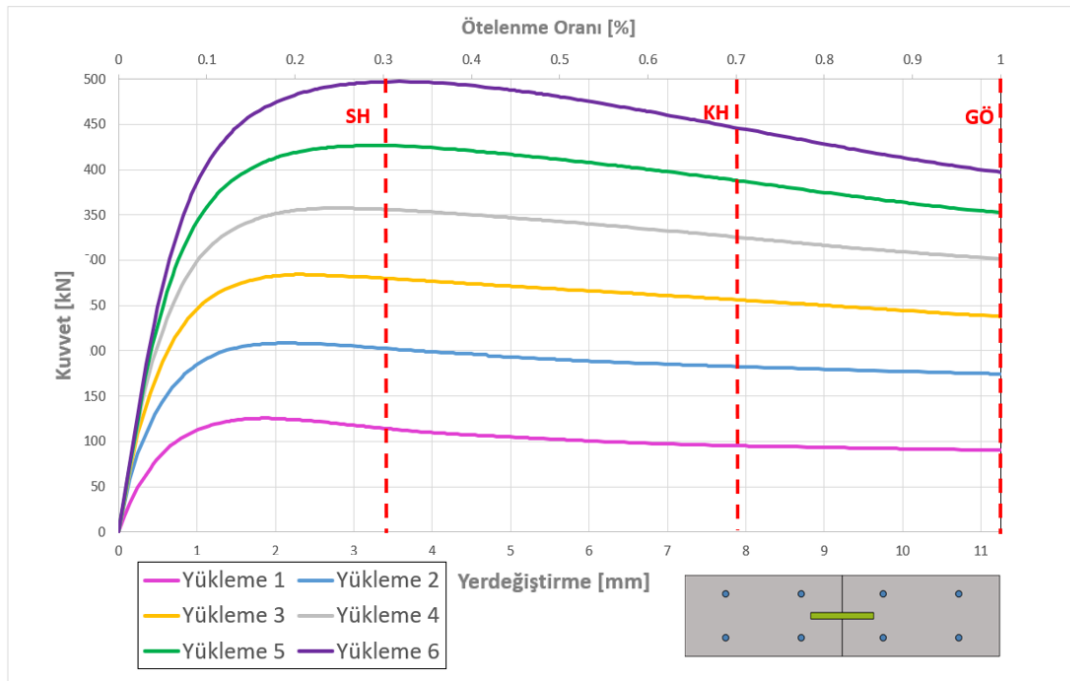
Şekil 5.20 : Model 1 hibrit için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yüklem 1, Yüklem 2, Yüklem 3, Yüklem 4, Yüklem 5 ve Yüklem 6'ya karşılık gelmektedir.



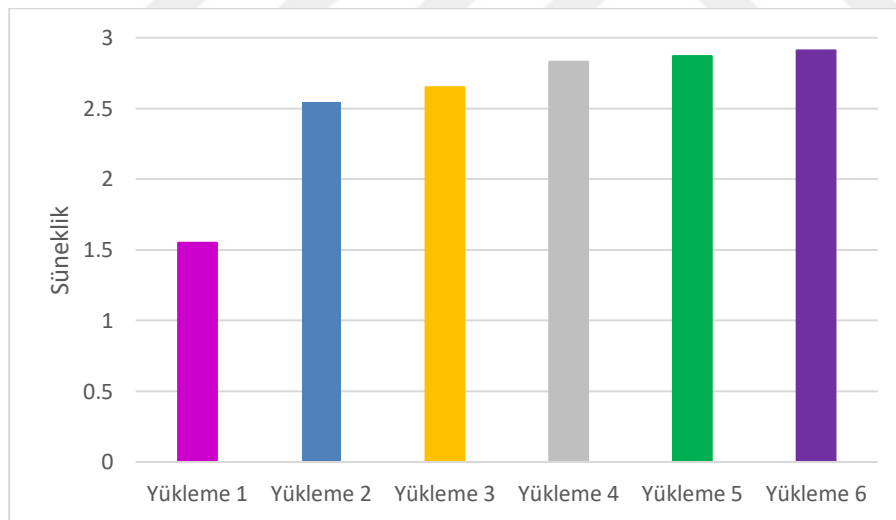
Şekil 5.21 : Model 1 hibritteki demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3 üst sırada; Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6 alt sırada sunulmuştur.



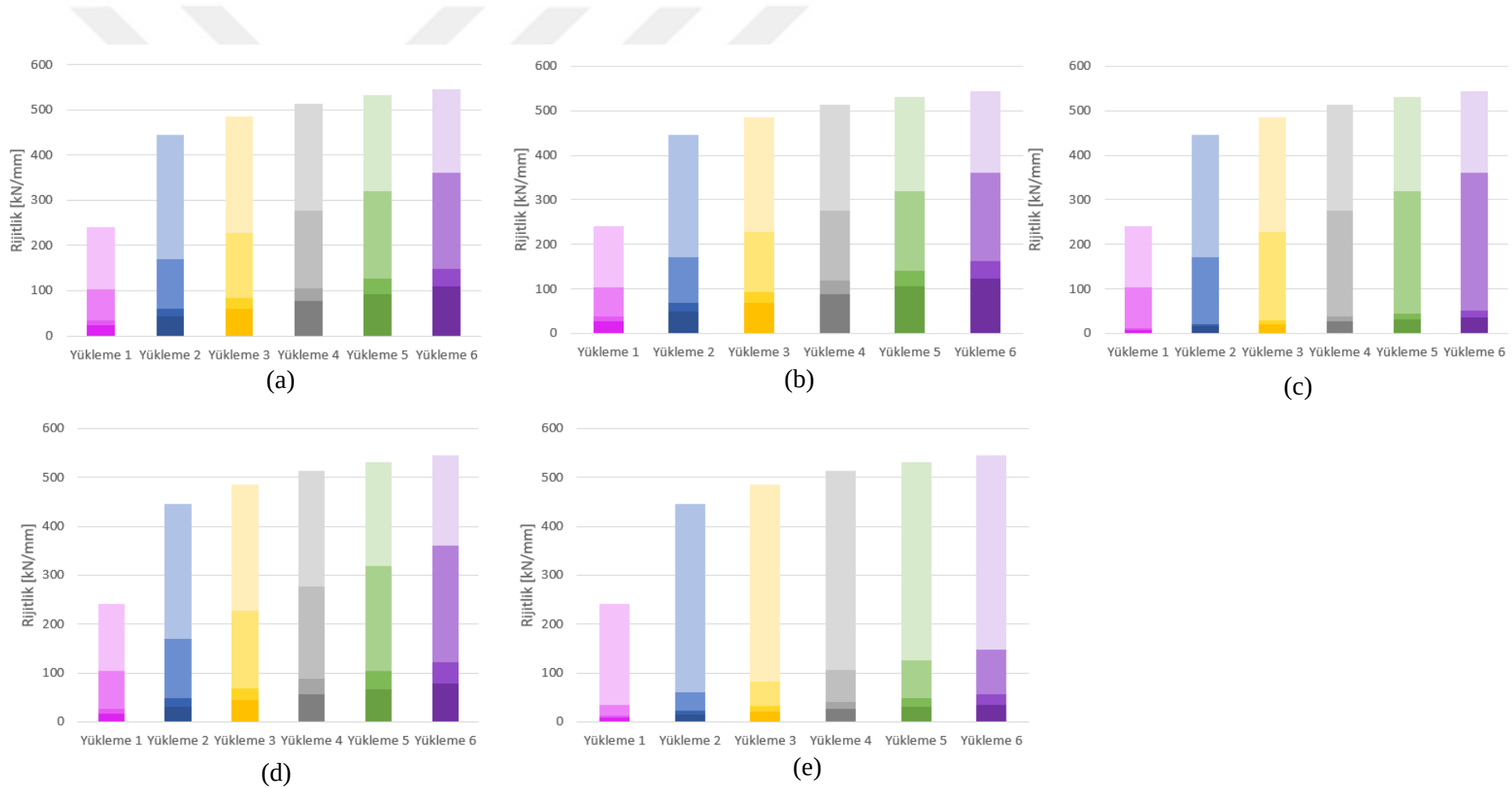
Şekil 5.22 : Model 1 hibrit için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.



Şekil 5.23 : Model 1 hibrit için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.



Şekil 5.24 : Model 1 hibrit için süneklik değerleri.

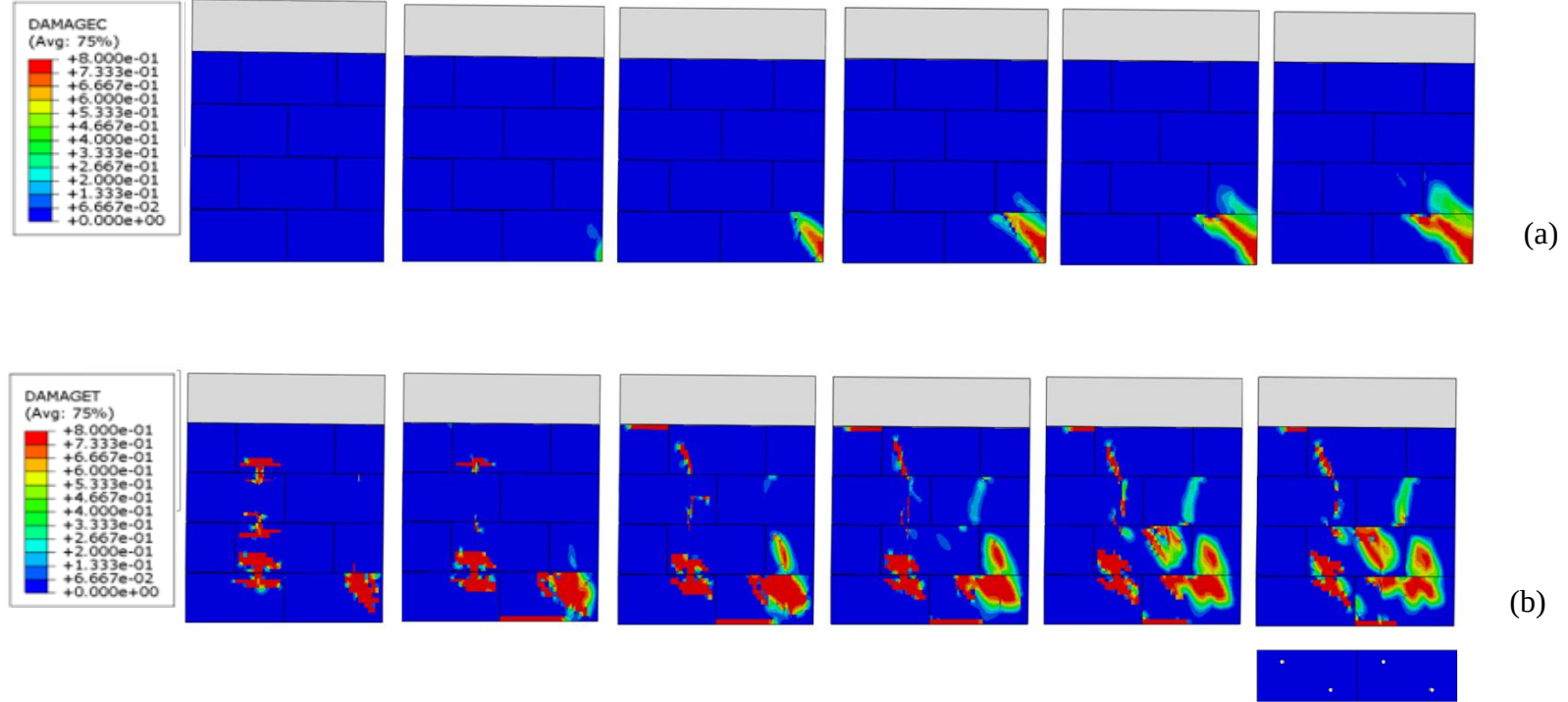


Şekil 5.25 : Model 1 hibrit için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356’ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23’e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017’ ye göre rijitlik değerleri.

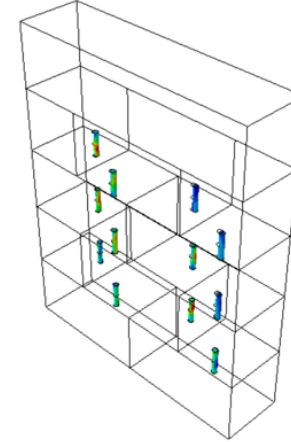
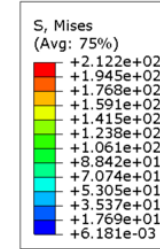
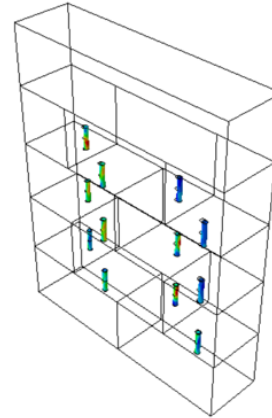
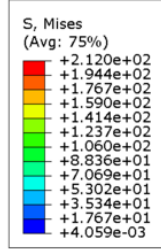
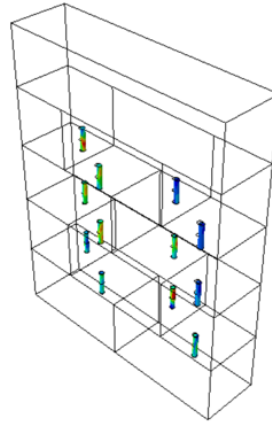
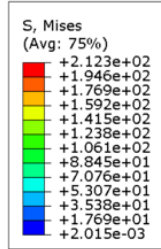
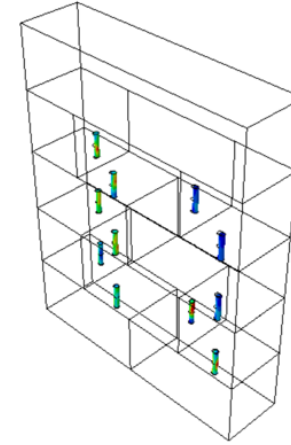
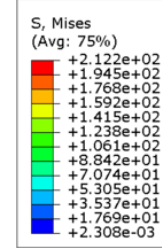
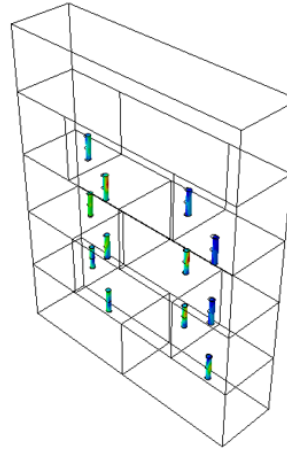
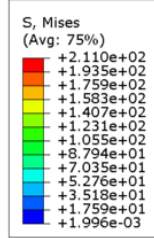
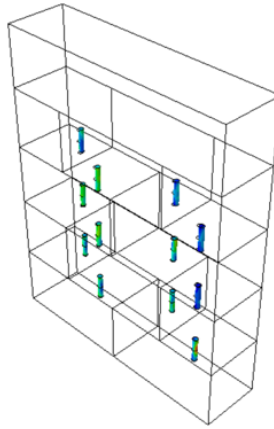
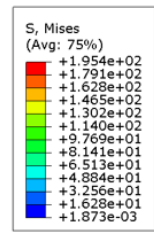
Çizelge 5.4 : Model 1 hibrit P/P_{max} değerleri.

FEMA 356 – Kayma Davranışı			
Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.926	0.911	0.852
Yükleme 2	0.919	0.971	0.942
Yükleme 3	0.898	0.985	0.963
Yükleme 4	0.870	0.996	0.979
Yükleme 5	0.842	0.999	0.986
Yükleme 6	0.816	0.999	0.990
FEMA 356 – Dönme Davranışı			
Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.926	0.935	0.870
Yükleme 2	0.919	0.984	0.953
Yükleme 3	0.898	0.991	0.972
Yükleme 4	0.870	0.999	0.988
Yükleme 5	0.842	0.999	0.993
Yükleme 6	0.816	0.996	0.996
ASCE 41- 23 – Kayma Davranışı			
Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.926	0.750	0.719
Yükleme 2	0.919	0.868	0.837
Yükleme 3	0.898	0.891	0.836
Yükleme 4	0.870	0.898	0.844
Yükleme 5	0.842	0.894	0.827
Yükleme 6	0.816	0.880	0.799
ASCE 41-23 – Dönme Davranışı			
Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.926	0.870	0.797
Yükleme 2	0.919	0.953	0.903
Yükleme 3	0.898	0.972	0.934
Yükleme 4	0.870	0.988	0.951
Yükleme 5	0.842	0.993	0.954
Yükleme 6	0.816	0.996	0.954
TYDRYK 2017			
Yükleme	SH	KH	GÖ
Yükleme 1	0.911	0.757	0.719
Yükleme 2	0.971	0.876	0.837
Yükleme 3	0.985	0.901	0.836
Yükleme 4	0.996	0.911	0.844
Yükleme 5	0.999	0.909	0.827
Yükleme 6	0.999	0.897	0.799

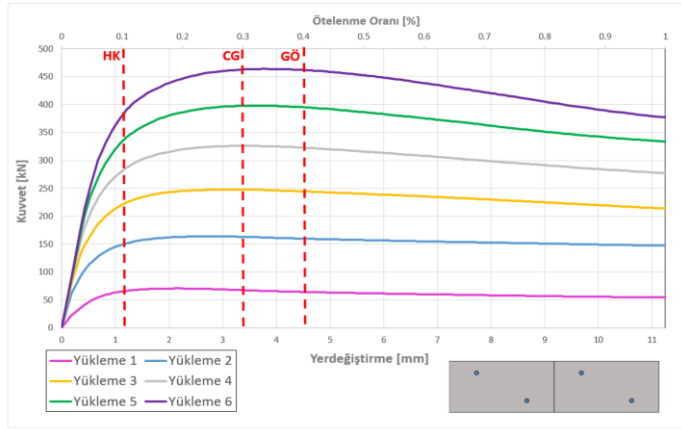
5.3.5 Model 2 pim



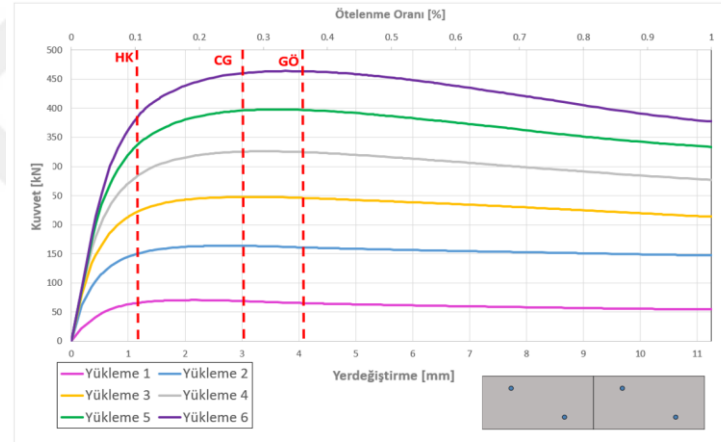
Şekil 5.26 : Model 2 pim için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4 Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.



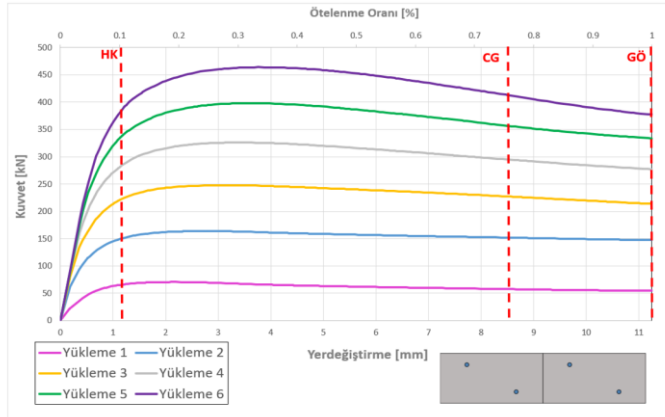
Şekil 5.27 : Model 2 pim demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3 üst sırada; Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6 alt sırada sunulmuştur.



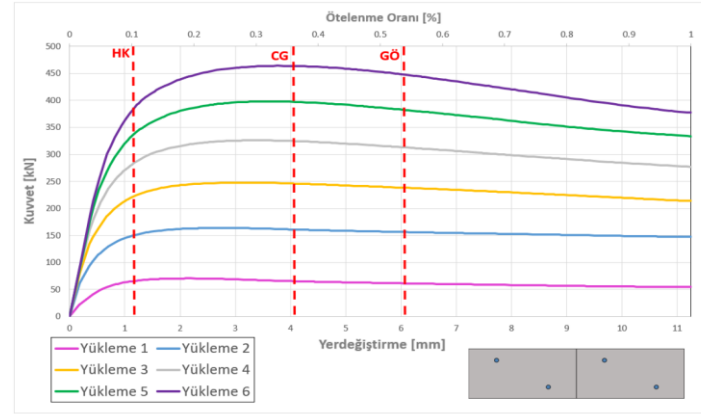
(a)



(b)

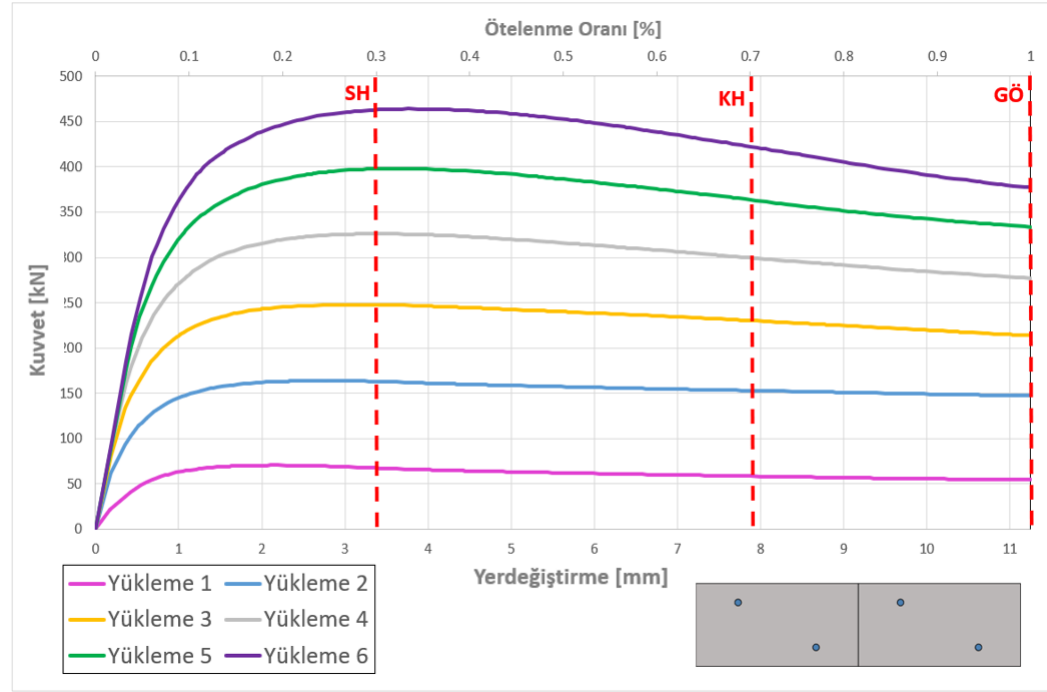


(c)

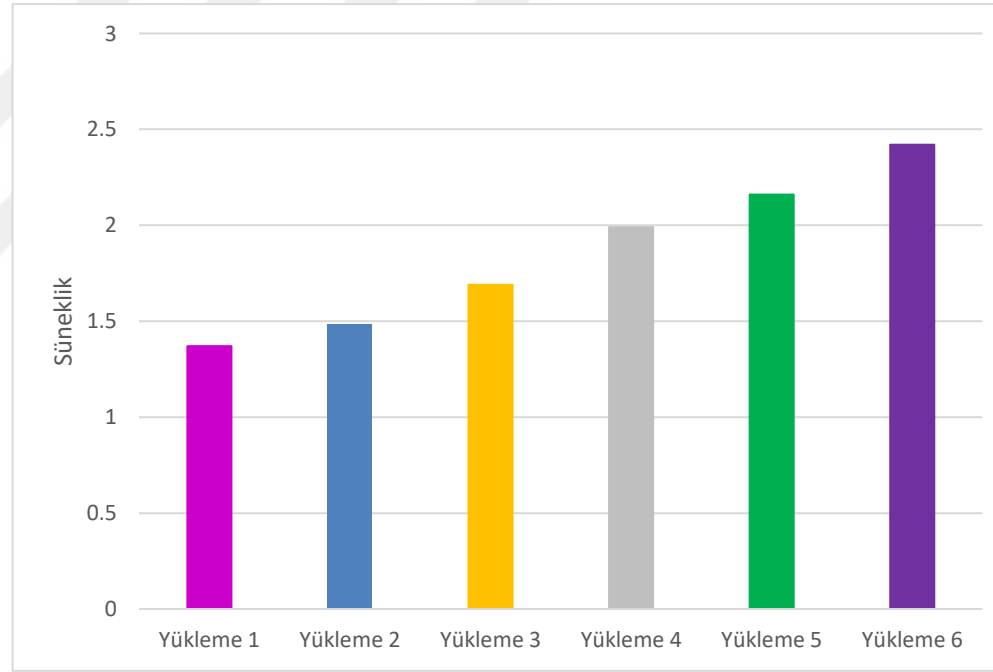


(d)

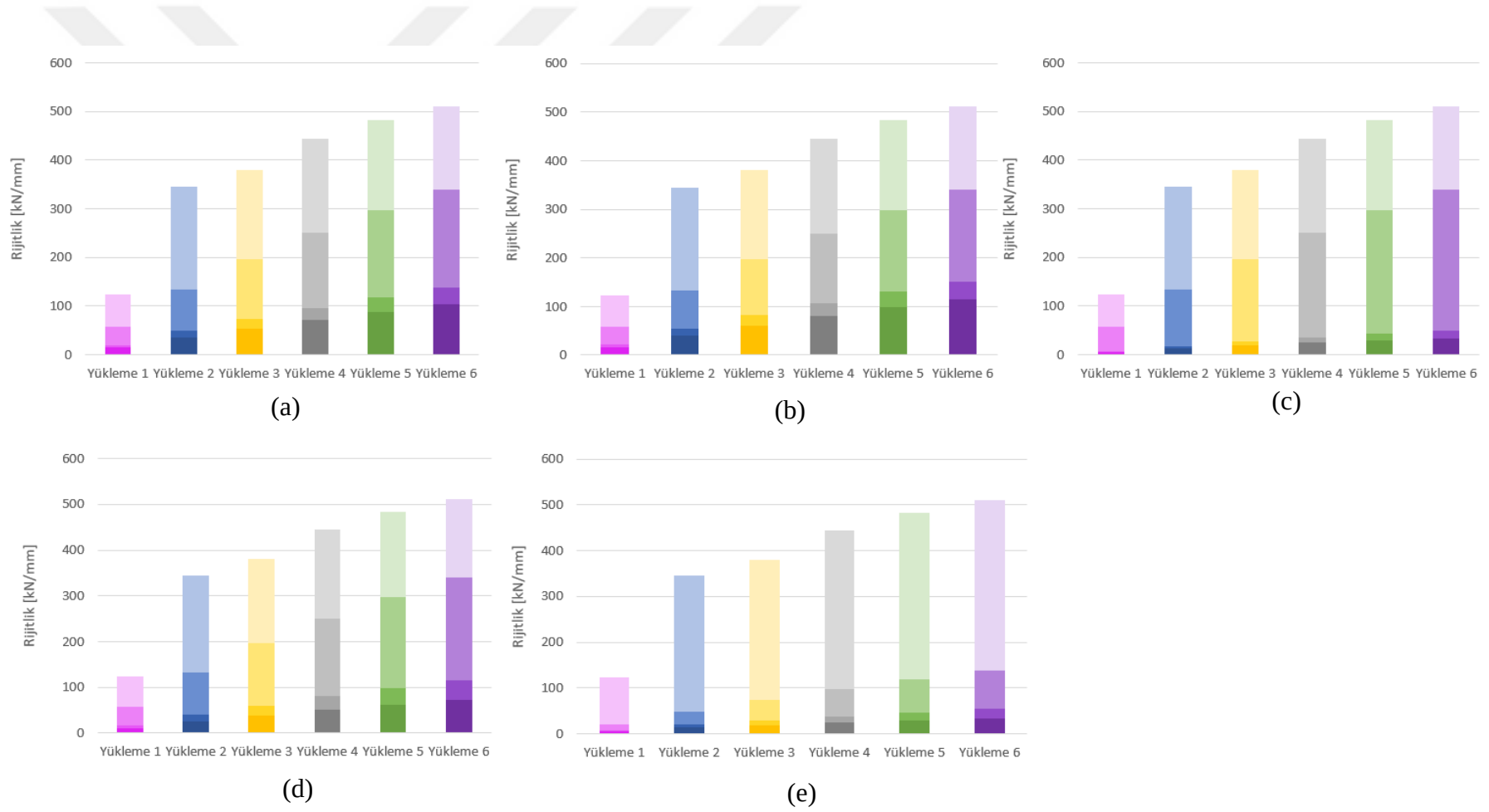
Şekil 5.28 : Model 2 pim için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.



Şekil 5.29 : Model 2 pim için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.



Şekil 5.30 : Model 2 pim için süneklik değerleri.



Şekil 5.31 : Model 2 pim için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017' ye göre rijitlik değerleri.

Çizelge 5.5 : Model 2 pim P/P_{max} değerleri.

FEMA 356 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.928	0.959	0.911
Yükleme 2	0.915	0.995	0.982
Yükleme 3	0.894	0.999	0.987
Yükleme 4	0.863	0.999	0.990
Yükleme 5	0.840	0.999	0.992
Yükleme 6	0.824	0.998	0.996

FEMA 356 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.928	0.975	0.927
Yükleme 2	0.915	0.999	0.982
Yükleme 3	0.894	0.999	0.993
Yükleme 4	0.863	0.999	0.996
Yükleme 5	0.840	0.996	0.998
Yükleme 6	0.824	0.993	0.999

ASCE 41- 23 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.928	0.817	0.772
Yükleme 2	0.915	0.928	0.898
Yükleme 3	0.894	0.919	0.863
Yükleme 4	0.863	0.907	0.850
Yükleme 5	0.840	0.899	0.837
Yükleme 6	0.824	0.891	0.813

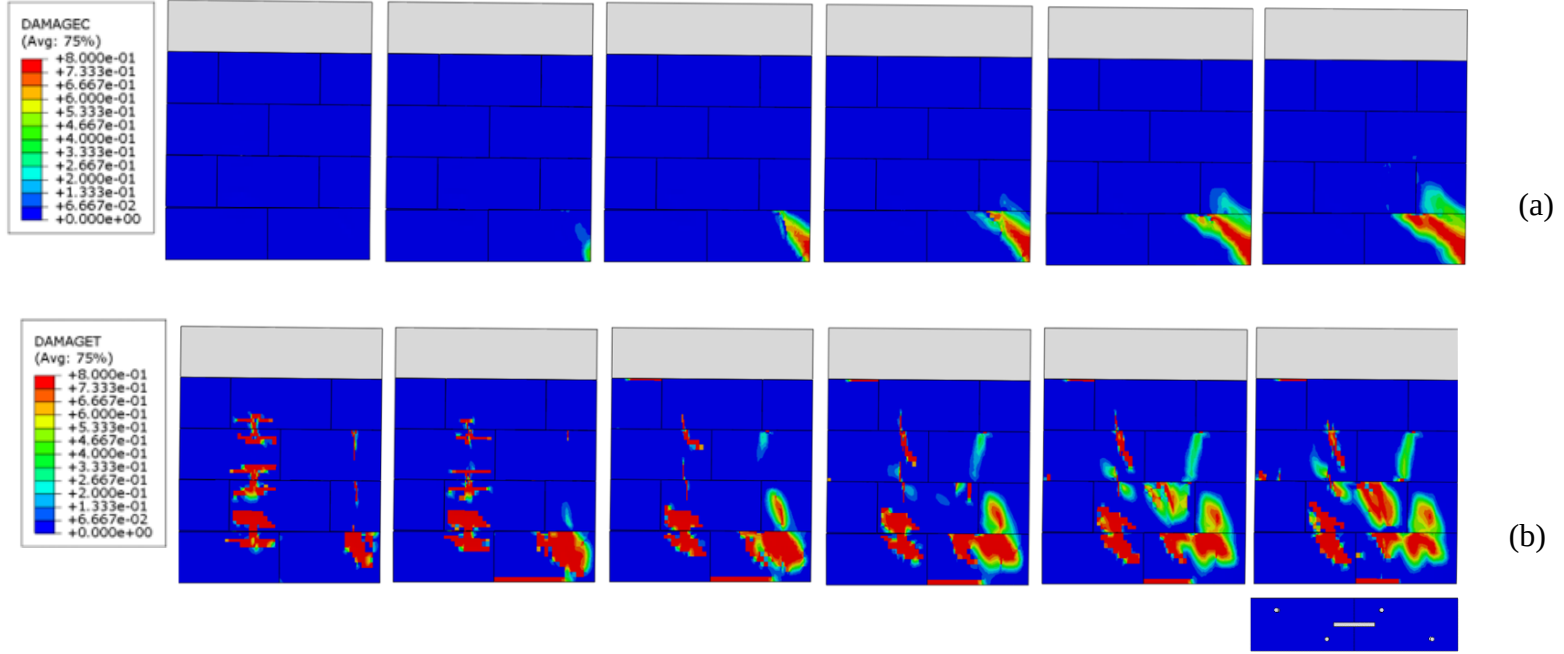
ASCE 41-23 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.928	0.927	0.870
Yükleme 2	0.915	0.982	0.954
Yükleme 3	0.894	0.993	0.962
Yükleme 4	0.863	0.996	0.959
Yükleme 5	0.840	0.998	0.960
Yükleme 6	0.824	0.999	0.964

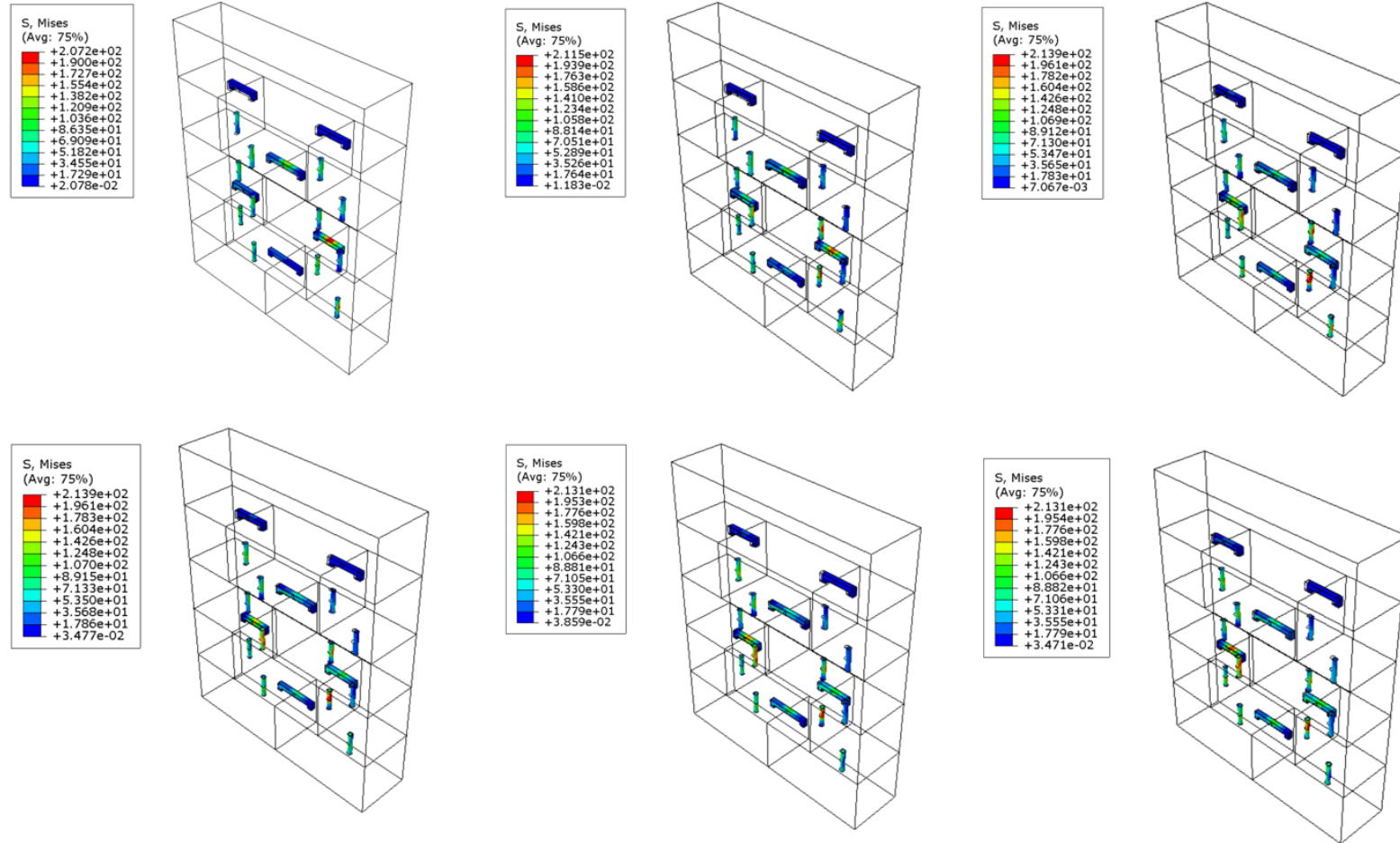
TYDRYK 2017

Yükleme	SH	KH	GÖ
Yükleme 1	0.959	0.830	0.772
Yükleme 2	0.995	0.933	0.898
Yükleme 3	0.999	0.929	0.863
Yükleme 4	0.999	0.919	0.850
Yükleme 5	0.999	0.912	0.837
Yükleme 6	0.998	0.910	0.813

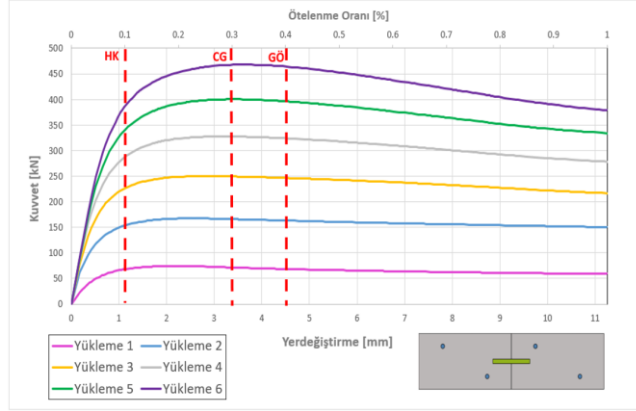
5.3.6 Model 2 hibrit



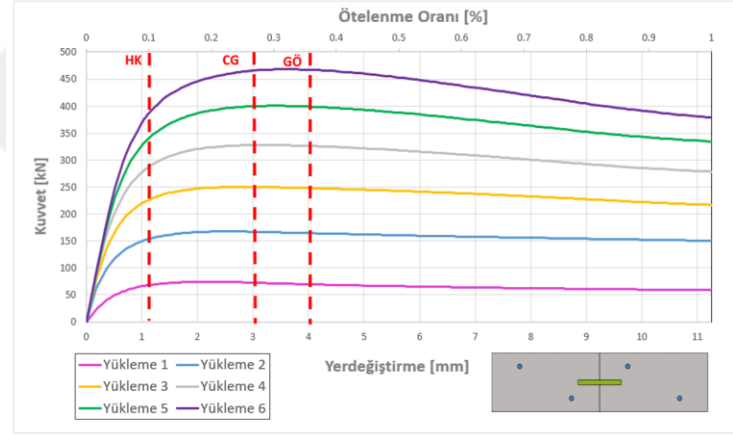
Şekil 5.32 : Model 2 hibrit için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.



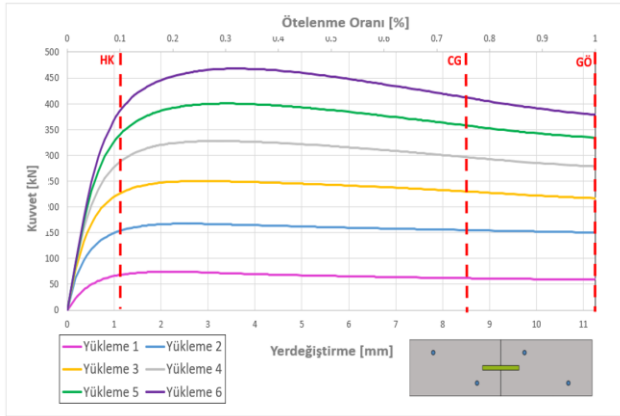
Şekil 5.33 : Model 2 hibritteki demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3 üst sırada; Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6 alt sırada sunulmuştur.



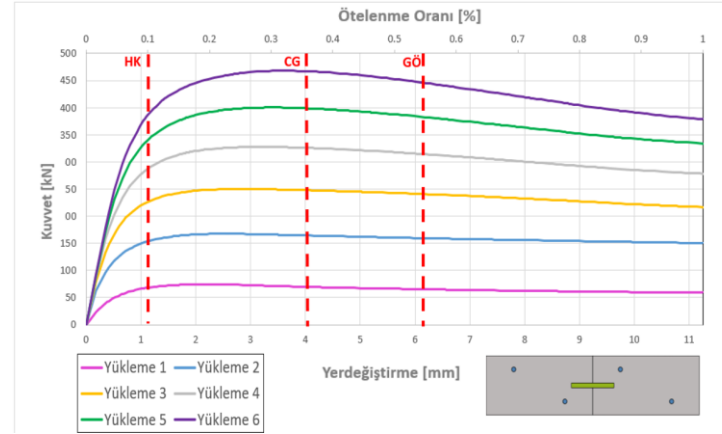
(a)



(b)

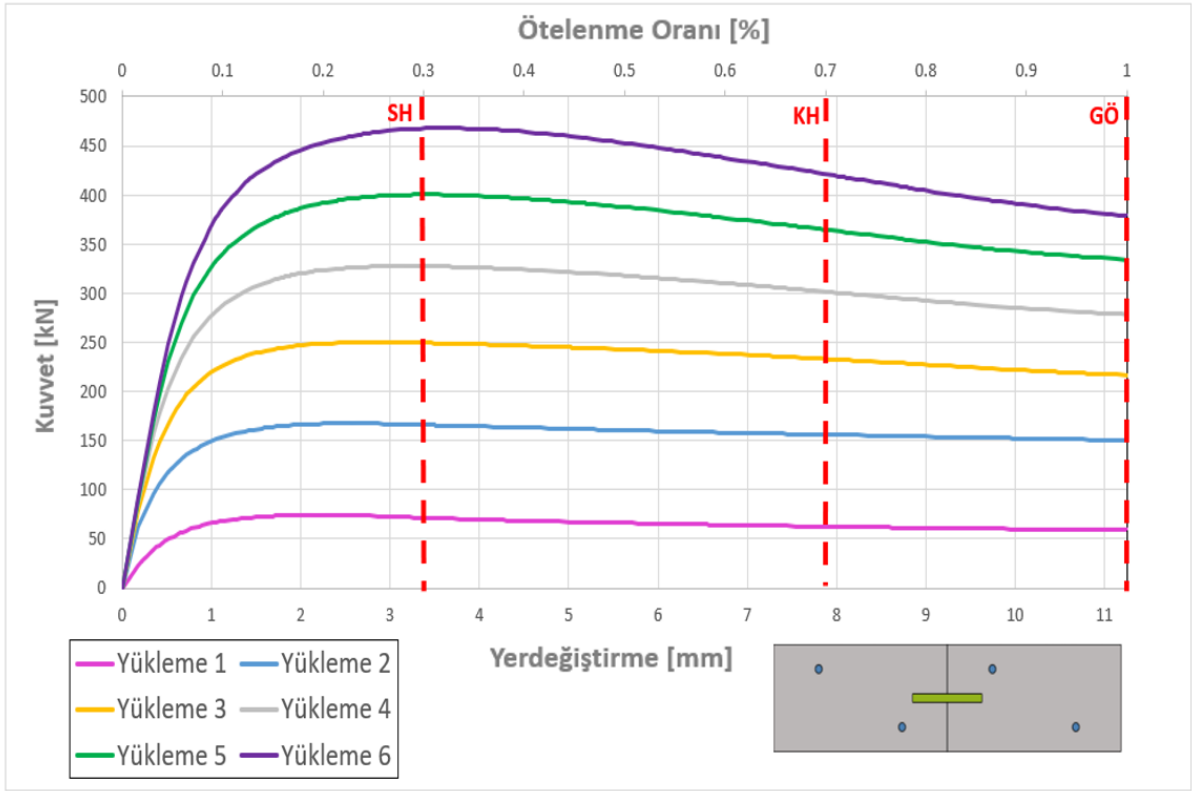


(c)

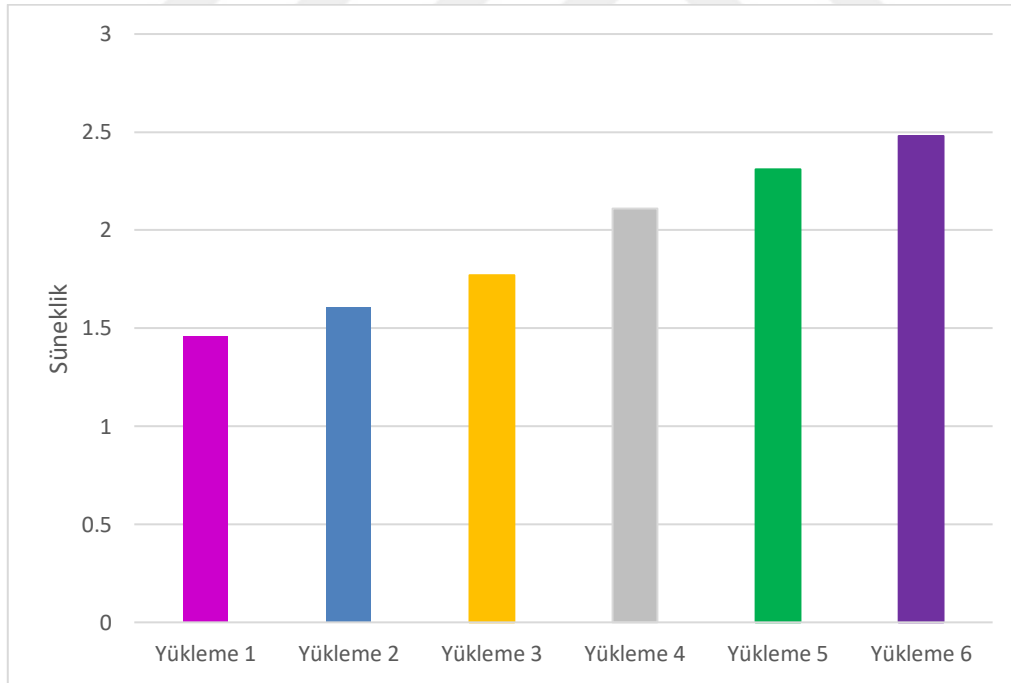


(d)

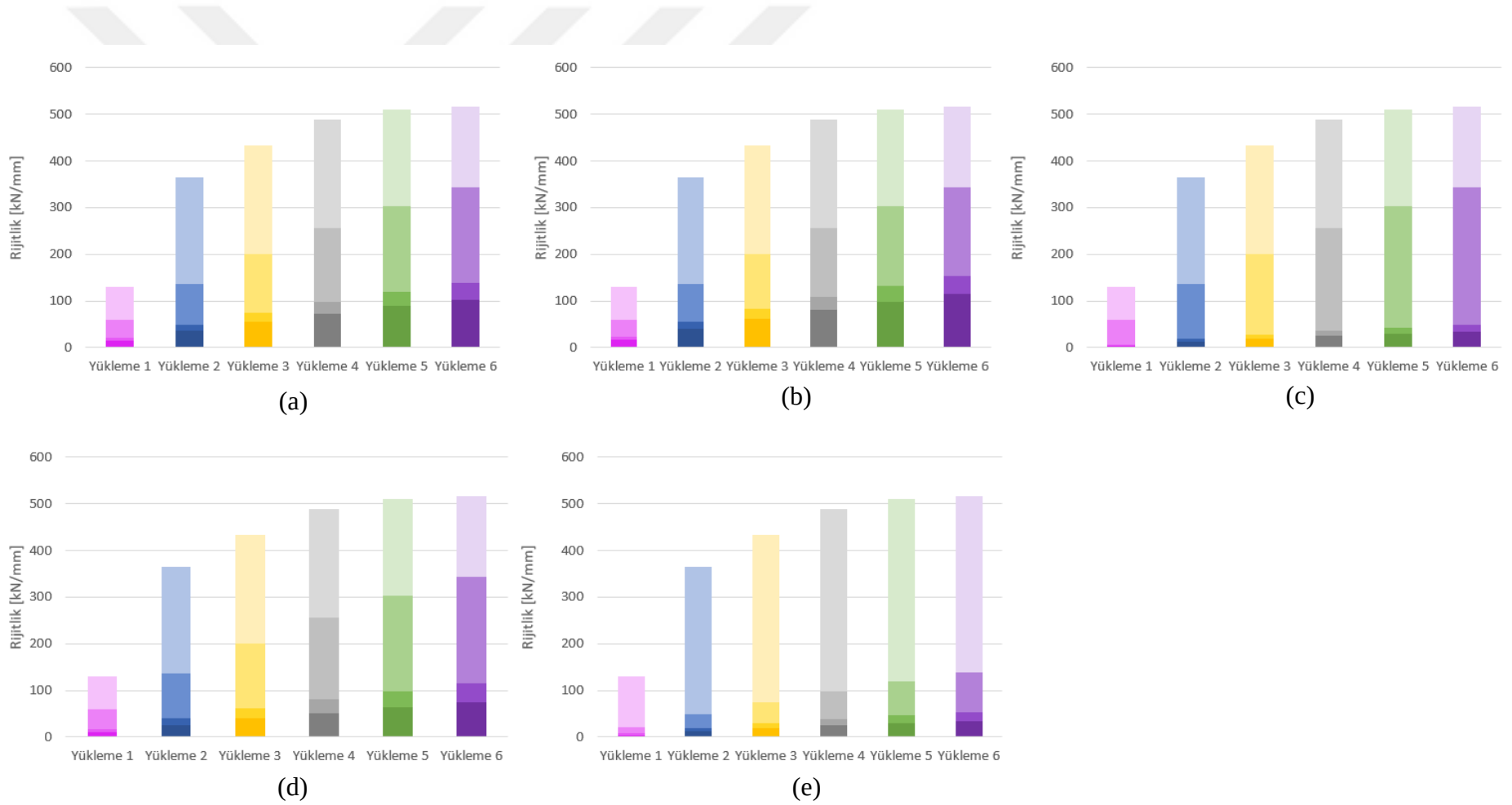
Şekil 5.34 : Model 2 hibrit için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.



Şekil 5.35 : Model 2 hibrit için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.



Şekil 5.36 : Model 2 hibrit için süneklik değerleri.



Şekil 5.37 : Model 2 hibrit için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356’ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23’e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017’ ye göre rijitlik değerleri.

Çizelge 5.6 : Model 2 hibrit P/P_{max} değerleri.

FEMA 356 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.928	0.959	0.911
Yükleme 2	0.915	0.995	0.982
Yükleme 3	0.894	0.999	0.987
Yükleme 4	0.863	0.999	0.990
Yükleme 5	0.840	0.999	0.992
Yükleme 6	0.824	0.998	0.996

FEMA 356 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.928	0.975	0.927
Yükleme 2	0.915	0.999	0.982
Yükleme 3	0.894	0.999	0.993
Yükleme 4	0.863	0.999	0.996
Yükleme 5	0.840	0.996	0.998
Yükleme 6	0.824	0.993	0.999

ASCE 41- 23 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.928	0.817	0.772
Yükleme 2	0.915	0.928	0.898
Yükleme 3	0.894	0.919	0.863
Yükleme 4	0.863	0.907	0.850
Yükleme 5	0.840	0.899	0.837
Yükleme 6	0.824	0.891	0.813

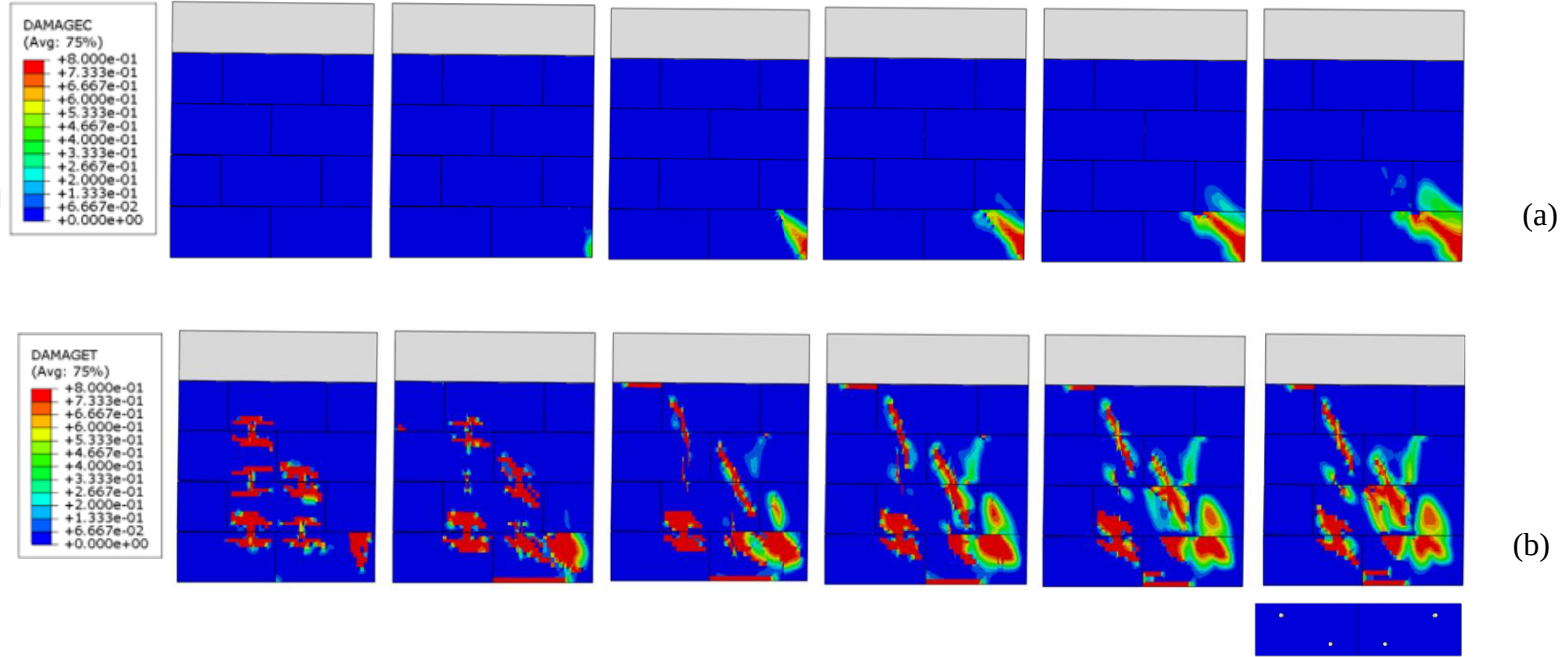
ASCE 41-23 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.928	0.927	0.870
Yükleme 2	0.915	0.982	0.954
Yükleme 3	0.894	0.993	0.962
Yükleme 4	0.863	0.996	0.959
Yükleme 5	0.840	0.998	0.960
Yükleme 6	0.824	0.999	0.964

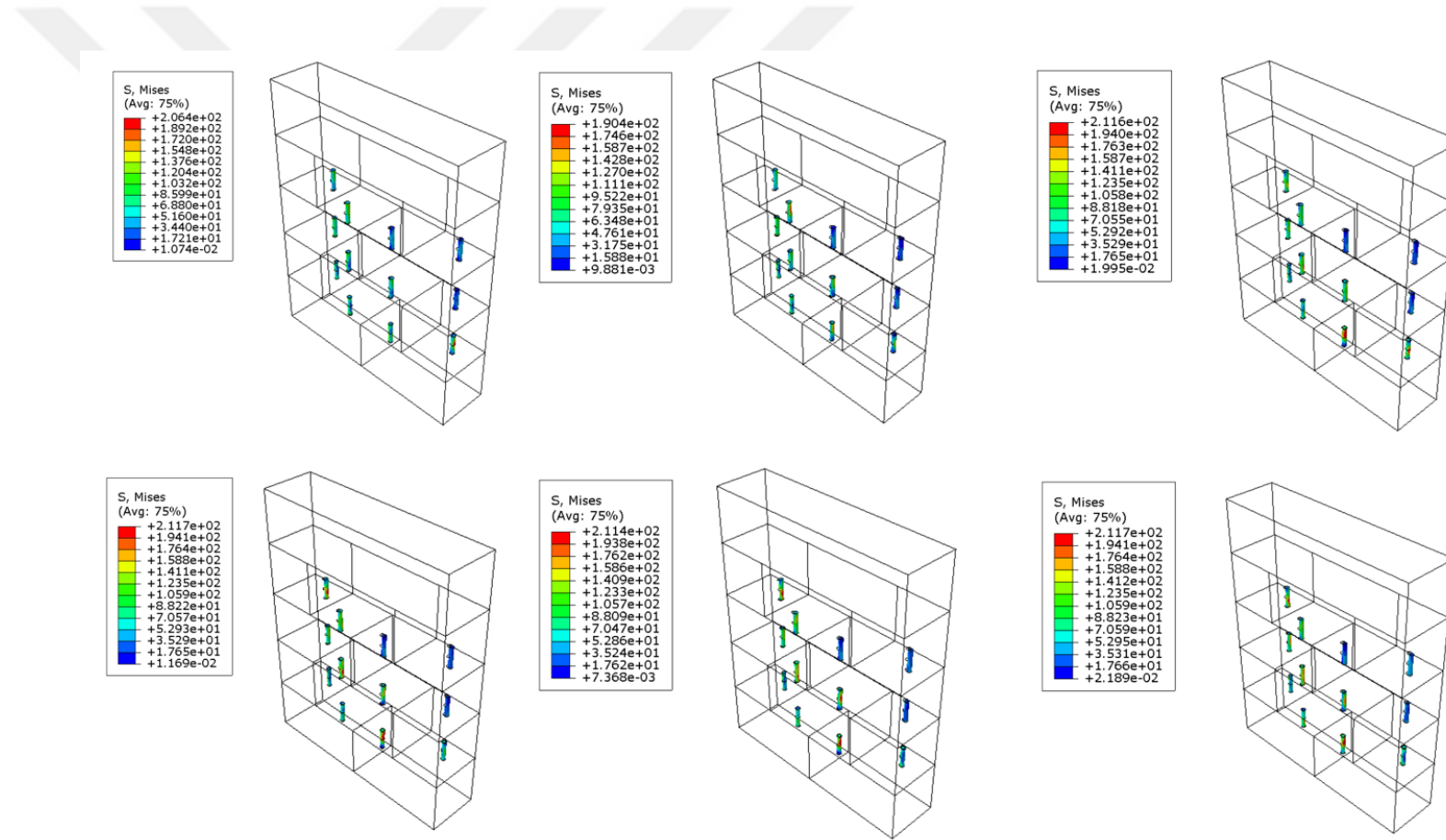
TYDRYK 2017

Yükleme	SH	KH	GÖ
Yükleme 1	0.959	0.830	0.772
Yükleme 2	0.995	0.933	0.898
Yükleme 3	0.999	0.929	0.863
Yükleme 4	0.999	0.919	0.850
Yükleme 5	0.999	0.912	0.837
Yükleme 6	0.998	0.910	0.813

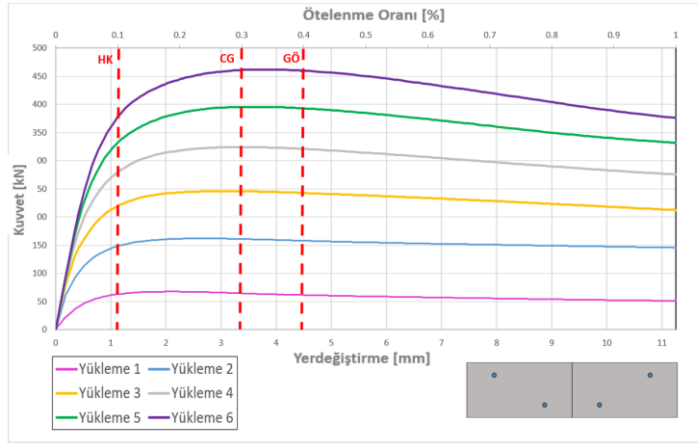
5.3.7 Model 3 pim



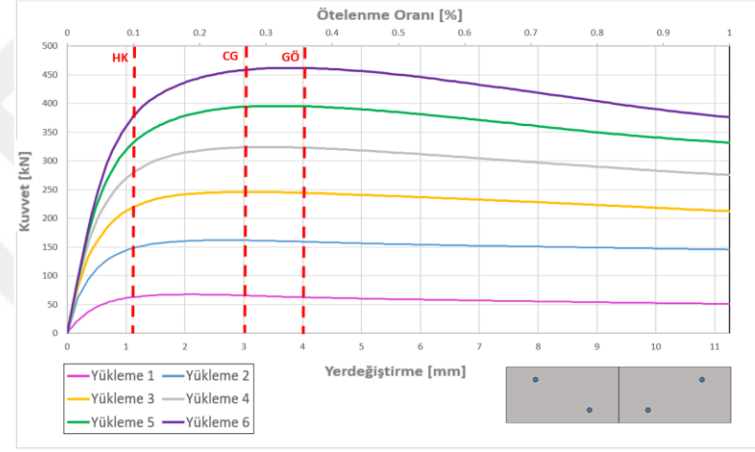
Şekil 5.38 : Model 3 pim için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.



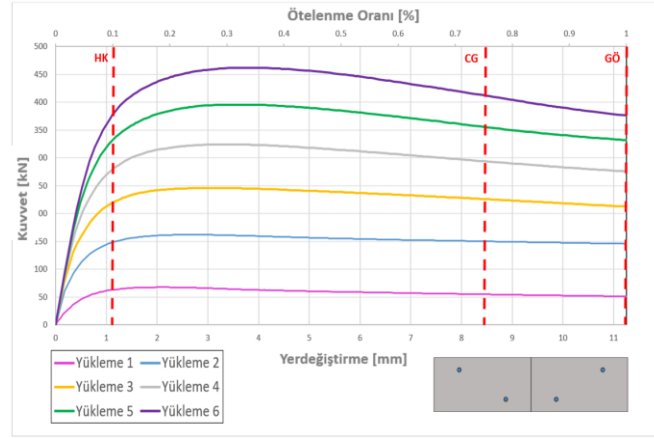
Şekil 5.39 : Model 3 pim demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yüklemeler 1, Yüklemeler 2, Yüklemeler 3 üst sırada; Yüklemeler 4, Yüklemeler 5 ve Yüklemeler 6 alt sırada sunulmuştur.



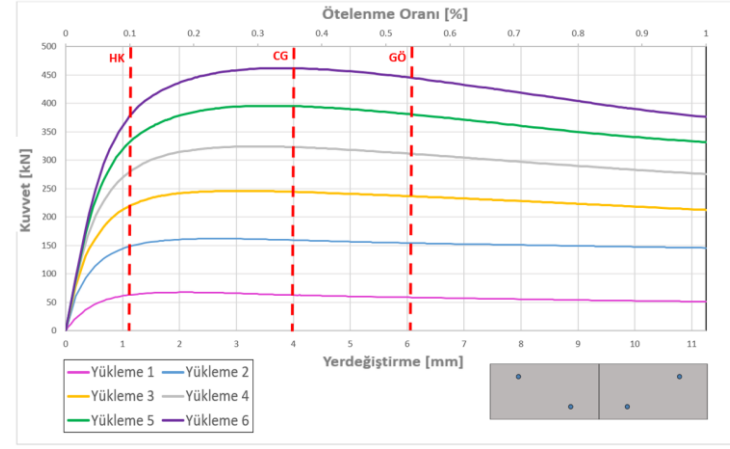
(a)



(b)

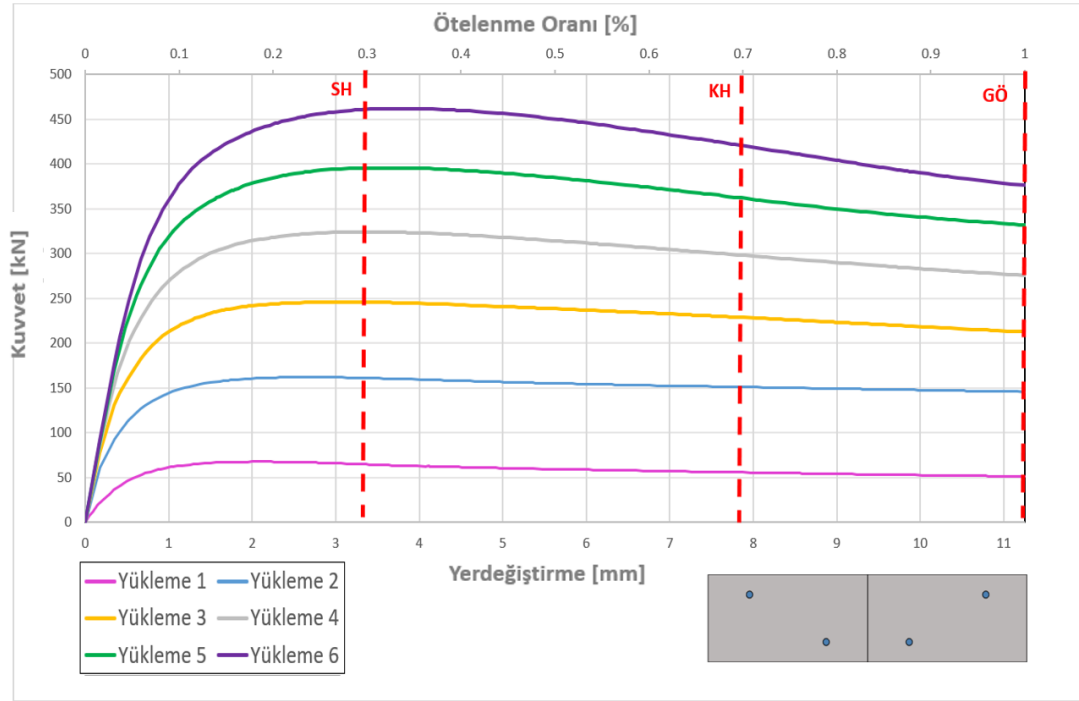


(c)

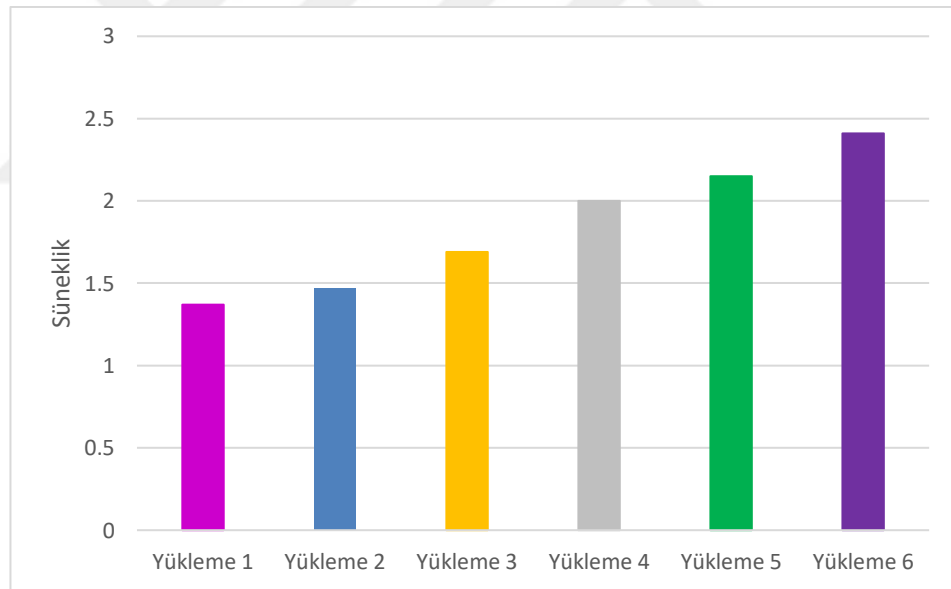


(d)

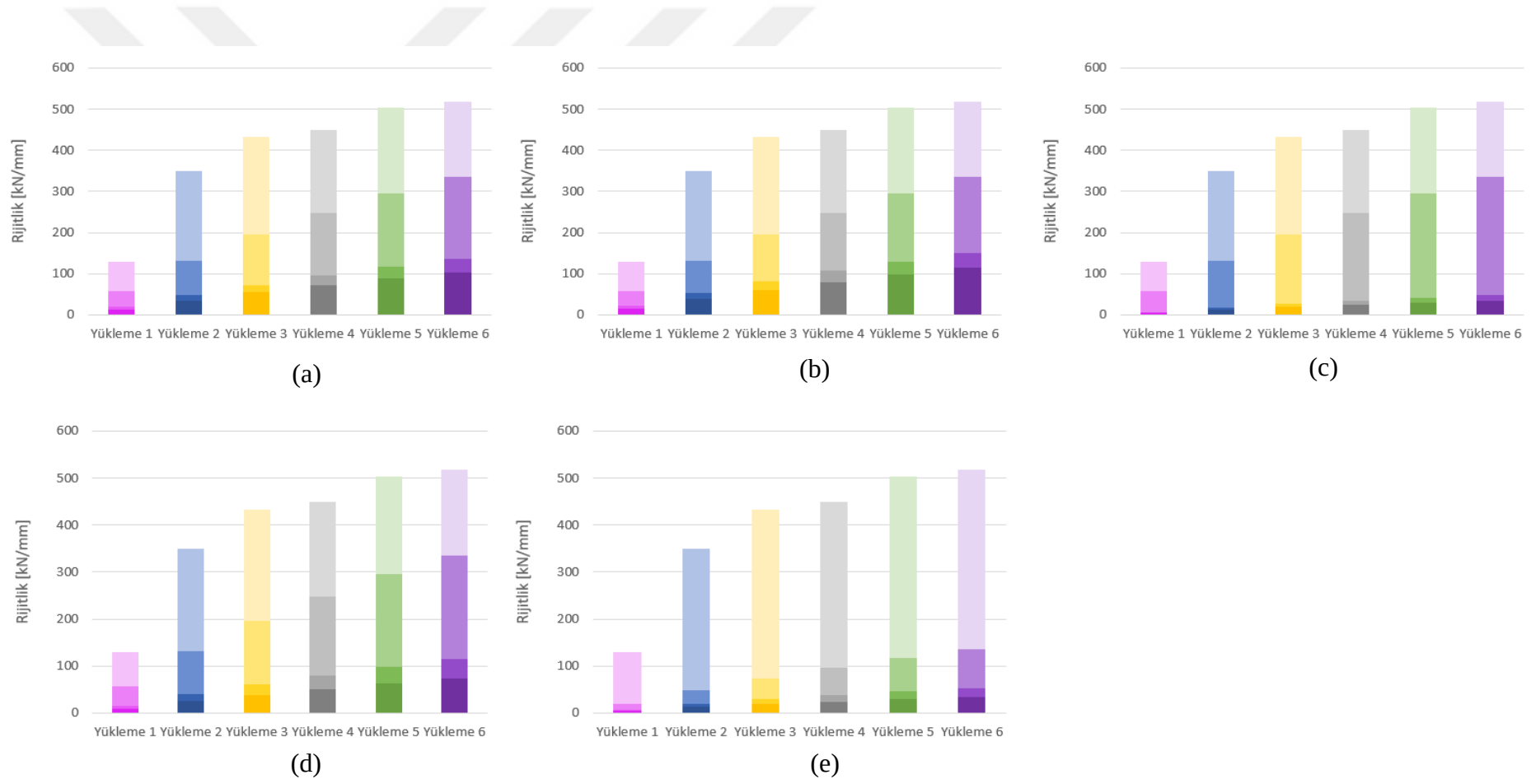
Şekil 5.40 : Model 3 pim için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.



Şekil 5.41 : Model 3 pim için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.



Şekil 5.42 : Model 3 pim için süneklik değerleri.



Şekil 5.43 : Model 3 pim için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017' ye göre rijitlik değerleri.

Çizelge 5.7 : Model 3 pim P/P_{max} değerleri.

FEMA 356 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.940	0.956	0.911
Yükleme 2	0.998	0.994	0.974
Yükleme 3	0.999	0.998	0.992
Yükleme 4	0.999	0.999	0.996
Yükleme 5	0.997	0.999	0.998
Yükleme 6	0.993	0.997	0.999

FEMA 356 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.940	0.976	0.923
Yükleme 2	0.998	0.998	0.982
Yükleme 3	0.999	0.999	0.992
Yükleme 4	0.999	0.999	0.996
Yükleme 5	0.997	0.997	0.998
Yükleme 6	0.993	0.993	0.999

ASCE 41- 23 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.940	0.812	0.758
Yükleme 2	0.998	0.926	0.899
Yükleme 3	0.999	0.918	0.864
Yükleme 4	0.999	0.907	0.850
Yükleme 5	0.997	0.899	0.839
Yükleme 6	0.993	0.892	0.815

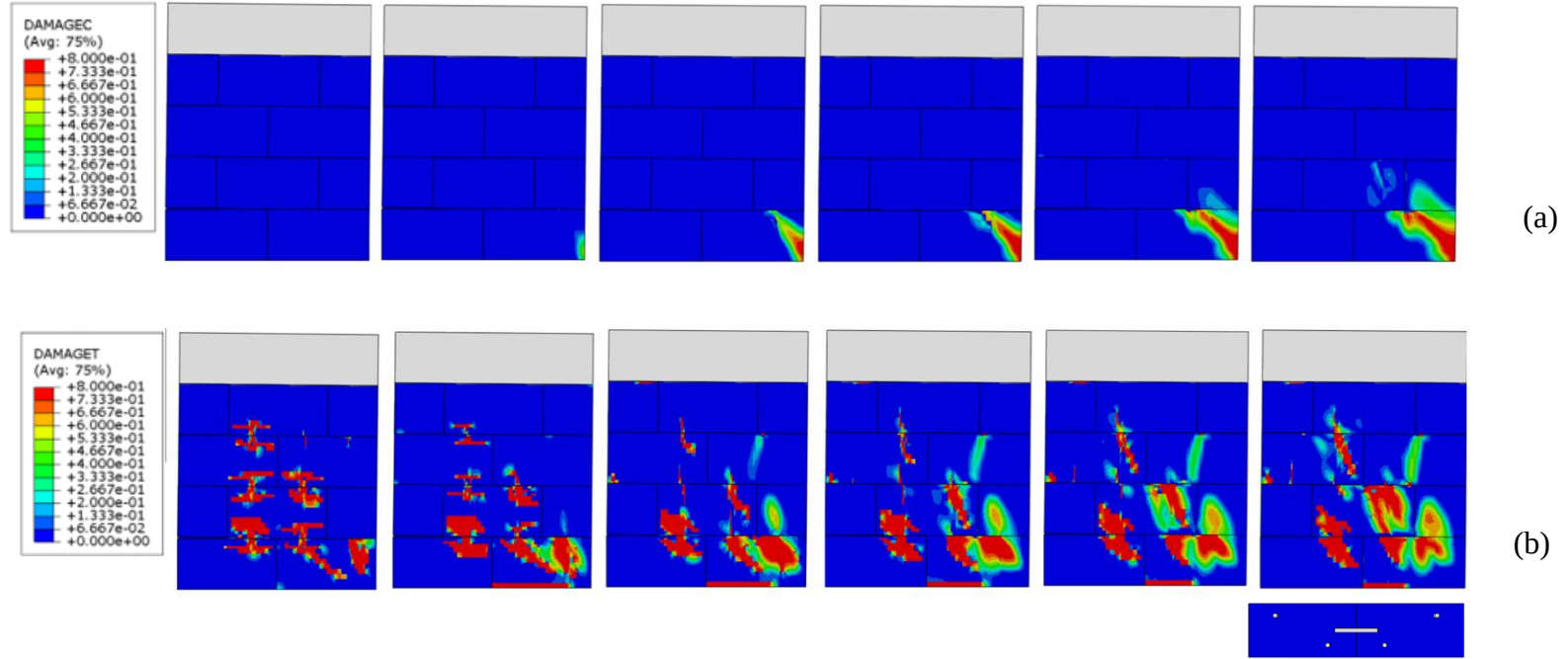
ASCE 41-23 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.940	0.923	0.867
Yükleme 2	0.998	0.982	0.952
Yükleme 3	0.999	0.992	0.962
Yükleme 4	0.999	0.996	0.960
Yükleme 5	0.997	0.998	0.961
Yükleme 6	0.993	0.999	0.964

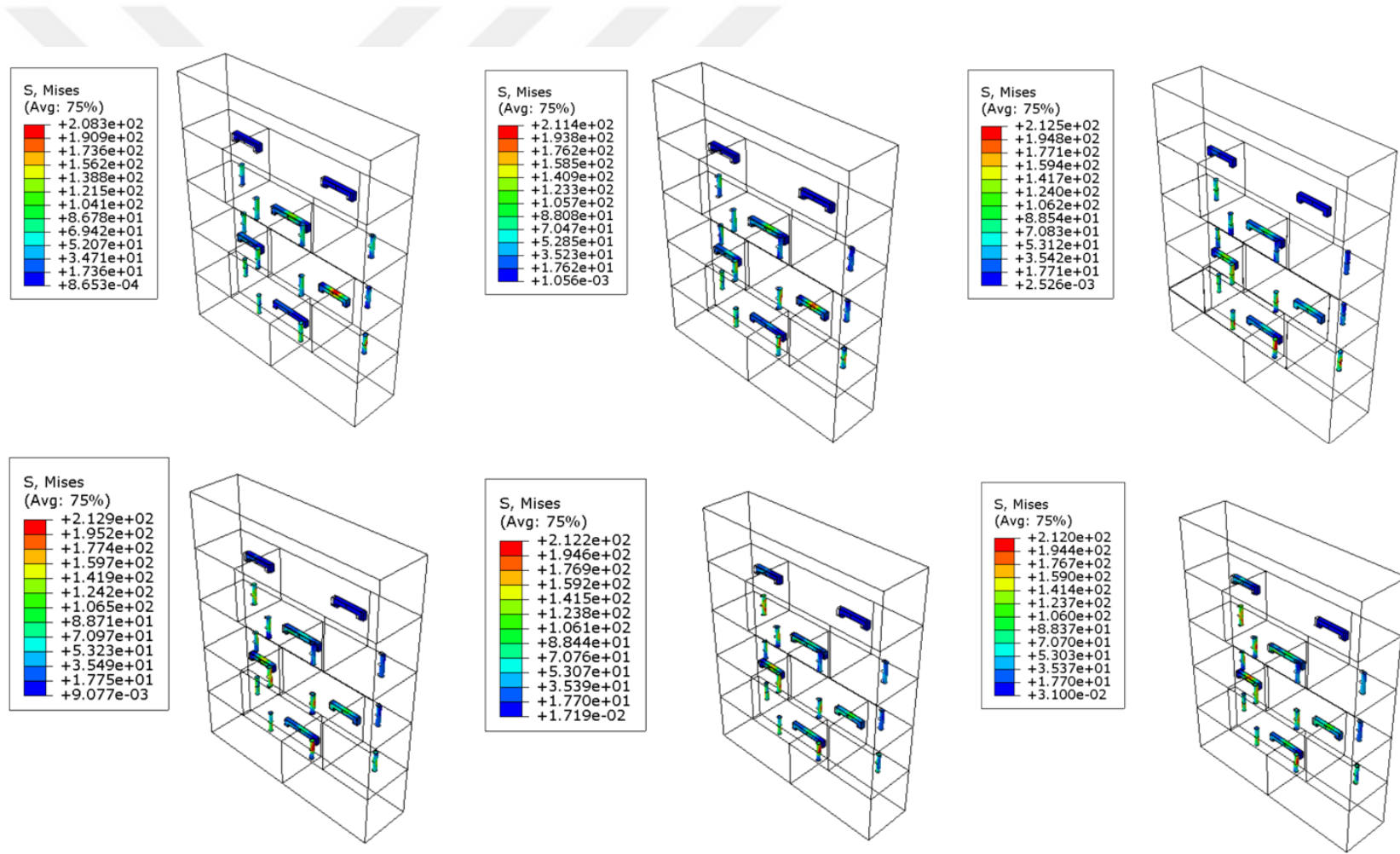
TYDRYK 2017

Yükleme	SH	KH	GÖ
Yükleme 1	0.956	0.824	0.758
Yükleme 2	0.994	0.932	0.899
Yükleme 3	0.998	0.929	0.864
Yükleme 4	0.999	0.920	0.850
Yükleme 5	0.999	0.915	0.839
Yükleme 6	0.997	0.909	0.815

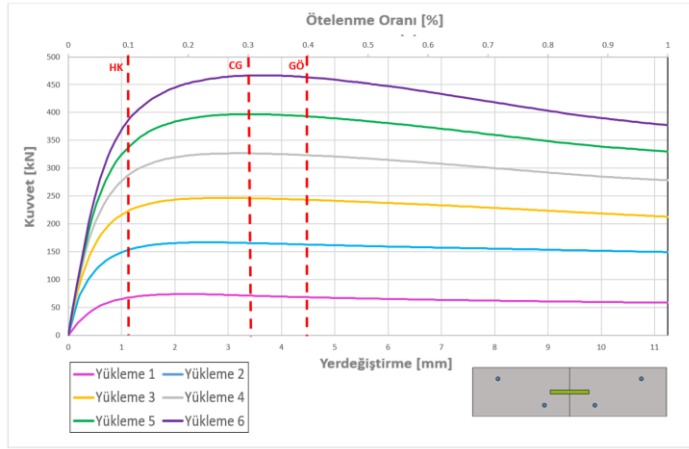
5.3.8 Model 3 hibrit



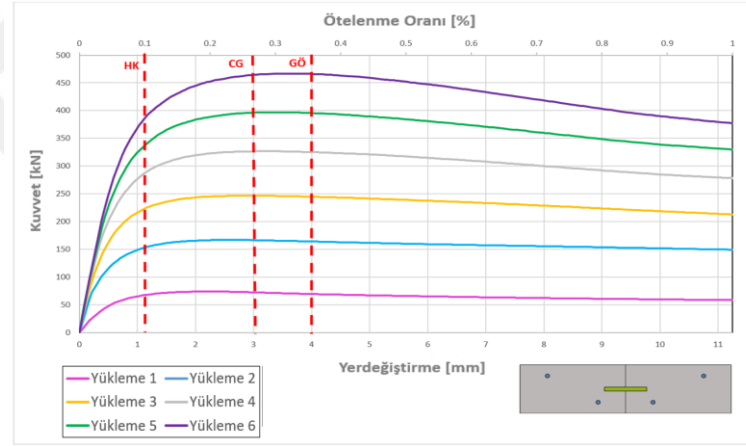
Şekil 5.44 : Model 3 hibrit için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.



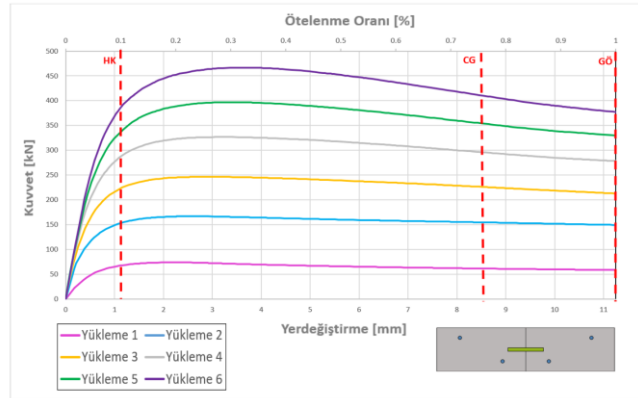
Şekil 5.45 : Model 3 hibritteki demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3 üst sırada; Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6 alt sırada sunulmuştur.



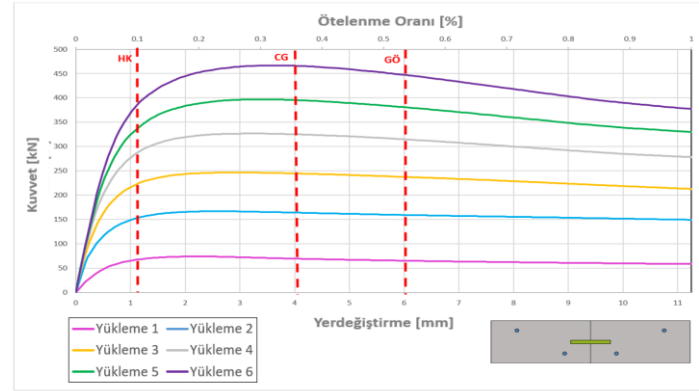
(a)



(b)

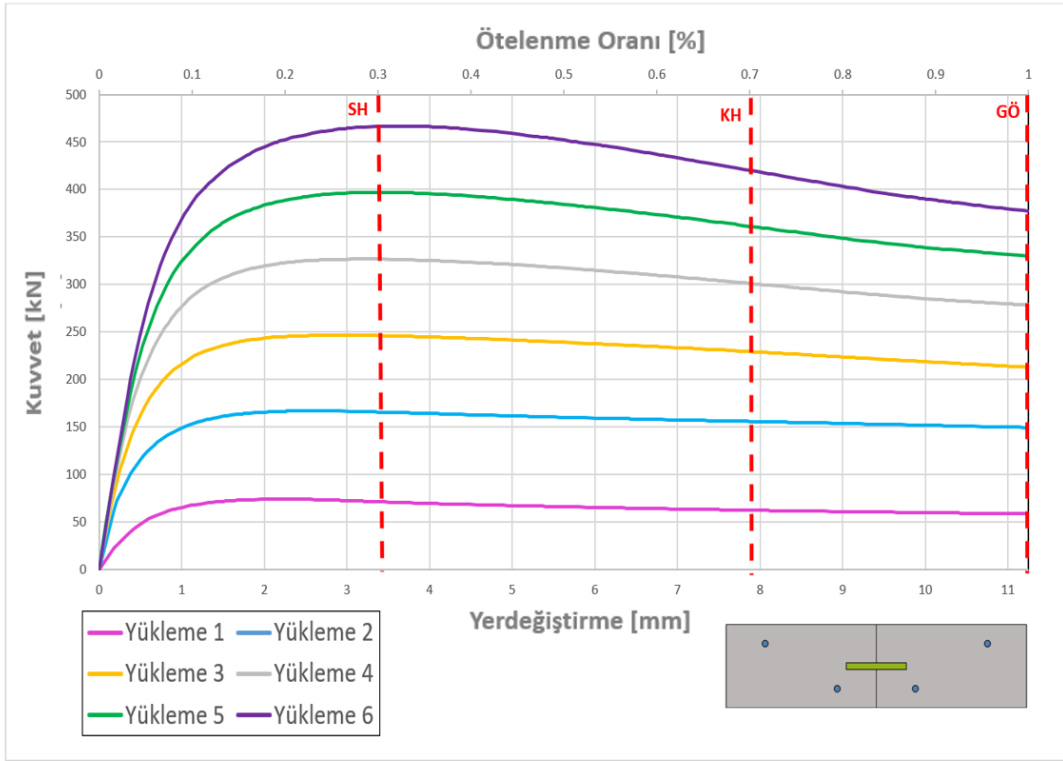


(c)

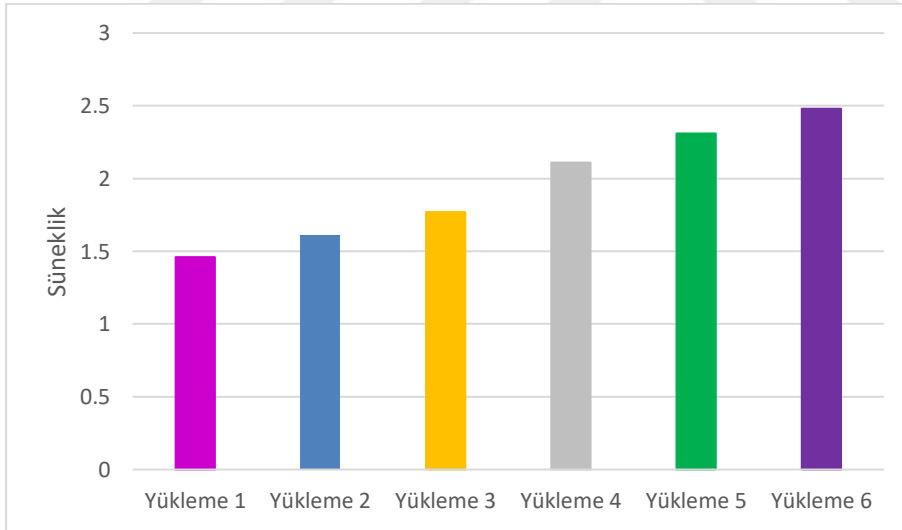


(d)

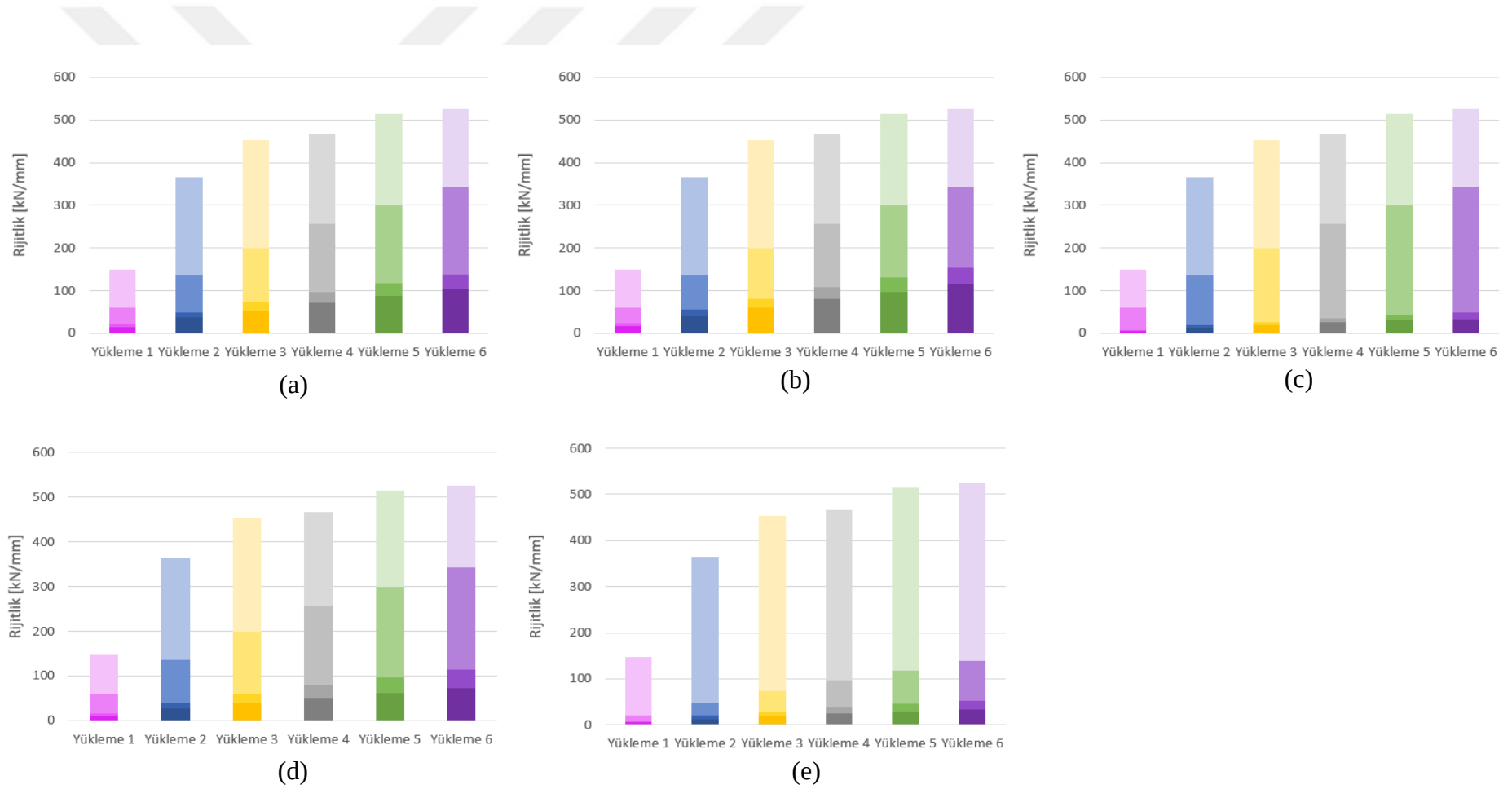
Şekil 5.46 : Model 3 hibrit için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.



Şekil 5.47 : Model 3 hibrit için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.



Şekil 5.48 : Model 3 hibrit için süneklik değerleri.



Şekil 5.49 : Model 3 hibrit için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017' ye göre rijitlik değerleri.

Çizelge 5.8 : Model 3 hibrit $P/P_{\max}$ değerleri.

FEMA 356 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.914	0.965	0.924
Yükleme 2	0.917	0.992	0.976
Yükleme 3	0.905	0.999	0.987
Yükleme 4	0.879	0.999	0.990
Yükleme 5	0.849	0.999	0.990
Yükleme 6	0.827	0.999	0.992

FEMA 356 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.914	0.978	0.938
Yükleme 2	0.917	0.996	0.982
Yükleme 3	0.905	0.999	0.992
Yükleme 4	0.879	0.999	0.995
Yükleme 5	0.849	0.999	0.995
Yükleme 6	0.827	0.996	0.998

ASCE 41- 23 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.914	0.817	0.792
Yükleme 2	0.917	0.928	0.895
Yükleme 3	0.905	0.919	0.863
Yükleme 4	0.879	0.907	0.852
Yükleme 5	0.849	0.899	0.831
Yükleme 6	0.827	0.891	0.809

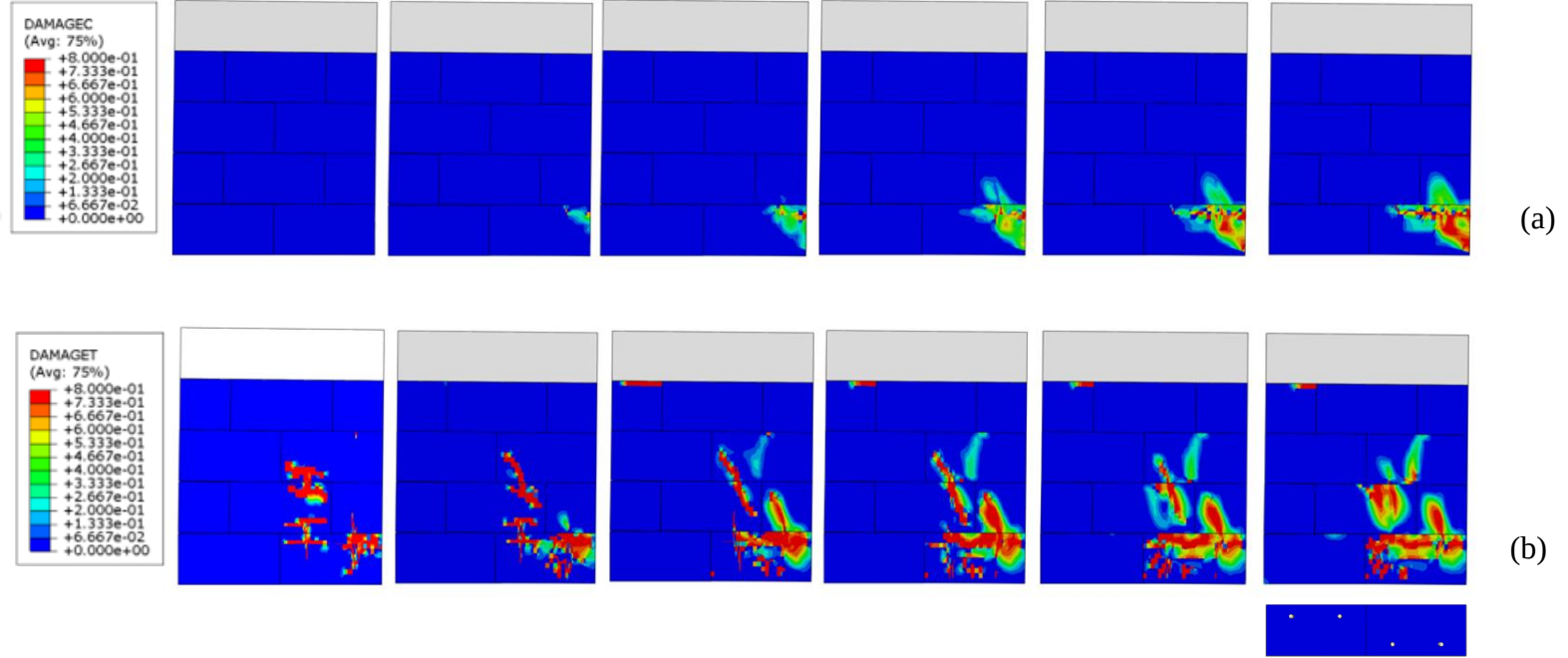
ASCE 41-23 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.914	0.938	0.883
Yükleme 2	0.917	0.982	0.954
Yükleme 3	0.905	0.992	0.963
Yükleme 4	0.879	0.995	0.962
Yükleme 5	0.849	0.995	0.958
Yükleme 6	0.827	0.998	0.956

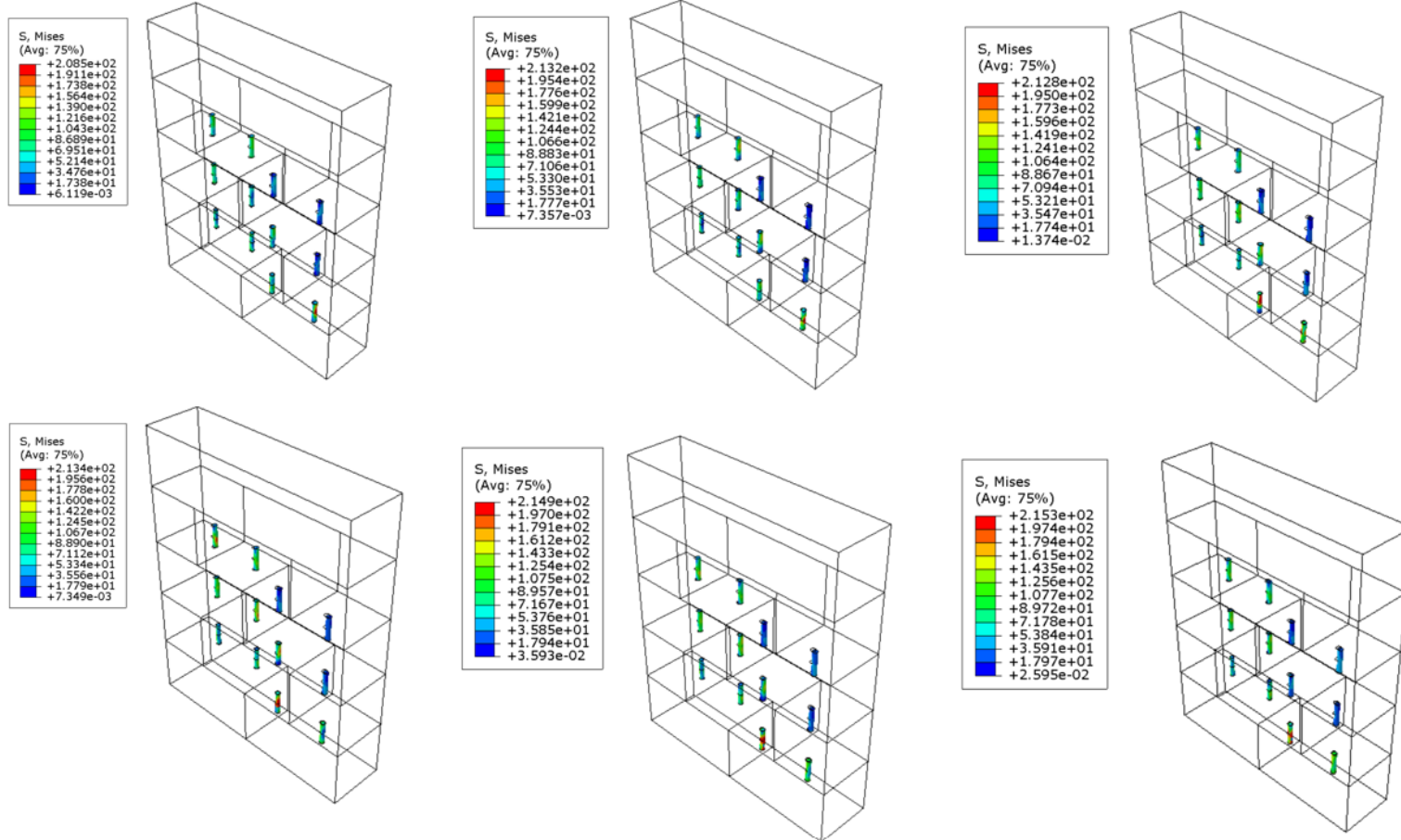
TYDRYK 2017

Yükleme	SH	KH	GÖ
Yükleme 1	0.965	0.843	0.792
Yükleme 2	0.992	0.954	0.895
Yükleme 3	0.999	0.963	0.863
Yükleme 4	0.999	0.962	0.852
Yükleme 5	0.999	0.958	0.831
Yükleme 6	0.999	0.956	0.809

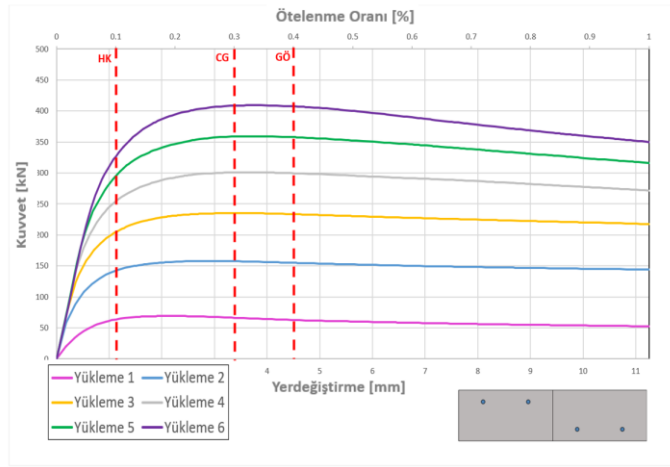
5.3.9 Model 4 pim



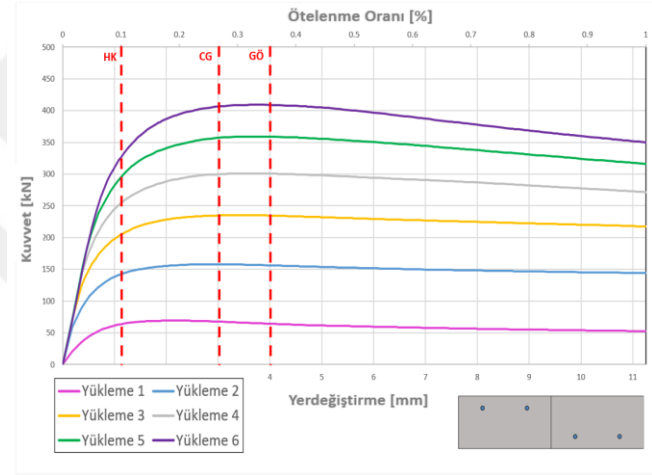
Şekil 5.50 : Model 4 pim için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.



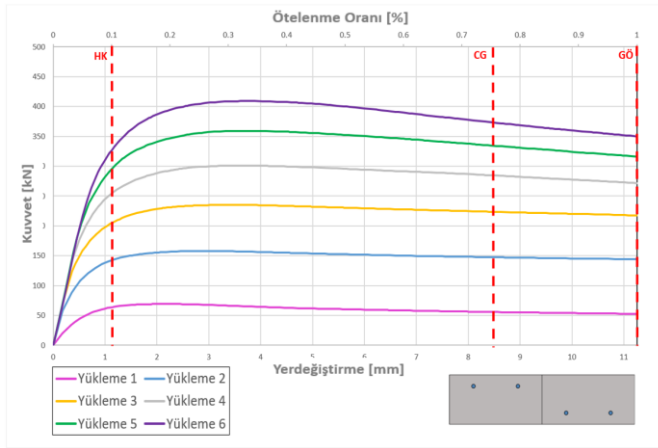
Şekil 5.51 : Model 4 pim demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yüklemeler 1, Yüklemeler 2, Yüklemeler 3 üst sırada; Yüklemeler 4, Yüklemeler 5 ve Yüklemeler 6 alt sırada sunulmuştur.



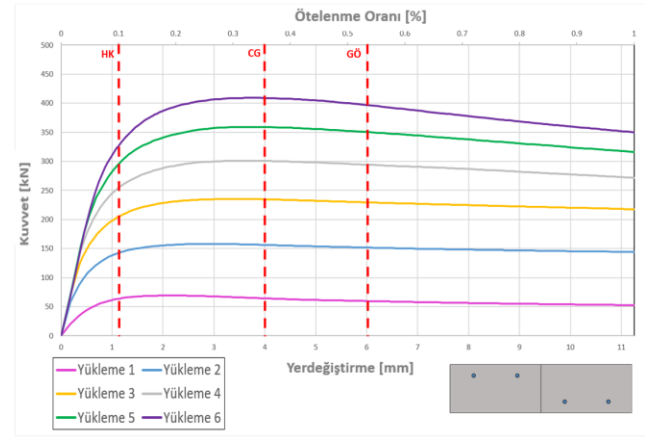
(a)



(b)

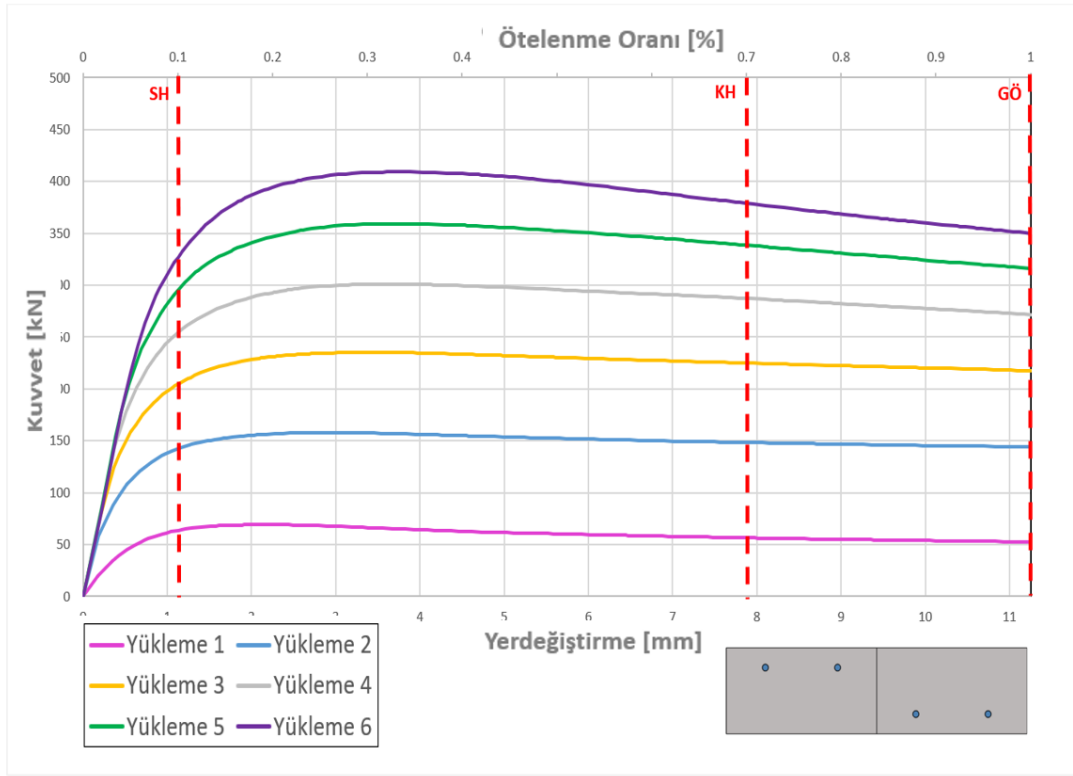


(c)

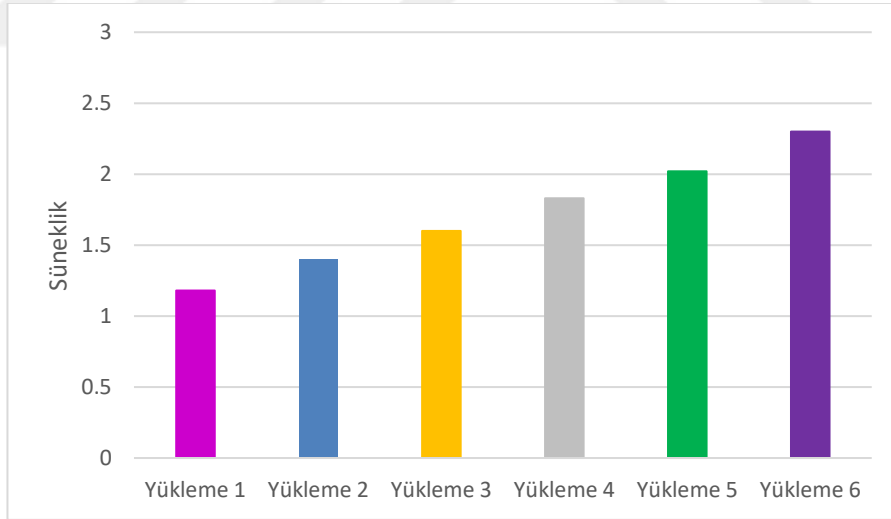


(d)

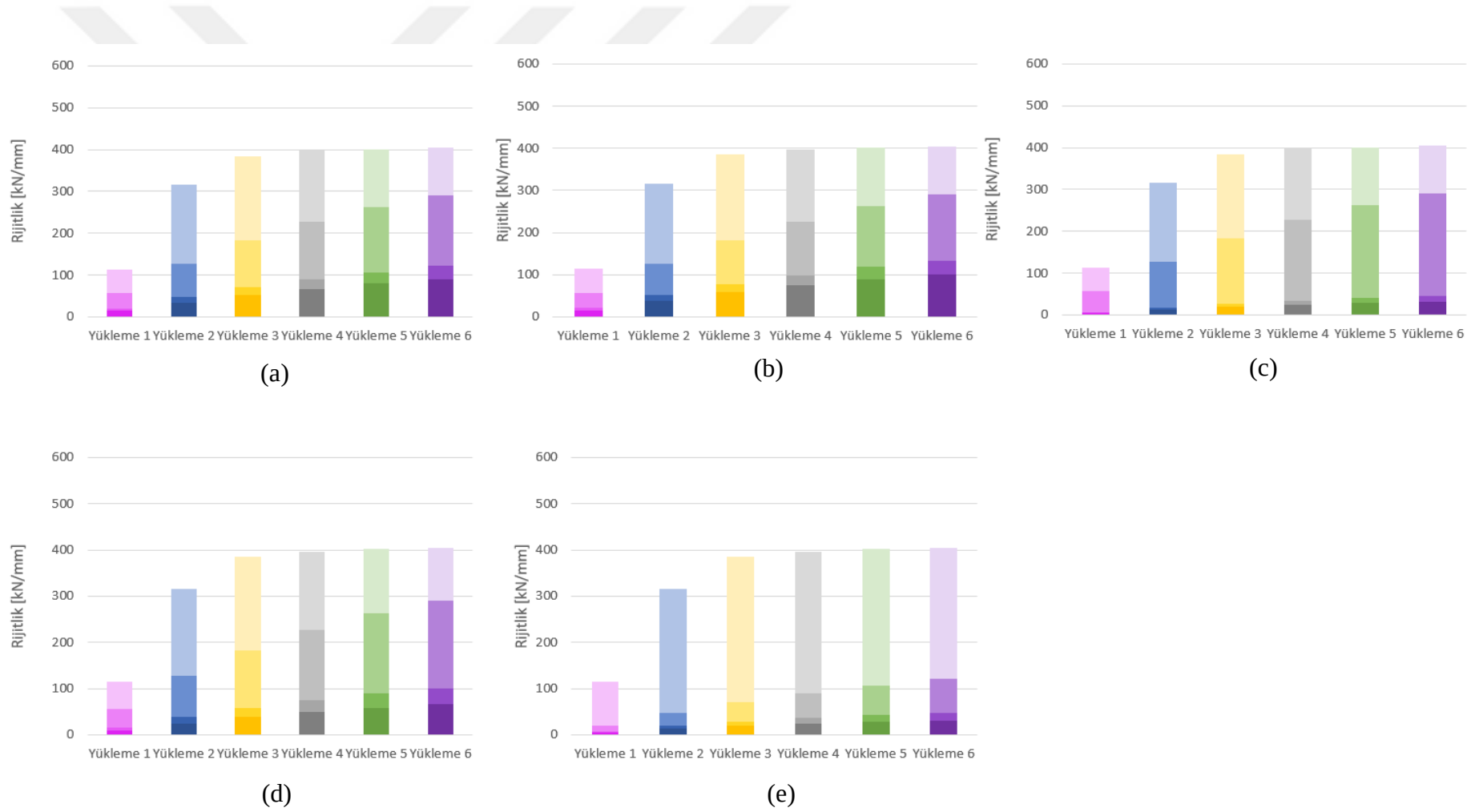
Şekil 5.52 : Model 4 pim için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.



Şekil 5.53 : Model 4 pim için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.



Şekil 5.54 : Model 4 pim için süneklik değerleri.



Şekil 5.55 : Model 4 pim için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017' ye göre rijitlik değerleri.

Çizelge 5.9 : Model 4 pim $P/P_{\max}$ değerleri.

FEMA 356 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.921	0.960	0.909
Yükleme 2	0.901	0.997	0.982
Yükleme 3	0.869	0.999	0.993
Yükleme 4	0.845	0.999	0.995
Yükleme 5	0.822	0.998	0.996
Yükleme 6	0.798	0.998	0.996

FEMA 356 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.921	0.976	0.925
Yükleme 2	0.901	0.999	0.988
Yükleme 3	0.869	0.998	0.997
Yükleme 4	0.845	0.997	0.998
Yükleme 5	0.822	0.996	0.999
Yükleme 6	0.798	0.994	0.999

ASCE 41- 23 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.921	0.805	0.761
Yükleme 2	0.901	0.935	0.912
Yükleme 3	0.869	0.951	0.924
Yükleme 4	0.845	0.945	0.903
Yükleme 5	0.822	0.932	0.881
Yükleme 6	0.798	0.913	0.855

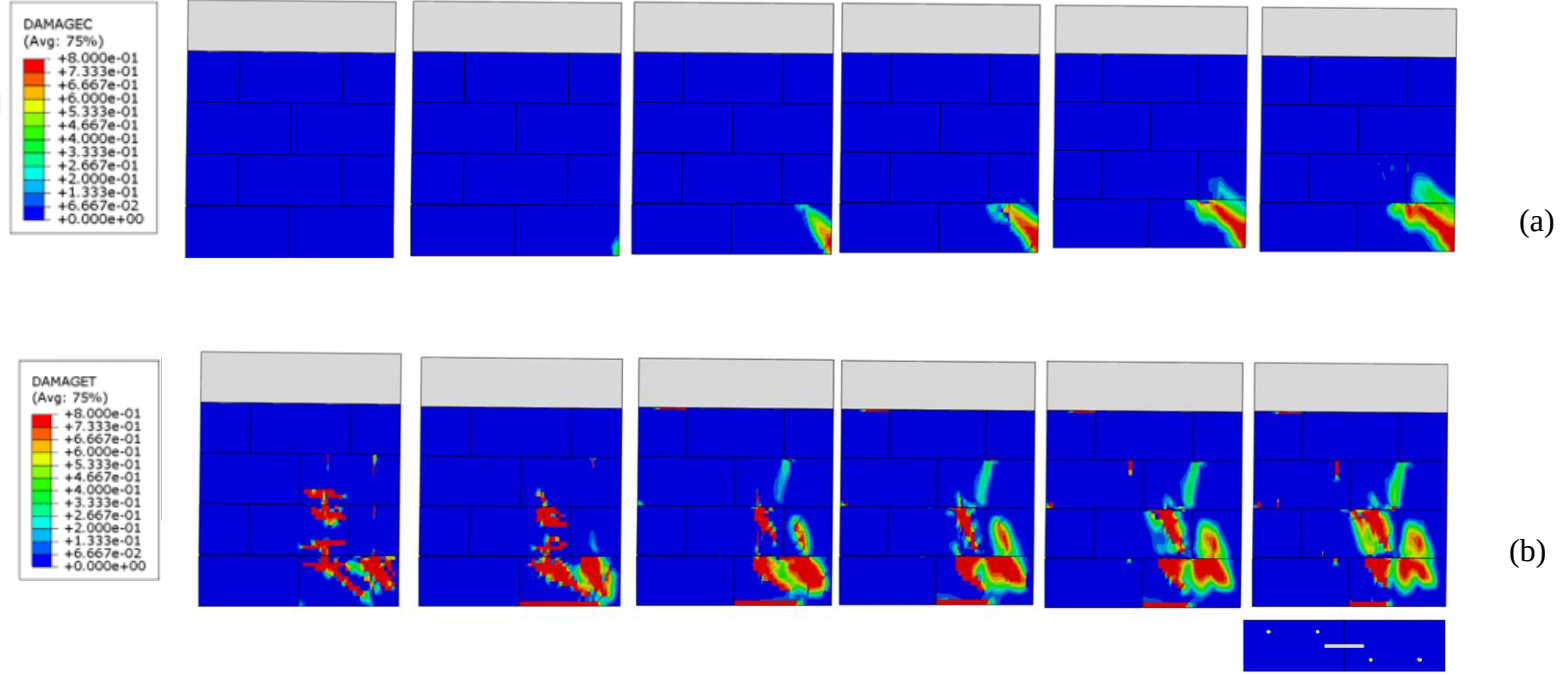
ASCE 41-23 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.921	0.925	0.860
Yükleme 2	0.901	0.988	0.960
Yükleme 3	0.869	0.997	0.975
Yükleme 4	0.845	0.998	0.977
Yükleme 5	0.822	0.999	0.975
Yükleme 6	0.798	0.999	0.968

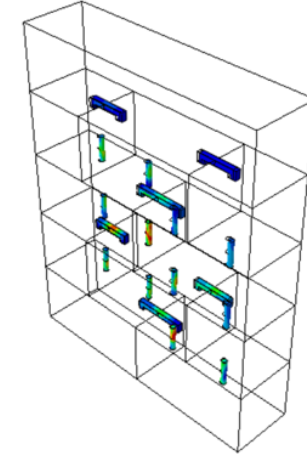
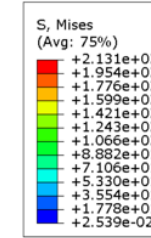
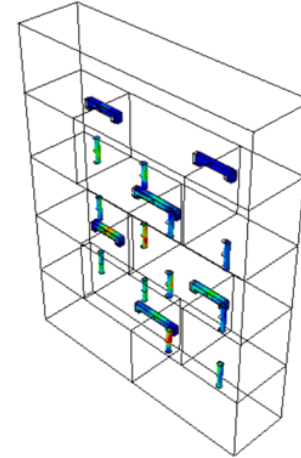
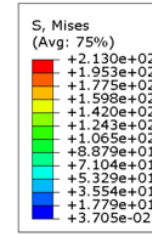
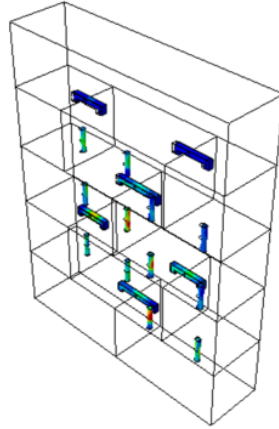
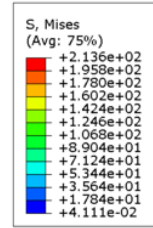
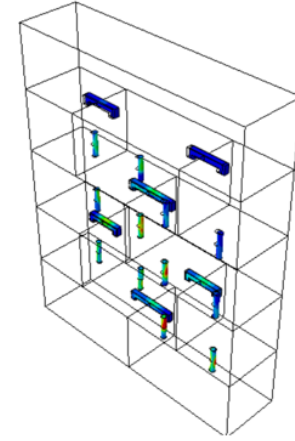
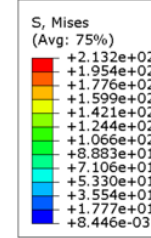
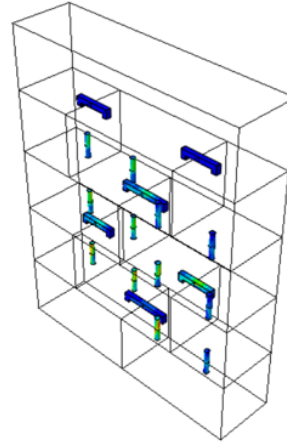
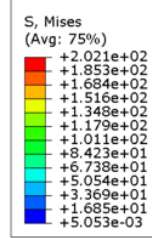
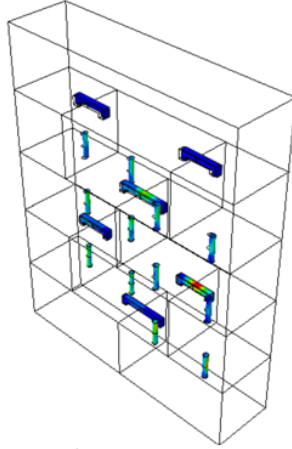
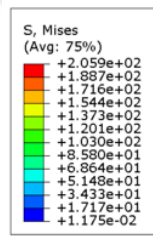
TYDRYK 2017

Yükleme	SH	KH	GÖ
Yükleme 1	0.960	0.817	0.761
Yükleme 2	0.997	0.940	0.912
Yükleme 3	0.999	0.956	0.924
Yükleme 4	0.999	0.954	0.903
Yükleme 5	0.998	0.942	0.881
Yükleme 6	0.998	0.927	0.855

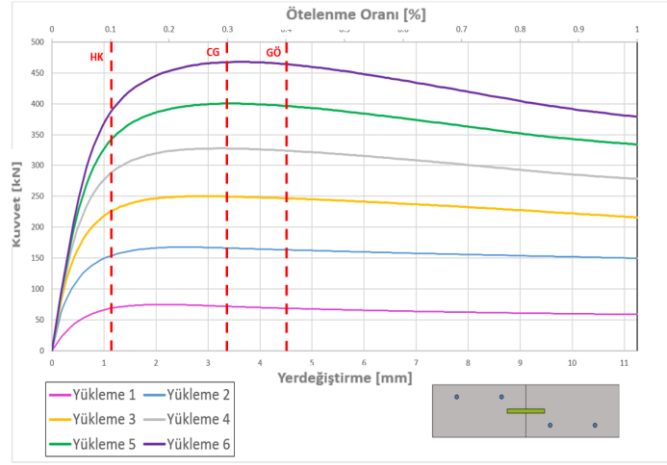
5.3.10 Model 4 hibrit



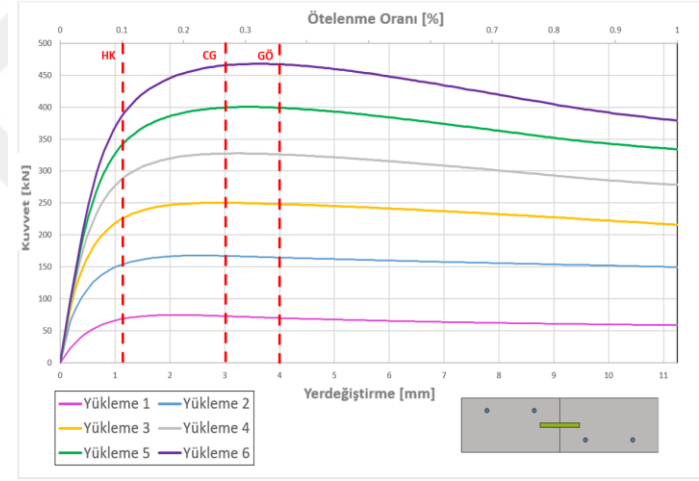
Şekil 5.56 : Model 4 hibrit için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yüklemeler 1, Yüklemeler 2, Yüklemeler 3, Yüklemeler 4, Yüklemeler 5 ve Yüklemeler 6'ya karşılık gelmektedir.



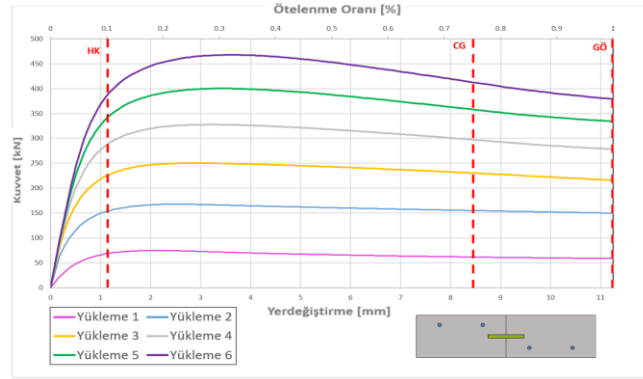
Şekil 5.57 : Model 4 hibritteki demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3 üst sırada; Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6 alt sırada sunulmuştur.



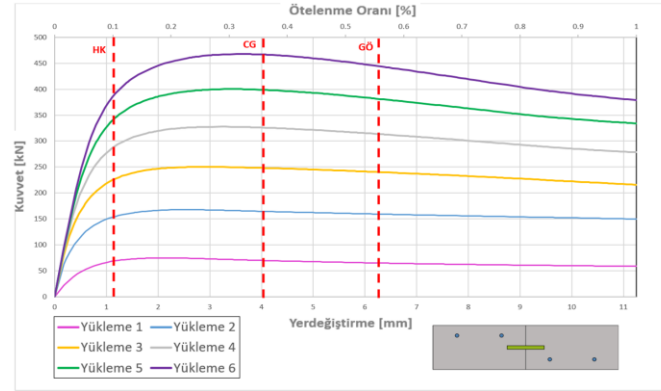
(a)



(b)

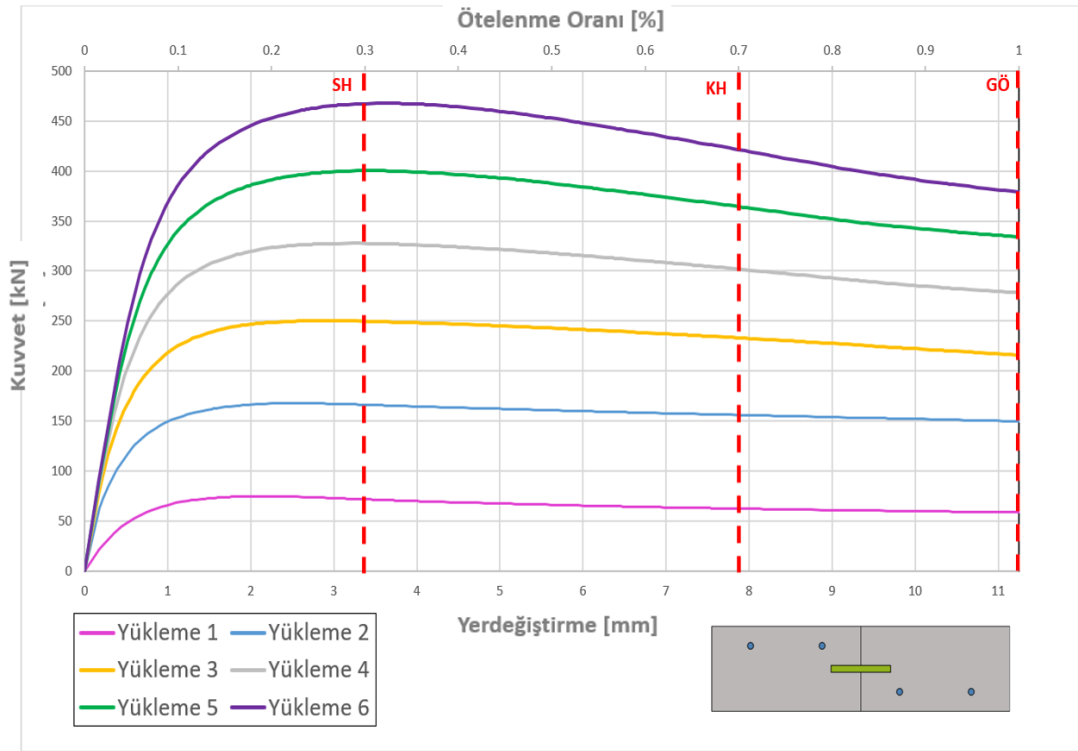


(c)

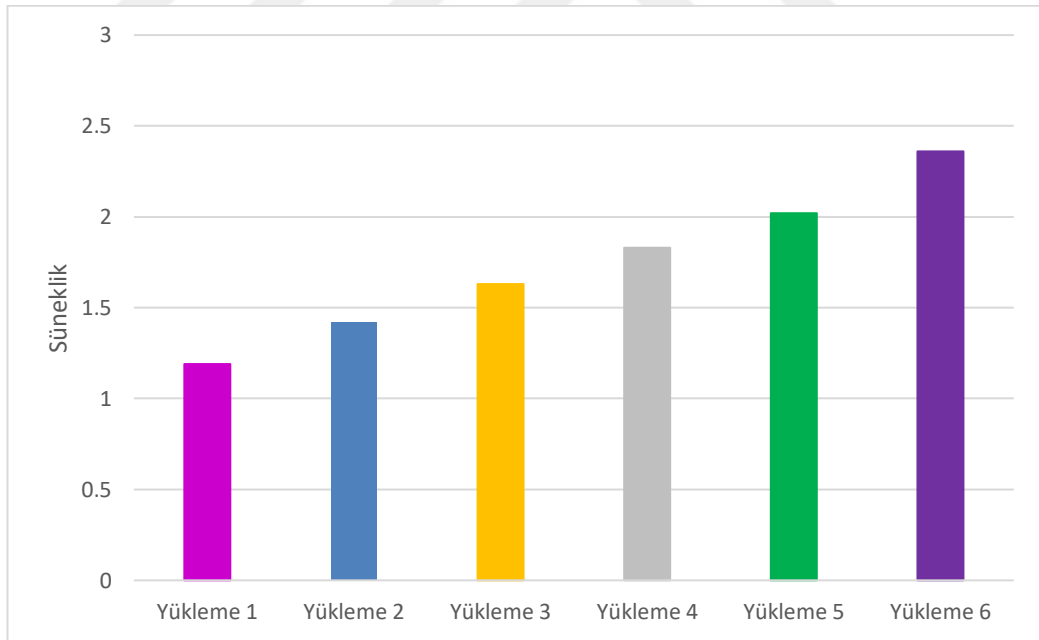


(d)

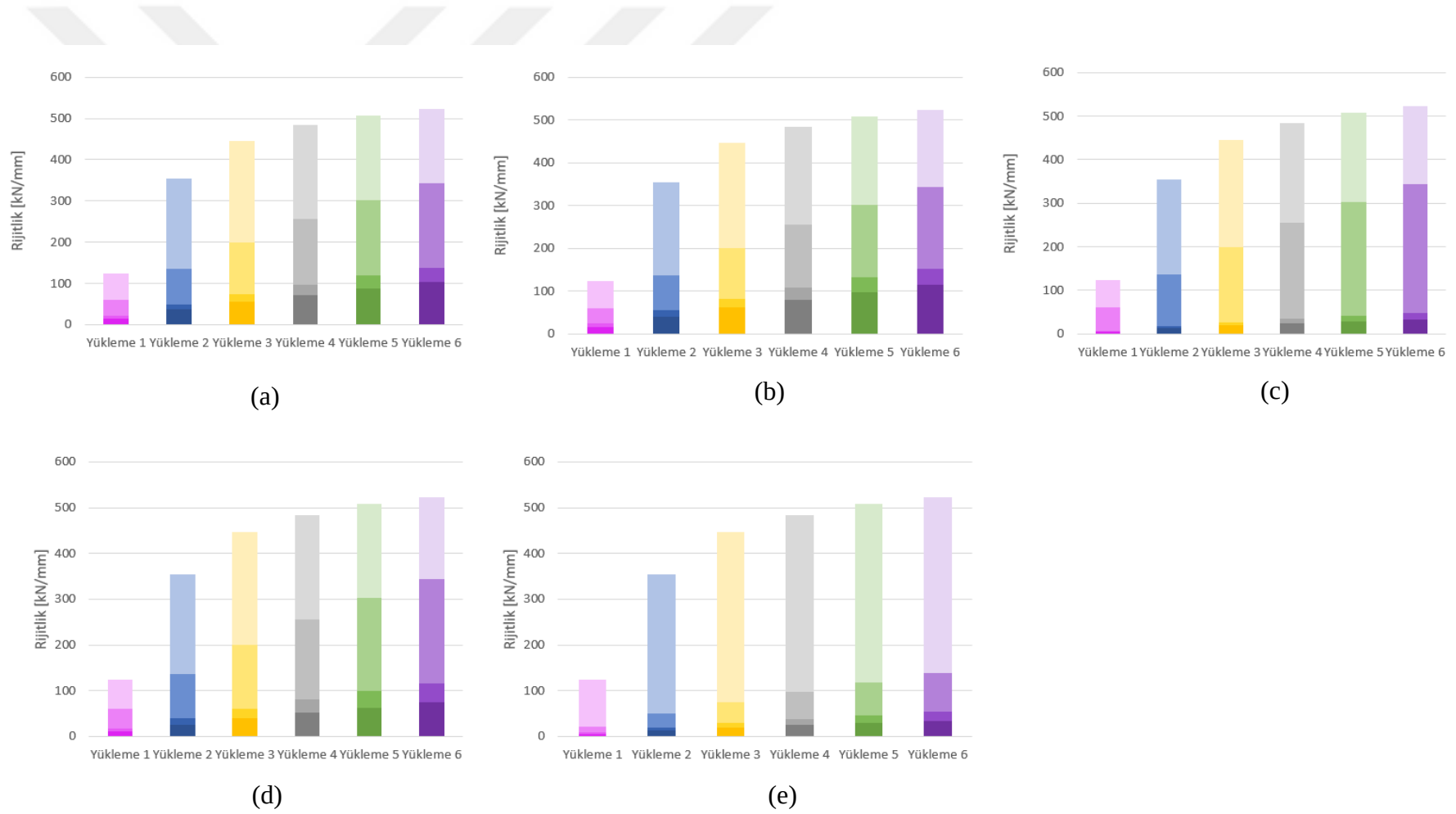
Şekil 5.58 : Model 4 hibrit için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.



Şekil 5.59 : Model 4 hibrit için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.



Şekil 5.60 : Model 4 hibrit için süneklik değerleri.



Şekil 5.61 : Model 4 hibrit için elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017' ye göre rijitlik değerleri.

Çizelge 5.10 : Model 4 hibrit P/P_{max} değerleri.

FEMA 356 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.917	0.959	0.918
Yükleme 2	0.915	0.991	0.974
Yükleme 3	0.900	0.997	0.986
Yükleme 4	0.877	0.999	0.989
Yükleme 5	0.849	0.999	0.990
Yükleme 6	0.825	0.999	0.993

FEMA 356 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.917	0.975	0.925
Yükleme 2	0.915	0.996	0.988
Yükleme 3	0.900	0.999	0.997
Yükleme 4	0.877	0.999	0.998
Yükleme 5	0.849	0.998	0.999
Yükleme 6	0.825	0.996	0.999

ASCE 41- 23 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.917	0.825	0.785
Yükleme 2	0.915	0.924	0.892
Yükleme 3	0.900	0.921	0.863
Yükleme 4	0.877	0.908	0.850
Yükleme 5	0.849	0.893	0.834
Yükleme 6	0.825	0.883	0.810

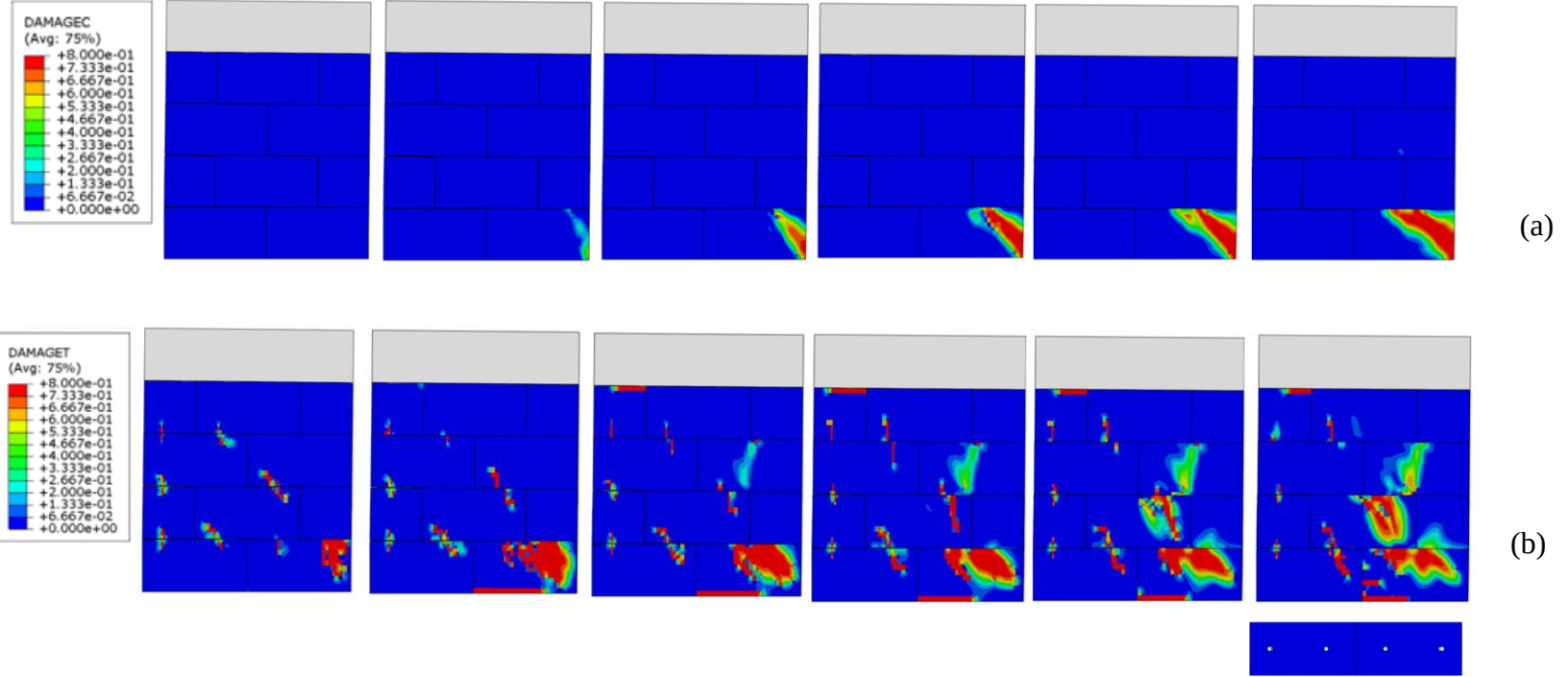
ASCE 41-23 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.917	0.933	0.875
Yükleme 2	0.915	0.980	0.952
Yükleme 3	0.900	0.991	0.964
Yükleme 4	0.877	0.994	0.961
Yükleme 5	0.849	0.996	0.957
Yükleme 6	0.825	0.998	0.957

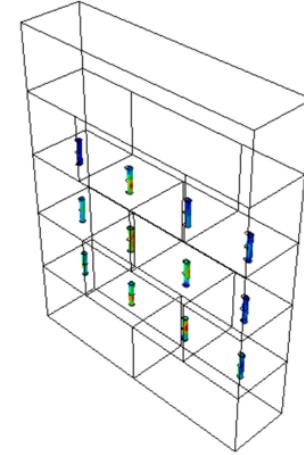
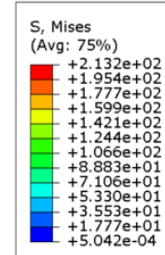
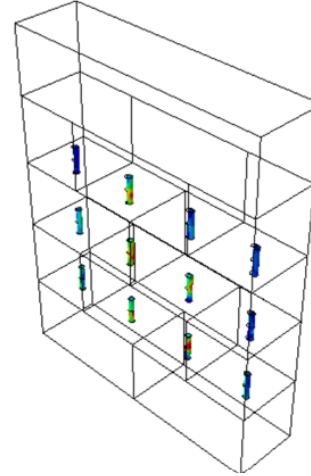
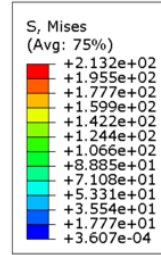
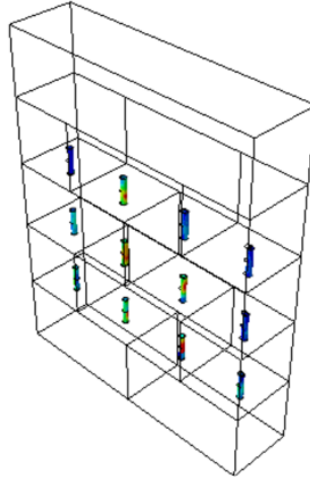
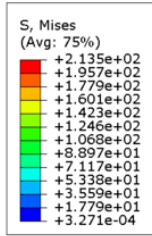
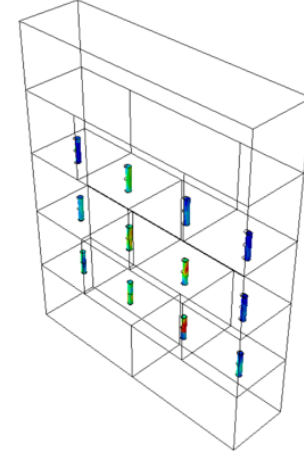
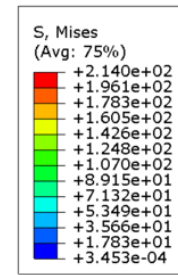
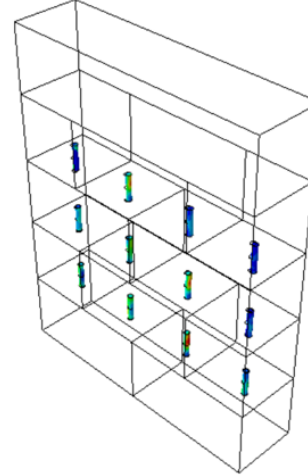
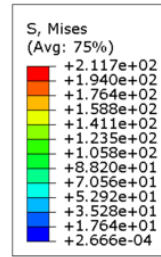
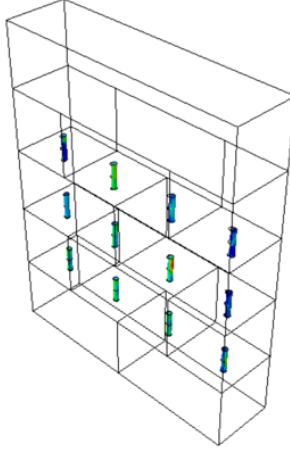
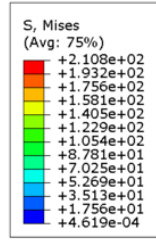
TYDRYK 2017

Yükleme	SH	KH	GÖ
Yükleme 1	0.959	0.835	0.785
Yükleme 2	0.991	0.930	0.892
Yükleme 3	0.997	0.931	0.863
Yükleme 4	0.999	0.921	0.850
Yükleme 5	0.999	0.912	0.834
Yükleme 6	0.999	0.901	0.810

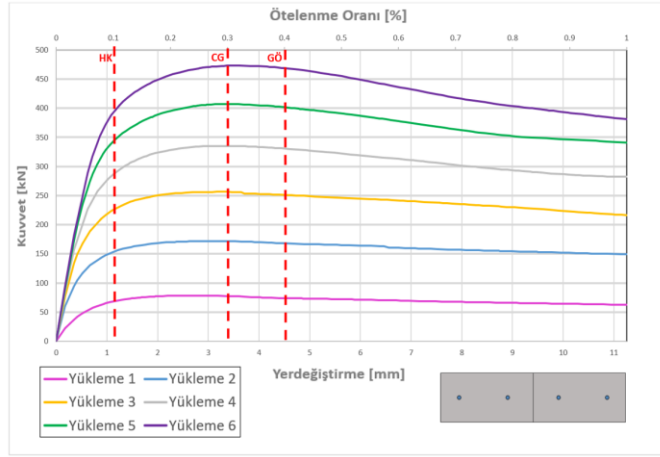
5.3.11 Model 5 pim



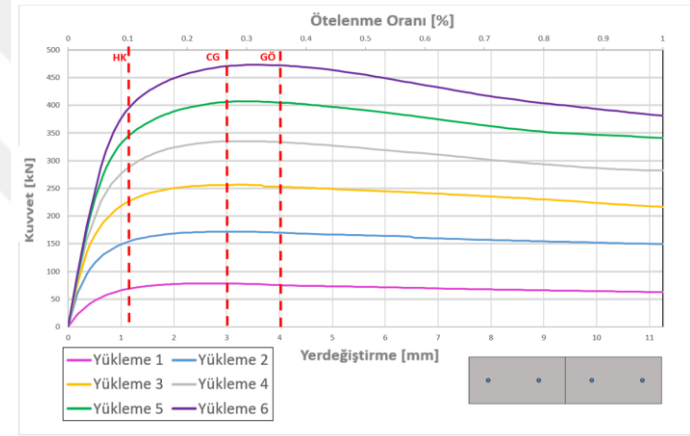
Şekil 5.62 : Model 5 pim için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.



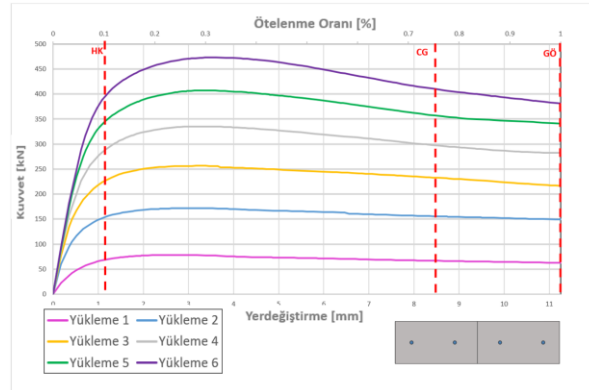
Şekil 5.63 : Model 5 pim demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3 üst sırada; Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6 alt sırada sunulmuştur.



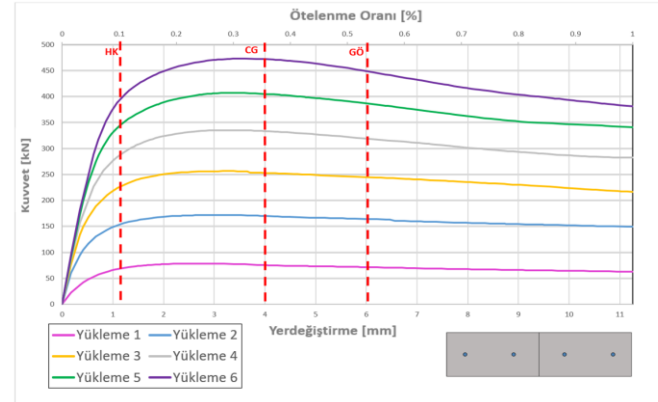
(a)



(b)

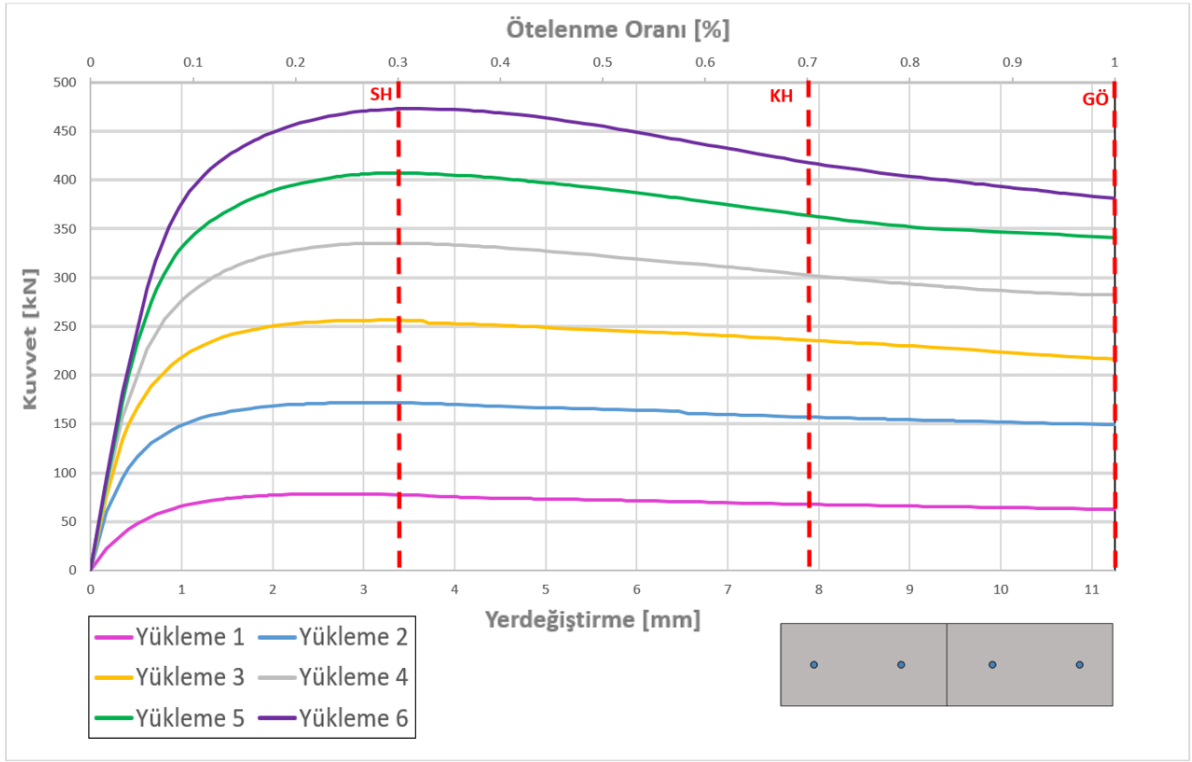


(c)

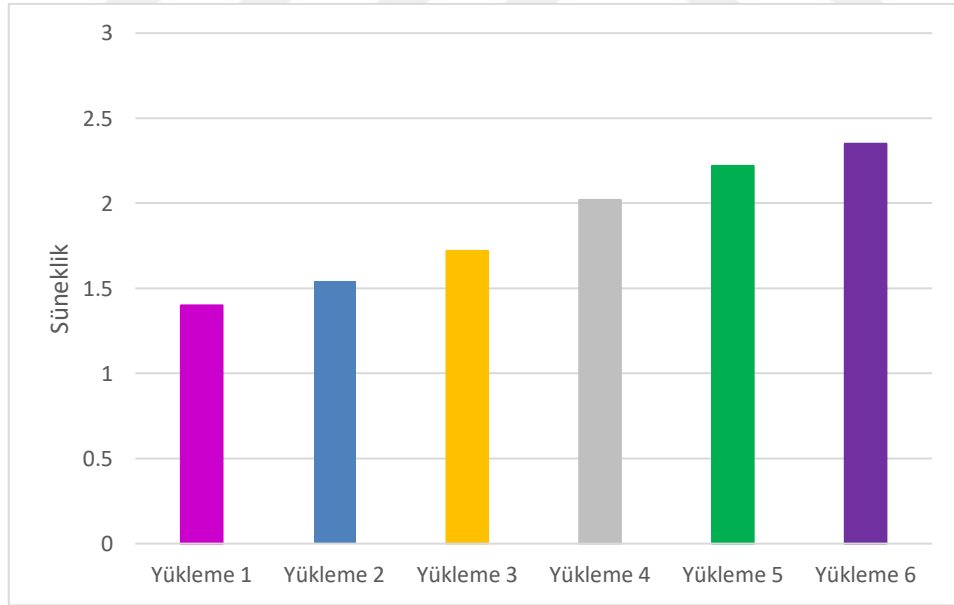


(d)

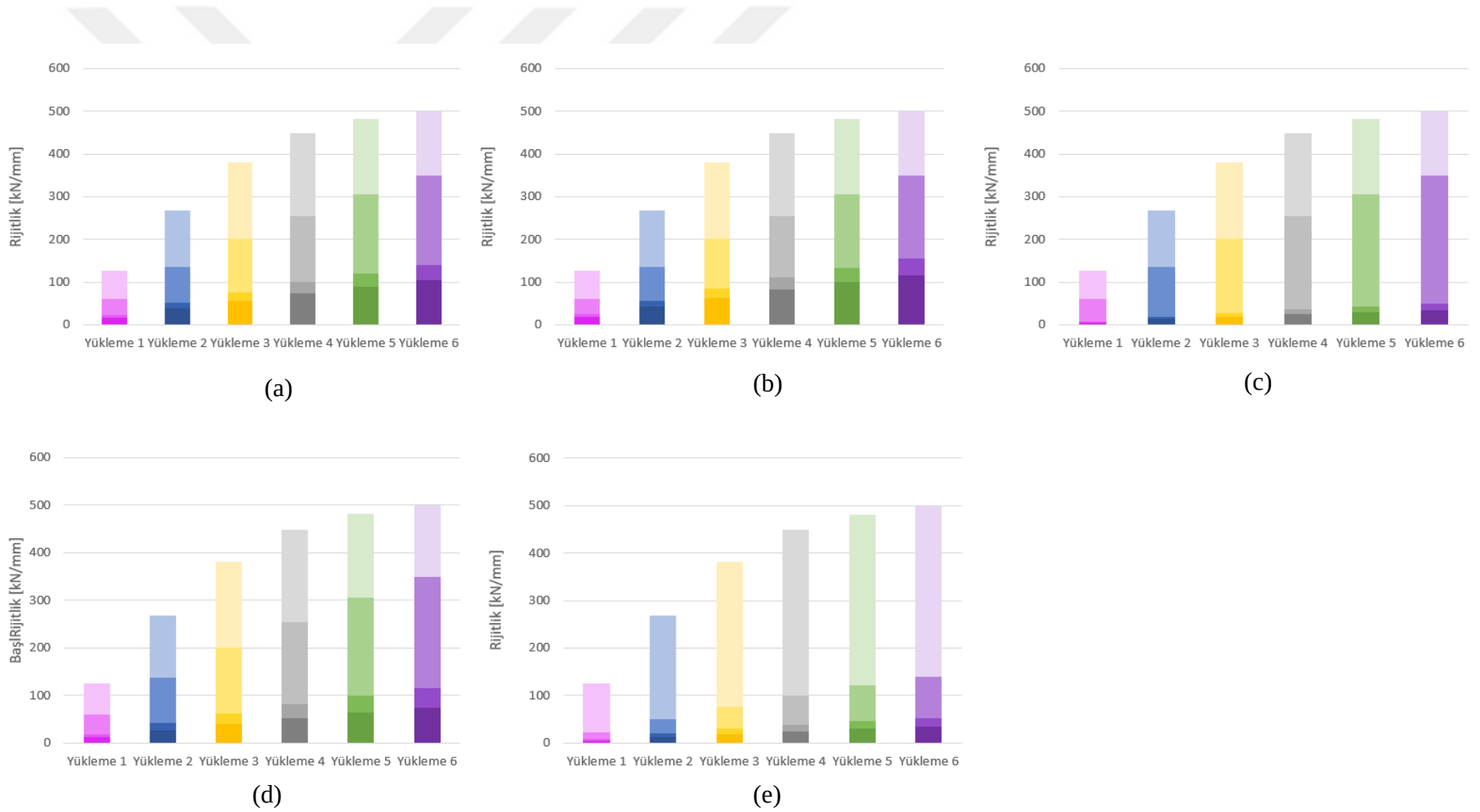
Şekil 5.64 : Model 5 pim için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.



Şekil 5.65 : Model 5 pim için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.



Şekil 5.66 : Model 5 pim için süneklik değerleri.



Şekil 5.67 : Model 5 pim için rijitlik değerleri elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017' ye göre rijitlik değerleri.

Çizelge 5.11 : Model 5 pim $P/P_{\max}$ değerleri.

FEMA 356 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.869	0.990	0.941
Yükleme 2	0.892	0.998	0.978
Yükleme 3	0.880	0.999	0.979
Yükleme 4	0.855	0.999	0.988
Yükleme 5	0.843	0.999	0.987
Yükleme 6	0.829	0.999	0.991

FEMA 356 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.869	0.999	0.958
Yükleme 2	0.892	0.999	0.988
Yükleme 3	0.880	0.999	0.986
Yükleme 4	0.855	0.999	0.994
Yükleme 5	0.843	0.998	0.994
Yükleme 6	0.829	0.995	0.996

ASCE 41- 23 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.869	0.850	0.799
Yükleme 2	0.892	0.906	0.867
Yükleme 3	0.880	0.909	0.844
Yükleme 4	0.855	0.889	0.842
Yükleme 5	0.843	0.877	0.839
Yükleme 6	0.829	0.867	0.806

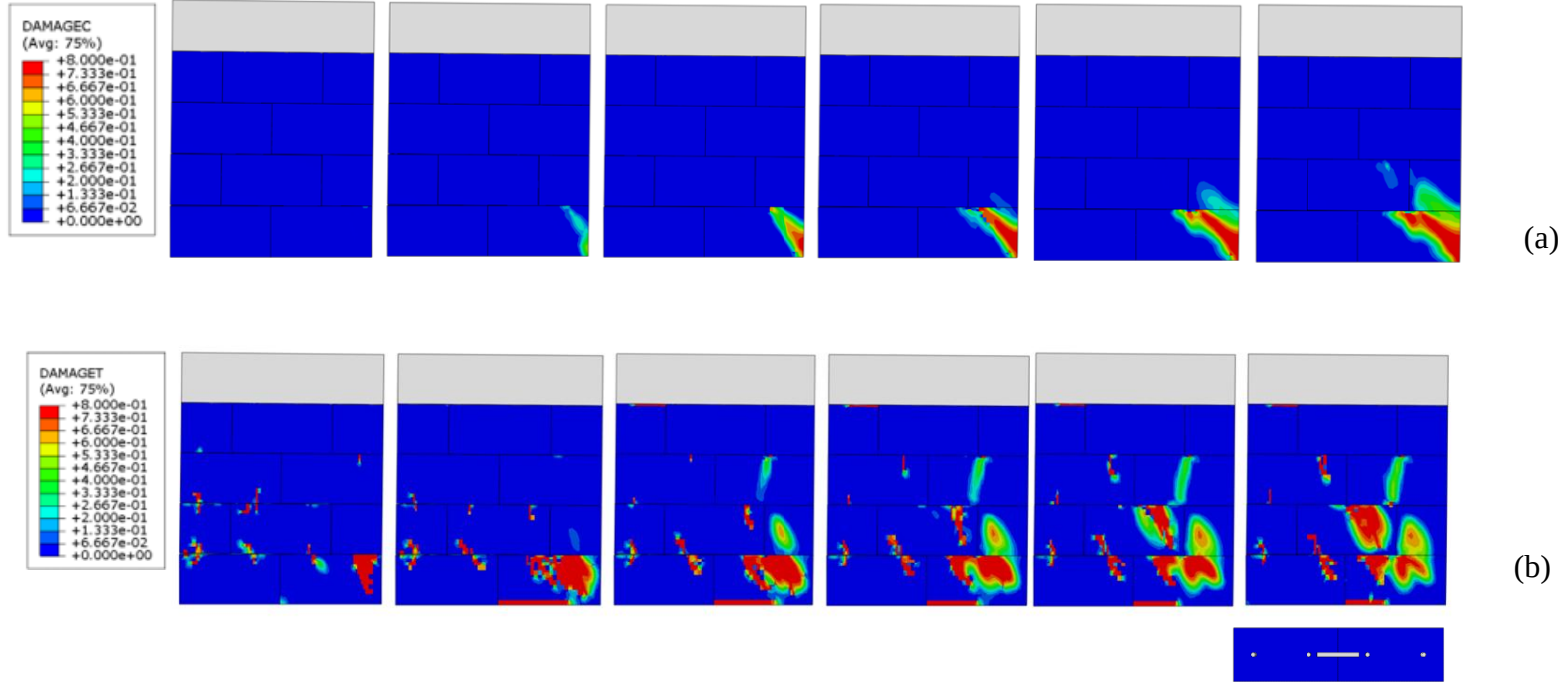
ASCE 41-23 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.869	0.958	0.908
Yükleme 2	0.892	0.988	0.955
Yükleme 3	0.880	0.986	0.952
Yükleme 4	0.855	0.994	0.948
Yükleme 5	0.843	0.994	0.948
Yükleme 6	0.829	0.996	0.946

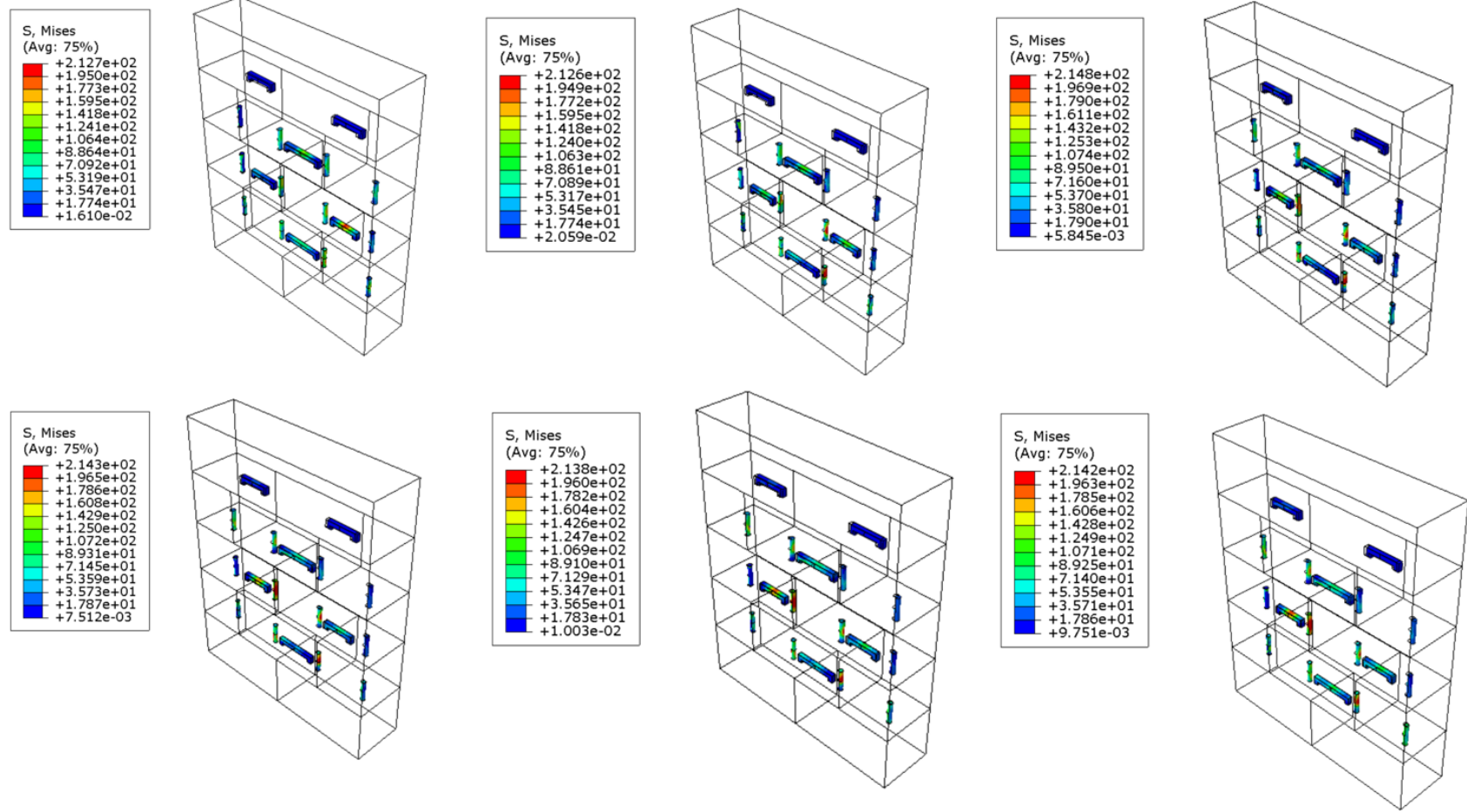
TYDRYK 2017

Yükleme	SH	KH	GÖ
Yükleme 1	0.990	0.865	0.799
Yükleme 2	0.998	0.914	0.867
Yükleme 3	0.999	0.921	0.844
Yükleme 4	0.999	0.904	0.842
Yükleme 5	0.999	0.895	0.839
Yükleme 6	0.999	0.884	0.806

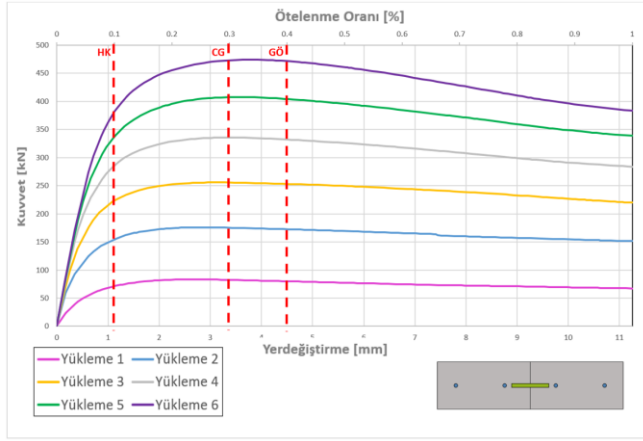
5.3.12 Model 5 hibrit



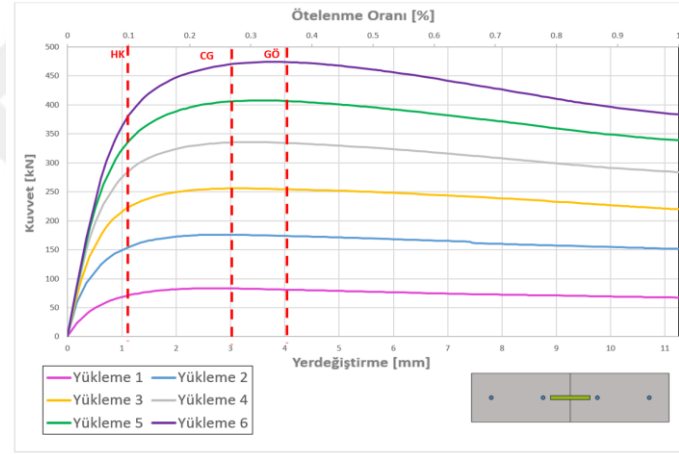
Şekil 5.68 : Model 5 hibrit için hasar gelişimi, (a) Basınç hasarları, (b) Çekme hasarları. Her bir alt görsel soldan sağa sırasıyla; Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3, Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6'ya karşılık gelmektedir.



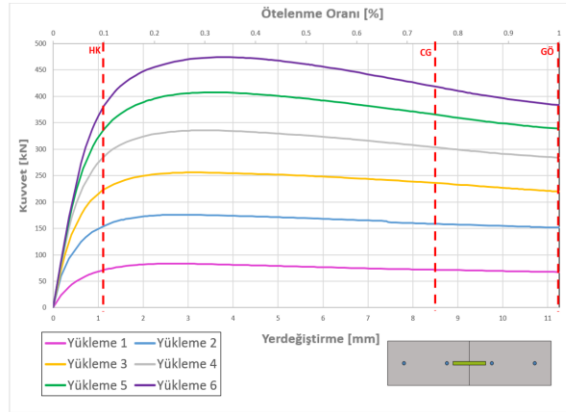
Şekil 5.69 : Model 5 hibritteki demir elemanlarda farklı yüklemeler altında oluşan Mises gerilmeleri. Sırasıyla Yükleme 1, Yükleme 2, Yükleme 3 üst sırada; Yükleme 4, Yükleme 5 ve Yükleme 6 alt sırada sunulmuştur.



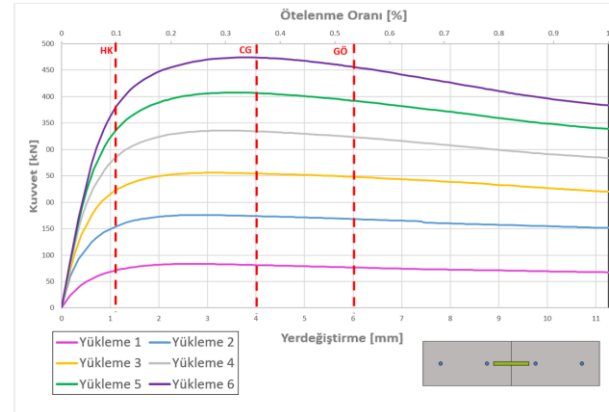
(a)



(b)

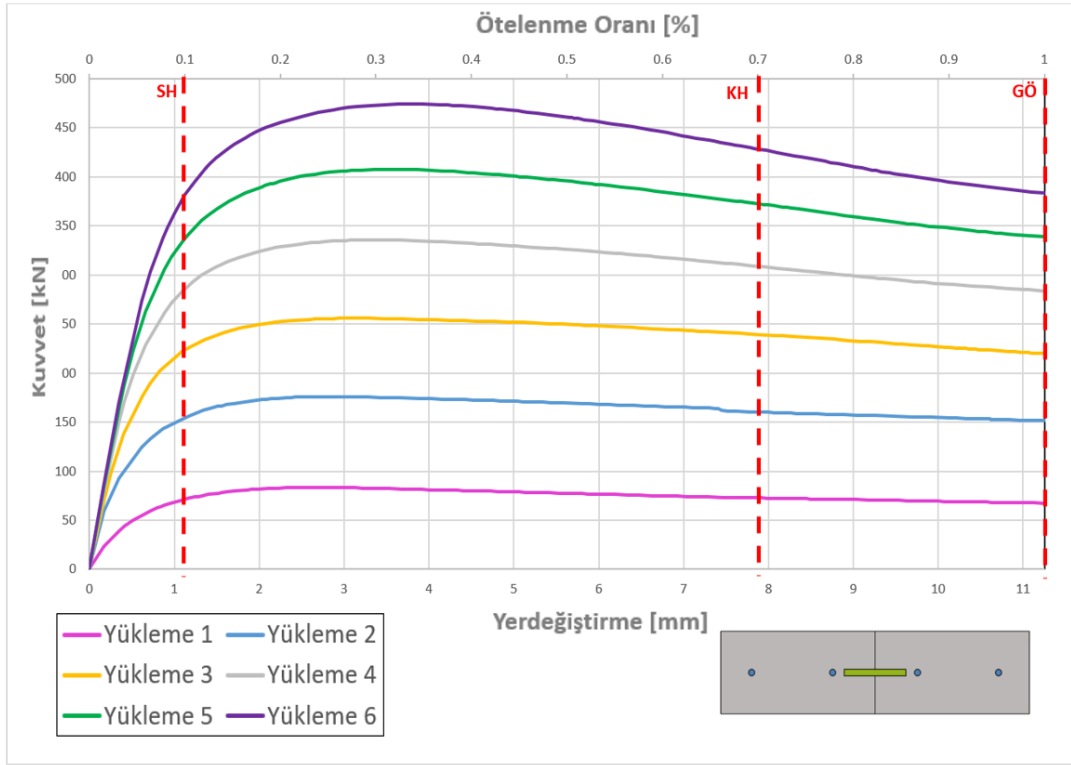


(c)

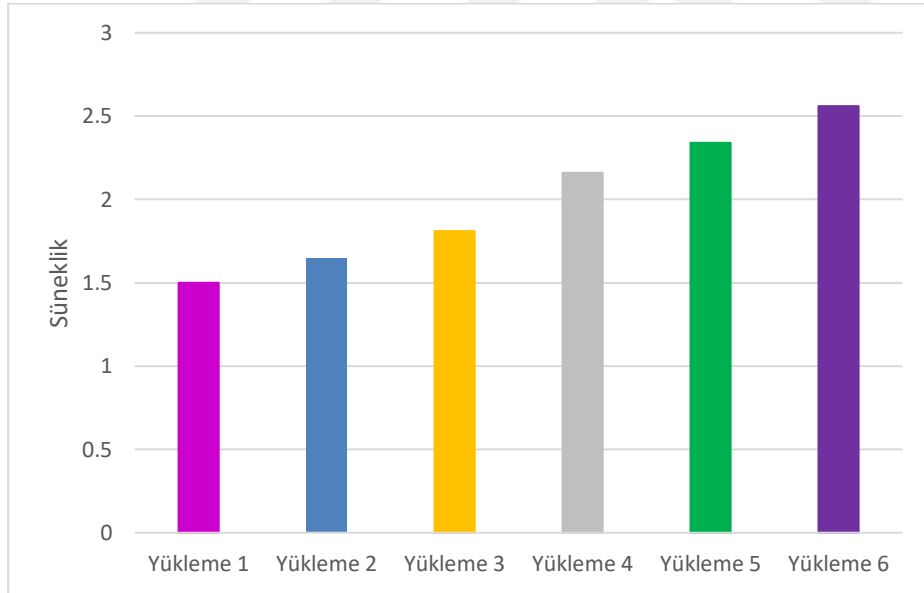


(d)

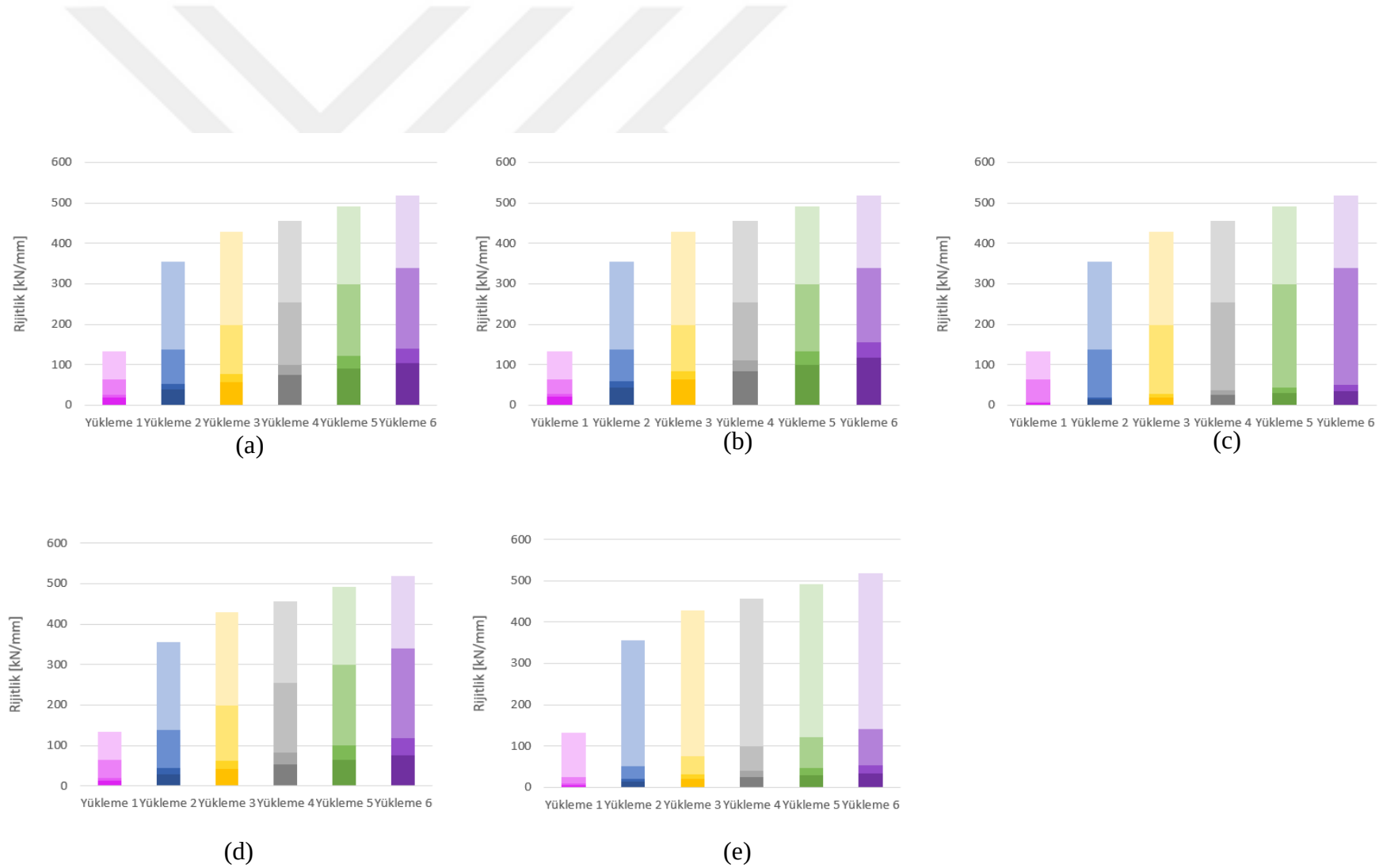
Şekil 5.70 : Model 5 hibrit için performans seviyeleri, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme davranışları, (c) ve (d) ASCE 41-23'e göre sırasıyla kayma ve dönme davranışı.



Şekil 5.71 : Model 5 hibrit için TYDRYK'ya göre performans seviyeleri.



Şekil 5.72 : Model 5 hibrit için süneklik değerleri.



Şekil 5.73 : Model 5 hibrit için rijitlik değerleri elastik ve ikinci rijitliklerin performans seviyelerine bağlı olarak değişimi, (a) ve (b) FEMA 356'ya göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (c) ve (d) ASCE 41 23'e göre sırasıyla kayma ve dönme rijitlikleri, (e) TDYRK 2017' ye göre rijitlik değerleri.

Çizelge 5.12 : Model 5 hibrit P/P_{max} değerleri.

FEMA 356 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.857	0.991	0.960
Yükleme 2	0.878	0.995	0.980
Yükleme 3	0.873	0.999	0.989
Yükleme 4	0.852	0.999	0.990
Yükleme 5	0.826	0.999	0.991
Yükleme 6	0.806	0.997	0.994

FEMA 356 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.857	0.997	0.971
Yükleme 2	0.878	0.999	0.987
Yükleme 3	0.873	0.999	0.994
Yükleme 4	0.852	0.999	0.995
Yükleme 5	0.826	0.996	0.996
Yükleme 6	0.806	0.992	0.999

ASCE 41- 23 – Kayma Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.857	0.862	0.809
Yükleme 2	0.878	0.860	0.860
Yükleme 3	0.873	0.859	0.859
Yükleme 4	0.852	0.846	0.846
Yükleme 5	0.826	0.831	0.831
Yükleme 6	0.806	0.808	0.808

ASCE 41-23 – Dönme Davranışı

Yükleme	HK	CG	GÖ
Yükleme 1	0.857	0.971	0.916
Yükleme 2	0.878	0.987	0.954
Yükleme 3	0.873	0.994	0.967
Yükleme 4	0.852	0.995	0.962
Yükleme 5	0.826	0.996	0.961
Yükleme 6	0.806	0.999	0.959

TYDRYK 2017

Yükleme	SH	KH	GÖ
Yükleme 1	0.991	0.873	0.809
Yükleme 2	0.995	0.912	0.860
Yükleme 3	0.999	0.935	0.859
Yükleme 4	0.999	0.922	0.846
Yükleme 5	0.999	0.914	0.831
Yükleme 6	0.997	0.903	0.808

5.4 Genel Değerlendirme

Bu tez çalışmasında, taş yığma duvar sistemlerinin yapısal performansı sayısal analizler yoluyla incelenmiş ve demir bağlantı elemanları olan pim (zıvana) ile kenetin yapı davranışına etkileri değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, bu bağlantı elemanlarının yapının rijitliğini, dayanımını ve sünekliğini artırarak yapının stabilitesine önemli katkı sağladığını göstermiştir.

Pim ve kenet kullanımı, yapıların yatay yükler karşısındaki performansını iyileştirmiş; yapının hasar almasını geciktirmiş ve daha stabil bir deformasyon süreci sağlamıştır. Özellikle her iki bağlantı elemanının birlikte kullanılması, yapının stabilitesini ve deformasyon kapasitesini artırmış, böylece daha kontrollü ve geç hasar gelişimi mümkün olmuştur. Bu bulgular, kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri, Von Mises gerilme dağılımları ve yer değiştirme konturları ile desteklenmiştir.

Sonuçlar, bu bağlantıların sayısal modellemelerde dikkate alınmasının yanı sıra, tarihi yapıların restorasyon ve güçlendirme projelerinde de öneminin altını çizmektedir. Demir bağlantı elemanlarının yapısal performansına olan katkısı, gelecekteki tasarım ve değerlendirme süreçlerinde göz önünde bulundurulmalıdır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1 Çalışmanın Özeti

Bu çalışmada, tarihi taş duvarların yapısal davranışı, farklı demir bağlantı elemanı konfigürasyonları altında detaylı olarak incelenmiştir. Tarihi yapılar, kültürel miras açısından önemli yapılar olup deprem ya da hatalı müdahaleler sonucunda geri dönüşü olmayan hasarlara uğrayabilmektedir. Bu tür yapıların doğru biçimde modellenmesi, yapısal davranışlarının anlaşılması ve uygun müdahale yöntemlerinin belirlenmesi amacıyla, demir bağlantılı taş duvarların süneklik, rijitlik ve taşıma kapasitesi gibi temel parametreleri sayısal olarak değerlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında, toplam 12 farklı model oluşturulmuş ve analizler yürütülmüştür. Olası etkileri belirlemek amacıyla modellerde çeşitli pim ve kenet kombinasyonları tanımlanmıştır. Harç kullanılmayan bu modellerde, taş üniteler arasında yalnızca mekanik temas esas alınmış, herhangi bir harç ya da benzeri eleman kullanılmamıştır.

Tüm analizlerde ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılmış ve doğrusal olmayan (nonlinear) statik itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılara %1 düzlem içi ötelenme oranı (drift ratio) uygulanmış ve her bir model, taş birimlerin karakteristik basınç dayanımının sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarındaki eksenel yük seviyelerine maruz bırakılmıştır. Böylece, eksenel yüklerin yapısal davranış üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak gözlemlenmiştir.

Gerçekçi bir yapısal davranışın modellenmesi amacıyla, çalışmada malzeme doğrusal olmayan davranış esas alınmış ve detaylı mikro modelleme tekniği kullanılmıştır. Bu teknik, yığma yapılarda uygulanması oldukça karmaşık ve hesaplama açısından maliyetli olmakla birlikte, taş birimlerin bireysel davranışlarını ve birbirleriyle etkileşimlerini ayrı ayrı tanımlama olanağı sunmaktadır. Modellemede her taş birimi ile diğer taş birimleri arasındaki temas noktalarında arayüz tanımları yapılmış, bu yüzeylerde deneysel verilere dayalı gerçekçi sürtünme katsayıları kullanılmıştır. Aynı şekilde, taş birimleriyle demir bağlantı elemanları (pim ve kenetler) arasındaki temas yüzeylerinde de benzer tanımlar yapılmış, taş–demir etkileşimi en yüksek doğrulukta modellenmiştir. Böylece, yapının karmaşık iç etkileşimlerinin tümü fiziksel gerçekliğe uygun şekilde temsil edilmiştir.

Modelleme kalitesinin artırılması için HyperMesh programı kullanılarak ileri düzey ağ (mesh) işlemleri uygulanmış, farklı bölgelerdeki gerilme yoğunluklarını dikkate alarak eleman tipine göre özel ağ yapısı (mesh) stratejileri geliştirilmiştir. Kritik bölgelerde daha yoğun ve hassas ağ yapısı uygulanmış, bu sayede lokal gerilme yığılmalarının önüne geçilmiştir. Bu işlem, sonlu eleman analizlerinde deformasyonun düzgün dağılımını sağlamış ve sonuçların güvenilirliğini arttırmıştır.

Her bir model için elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri üzerinden taşıma kapasitesi, rijitlik ve süneklik parametreleri belirlenmiş, bu veriler FEMA 356, ASCE 41-23 ve TYDRYK 2017 kapsamında tarihi yapılar için sunulan performans seviyeleriyle karşılaştırılmıştır. Yapılan bu karşılaştırmalar sonucunda, FEMA ve ASCE kılavuzlarının tarihi taş yapıların deformasyon kapasitesine uygun ve daha gerçekçi limitler sunduğu gözlemlenmiştir. Buna karşın, TYDRYK 2017 kılavuzunun oldukça geniş aralıklarla tanımlanmış performans limitlerine sahip olduğu, özellikle göçme sınırının %1 ötelenme oranı gibi yüksek denilebilecek bir seviyede tanımlanmasının, bazı modellerin bu sınır değerine ulaşamadan göçme davranışı sergilemesi nedeniyle, tarihi yapıların süneklik ve rijitliğini olduğundan daha yüksek gösterebildiği sonucuna varılmıştır. Bu durum, tarihi taş yapıların doğası gereği büyük deformasyonlara karşı dayanıksız olmalarıyla çelişmekte, dolayısıyla, TYDRYK 2017'in performans tanımlarının bu tür yapılar için fazla iyimser olduğu düşünülmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma tarihi taş duvar yapıların karmaşık mekanik davranışlarının sonlu elemanlar yöntemiyle etkin şekilde simüle edilebileceğini, detaylı mikro modellemenin, malzeme doğrusal olmayan tanımlarının ve yüksek kaliteli ağ yapısının analiz doğruluğuna büyük katkı sunduğunu ve demir bağlantı elemanlarının yapı performansına etkisinin yalnızca varlığıyla değil, yerleşim düzeniyle de belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen veriler, restorasyon ve güçlendirme projelerinde bilimsel dayanak sağlama açısından değerlidir. Donatı konfigürasyonu hem taşıma kapasitesi hem de süneklik üzerinde belirleyici bir parametre olup aksel yük gibi dış etkilere karşı yapının dayanım düzeyini doğrudan etkilemektedir. Doğru konfigürasyon tercihleri ile yüksek aksel yüklere karşın yapı performansı arttırılabilirken, hatalı yerleşimle düşük yük seviyelerinde dahi göçme riski oluşabilmektedir.

Bu bağlamda, donatı (kenet, zıvana) tasarımı yapılırken yalnızca toplam donatı oranı değil, aynı zamanda donatının yerleşim şekli, bağlanma düzeni ve konumlandırması da dikkate alınmalı, modellenen sistemlerde olduğu gibi alternatif konfigürasyonlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmelidir.

6.2 Çalışmada Ulaşılan Ana Sonuçlar

Bu sayısal çalışma kapsamında ulaşılan ana sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Demir elemanların konfigürasyonu taşıyıcı performans üzerinde belirleyici bir etkidir. Özellikle düzgün dağıtılmış ve simetrik donatıya (kenet, zıvana) sahip modeller hem taşıma kapasitesi hem de süneklik bakımından daha dengeli bir performans göstermiştir. Kenarlarda yoğunlaştırılmış donatıya sahip modellerde rijitlik artışı gözlenirken, süneklikte önemli ölçüde azalma meydana gelmiştir.
- Taşıma kapasitesi, donatı konfigürasyonuna bağlı olarak önemli oranda değişmiştir. Bazı konfigürasyonlar örneğin model 1 pim ve model 1 hibrit düşük eksenel yük seviyelerinde bile yüksek taşıma kapasitesine ulaşabilirken, zayıf donatı düzenine sahip modellerde kapasite sınırlı kalmıştır. En yüksek taşıma kapasitesi, simetrik ve köşe takviyeli konfigürasyonlara sahip modellerde, özellikle, %10~%15 eksenel yük seviyelerinde elde edilmiştir.
- Rijitlik, donatı yoğunluğu ve dağılımına doğrudan bağlıdır. Donatının yalnızca belli bölgelerde yoğunlaştığı modellerde, rijitlik lokal olarak artarken yapının genel davranışı dengesizleşmiştir. Donatının homojen ve çevresel yerleşimi, rijitlikte daha kararlı bir artış sağlamıştır.
- Süneklik açısından en başarılı performans, hem yatay hem düşey doğrultuda bağlanmış ve çekme bölgesinde donatı bulunduran modellerde gözlenmiştir. Bu modeller, enerji tüketme kapasitesi yüksek ve hasar sonrası göçme eğilimi düşük sistemler olarak değerlendirilebilir.

- Hasar mekanizmaları da doğrudan donatı konfigürasyonuna bağlı olarak çeşitlenmiştir. Düşük donatı yoğunluğuna sahip modellerde taş ezilmesi ve çekme hasarı gözlenirken, yetersiz kenetlemeye sahip modellerde kayma davranışı baskın olmuştur.
- Belirgin hasarın oluştuğu eksenel yük seviyesi, modele bağlı olarak değişmiştir. Ancak, genel eğilim olarak, zayıf donatıya sahip modellerde %10 eksenel yük seviyesinde dahi ciddi hasarlar başlarken, iyi konfigüre edilmiş modellerde bu sınır %15~%20 aralığına kadar çıkabilmiştir.
- Taş model, bağlayıcısız bir sistem olduğundan yapısal rijitliği yok denecek kadar azdır. Sistem, esas olarak malzeme sürtünmesi ve üzerine etkiyen eksenel yük ile dengede kalmaktadır. Eksenel yük arttıkça taşların birbirine temas yüzeylerindeki sürtünme kuvveti artmakta, bu durum sınırlı da olsa rijitlikte bir artışa neden olmaktadır. Ancak genel olarak sistemin rijitliği oldukça düşüktür ve dış etkiler karşısında deformasyona açıktır.
- Kenet modelde, yalnızca yatay kenetlemenin etkisi görülmektedir. Zıvana olmamasına rağmen taş modele göre ciddi iyileşme olduğu görünmüştür. Bu da basit bir bağlayıcının bile önemli fark yaratabildiğini göstermektedir.
- Model 1 Pim ve Hibrit sistemde, her sırada simetrik donatı olduğu için dengelidir. Hem rijitlik ve süneklik hem de taşıma kapasitesinde en iyi konfigürasyon bu modelde elde edilmiştir. Hibrit versiyonda kenet katkısı %5~10 artmıştır. Model 1 Hibrit diğer modellerle karşılaştırma için referans modeli alınmış olup diğer modellerin taşıma kapasitesi, rijitlik ve süneklik oranları bu modele göre oransal olarak değerlendirilmiştir (Çizelge 6.1). Hibrit

bağlantı sistemlerinin hem süneklik hem de rijitlik bakımından daha dengeli ve yüksek performans sunduğu, pimli sistemlerin ise nispeten düşük süneklik değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

- Model 2 Pim ve Hibrit sistemde, demirler simetrik değildir. Bu nedenle süneklik ve rijitlik sınırlı kalmıştır. Hibrit model kenet katkısıyla toparlanmış, ancak Model 1 kadar etkili olamamıştır.

- Model 3 Pim ve Hibrit sistemde aynı sırada tekrar eden pimler mevcuttur. Bu, rijitliği belirli ölçüde sağlasa da yapının davranışını biraz yönlü hâle getirmiştir. Hibrit model kenet katkısıyla daha kararlı davranış sergilemiştir.

- Model 4 Pim ve Hibrit sistemde, aynı taş içinde aynı hizada pimler mevcuttur; Bu durum yerel zayıflık yaratmıştır. Lokal rijitlikler oluşmuş, deformasyon tek bölgede toparlanmıştır. Rijitlik diğer modellere göre daha düşük elde edilmiştir. Bu durum pimlerin aynı hizada olması sonucu taşıyıcı etkinliğin azalması ile açıklanabilir. Kenet kullanımı ortaya çıkan bu olumsuzluğu kısmen telafi etmiştir.

- Model 5 Pim ve Hibrit sistemde, pim model için tek sıra ortadaki pimle çözüm aranmıştır. Merkeze yük alan bir davranış vardır, kenar taşlar yeterince tutunamadığı için rijitlik ve süneklik sınırlı kalmıştır. Hibrit modelde kenet katkısı rijitlikte hissedilir bir iyileşme sağlamıştır.

- Donatının simetrik olmaması ve dağılımı, hem süneklik hem de rijitlik için kritik önemdedir.

- Kenetleme rijitliği arttırmakta (%1.07~%29.40) ve deformasyon kapasitesini (%1.42~%14.49) geliştirmekte oldukça başarılıdır.

- Tek yönlü ya da aynı hizada donatıların kullanılması yerel zayıflık oluşturabileceğinden kaçınılmalıdır.

- İdeal çözüm Model 1 hibrit sistemde olduğu gibi simetrik, her sırada donatılı ve kenetle desteklenmiş sistemlerdir.

-Hibrit modeller tüm ölçütlerde en iyi sonuçları vermiştir.



Çizelge 6.1 : Modellerin referans modele (Model 1 Hibrit) göre oransal karşılaştırılması.

Model	Süneklik Oranı[%]	Rijitlik Oranı [%]	Yük Taşıma Oranı [%]
Model 1 Hibrit	100	100	100
Model 1 Pim	98.60	97.90	98.60
Model 2 Hibrit	95.60	94.80	98.10
Model 2 Pim	83.90	93.80	95.50
Model 3 Hibrit	95.60	96.30	98.50
Model 3 Pim	83.50	95.00	97.10
Model 4 Hibrit	81.10	96.00	87.80
Model 4 Pim	79.00	74.20	82.30
Model 5 Hibrit	88.00	95.20	95.40
Model 5 Pim	80.70	91.80	95.70
Kenet Model	77.60	64.70	78.20
Taş Model	76.30	59.30	74.80

* Bu çizelgedeki oransal yaklaşım %25 eksenel yük seviyesine göre yapılmıştır. Model 1 Hibrit için maksimum yük taşıma değeri 497.23 kN'dur.

6.3 Bu Çalışmanın Katkıları Doğrultusunda Gelecekte Yürütülebilecek Araştırmalar

- Bu çalışmada sayısal inceleme için geliştirilen modeller, gerçek ölçekli deneysel verilerle kalibre edilerek daha doğru ve güvenilir simülasyon çıktıları elde edilebilir.
- Farklı taş tipleri, boyutları ve yerleştirme desenleri dikkate alınarak, daha farklı taş duvar konfigürasyonları modellenebilir; böylece diğer tarihi yapı türlerine uygun tasarım stratejileri geliştirilebilir.
- Restorasyon uygulamalarında, yapının davranışına zarar verebilecek aşırı rijitleştirmelerden kaçınılmalı, elde edilen sonuçlar doğrultusunda yapının doğal sünekliğini koruyacak şekilde demir donatı detayları seçilmelidir.
- Özellikle yalnızca bir bölgesi hasar görmüş yığma duvarlarda, lokal müdahaleler için uygun donatı yerleşim stratejileri belirlenebilir. Simetrik ya da kısmen simetrik donatı düzenlerinin bölgesel uygulanabilirliği araştırılabilir.
- Bu çalışmada incelenen pim ve kenet sistemlerinin dışında, farklı bağlantı elemanları (çelik çubuklar, cam lif takviyeli polimerler vb.) içeren hibrit sistemler analiz edilerek alternatif tekniklerin etkinliği karşılaştırmalı olarak incelenebilir.
- Gerçekleştirilen statik karakterli analizlerin ötesine geçilerek, doğrusal olmayan zaman tanım aralığında dinamik analizlerle, farklı büyüklüklerdeki deprem senaryoları altında yapısal davranış test edilebilir.
- Tarihi yapıların restorasyon rehberlerinde kullanılan performans limitleri, bu tür sayısal modelleme yöntemleriyle yeniden değerlendirilebilir ve farklı ülkelerin yönetmelikleriyle karşılaştırarak evrensel ölçekli iyileştirme önerileri geliştirilebilir.
- Gelecekte yapay zekâ destekli optimizasyon algoritmaları ile belirli bir yapı tipi ve hasar senaryosuna özel en uygun donatı konfigürasyonunun otomatik olarak belirlenmesi yönünde çalışmalar yapılabilir.

- Son olarak, yapının yalnızca mekanik değil, nem, sıcaklık, karbonatlaşma gibi çevresel etkiler altındaki uzun vadeli davranışı da entegre modellerle değerlendirilerek daha bütüncül koruma stratejileri üretilebilir.





KAYNAKLAR

- ABAQUS.**, Analysis User's Guide, Hibbit, Karlsson, and Sorenson, Inc, Pawtucket, RI.
- ABAQUS.**, Getting Started with ABAQUS: Interactive Edition, Hibbit, Karlsson, and Sorenson, Inc, Pawtucket, RI.
- Abdulla, K. F., Cunningham, L. S., & Gillie, M.** (2017). Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach. *Engineering Structures*, 151, 349-365.
- Altair Engineering Inc.** (2019). *Altair HyperMesh (Version 2019)* [Computer software]. <https://altair.com/hypermesh>
- Arioğlu, N., Tuğrul, İ., Zarif, H., Girgin, C. ve Arioğlu, E.**(1999a), “Küfeki Taşının Dayanıklılık Analizi: Şehzade Camisi Örneği-1”, *Yapı Dergisi*, 214, sy. 109-113.
- ASCE/SEI 41-23.**, *Seismic Evaluation and Retrofil of Existing Buildings*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA.
- Autodesk Inc.** (2022). *AutoCAD Mechanical (Version 2020)* [Computer software]. <https://www.autodesk.com/products/autocad-mechanical>.
- Birtel, V., Mark, P.** 2006. Parameterised finite element modelling of RC beam shear failure. In ABAQUS users' conference (pp. 95-108).
- Bussell, M.** (1997). *Appraisal of existing iron and steel structures*. The Steel Construction Institute.
- Calderini, C., Cattari, S. and Lagomarsino, S.** (2010). The use of the diagonal compression test to identify the shear mechanical parameters of masonry, *Construction and Building Materials*, 24, 5, pp.677-685.
- Çelik, O. C., Sesigür, H.** (2010). Performance of Historic Masonry Buildings during the April 6, 2009 L'Aquila Earthquake. 14th European Conference on Earth uake Engineering, August 30-September 3, Ohrid, Rep. of Macedonia (CD-ROM).
- Çelik, O. C.** (2017, Kasım). *Holistic seismic behavior and design of buildings*. Detmold Conference Week 2017. Erişim adresi: <https://www.researchgate.net/publication/334250271>
- Çelik, O.C., Mentese, V.G. ve Salman, M.** (2021). Yığma Kargir Tarihi Yapıların Deprem Güvenliği ve Yapısal Modellenmesi, İTÜ-AFAD, Bursa Tarihi Cami Minarelerinin Deprem Davranışı Çalıştayı Bildiriler Kitabı, 27 Kasım, İstanbul, içinde (ss. 22-28)
- Çelik, O. C.** (2023). Etkin güçlendirme yöntemlerine örnekler. *İTÜ Vakfı Dergisi – Deprem Aklımızda Kalmalı*, 91, 58–65.
- Çelik, O. C.** (2024). Tarihi yapıların güçlendirilmesi. *Ege Mimarlık*, 2024(2)

- Demir, C.**(2012) “Seismic Behaviour of Historical Stone Masonry Multi-leaf Walls“, PhD Thesis, Istanbul Technical University.
- FEMA 356**, 2000: *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington.
- Gedik, H., Sesigür, H., Çelik ve O.C. ve Çılı, F.** (2010). Effect of Wooden Ties on the Behavior of Historic Stone Masonry Vaults. 8th International Masonry Conference, July 4-7, Dresden, Germany
- Hibbitt, H., Karlsson, B. ve Sorensen P.**, 2011. Abaqus analysis users manual version 6.11 Dassault Systèmes Simulia Corp, Providence, RI, USA.
- Foroughi, A., & Yüksel, E.** (2019). Farklı Plastik Menteşe İlişkilerine Sahip Betonarme Perdelerin Yer Değiştirme Davranışının İncelenmesi. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(3), 614–623. <https://doi.org/10.24107/ijeas.620994>
- Lee, J., & Fenves, G. L.** (1998). Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(8), 892–900. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:8\(892\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892))
- Ling, J. H., Lim, Y. T., & Jusli, E.** (2023). Methods to Determine Ductility of Structural Members: A Review. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 9(2), 181–194. <https://doi.org/10.22146/jcef.6631>
- Lourenço, P.B., Rots, J. G. ve Blaauwendraad, J.** (1995). “Two approaches for the analysis of masonry structures: micro and macro-modeling”, *HERON*, 40(4), 313-340.
- Lourenço, P. B.** (1996). Computational strategies for masonry structures (Doctoral dissertation, Delft University of Technology). TU Delft Repository. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:4f5a2c6c-d5b7-4043-9d06-8c0b7b9f1f6f>
- Lourenço, P.B. ve Rots, J. G.** (1997). Multisurface interface model for analysis of masonry structures. *Journal of Engineering Mechanics* 123(7): 660-668.
- Lourenço, P.B., Oliveria, D.V., Roca, P. ve Orduna, A.** (2005). Dry Joint Stone Masonry Walls Subjected to In-Plane Combined Loading. *Journal of Engineering Mechanics* :1665-1673
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., & Oñate, E.** (1989). A plastic-damage model for concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 25(3), 299–326. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4)
- Mentese, V. G.** (2018). 3D Nonlinear Modeling and Testing of Historic Stone Masonry Arch Bridges: The Case of Justinian’s Bridge. Istanbul Technical University - Graduate School of Science Engineering and Technology.
- Tarihi yapılar için deprem risklerinin yönetimi kılavuzu (2017)**, Erişim adresi: https://cdn.vgm.gov.tr/organizasyon/organizasyon12_030619/kilavuz.pdf

- Nikolić, Ž., Krstevska, L., Smoljanović, H., & Živaljić, N.** (2020). Modelling of the influence of metal connectors on the resistance of historical dry-stone masonry structures. *International journal of architectural heritage*.
- Oliveira, D.V.** (2003). Experimental and numerical analysis of blocky masonry structures under cyclic loading, PhD Thesis, University of Minho, Portugal.
- Roca, P., Cervera, M., Gariup, G., and Pela, L.** (2010). Structural analysis of masonry historical constructions: Classical and advanced approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17, 299-325.
- Salman, M.** (2023). Kişisel arşiv.
- Sesigür, H., Çelik, O.C. ve Çılı, F.** (2005). Esnek Döşemeli Tarihi Yığma Kargir Yapıların Güçlendirilmesi: İzmit Sultan Abdülaziz Av Köşkü Örneği, Kocaeli 2005 Deprem Sempozyumu, 23-25 Mart, Kocaeli içinde (s. 147).
- Silva, V., Tsiavos, I., & Stojadinović, B.** (2023). Ductility-strength and strength-ductility relations for a constant yield displacement seismic design procedure. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21, 1655–1680. <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01683-1>
- T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı.** (2007). *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY 2007)*. Resmî Gazete (sayı: 26454). <https://www.resmigazete.gov.tr/>
- Tanyeli, G.**, 1990: Osmanlı Mimarlığında Demirin Strüktürel Kullanımı (15.18. yüzyıl), İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi Çalışması, İstanbul.
- Vanin, M., da Porto, F., & Modena, C.** (2017). Experimental investigation on in-plane shear behaviour of full-scale stone masonry walls. *Engineering Structures*, 141, 76–94. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.02>



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Melika SALMAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Salman, M., Çelik, O. C. (2024, May 8–10). Advanced structural modeling of historic stone masonry walls incorporating iron clamps and dowels. 3rd International Graduate Research Symposium (IGRS'24), Istanbul Technical University, Istanbul, Türkiye.

DiĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Çelik, O.C., Mentese, V.G. ve Salman, M. (2021). Yığma Kargir Tarihi Yapıların Deprem Güvenliği ve Yapısal Modellenmesi, İTÜ-AFAD, Bursa Tarihi Cami Minarelerinin Deprem Davranışı Çalıştayı Bildiriler Kitabı, 27 Kasım, İstanbul, içinde (ss. 22-28)