

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

LİFLİ POLİMERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ YIĞMA DUVARLARIN MODELLENMESİ

OKTAY JAFAROV

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YAPI PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. Dr. H. Orhun KÖKSAL**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LİFLİ POLİMERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ YIĞMA DUVARLARIN MODELLENMESİ

Oktaç JAFAROV tarafından hazırlanan tez çalışması 16.07.2012 tarihinde aşığıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. H. Orhun KÖKSAL
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Eş Danışman

Doç. Dr. Bilge DORAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. H. Orhun KÖKSAL
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Prof. Dr. Cengiz KARAKOÇ
Boğaziçi Üniversitesi

Doç. Dr. Zafer KÜTÜĞ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Güray ARSLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Kutay ORAKÇAL
Boğaziçi Üniversitesi



ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmamı tamamlama süresince benden destek ve yardımlarını esirgemeyen, tezimin her bölümünü titizlikle inceleyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. H. Orhun KÖKSAL ve Doç. Dr. Bilge DORAN'a

Her türlü bilgi ve tecrübesi ile bu çalışma boyunca bana yardımcı olan, önerilerini hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Cengiz KARAKOÇ'a,

Maddi manevi destekleri ile her zaman yanımda olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Temmuz, 2012

Oktay JAFAROV

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xviii
ABSTRACT	xx
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	18
1.3 Bulgular	20
BÖLÜM 2	
YIĞMA DUVAR BİLEŞENLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	22
2.1 LP Sargılı Yığma Duvarların Doğrusal Olmayan Analizinde Temel İlkeler.....	22
2.2 Yığma Birimleri Olarak Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	23
2.2.1 Tuğla.....	23
2.2.2 Doğal taş	31
2.2.4 Beton Biriketler	32
2.2.5 Yığma Birimlerinin Basınç Dayanımları	34
2.2.6 Kayma Dayanımı	43
2.3 Harcın Yığma Davranışı Üzerinde Etkisi	44
2.4 Yığmanın Elastisite Modülü.....	46
2.5 LP'nin Yapısına Göre Sınıflandırılması.....	48
BÖLÜM 3	
3.1 Akma/Kırılma Kriterleri	51
3.2 Rankine Kriteri.....	55
3.3 Tresca ve von Misses Kriterleri	56

3.4 Mohr- Coulomb Kriteri.....	58
3.5 Drucker-Prager Kriteri.....	61
BÖLÜM 4	
4.1 Giriş	68
4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	68
4.2.1 Sonlu Eleman Formülasyonu	70
4.2.2 Üç Boyutlu Problemler.....	70
4.2.2.1 Altı Yüzlü, Sekiz Düğüm Noktalı Eleman	71
4.2.2.2 Tek Yüzlü, Dört Düğüm Noktalı, İki Boyutlu Eleman.....	72
4.3 Önerilen Nümerik Model	74
4.4 Deney Duvarı No.1	78
4.5 Deney Duvarı No.2	83
4.6 Deney Duvarı No.3	106
4.7 Deney Duvarı No.4	115
4.8 Deney Duvarı No.5	122
4.9 Deney Duvarı No.6	138
4.10 Deney Duvarı No.7	172
4.11 Deney Duvarı No.8.....	179
4.12 Deney Duvarı No.9	187
4.13 Deney Duvarı No.10.....	192
BÖLÜM 5	
SONUÇ VE ÖNERİLER	204
KAYNAKLAR.....	209
EK1	
NÜMERİK OLARAK DP KRİTERİ AKMA YÜZEYİ.....	217
ÖZGEÇMİŞ.....	218

SİMGE LİSTESİ

b	Duvar uzunluğu
c	Kohezyon
c_{bl}	Tuğla/Beton bimlerin kohezyon değeri
c_{mr}	Harç birimlerin basınç dayanımı
E_{mr}	Harç birimlerin elastisite modülü
E_{bl}	Tuğla/ Beton birimlerin elastisite modülü
E_{FRP}	LP eleman elastisite modülü
ϵ	Birim deformasyon
h	Duvar yüksekliği
f'_m	Yığma basınç dayanımı (MPa)
f_{mr}	Harcın ortalama basınç dayanımı (MPa)
f_{bl}	Tuğla/Beton elemanın basınç dayanımı (MPa)
f_l	LP eleman çekme dayanımı
I_1	Gerilme tansörünün birinci invaryantı
J_2	Deviatorik(şekil fonksiyonu) kayma gerilme tansörünün ikinci invaryantı
n	LP elemanın duvar yüzeyine sarım sayısı
S	Atomlar arası bağ sabiti
K, α, β	Yığma basınç dayanım sabit değerleri
τ	Kayma dayanımı (MPa)
μ	Poisson oranı
α, k	DP kriteri malzeme katsayıları
ϕ_{mr}	Harç birimlerin içsel sürtünme açısı
ϕ_{bl}	Tuğla/Beton birimlerin içsel sürtünme açısı
σ_m	Ortalama basınç dayanımı
r_0	Atom boyutu

KISALTMA LİSTESİ

ABYYHY	Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
CLF	Cam Lifli Polimer
DP	Drucker- Prager
EC	Eurocode
ETHZ	Zurich Institute of Structural Engineering
KLF	Karbon Lifli Polimer
LP	Lifli Polimer
PET	Polyethylene Terephthalate
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Atomlar Arası Uzaklığa Bağlı Olarak Bağların Kuvvetliliği [73]. 25
Şekil 2.2	Üçlü (a) ve Beşli (b) Yığma Prizmanın Şematik Gösterimi 27
Şekil 2.3	Eksenel Kuvvet Etkisinde Şaşırtmalı Örgülü Yığma Duvar..... 28
Şekil 2.4	(a) Taban Kayması, (b) Diyagonal Çatlamalar [77] 29
Şekil 2.5	Harman Tuğlası..... 30
Şekil 2.6	Beton Briket..... 32
Şekil 2.7	Harç Basınç Dayanımının Yığma Basınç Dayanımı Üzerinde Etkisi 34
Şekil 2.8	Tuğla Basınç Dayanımının Yığma Basınç Dayanımı Üzerinde Etkisi..... 35
Şekil 2.9	Harç Basınç Dayanımının Yığma Basınç Dayanımı Üzerinde Etkisi..... 36
Şekil 2.10	Tuğla Basınç Dayanımının Yığma basınç Dayanımı Üzerinde Etkisi..... 38
Şekil 2.11	Beton Briket Basınç Dayanımının Yığma Basınç Dayanımına Etkisi..... 39
Şekil 2.12	Beton Briket ve Tuğla Blokların Yığma Duvar Üzerinde Etkisi..... 40
Şekil 2.13	Prizmada Eksenel Yük Etkisinde Harç Birimlerinde Çekme Oluşumu 42
Şekil 2.14	Elastisite Modülü - Tuğla Basınç Dayanımı İlişkisi 48
Şekil 2.15	Lifli Polimer, Kompozit ve Reçinenin Çekme Gerilmesinin Karşılaştırılması..... 48
Şekil 2.16	Cam, Aramid, Karbon ve Çelik Malzemelerin Karşılaştırılması [96] ... 49
Şekil 2.17	Şerit Halinde Cam Elyaf [97] 50
Şekil 3.1	Yüklü ve Yüksüz Durumlarda Akma Yüzeyi [99] 52
Şekil 3.2	Pekleşmiş Malzemenin Akma Yüzeyi [100] 53
Şekil 3.3	En Büyük Normal Gerilme Hipotezine Göre Gerilme Alanı..... 56
Şekil 3.4	Rankine Maksimum Asal Gerilme Kriteri (a) Meridyen Düzlemde, $\theta = 0^\circ$; (b) π Düzleminde [99]..... 56
Şekil 3.5	π Düzleminde von Misses ve Tresca Kriterinin Gösterimi [100] 58
Şekil 3.6	Mohr Coulomb Kırılma/Göçme Yüzeyi [101] 59
Şekil 3.7	Mohr- Coulomb Akma Yüzeyi [101]..... 59
Şekil 3.8	(a) Mohr Coulomb Meridyen Düzleminde (b) Mohr Coulomb Deviatorik Düzlemde [101]..... 60
Şekil 3.9	Mohr- Coulomb ve DP Eksenlerinin Çakıştırılması [102]..... 62
Şekil 3.10	DP Kriterinin Asal Gerilme Uzaklığında Gösterimi [103]..... 63
Şekil 3.11	Basınç Bölgesinde DP Kriteri..... 63
Şekil 3.12	$I_1 - \sqrt{J_2}$ Düzleminde DP Akma Yüzeyi [104] 64
Şekil 3.13	Nümerik Olarak Elde Edilen DP Kriteri Akma Yüzeyi 65
Şekil 3.14	Boşluklu Duvarın Fiziksel Duruma Ait Çatlak Oluşumu [108] 66
Şekil 3.15	Boşluklu Duvarın Nümerik Model Asal Gerilme Vektörleri..... 66

Şekil 3.16	Dolu Duvarın Fiziksel Durumuna Ait Çatlak Oluşumu [108].....	67
Şekil 3.17	Dolu Duvarın Nümerik Model Asal Gerilme Vektörleri	67
Şekil 4.1	İzoparametrik Katı Eleman [66].....	72
Şekil 4.2	Dört Düğüm Noktalı Kabuk Eleman [66]	73
Şekil 4.3	Yığma Duvarın Sonlu Eleman Ağına Bir Örnek	74
Şekil 4.4	Tuğla-Harç Etkileşimi ve Maksimum Şekil Değişimi Varsayımı	76
Şekil 4.5	Literatürde Bulunan Yığma Duvar Örnekleri [1,9].....	77
Şekil 4.6	(a) Deney Duvarı No.1 Fiziksel Durumu [1] (b) Nümerik Model	78
Şekil 4.7	(a) Deney Duvarı No.1 Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66].	79
Şekil 4.8	Deney Duvarı No.1'e Uygulanan Yükler ve Çatlak Oluşumu [1].....	80
Şekil 4.9	Deney Duvarı No.1 Yatay Yük-Yerdeğiştirme Eğrisi.....	80
Şekil 4.10	Sadece Düşey Yükün Uygulandığı Durumda Deney Duvarı No.1'de Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımı	81
Şekil 4.11	Yatay Yükün Göçme Yükünün % 94 Olması Durumunda Deney Duvarı No.1 Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımı.....	82
Şekil 4.12	Deney Duvarı No.1'de Maksimum Asal Şekil Değişiminin Olduğu Durum	82
Şekil 4.13	Deney Duvarı No.1 (a) Nümerik Modelde Oluşan Asal Şekil Değiştirme (b) Deney Duvarında Çatlak Oluşumu [107]	83
Şekil 4.14	Clay 1 Duvarı (a) Fiziksel Model [9] (b) Nümerik Model.....	84
Şekil 4.15	Clay 1 Duvarı Yük-Yerdeğiştirme Eğrisi.....	86
Şekil 4.16	Clay 1 Duvarı (a) Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66]	87
Şekil 4.17	Sadece Düşey Yük Etkidiği Durumda Clay 1 Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımı	88
Şekil 4.18	Yatay Yükün Göçme Yükünün % 31 Değerinde Clay 1 Duvarında Oluşan Şekil Değiştirme Dağılımları.....	89
Şekil 4.19	Yatay Yükün Göçme Yükünün % 99 Değerinde Clay 1 Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları	89
Şekil 4.20	Deforme Olmuş Clay 1 Duvarında Maksimum Asal Şekil Değiştirme Dağılımları	90
Şekil 4.21	Clay 1 Duvarı (a) Fiziksel Durumda Çatlak Oluşumu [9] (b) Nümerik Modelde Oluşan Şekil Değiştirme Dağılımları	90
Şekil 4.22	Tek Yüzeye LP Uygulanmış Clay 2-3 Duvarlarının (a) Fiziksel Durumu [9] (b) Nümerik Model	91
Şekil 4.23	Clay 2-3 Duvarlarının Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi	92
Şekil 4.24	Clay 2-3 Duvarına Uygulanan (a) LP Nümerik Modeli (b) Sonlu Eleman Ağı (c) Sonlu Eleman Tipi [66]	92
Şekil 4.25	Clay 2-3 Duvarında Sadece Düşey Yükün Etkidiği Durumda LP'de Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları	93
Şekil 4.26	Clay 2 Duvarında Yatay Yükün Göçme Yükünün % 5 Durumunda LP'de Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları	93
Şekil 4.27	Clay 2 Duvarında Yatay Yük Göçme Yükünün % 85 Durumda LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımı	94
Şekil 4.28	LP Elemanda (a) Maksimum Asal Şekil Değiştirme Dağılımları (b) Deforme Olmuş Durum	94
Şekil 4.29	Clay 2-3 Duvarı (a) Fiziksel Durumda LP Elemanda Hasar Oluşumu [9], Nümerik Modelde LP Elemanda Asal Şekil Değiştirme Dağılımı	95

Şekil. 4.30	Clay 2-3 Duvarı (a) Yalın Yüzeyde Hasar Oluşumu [9] (b) Nümerik Modelde Şekil Değiştirme Dağılımları 96
Şekil 4.31	Clay 1 ve Clay 2 Duvarları Nümerik Modellerinin Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi..... 96
Şekil 4.32	Concrete 1 Duvarı Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi 97
Şekil 4.33	Sadece Düşey Yük Etkisinde Concrete 1 Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 98
Şekil 4.34	Yatay Yükün Göçme Yükünün % 56 Değerinde Concrete 1 Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 98
Şekil 4.35	Yatay Yükün Göçme Yükünün % 97 Değerinde Concrete 1 Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 99
Şekil 4.36	Yatay Yükün Göçme Yükünün % 99 Değerinde Concrete 1 Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 99
Şekil 4.37	Maksimum Şekil Değiştirme Durumunda Concrete 1 Duvarında Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 100
Şekil 4.38	(a) Nümerik Modelde Asal Şekil Değiştirme Dağılımları (b) Fiziksel Durumda Çatlak Oluşumu [9].....100
Şekil 4.39	Concrete 2-3 Duvarlarında Yük Yerdeğiştirme Eğrisi..... 102
Şekil 4.40	Concrete 2-3 Duvarında Sadece Düşey Yük Etkisinde LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 102
Şekil 4.41	Concrete 2 Duvarında Yatay Yükün Göçme Yükünün % 23 Değerinde LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 103
Şekil 4.42	Yatay Yükün Göçme Yükünün % 58 Değerinde LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 103
Şekil 4.43	Yatay Yükün Göçme Yükünün % 73 Değerinde LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 104
Şekil 4.44	Concrete 2 Duvarı LP Elemanda Kopma Durumunda Deforme Olmuş Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 104
Şekil 4.45	Deney Panelinde (a) Hasar Oluşumu [9] ve (b) Nümerik Modelde Yığma Birimlerde Asal Şekil Değiştirme Dağılımı 105
Şekil 4.46	Concrete1 ve Concrete 2 Kodlu Duvarların Nümerik Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi 106
Şekil 4.47	Concrete 2 Duvarı Yük- Şekil Değiştirme Eğrisi..... 106
Şekil 4.48	HURM-C2 Duvarı Fiziksel Durum ve Geometrik Ölçüler [10] 108
Şekil 4.49	HRM C2 Duvarı Yığma Birimlerde (a) Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66] 108
Şekil 4.50	HRM C2 Duvarına Uygulanan LP Nümerik Modeli (b) Sonlu Eleman Ağı (c) Sonlu Eleman Tipi [66].....109
Şekil 4.51	HRM C2 Duvarı LP Elemanın Kopma Durumunda Yatay Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi 109
Şekil 4.52	HRM C2 Duvarı Yığma Birimlerde Oluşan Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi..... 110
Şekil 4.53	Sadece Düşey Yük Etkisinde HRM C2 Duvarında Yığma Birimlerde Asal Oluşan Şekil Değiştirme Dağılımları..... 111
Şekil 4.54	Sadece Düşey Yük Uygulandığı Durumda HRM C2 Duvarı LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 111

Şekil 4.55	HRM C2 Duvarı LP Elemanda Kopma Durumunda Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları 112
Şekil 4.56	HRM C2 Duvarında Yatay Yükün Göçme Yükünün % 25 Değerinde Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları 113
Şekil 4.57	HRM C2 Duvarında Yatay Yükün Göçme Yükünün % 48 Değerinde Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları 113
Şekil 4.58	HRM C2 Duvarında Yatay Yükün Göçme Yükünün % 92 Değerinde Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları 114
Şekil 4.59	HRM C2 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Maksimum Asal Şekil Değişirme Dağılımları 114
Şekil 4.60	(S2-WRAP-G-F-ST Duvarı (a) Fiziksel Durumu [18] (b) S2-WRAP-G-F-ST Duvarı Nümerik Model 116
Şekil 4.61	S2-WRAP-G-F-ST Duvarı (a) Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66].....117
Şekil 4.62	S2-WRAP-G-F-ST Duvarı (a) LP Eleman Nümerik Model (b) Sonlu Eleman Ağı (c) Sonlu Eleman Tipi[66]..... 117
Şekil 4.63	Düşey Yük Etkisinde S2-WRAP-G-F-ST Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları 118
Şekil 4.64	S2-WRAP-G-F-ST Duvarı Yük- Yerdeğişirme Eğrisi..... 119
Şekil 4.65	S2-WRAP-G-F-ST Duvarı LP Uygulanması [19]..... 120
Şekil 4.66	Sadece Düşey Yük Etkisinde S2-WRAP-G-F-ST Duvarı LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları 120
Şekil 4.67	Yatay Yükün Göçme Yükünün % 57 Değerinde S2-WRAP-G-F-ST Duvarında LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları . 121
Şekil 4.68	Yatay Yükün Göçme Yükünün % 85 Değerinde S2-WRAP-G-F-ST Duvarında LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları . 121
Şekil 4.69	LP Elemanda Kopma Durumunda S2-WRAP-G-F-ST Duvarında Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları. 122
Şekil 4.70	S2-WRAP-G-F-ST Duvarı (a) Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları (b) S2-WRAP-G-F-ST Duvarında Yığma Birimlerde Hasar Oluşumu [19] 122
Şekil 4.71	WALL 2 Duvarı Fiziksel Durumu [47] 123
Şekil 4.72	(a) Wall 3 ve (b) Wall 4 Duvarlarının Fiziksel Durumu [47] 124
Şekil 4.73	(a) WALL 3 Duvarı Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66]..... 125
Şekil 4.74	(a) LP Eleman Nümerik Modeli (b) Sonlu Eleman Ağı (c) Sonlu Eleman Tipi [66] 126
Şekil 4.75	Sadece Düşey Yük Etkisinde WALL 3 Duvarı Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları 126
Şekil 4.76	WALL 3 Duvarı Yük- Yerdeğişirme Eğrisi 127
Şekil 4.77	Yatay Yükün Göçme Yükünün % 11 Değerinde WALL 3 Duvarı Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları 128
Şekil 4.78	Yatay Yükün Göçme Yükünün % 51 Değerinde WALL 3 Duvarı Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları 129
Şekil 4.79	Yatay Yükün Göçme Yükünün % 81 Değerinde WALL 3 Duvarı Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları 129

Şekil 4.80	Analizin Sonlandırıldığı Durumda WALL 3 Duvarı Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 130
Şekil 4.81	(a) Fiziksel Durumda Hasar Oluşumu [47] (b) Nümerik Modelde Asal Şekil Değiştirme Dağılımı 130
Şekil 4.82	Analizin Sonlandırıldığı Durumda WALL 3 Duvarı LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 131
Şekil 4.83	(a) WALL 4 Duvarı Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66]..... 132
Şekil 4.84	(a) LP Eleman Nümerik Modeli (b) Sonlu Eleman Ağı (c) Sonlu Eleman Tipi [66] 133
Şekil 4.85	Sadece Düşey Yük Etkisinde WALL 4 Duvarı Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 133
Şekil 4.86	WALL 4 Duvarı Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi 134
Şekil 4.87	WALL 4 Duvarında Yatay Yükün Göçme Yükünün % 11 Durumunda Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 135
Şekil 4.88	WALL 4 Duvarında Yatay Yükün Göçme Yükünün % 63 Durumunda Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 136
Şekil 4.89	WALL 4 Duvarında Yatay Yükün Göçme Yükünün % 95 Durumunda Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 136
Şekil 4.90	WALL 4 Duvarında Analizin Sonlandırıldığı Durumda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları.....137
Şekil 4.91	(a) WALL 4 Duvarı Fiziksel Modelde Hasar Oluşumu [47] (b) Wall 4 Duvarı Yığma Birimlerde Asal Şekil Değiştirme dağılımları 137
Şekil 4.92	WALL 4 Duvarında Analizin Sonlandırıldığı Durumda LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 138
Şekil 4.93	Şekil 4.93. (a) URM 1-2 Duvarı Fiziksel Durum [23] ve (b) Nümerik Model..... 139
Şekil 4.94	(a) URM 1 Duvarı Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66]..... 140
Şekil 4.95	Sadece Düşey Yük Etkisinde URM 1-2 Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 141
Şekil 4.96	URM-1 Duvarı Yük-YerDeğiştirme Eğrisi..... 142
Şekil 4.97	Yatay Yükün Göçme Yükünün %11'e Ulaştığı Durumda URM 1-2 Duvarında Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 142
Şekil 4.98	Yatay Yükün Göçme Yükünün %36' na Ulaştığı Durumda URM 1-2 Duvarında Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 143
Şekil 4.99	Yatay Yükün Göçme Yükünün %59' na Ulaştığı Durumda URM 1-2 Duvarında Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 143
Şekil 4.100	Yatay Yükün Göçme Yükünün %94'ne Ulaştığı Durumda URM 1-2 Duvarında Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 144
Şekil 4.101	Analizin Sonlandırıldığı Durumda URM 1-2 Duvarında Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 144
Şekil 4.102	Analizin Sonlandırıldığı Durumda (a,c)URM 1-2 Duvarında Hasar Oluşumu [23-26] (b) Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 145
Şekil 4.103	H- URM- 3x100 Duvarı Fiziksel Durum [23-26] ve H- URM- 3x100 Duvarı Nümerik Model 145
Şekil 4.104	(a) H- URM- 3x100 Duvarı Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66]147

Şekil 4.105	(a) H- URM- 3x100 Duvarı LP Nümerik Modeli (b) Sonlu Eleman Ağı (c) Sonlu Eleman Tipi [66] 147
Şekil 4.106	Sadece Düşey Yük Etkimesi Durumunda H-URM 3X100 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 148
Şekil 4.107	H-URM 3X100 Duvarı Yük-Yerdeğiştirme Eğrisi..... 149
Şekil 4.108	Yatay Yükün Göçme Yükünün %37'e Ulaştığı Durumda H-URM 3X100 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 150
Şekil 4.109	Yatay Yükün Göçme Yükünün %71'e Ulaştığı Durumda H-URM 3X100 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 151
Şekil 4.110	Yatay Yükün Göçme Yükünün % 93'e Ulaştığı Durumda H-URM 3X100 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 151
Şekil 4.111	Analizin Sonlandırıldığı Durumda H-URM 3X100 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 152
Şekil 4.112	Analizin Sonlandırıldığı Durumda H-URM 3X100 Duvarında LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 152
Şekil 4.113	(a) H-URM 3X100 Duvarında LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları (b) Deney Duvarında LP'de Hasar Oluşumu (c) Yığma Birimlerde Asal Şekil Değiştirme Dağılımları..... 153
Şekil 4.114	(a) H- URM- 1x300 Duvarı Fiziksel Durum [23-26] (b) H- URM- 1x300 Duvarı Nümerik Model 153
Şekil 4.115	(a) H-URM 1X300 Duvarı Sonlu Eleman Ağı ve (b) Sonlu Eleman Tipi [66].....155
Şekil 4.116	H-URM 1X300 Duvarı (a) LP Nümerik Modeli (b) Sonlu Eleman Ağı (c)Sonlu Eleman Tipi [66].....155
Şekil 4.117	Sadece Düşey Yük Etkisinde H-URM 1X300 Duvarı Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 156
Şekil 4.118	H-URM 1X300 Duvarı Yük Yerdeğiştirme Eğrisi..... 157
Şekil 4.119	Yatay Yükün Göçme Yükünün %36'na Ulaştığı Durumda H-URM 1X300 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 158
Şekil 4.120	Yatay Yükün Göçme Yükünün %94'ne Ulaştığı Durumda H-URM 1X300 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 158
Şekil 4.121	H-URM 1X300 Duvarında Analizin Sonlandırıldığı Durumda Yığma Birimlerde Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 159
Şekil 4.122	H-URM 1X300 Duvarında Analizin Sonlandırıldığı Durumda LP Elemanlarda Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 159
Şekil 4.123	H-URM 1X300 Duvarında Analizin Sonlandırıldığı Durumda (a) Yığma Birimlerde Asal Şekil Değiştirme Dağılımları (b) Fiziksel Modelde Hasar Oluşumu (c) LP Elemanlarda Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 160
Şekil 4.124	(a) H- URM- 3x150 Kodlu Duvarın Fiziksel Modeli [23-26] (b) H- URM- 3x150 Kodlu Duvarın Nümerik Model 160
Şekil 4.125	(a) H- URM- 3x150 Kodlu Duvarın Yığma Birimlerinin Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66]..... 162

Şekil 4.126	(a) H- URM- 3x150 Kodlu Duvarın LP Eleman Nümerik Modeli (b) LP Eleman Sonlu Eleman Ağı (c) Sonlu Eleman Tipi[66].....162
Şekil 4.127	H- URM- 3x150 Kodlu Duvarın Yığma Birimlerinde Sadece Düşey Yük Etkisinde Oluşan Asal Şekil Değişiklikler 163
Şekil 4.128	H- URM 3X150 Duvarı Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi..... 164
Şekil 4.129	Uygulanan Yükün Göçme Yükünün % 47 Değerine Ulaştığı Anda H- URM 3X150 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değişiklik Dağılımları 165
Şekil 4.130	Uygulanan Yükün Göçme Yükünün % 84 Değerine Ulaştığı Anda H- URM 3X150 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değişiklik Dağılımları 165
Şekil 4.131	Uygulanan Yükün Göçme Yükünün % 97 Değerine Ulaştığı Anda H- URM 3X150 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değişiklik Dağılımları 166
Şekil 4.132	Analizin Sonlandırıldığı Durumlarda H-URM 3X150 Duvarında Yığma Birimlerde Asal Şekil Değişiklik Dağılımları 167
Şekil 4.133	(a) H-URM 1X450 Duvarı Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66].....168
Şekil 4.134	(a) H-URM 1X450 Duvarı LP Eleman Nümerik Modeli (b) Sonlu Eleman Ağı (c) Sonlu Eleman Tipi [66].....168
Şekil 4.135	Şekil 4.135. H-URM 1X450 Duvarı Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi.....169
Şekil 4.136	Sadece Düşey Yük Etkisinde H-URM 1X450 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değişiklik Dağılımları 169
Şekil 4.137	Yatay Yükün Göçme Yükünün % 47 Değerlerinde H-URM 1X450 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değişiklik Dağılımları.. 170
Şekil 4.138	Yatay Yükün Göçme Yükünün % 82 Değerlerinde H-URM 1X450 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değişiklik Dağılımları 170
Şekil 4.139	Yatay Yükün Göçme Yükünün % 96 Değerlerinde H-URM 1X450 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değişiklik Dağılımları.....171
Şekil 4.140	Analizin Sonlandırıldığı Durumda H-URM 1X450 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değişiklik Dağılımları 171
Şekil 4.141	Analizin Sonlandırıldığı Durumda H-URM 1X450 Duvarında LP Elemanlarda Oluşan Asal Şekil Değişiklik Dağılımları 172
Şekil 4.142	(a) IPV Duvarı Fiziksel Durum (b) IPV Duvarı Nümerik Modeli 173
Şekil 4.143	(a) IPV Duvarı Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66]..... 174
Şekil 4.144	Düşey Yükün İlk Kademesinde IPV Duvarında Oluşan Asal Şekil Değişiklik Dağılımları 175
Şekil 4.145	IPV Duvarı Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi 176
Şekil 4.146	Düşey Yükün Göçme Yükünün % 20 Değerinde IPV Duvarında Oluşan Asal Şekil Değişiklik Dağılımları 177
Şekil 4.147	Düşey Yükün Göçme Yükünün % 57 Değerinde IPV Duvarında Oluşan Asal Şekil Değişiklik Dağılımları 177

Şekil 4.148	Düşey Yükün Göçme Yükünün % 76 Değerinde IPV Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları	178
Şekil 4.149	Analizin Sonlandırıldığı Durumda IPV Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları	178
Şekil 4.150	(a) Fiziksel Durum Hasar Oluşumu [35] (b) Nümerik Modelde Asal Şekil Değiştirme Dağılımları	179
Şekil 4.151	(a) RM1 Duvarı Fiziksel Durum (b) Nümerik Model	180
Şekil 4.152	RM1 Duvarı Yatay Yük- Yerdeğiştirme Eğrileri	181
Şekil 4.153	(a) RM1 Kodlu Duvarın Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66]	182
Şekil 4.154	RM1 Duvarı (a) LP Eleman Nümerik Model (b) Sonlu Eleman Ağı (c) Sonlu Eleman Tipi [66]	183
Şekil 4.155	Sadece Düşey Yük Etkisinde RM1 Duvarı LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları	184
Şekil 4.156	RM1 Duvarında Göçme Yükünün % 15 Değerine Ulaştığı Zaman Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları	185
Şekil 4.157	RM1 Duvarında Göçme Yükünün % 44 Değerine Ulaştığı Zaman Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları	185
Şekil 4.158	RM1 Duvarında Göçme Yükünün % 86 Değerine Ulaştığı Zaman Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları	186
Şekil 4.159	RM1 Duvarında LP Elemanın Kopma Durumunda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları	186
Şekil 4.160	W4-C-RT Duvarı (a) Fiziksel Durum [109] (b) Nümerik Model.....	187
Şekil 4.161	W4-C-RT Duvarı (a) LP Eleman Nümerik Model (b) Sonlu Eleman Ağı (c) Sonlu Eleman Tipi [66]	189
Şekil 4.162	W4-C-RT Duvarı Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi	190
Şekil 4.163	W4-C-RT Duvarında Düşey Yük Etkisinde LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları	190
Şekil 4.164	Yatay Yükün Göçme Yükünün %16 Değerinde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları	191
Şekil 4.165	Yatay Yükün Göçme Yükünün %71 Değerinde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları	191
Şekil 4.166	LP Elemanın Kopma Durumunda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları	192
Şekil 4.167	URM W6 Duvarı Fiziksel Model [96]	193
Şekil 4.168	URM W6 Duvarı Nümerik Model.....	193
Şekil 4.169	(a) URM W6 Duvarı Sonlu Eleman Ağı (b) URM W6 Duvarı Sonlu Eleman Tipi [66]	194
Şekil 4.170	URM W6 Duvarında Sadece Düşey Yük Etkimesi Durumunda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları	195
Şekil 4.171	URM W6 Duvarı Yük-Yerdeğiştirme Eğrisi	196
Şekil 4.172	URM W6 Duvarında Göçme Yükünün % 12 Değerine Ulaştığı Zaman Oluşan Asal Şekil Değiştirme dağılımları	197
Şekil 4.173	URM W6 Duvarı Yük-Yerdeğiştirme Eğrisi	197
Şekil 4.174	URM W6 Duvarında Göçme Yükünün % 58 Değerine Ulaştığı Zaman Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları	198

Şekil 4.175	URM W6 Duvarında Göçme Yükünün % 81 Değerine Ulaştığı Zaman Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 198
Şekil 4.176	URM W6 Duvarında Maksimum Asal Şekil Değiştirme Dağılımları.. 199
Şekil 4.177	(a) Fiziksel Modelde Hasar Oluşumu [96] (b) Nümerik Modelde Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 199
Şekil 4.178	URM W6 Duvarın Nümerik Modeli..... 200
Şekil 4.179	URM W6 Duvarı Yük Yerdeğiştirme Eğrisi 201
Şekil 4.180	Sadece Düşey Yük Etkisinde URM W6 Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 201
Şekil 4.181	Yatay Yükün Göçme Yükünün %42 Değerinde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 202
Şekil 4.182	Yatay Yükün Göçme Yükünün %99 Değerinde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 202
Şekil 4.183	Analizin Sonlandırıldığı Durumda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları 203
Şekil 4.184	Depremden Hasar Görmüş Bir Yığma Yapı..... 203

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Doğal Yapı Taşlarının Ortalama Fiziksel Özellikleri [8]..... 31
Çizelge 2.2	Duvarlarda Kayma Dyanımı [83]..... 44
Çizelge 3.1	Akma Kriterlerinin Sınıflandırılması..... 60
Çizelge 4.1	Deney Duvarı No.1 Modelinin Mekanik Özellikleri 80
Çizelge 4.2	Stratford vd. Deneyleri Geometrik ve Yük Değerleri..... 85
Çizelge 4.3	Stratford, vd. Nümerik Model Mekanik Parametreleri 87
Çizelge 4.4	Capozucca Duvarı (HRM C2) Geometrik Ölçüler ve Yük Değerleri... 109
Çizelge 4.5	Capozucca Duvarı (HRM C2) Mekanik Özellikleri 109
Çizelge 4.6	(S2-WRAP-G-F-ST) Duvarı Mekanik Özellikleri 118
Çizelge 4.7	(S2-WRAP-G-F-ST) Duvarı Geometrik Ölçüleri ve Yük Değerleri 119
Çizelge 4.8	WALL 3 ve WALL 4 Duvarları Geometrik Ölçüleri ve Yük Değerleri . 124
Çizelge 4.9	WALL 3 ve WALL 4 Duvarları Mekanik Özellikleri..... 125
Çizelge 4.10	URM ve HURM Duvarları Geometrik Ölçüleri ve Yük Değerleri 139
Çizelge 4.11	URM ve H-URM Duvarları Mekanik Özellikleri 141
Çizelge 4.12	H-URM 3X100 Duvarı Mekanik Özellikleri..... 149
Çizelge 4.13	IPV Duvar Modelinin Mekanik Özellikleri 175
Çizelge 4.14	RM1 Duvarı Geometrik Büyüklükler ve Yatay Yük Değerleri..... 180
Çizelge 4.15	RM1 Deney Duvarı Nümerik Model Mekanik Parametreleri 183
Çizelge 4.16	W4- C-RT Duvarı Geometrik Büyüklükler ve Yatay Yük Değerleri 187
Çizelge 4.17	W4-C-RT Duvar Modelinin Mekanik Özellikleri..... 188
Çizelge 4.18	URM W6 Duvar Modelinin Mekanik Özellikleri..... 196

LİFLİ POLİMERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ YIĞMA DUVARLARIN MODELLENMESİ

Oktay JAFAROV

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. H. Orhun KÖKSAL

Eş Danışman: Doç. Dr. Bilge DORAN

Yığma yapılar, tuğla ve doğal taş gibi genellikle kolayca temin edilebilen malzemelerden yapılmış, taşıyıcı sistemi donatılı ve/veya donatısız duvar ve kolonlardan oluşan yapılardır. Türkiye, Akdeniz ülkeleri ile Ortadoğu bölgesini içine alan coğrafyada bir kısmı tarihi değere de sahip büyük bir yığma yapı stoğu mevcuttur. Taşıyıcı sistemlerinin ağır ve kâgir duvarlardan oluşması, deprem altında sünek davranmamaları gibi olumsuz özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla farklı disiplinlerden pek çok araştırmacının çalışmaları mevcuttur. Depremselliğin önemli olduğu Türkiye’de yığma yapı elemanları, yatay yükler altında gerekli ve yeterli performansı gösterebilmeleri açısından, yük taşıma kapasitesinde ve sistem sünekliğinde önemli artışa neden olan lifli polimer (LP) malzeme ile güçlendirilmektedir. Son on yıl içerisinde bilimsel literatürde de yığma yapı elemanlarının LP ile güçlendirilmesi konusunda birçok deneysel ve nümerik çalışmaya rastlamak mümkündür.

Bu tez çalışmasının başlıca amacı, doğrusal olmayan sonlu eleman yöntemini kullanarak LP ile güçlendirilmiş yığma duvarların düşey ve yatay yükler altında elasto-plastik analizlerini gerçekleştirmektir. Bu kapsamda bir çalışma LP ile sarılmış yığma kolonlar için yapılmış olan dışında bir ilk olma niteliği taşımaktadır. Bu bağlamda, LP sargılı duvarların plastik analizler için tercih edilen Drucker-Prager (DP) kırılma kriterinin ihtiyaç duyduğu malzeme parametreleri (kohezyon ve içsel sürtünme açısı) hidrostatik basınca bağlı olacak şekilde ifade edilmiştir. Bu bağlntıların kullanılmasıyla

DP kriterine ait basınç ve çekme meridyenlerinin doğrusal formu da değiştirilmiştir. Daha önce yalın duvar ve kolonlara uygulanmış bu yaklaşımın en büyük eksikliği olan analizlerin sonlandırılması ve kırılmanın tanımlanması aşaması için bu çalışma kapsamında en büyük çatlak genişliği yaklaşımı geliştirilmiş ve kırılma kriteri olarak ileri sürülmüştür. Bu kriter, literatürde bulunan yalın, boşluklu ve LP ile güçlendirilmiş duvarlara ait 17 (on yedi) deney çalışmasının sonuçlarının tahmininde başarı ile kullanılmıştır. Literatürde bulunan 10 (on) farklı deneysel çalışmadan toplam 17 (on yedi) adet duvar modellenmiştir. Bu duvarların 11 (on bir) tanesi LP ile sargılı, 1 (bir) tanesi boşluklu ve 5 (beş) tanesi de dolu yalın duvardır. Tez çalışması yapıldığı tarih itibari ile aynı modelleme yaklaşımının üç farklı duvar tipi için geliştirilerek uygulandığı tek örnektir.

Yalın ve hasar gördükten sonra LP elemalarlarla güçlendirilen kuşatma etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı duvarlarda da maksimum asal şekil değiştirme kriteri ile deneysel duvarlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Yüklenden önce güçlendirilen duvarlarda da LP kopma durumuna göre irdelenerek deneysel sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sonlu elemanlar yöntemi, Elasto-plastik analiz, Drucker-Prager akma kriteri, Yığma duvar, Lifli polimer, kohezyon, içsel sürtünme açısı.

**NUMERICAL MODELING OF UNREINFORCED MASONRY WALLS
STRENGTHENED WITH FIBER REINFORCED POLYMERS**

Oktay JAFAROV

Civil Engineering Division

PhD Thesis

Advisor: Prof. Dr. H. Orhun KÖKSAL

Co-Advisor: Assoc. Prof. Dr. Bilge DORAN

Masonry structures, which have structural components made of brick, stone, and concrete materials and load bearing systems consisting of unreinforced/reinforced masonry walls and columns are commonly encountered worldwide. They are mostly located in Turkey, Mediterranean area, and Middle East territories and have been built since ancient times and has usually historic significance. Avast amount of research from different disciplines have been conducted on masonry structures, which consist of heavy and brick/stone walls to improve their unfavorable behavior when they are subjected to lateral forces such as earthquake loads. Since seismicity is important in Turkey, masonry structural components should be strengthened using fiber reinforced polymers (FRP) in order to get adequate performance on lateral loading.

There have been numerous experimental and numerical researches onstrengthening of masonry structural components using FRP in scientific literature during last ten years.

The major aim of this thesis is to perform nonlinear analysis of strengthened unreinforced masonry walls (URM) with FRP under vertical and incremental lateral loading. In this context, the cohesion and internal friction angle of Drucker-Prager (DP) yield criterion for masonry constituent are expressed in terms of uniaxial compression strength and the hydrostatic pressure. Using proposed relations, the slight change of the linear part of the compressive and tensile meridians of DP criterion is modified into

a curve. The considerable deficiency of this approach is the ending point of nonlinear finite element analysis and definition of rupture in implementation of masonry walls and columns; hence the definition of rupture criterion is newly introduced in this study. For the URM walls, the end point for the analysis is determined by defining a discontinuity of surface between two clay units along the thickness of the mortar which indicates a macro-crack on the wall. This criterion is successfully used in prediction of 17 (seventeen) URM walls with/ without openings and also strengthened walls with FRP which are available in literature experimentally. These numerical modeling studies consist of one unreinforced wall with opening, five unreinforced walls and rest of strengthened walls wrapped with FRP. This thesis which have been improved and applied with the same numerical prediction on the 3 different wall types is currently the unique exemplification in the literature.

Similar results obtained numerically with the definition of maximum tensile assumption URM and damaged walls retrofitted with FRP which are experimentally investigated and existed in the literature. Strengthening of undamaged walls are also investigated with the prediction of rupture of FRP and the numerical results obtained are the same of that experimental works.

Keywords: Finite element method, Elasto-plastic analysis, Drucker-Prager yield criterion, Unreinforced masonry wall, Fiber reinforced polymer, Cohesion, Internal friction angle.

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Yığma duvarların dünyanın çoğu yerinde yapılmış olması ve halen yapımına devam edilmesinden dolayı literatürde çok sayıda deneysel ve nümerik analizlerine rastlamak mümkündür. Betonarme ve çelik kadar davranış ve modellenmesi üzerinde çalışılmamış olması bir yana özellikle bünyesinde bulunan malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesindeki güçlükler nedeni ile analizleri daha karmaşık ve fazla sayıda varsayıma ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle ancak basitleştirilmiş varsayımlarla yapısal çözümlemeler gerçekleştirilmektedir. Varsayımlar özellikle malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Yığma yapıların incelenmesinde kullanılan en önemli çözümleme tekniklerinden biri olan sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan uygulamalarda istenilen bilgi düzeyine göre üç farklı modelleme tipi geliştirilmiştir. Bunlar makro, basitleştirilmiş mikro ve detaylı mikro modellemelerdir. Literatürde yapılan deneysel çalışmalardan çok daha fazlası bu tür geometrik ve bünyesel modelleme örneklerinde mevcuttur. Tezin bu bölümünde, literatürde yer alan yalın yığma duvarlar ve güçlendirilmiş yığma duvarların deneysel ve sonlu eleman modelleri çalışmalarına yönelik literatür araştırması yapılmıştır ve aşağıda bu çalışmaların en önemlileri özetlenmiştir.

Bu çalışmaların en önemlilerinden olan ve bu tür uygulamalara bir temel teşkil eden araştırma (Lourenço, [1]) tarafından hazırlanan yığma yapılar için çözümleme teknikleri isimli doktora tezidir. Bu çalışmada mikro modelleme tekniği kullanarak yapılan çözümlemede kayma (kesme), çatlama ve göçme mekanizmalarını birlikte kullanarak matematiksel bir model önerilmiştir. Bu model kompozite enterfaz modeli olarak adlandırılmıştır. Enterfaz davranışı yığma duvarın elemanları ile aralarındaki harcın birbirine etkisini ifade etmektedir.

Bu modelde enterfaz modeli birleşim bölgesine ait çekme dayanımı ile çekme altında oluşacak açılma için gerekli G_f^I kırılma enerjisine ihtiyaç duymaktadır. Bu değerlerin düzgün bir şekilde ölçülerek enterfazın mekanik özelliği olarak kabul edilmesinin neredeyse imkânsız olduğu düşünüldüğünde teorik olarak sağlam bir kurguya sahip olan çalışmanın pratik olarak sağlam temelleri olmadığı rahatlıkla söylenebilir. Ancak, konu hakkında ilk çalışma olmasından dolayı ileriki yıllarda bu çalışma benzeri diğer bünyesel modeller ileri sürülmeye devam etmiştir. Aynı zamanda kohezyon ve içsel sürtünme açısı gibi gene ölçülmesi problemli olan büyüklüklere de ayrıca elastik-ötesi davranışı tanımlamakta ihtiyaç duyulmaktadır. Bu özellikler ilkinde oranla yığma birim ve harç için daha kolay ifade edilebilecek olan değerlerdir. Çekme ile kesme gerilmelerinin birleşik etkilerini dikkate almak için ise G_f^{II} kesme altında yüzeylerin ayrılmasına neden olan çatlağın gerçekleşmesi için gerekli enerjisini kullanmaktadır. Bu ise G_f^I değerine oranla ölçülmesi çok daha zor olan ve açıkça ifade etmek gerekirse yığma için kullanılabilecek bir bağıntısının bile olmadığı bir büyüklüktür. Modelin geçerliliğini gösterilmek için Zurich Institute of Structural Engineering (ETHZ) duvarları incelenmiştir. Analiz sonuçlarını deneysel verilere uydurabilmek için tezinin 72 numaralı sayfasında J2G kodlu duvar için kesmeye ait özelliklerin %30 basınca ait mekanik özelliklerin %20 azaltırken basınç altındaki kırılma enerjisini ise 3 ile çarptığını açıklamaktadır [1]. Konu hakkında ilk çalışma olmasından dolayı bu tür kaba varsayımlara müsamaha ile bakıldığı düşünülebilir.

Tezinin ikinci kısmında ise ilk bölümde geliştirdiği ve tartışmaya son derece açık malzeme parametrelerini kullandığı mikro-modelden yola çıkarak blok-harç-enterfaz üçlüsünü tek bir malzeme olarak ifade etmek için kullanılan homojenize etme tekniklerinden faydalanmıştır [1]. Bu şekilde geliştirdiği makro model yardımı ile ETHZ duvarlarını modellemiştir. Bu modelde de duvarın her iki ortogonal doğrultudaki dayanımları, elastisite modülleri ile çekme ve basınç altındaki kırılma enerjileri için genel kabul edilen bir takım değerler mevcuttur. Bu değerler için herhangi bir bağıntı önerilmemektedir. Sadece üç adet duvar sonucunu doğru bir şekilde modellemeye uygun parametreler bulunarak analizlerde kullanılmıştır. Bu yaklaşımın diğer duvarlarda genel bir modelleme yönetemi olarak kabul edilemeyeceği açıktır.

(Chaimoon, ve Attard, [2,3]) tarafından yapılan çalışmalarda kesme ve basınç kırılmaları etkisi altındaki kil/tuğla birimlerden üretilen yığma duvarların nümerik çözümlemesi ile ilgili bilgiler

sunmuşlardır. Sonlu eleman şekli olarak üçgen sonlu elemanlar seçildiği bu çalışmada, düğüm noktaları kenar çizgileri üzerinde tanımlanmıştır. Elemanın köşelerinde ve merkezi kısımlarda düğüm noktaları atanmamıştır. Kırılmanın köşelere yakın bölgelerde oluştuğunu kabullenerek, bu tarz bir sonlu eleman modellemesi yapmışlardır. Kırılma yüzeyi Mohr-Coulomb kırılma kriterlerine göre modellenmiştir. Bağıntılarının deneysel ve nümerik sonuçların kıyaslanması ile doğruluğunu kanıtlamışlardır. Basitleştirilmiş mikro modelleme ile yığma duvar analizi yapılmıştır. Harç eleman kalınlığı ve tuğla-harç ara yüzeyleri sıfır kalınlıklı ara yüzey elemanlarla modellenmiştir. Çatlamalar yatay ve düşeydeki harç yüzeylerde, tuğla-harç ara yüzeylerinde ve/veya tuğla çapraz yüzeylerinde sınırlandırılmıştır. Modellerinde kohezyon ve içsel sürtünme açısının bilinmesine gerek vardır. Basitleştirilmiş mikro-modelde enterfaz davranış için ayrı bir bünyesel model düşünülmemektedir. Geometrik olarak, harç kalınlığı ve enterfaz yüzeyi sıfır kalınlığa sahip bir biçimde blok boyutlarının içerisinde düşünülmüştür. Harç ve blok elastisite ve kesme modüllerini kullanarak ortalama elastisite ve kesme modülü değerleri hesaplamaktadırlar. Bu yapılırken iki blok ve aralarındaki harç dikkate alınmaktadır. Ancak, (Chaimoon, ve Attard,[2]) yaptıkları çalışmada, gerçekte yığma bileşenlerine ait rijitlik değerlerinin belirlenmesinin güç olduğunu da belirtmektedirler. Kırılma kriterinde aşırı plastik davranışı sınırlamak için basınç bölgesinde bir başlık kullanmayı tercih etmişlerdir. Lourenço da tezinde benzer bir yol izlemiştir. (Chaimoon, ve Attard,[2]) 'ın geliştirdikleri model ile ETHZ deneysel çalışmalarını incelemişlerdir. (Lourenço'nun, [1]) çalışmasında kullandığı gibi çekme ve basınç bölgeleri için kırılma enerjileri kullanmışlardır. Bu enerjilerin tanımlanması ya da genel bir bağıntı olarak ifade edilmeleri bu çalışmada görülmemektedir. Bu çalışma kısaca (Lourenço, [1]) yılında yaptığı çalışmanın bir benzeri olarak literatürde yerini almıştır.

(Chaimoon, ve Attard, [3]) yaptıkları çalışmada ise kendi gerçekleştirdikleri duvar ve kiriş deneylerini 2007 yılında önerdikleri ve üçgen sonlu elemanların kullanıldığı basitleştirilmiş mikro model yaklaşımı ile incelemişlerdir. Tuğlanın ve harcın elastik davranış sergilediğini, tuğla-harç ara yüzeyinin ise elastik ötesi bir davranış gösterdiğini kabul etmişlerdir. (Giambanco, vd. [4]) yılında yaptıkları çalışmalarında ise ara yüzey harç elemanlarda oluşabilecek çekme ve kaymadan göçmeli mikro modelleme tekniği kullanmışlardır. (Lourenço ve Rots, [5]) gerçekleştirdikleri çalışmalarında von Mises kriteri kullanarak tuğla birimler için yığmada basınç göçmesini araştırmışlardır. Bu yaklaşımda da nümerik zorluklar

olduğunu fakat (Lourenço, [1]) çalışmasında yığmanın lineer elastik durumdan kırılma oluştuğu duruma kadar gerilmenin tamamen azaldığını modelleyerek bu zorluğu çözdüğünü belirtmişlerdir.

(Formica, vd. [6]) yaptıkları çalışmalarında yığma duvarların ayırık mekanik model analizini sunmuşlardır. Bu çalışmada yığma yapıların modellenmesinde sorunların göstergesinin deneysel çalışmalar ile nümerik modellemelerdeki farklılıklar olduğunu belirtilmiştir. Birebir ölçekli deneylerin tahmini için hala oldukça uzak durumda olduğunu belirten (Formica, vd. [6]) davranışın modellenmesi kadar uygun nümerik modellerin geliştirilmesinin de önemli olduğunu vurgulamaktadır. Bu çalışmada her tuğla elemanı rijit cisim, her harç ise ara yüzey eleman olarak tanımlanmıştır. Oluşan hasarın, sürtünmelerin ara yüzeylerde oluştuğunu belirtmişlerdir. Yerdeğiştirme, şekil değiştirme, gerilme, çatlamlar ve yük parametreleri esas tanımlama parametreleri olarak ele alınmıştır. Yığma yapıyı oluşturan bir tuğla elemanın diğer tuğla elemanla birleşimi altı adet düğüm noktası- ara yüzey elemanı olarak tanımlanan harç ile oluşmaktadır. Çatlamanın ve hasarların ara yüzeylerde oluştuğunu kabullenen Lagrangean sistem olarak tanımlayarak savunmuşlardır [6].

(Pandey, ve Meguro, [7]) yaptıkları çalışmalarında bina duvar ölçülerine uygun boyutta, kapı boşluğu bulunan duvarın nümerik çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında (Lourenço'nun [1]), çalışmasında da yer alan deneysel parametrelerden faydalanarak duvarı nümerik olarak modellemişlerdir. Yaptıkları modelde önce duvarı nümerik olarak sadece yatay yük etkisinde, sonra ise düşey ve kademeli olarak artımsal yatay yük etkisinde çözümlemesini yapmışlardır. Kapı boşluğu üzerindeki malzemenin düşeyde tek sıra olarak tuğla ve harçtan oluştuğunu ve aynı sırayı beton lentodan oluştuğunu kabul ederek her duvar için lentolu ve lentosuz durum için çatlak kontrolü karşılaştırılmıştır. Çatlakların düşey yükten daha ziyade yerdeğiştirmelerden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Lentolu ve lentosuz durum karşılaştırıldığında lentonun diyagonal doğrultuda oluşan çatlamları önlediğini savunmuşlardır. Lentosuz duvarda çatlaklar çapraz şekilli ve bant şeklinde oluşmuştur. Lentolu modelde ise lentonun çatlak oluşumunu önlediğini belirtmişlerdir [7].

(Mahrebel, [8]) yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında ise tarihi yığma yapıların değerlendirilirken en önemli noktalardan birinin malzeme parametrelerinin belirlenmesi olduğunu vurgulamaktadır. Yapıyı oluşturan malzemelerin mineralojik ve morfolojik özellikleri değişik yük ve etkiler altındaki davranışlarının bilinmesi gerekliliğini belirtmiştir.

Yığma bünyesindeki malzemelerin mekanik özellikleri açısından çok sayıda belirsizlik ve eksiklikler bulunan yığma duvarların modellenmesi geliştirilecek yöntemlerde de aranması gereken başlıca koşullardandır. (Mahrebel, [8]) yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında, tarihi yapıların kubbelerindeki hasarları minimal seviyelere indirmek için LP sistemlerin dış yüzeyden uygulanması gerektiğini vurgulamıştır. Bu uygulamanın amacının ise üzerleri kurşun tabakalarla kaplanacak olan kubbelerin yapılan güçlendirmeyi örtmesi ve en önemlisi tarihi doku ve görüntüyü değiştirmemesi olduğunu belirtmiştir [8].

(Stratford, vd. [9]) duvarlarla ilgili deneysel ağırlıklı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, altı adet yığma panelin davranışını düşey ve kademeli artımsal yatay yükleme etkisinde incelemişlerdir. Bu panellerden üç tanesi kil/tuğla birimlerden diğerleri ise beton bloklardan yapılmıştır. Her üç deney panelinden bir tanesi güçlendirilmeden yalın olarak test edilmiş, diğer ikisi ise lifli polimerle güçlendirildikten sonra düşey ve kademeli artımsal yatay yük etkisinde test edilmiştir. Tek yüzeye düşey ve yatay harç derzleri doğrultusunda olacak biçimde her iki doğrultuda lifli polimer uygulaması yapılmıştır. Lifli polimer tabandan ve duvar üst bölgesinden duvara ankrajlanmıştır, arta kalan kısımları ise duvarın alt ve üst kısmında döndürülerek duvar kalınlığı boyunca duvara uygulanmıştır. Kil birimlerden üretilen ve Clay 1 kodlu yalın duvarda oluşan hasar duvar taban bölgesine yakın kısımlarda tuğla harç yüzey aralarında oluşmuştur. Clay 2 ve Clay 3 kodlu güçlendirilen duvarlar, yalın duvarın göçmeye başladığı yük değerine kadar yalın duvara benzer davranış göstermişlerdir. LP sargının etkisi bu değerden sonra kendini göstermeye başlamış ve yük taşıma bazında etkisini göstermiştir. Güçlendirilmiş duvarların LP sargı uygulanmamış yüzeyindeki kırılma biçimi tek yönlü ve çapraz doğrultuda oluşmuştur. Çalışma kapsamında LP sargılamamanın duvarlarda hasar durumları ve göçme üzerine etkileri incelenmiştir. Beton bloktan üretilen ve Concrete 1 kodlu yalın ve Concrete 2 ve Concrete 3 kodlu güçlendirilen duvarların davranışlarında da güçlendirilmiş duvarlar yalın beton duvarın göçme yüküne kadar benzer davranış göstermişlerdir. LP, yalın beton duvarın göçme yükü değerinden sonra etkisini göstererek duvarın taşıma gücünde artış oluşmasına neden olmuştur. Deneyin yük- yerdeğiştirme grafikleri incelendiğinde kil/tuğla malzemelerinden üretilen yalın ve güçlendirilmiş duvarların yerdeğiştirme değerleri birbirine yakındır. Beton bloklardan üretilen yalın ve güçlendirilmiş duvarlarda da aynı durum söz konusudur. Kil/tuğla birimlerden üretilen duvarların beton bloklardan üretilen duvarlara oranla daha yüksek yük değerlerinde göçme eğilimine geçtikleri

görülmüştür. Bunun nedeni kil/tuğla duvarların tuğla ve harç basınç dayanımlarının beton bloktan üretilenden büyük olması ile açıklanabilir. Beton bloktan üretilen duvarda hasar harç bölgesinde oluşmuştur. Hasarın olduğu durumda harcın ortalama çekme gerilmesi 0.59 MPa olduğu değerdir. Kil/tuğladan üretilen yalın (Clay 1) duvarda hasarlar tabana yakın bölgede yatay doğrultuda harç birimlerde oluşmuştur. Diğer duvarlarda ise hasarlar diyagonal doğrultuda oluşmuştur. Beton (Concrete 1) yalın duvarın üst kısımdaki iki sırada tuğla elemanlarda çekme çatlakları oluştuğunu da belirtmişlerdir. Tuğlanın basınç değerinin harç basınç değerinden daha büyük olması, basınçtan dolayı oluşan göçmenin harç birimlerde ezilmeler oluşturmalarına sebep verdiğini belirtmişlerdir. Beton bloklardan oluşan duvarlarda LP etkisinin fazla olmadığını belirtmişlerdir. Beton duvarların dış yüzeylerinin kil/tuğla duvarlara oranla pürüzlü olması, LP elemanın yüzeyden ayrışmasını kolaylaştırmıştır. Yaptıkları çalışmalar, geliştirilen sayısal ve bünyesel modellerin uygunluğunun sınanabileceği deneysel sonuçları içermektedir [9].

(Capozucca, [10]) yaptığı deneysel çalışmasında tarihi kil tuğlalardan yapılmış iki adet yığma duvarı düşey yük ve yatayda çevrimsel yükleme etkisinde test ederek göçme durumlarını incelemiştir. Hasar görmüş yalın tarihi duvarları (HURM), çapraz ve yatay-düşey doğrultuda karbon elyaf şeritlerle (CFRP/KLP) güçlendirmiştir. Sonra, güçlendirilmiş tarihi duvarları (HRM) göçme anına kadar yük etkisinde test etmiştir. LP etkisi ve kırılma biçimleri ile ilgili bilgiler sunmuştur. Çevrimsel yük etkisinde duvarlardaki çatlak gelişimlerini ve birim şekil değiştirmelerin duvar üzerinde yayılımlarını kayıt altına almıştır. Çalışmalarında duvarlara etkileyen farklı düşey yük etkilerini de dikkate almıştır. LP sargısı duvarların tek bir yüzeyine uygulanmıştır. Sonuç olarak CFRP/KLP sargılamanın duvarların yük kapasitesini arttırırken daha büyük oranda yanal şekil değiştirme yeteneğini geliştirdiğini belirtmiştir. Tarihi yapıların LP ile güçlendirilmesinde en önemli ve geliştirilmesi gerekli olan noktanın LP şeritlerle duvar arasındaki uygun ve yeterli ankrajın sağlanması olduğu sonucuna varmışlardır. (Capozucca, [11]) çalışmasında ise 630x630x50 mm³ ölçülü duvarları önce (0.3-3.0) N/mm² düşey yük etkisinde, sonra ise yatayda artımsal yükleme etkisinde deneysel olarak irdelemiş ve makro modelleme ile nümerik olarak çözümlenmiştir. Büyük düşey yüke (3 MPa) sahip olan (P7) kodlu duvarın sonuçlarını irdelememiş, 2 MPa değerinden fazla olan yük durumlarında Mohr-Coulomb kriterine göre gerilme dağılımının elde edilemeyeceğini savunmuştur. Düşey yükün

artması ile yığmanın kesme (kayma) gerilmesinde artış olduğunu gözlemlemiştir. Farklı basınç dayanımına sahip harçların kayma gerilmesi üzerinde etkisinin öneminden bahsetmiştir [11].

(Stoian, vd. [12]) yaptıkları çalışmalarında yalın duvarları test ettikten sonra hasar görmüş duvarların tek yüzüne lifli polimerler uygulayarak duvarları tekrar düşey ve kademeli artımsal yatay yük etkisinde çözümlenmişlerdir. Düşey yük yüklenerek sabitlendikten sonra artımsal yatay kuvvet duvara hem tabandan hem de duvar üst kısmından L tipi kirişler aracılığı ile iletilmiştir. Lifli polimerler duvarların tek yüzüne %60 ve %100 oranında uygulanmıştır. Yük-yerdeğiştirme eğrilerinin ölçülmesinde duvarın sağ ve solundan ölçüler alınmıştır. Bulunan sonuçlarda güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş duvar sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmalarında LP sargılamanın güçlendirilmiş duvarların süneklik ve enerji yutma kapasitelerini önemli oranda arttırdıkları sonucuna ulaşmışlardır. Yalın duvarların ise deprem etkisi altında son derece gevrek bir davranış göstereceğini belirtmişlerdir [12].

(Weng, vd. [13]), (Lu, vd. [14]) ve (Weng, vd. [15]) yaptıkları çalışmalarında 13 adet yığma duvarı güçlendirerek sabit düşey yük ve çevrimsel yatay yük etkisinde deneysel olarak test etmişlerdir. Duvarlar 3000x1500x240 mm³ boyutlarında seçilmiştir. Bu duvarları cam elyaflarla (GFRP/CLP) sargılayarak yük etkisinde güçlendirmenin önemini incelemişlerdir. Duvarlar yüksek dayanımlı GFRP ile tek yüz tek kat, tek yüz çift kat, çift yüz tek kat ve çift yüz iki kat olmak üzere güçlendirilmiştir. Düşük dayanımlı GFRP ise her iki yüzeye çift kat uygulanmıştır. Çalışmalarında GFRP'nin duvarın süneklik davranışı üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Düşük ve yüksek dayanımlı olmak üzere iki tip GFRP kullanılmıştır. Düşük dayanımlı GFRP'yi iki doğrultuda, yüksek dayanımlı GFRP'yi ise tek doğrultuda uygulamışlardır. Deneylerde, GFRP malzemelerinde kopma ve ayrışma gözlenmediğini, tuğlada ayrışma oluştuğunu belirtmişlerdir. Deney süresince tabana yakın bölgelerde tuğlanın ezildiğini, sonrasında ise çatlak genişliği büyümekte ve tuğlada parçalanma ile birlikte yığmada tamamen hasar oluştuğunu belirtmişlerdir. Yüksek dayanımlı GFRP, deney aşamasında hasar görmemiş ve yırtılmamıştır. Tuğlalar hasar gördüğünde veya duvar göçme eğilimine geçtiğinde düşey yük kapasitesinde oluşan ani düşüşün GFRP ile önlendiğini saptamışlardır. Tüm deneylerde yalın duvarların tabanında en alt sıralardaki tuğlaların hasara uğradığını, fakat güçlendirilmiş duvarlarda bu tuğlalarda oluşan hasarın büyük olmadığını belirterek LP sargının davranış üzerindeki etkisini vurgulamışlardır. Test ettikleri X 202 kodlu duvarlardan ilk çatlakların yatay doğrultuda ve duvar tabanına yakın bölgelerde- yığma duvar

ve tabandaki kiriş arasında olduğunu gözlemlemişlerdir. X 206 kodlu duvarda ilk çatlaklar tabana yakın kısımda birinci ve ikinci sıradaki tuğla sıralarında oluşmuştur. Yataydaki çatlak duvar orta bölgesinde üst kiriş ve duvar arasında devam etmiştir. X 208 kodlu duvarda çatlaklar duvarla taban kirişi arasında oluşmuştur ve çapraz doğrultularla duvar tamamına yayılmıştır. Diyagonal şekilli çatlaklar duvar köşelerinde açılmalar oluşturmuştur. X 210 kodlu duvar yatayda kademeli artımsal yüklemeye tabi tutulmuştur. İlk çatlama duvar tabanına yakın bölgede ve yüklenen kenardan uzak köşede başlamıştır. Daha sonra duvar üst kısmında diyagonal doğrultuda yeni çatlaklar oluşmuştur. En büyük çatlak genişliği 15 mm kadar olmuştur ve diyagonal üzerinde yer alan iki karşı köşedeki tuğlalarda ezilmeler meydana gelmiştir. Sonuç olarak, duvarın yanal yük taşıma kapasitesinin duvara uygulanan düşey yük ile doğru orantılı olduğunu belirtmişlerdir. Yatay doğrultuda uygulanan kuvvetin en büyük değere ulaşması ile birlikte yük seviyesinde önemli derecede düşüş ve yanal yerdeğiştirmelerde ani artışlar ortaya çıktığını saptamışlardır. (Weng, vd. [12]) duvarın yanal yük taşıma kapasitesinin harcın dayanımından bağımsız olduğu sonucuna varmışlardır. (Hisdorf, [16]), (Mann, ve Betzler, [17]) ise deneysel çalışmalarında, yağmanın basınç dayanımının sadece tuğla ve sadece harca bağlı değil de, ikisine birlikte bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle, duvarın düşey ve yatay yük etkisi altında incelenirken tuğla ve harcın beraber değerlendirilmesi gerektiği deneysel sonuçlardan anlaşılmaktadır. (Lu, vd. [14]), hasar gören duvarların GFRP/CLP ile onarıldıktan sonra kaybettikleri yük taşıma kapasitesine ulaşabildiklerini vurgulamışlardır.

(ElGawady, vd. [18] [19],[20]), yaptıkları çalışmada 7 (yedi) adet duvarı deneysel olarak test etmişlerdir. Bu duvarlardan 3 tanesi yalın olarak test edilmiştir ve hasar görmüş bu duvarlar lifli polimerler ile onararak güçlendirildikten sonra tekrar yüklemeye maruz bırakılmışlardır. Diğer 4 (dört) duvar ise en baştan LP ile sarılarak düşey ve yatay yük uygulanmıştır. Lifli polimer malzemesi olarak cam elyaf (GFRP/CLP) kullanılmıştır. Tek kat GFRP/CLP kullanılarak duvarların sadece bir yüzeyi güçlendirilmiştir. Bütün deneysel duvarlar sabit düşey yükle yüklenmiştir ve yatayda çevrimsel yük etkisinde incelenmiştir. Deneysel çalışmada önceden test edilen bir yalın duvar (S2-REFE-ST) referans olarak alınmıştır. Bu duvar çevrimsel yükleme ile hasar görmüştür. Hasar seviyesi duvarın mesnete yakın bölgesinde alt sıralarda 2-3 adet tuğlanın ezilmesiyle sınırlıdır. Ezilmiş 2-3 adet tuğla değiştirilerek aynı özellikli harç malzemesi ile o bölge onarılmış ve tek yüz LP ile güçlendirilerek tekrar yük etkisinde

incelenmiştir. Yalın duvar 36 kN gibi bir değerde hasar görürken, güçlendirilen duvar yaklaşık olarak 50 kN gibi bir yükte hasar görmüştür. Hasar, değiştirilen tuğlaların bulunduğu bölgede gözlemlenmiştir. (ElGawady, vd. [18]) bu durumu eski ve yeni tuğlaların birleşim probleminden- bir bütünlük olmamasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Çalışmalarında LP ile güçlendirmenin önemi vurgulanmıştır. GFRP malzemesinin yanal rijitliği artırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca, (ElGawady, vd. [18]) yaptıkları çalışmada, depreme karşı hasar görmüş duvarlar için sadece diyagonal yönde yapılan güçlendirmenin yeterli olmayacağından yola çıkarak böyle bir güçlendirme önermemektedirler. (Zhao, vd. [21]) yaptıkları çalışmada ise yalın duvarı FRP ile çapraz yönde güçlendirmenin, hasar görmüş duvara sonradan uygulanan çapraz güçlendirmeye oranla daha başarılı yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

(Onar, [22]) yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında, LP kullanarak tuğla duvarların güçlendirilmesini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, tuğla duvarların CFRP ile güçlendirilmesinin verimli olacağı vurgulanmış ve özellikle tuğla duvarın iki yüzüne yapıldığı takdirde, dayanımlarının önemli oranda arttığı ve deprem sırasındaki performanslarını geliştireceğini saptamıştır. LP şerit ve dokumaların duvarın parçalanmasını önlediği ve hasar miktarını azalttığını belirtmektedir. Önceden hasar verilmiş çift taraflı örneklerde ortalama olarak en yüksek dayanımı, dokuma CFRP ile yapılan takviyenin gösterdiği belirtilmiştir. Hasarsız ve önceden hasar verilmiş çift taraflı ve tek taraflı model tuğla duvarlarda ortalama en yüksek dayanım dokuma CFRP ile yapılan güçlendirmede görülmüştür. Ancak tek taraflı numunelerde dokuma CFRP en yüksek dayanımı vermişse de ayırık şerit ve şerit CFRP ile yapılan tek taraflı uygulamalar birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Deneylerde yükleme ve mesnetlenmeler diyagonal yönde olduğu için bu tür duvarlar sayısal modellemelerde geometrilerinden ötürü öncelikli olarak tercih edilmemektedir. Tüm güçlendirme durumları içinde dokuma CFRP uygulamasının en yüksek yerdeğiştirmeleri verdiği belirtilmiştir. Güçlendirilmemiş model tuğla duvarlar dağılarak göçerken CFRP ile güçlendirilen model duvarlarda göçme duvarda çatlak oluşmasıyla gerçekleşmiş, herhangi bir dağılma gözlenmemiştir [22].

(Alcaino, vd. [23]), (Santa- Maria, vd. [24], [25], [26]) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda 12 (on iki) adet yığma duvarı düşey ve yatay yük etkisi altında incelemiştir. Bunlardan iki tanesi yalın, beş tanesi yatay, diğer beş tanesi ise diyagonal yönlerde LP ile güçlendirilmiştir. Lifli polimer malzemeleri duvarların her iki yüzüne de uygulanmıştır. Yatay yönde tek şerit ve

yatay yönde aralıklarla üç şerit olmak üzere iki farklı LP düzenlenmesi denenmiştir. Lifli polimer malzemesi olarak ise karbon elyaf (CFRP) şeritleri kullanılmıştır. Düşey yük belli bir değerde sabitlendikten sonra duvarlar yatay doğrultuda çevrimsel yüklemeye tabi tutulmuştur. Hasar görmüş duvarlar CFRP şeritlerle güçlendirilerek tekrar test edilmiş ve lifli polimer etkisi araştırılmıştır. Çalışmaları sonucunda, güçlendirme olarak üç şeritli yatay ve dört çaprazşeritin kullanıldığı duvarların, tek şeritli yatay ve tekli çapraz biçimle güçlendirilmiş duvarlara oranla dayanım ve şekildeğiştirme kapasite değerleri bakımından daha üstün oldukları saptanmıştır. Bu üstünlüğün oranı olarak ise toplam şerit genişlikleri aynı kalmak üzere yük taşıma gücü kapasitelerine ulaştıktan sonra yanal yer değiştirme kapasitelerinde % 50 gibi bir fazlalıktan söz edilmektedir. Donatısız yığma duvarların donatılı yığma duvarlara oranla güçlendirildikten sonra davranışlarında CFRP daha etkili olmuştur. CFRP ile güçlendirilmiş donatısız duvarların güçlendirildikten sonra da oluşan çatlak genişliğini değiştirdiği saptanmamıştır. Fakat çatlamanın başladığı yük değeri ile duvarların süneklik kapasitesinde de artış olduğunu saptamışlardır. Dış yüze uygulanan lifli polimerlerin yalın duvarların kayma gerilmelerini ve deformasyon kapasitelerini önemli bir şekilde artırdığı gözlemlenmiştir. Yalın duvarlarda gevrek kırılmalar oluşmuştur. Yatay doğrultuda 10 mm kadar yerdeğiştirme meydana gelmiştir ve bu durumda duvar gerilmelerinde %25 kadar kayıp olmuştur. Yatay doğrultuda yapılan güçlendirme, çatlakların yayılmasının önlenmesinde daha etkili olmuştur. Büyük basınç gerilmelerinin lifli polimerlerin duvar yüzeyinden ayrışmasına neden olabileceğini belirtmişlerdir [23-26].

(Aş, [27]) yılında yaptığı çalışmada, yaklaşık boyutları $400 \times 400 \times 260 \text{ mm}^3$ olarak üretilen 12 (on iki) duvar numunesini, 2 (iki) adedi herhangi bir güçlendirme işlemine tabi tutulmadan referans davranışı belirlemek üzere, 2 (iki) adedi tamir harcı ile sıvanarak, 8 (sekiz) adedi ise cam lifli polimer kompozitler ile güçlendirilerek monoton artan veya tekrarlı yükler altında diyagonal çekme deneyi ile denemiştir. LP kompozitlerle güçlendirilen numunelerde ortalama 3.30 kata varan oranlarda artış elde edilmiştir. Numunelerin şekildeğiştirme yapabilme yeteneği ve dayanımındaki artışta iyi sonucu tek katlı cam lifli polimer ile güçlendirilmiş numunede saptamışlardır. LP kompozitler ile güçlendirme uygulamasında LP kalınlığının duvar numunelerin davranışında etkili olmadığı görülmüştür. Bunun en önemli sebebi ise tuğla duvarın dayanımının düşük olması ve göçme biçiminin LP'nin sıva ve tuğlanın yüzeyinden ince bir tabakayı alarak numunenin yüzeyinden kalkması ile gerçekleşmesidir. LP

kompozitler ile güçlendirilmiş numunelerde göçme biçimini cam lifli kumaşların duvar yüzeyine yapışma şeklinin belirlediği görülmüştür. LP kompozitler ile güçlendirilmiş tüm numunelerde göçme benzer şekilde LP'in sıva ve tuğlanın yüzeyinden ince bir tabakayı alarak numunenin yüzeyinden kalkması sonucunda gerçekleşirken, göçme LP kompozitin katlanarak yapıştırıldığı yan yüzeyde numunenin yarılmasıyla gerçekleştirilmiştir. LP kompozitler ile güçlendirilmiş duvar numunelerinin analitik kesme dayanımlarının deneysel sonuçlardan daha yüksek çıktığı ve bunun nedeninin bağıntılarda LP kompozitlerin göçme biçimlerinin göz önünde bulundurulmaması olduğu belirtilmiştir [27].

(Parisi, [28]) yaptığı çalışmada kapı boşluğu bulunan yığma duvarın davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. (Parisi, vd. [29]) yaptıkları çalışmada ise aynı deney duvarını nümerik olarak modellemişlerdir. Duvar düşey yük uygulandıktan sonra yatay doğrultuda kademeli olarak artımsal yüklemeye tabi tutulmuştur. Kapı boşluğunun üzerinde ahşap lento kullanılmıştır. Hasar görmüş duvarın kapı boşluğu üzerindeki yaklaşık 1.00 m kadar yüksekliği IMG (inorganic matrix grid) isimli malzeme ile onarılarak tekrar deneysel olarak incelenmiştir. Mikro modelleme tekniği kullanarak analiz yapmışlardır. Tüf taşlar ve harç elemanlar sürtünmesiz enterfaz eleman olmadan izotropik sürekli eleman olarak modellenmiştir. Yığma birim ve harç elemanlar kabuk sonlu eleman kullanılarak modellenmiştir. IMG malzemesinin duvarın kesme dayanımının yanı sıra sünekliğini de artırdığını belirtmişlerdir [29].

(Mohebkah, vd. [30]), (Tasnimi, ve Mohebkah, [31]) yaptıkları çalışmalarında yığma dolgulu dolu ve boşluklu duvarlar için UDEC isimli doğrusal olmayan statik analiz yapabilen bir sonlu elemanlar programı aracılığıyla dolgulu çelik çerçeve sistemi düzlem içi yükleyerek doğrusal olmayan davranışlarını incelemişlerdir. Beton bloklar için betonun basınç dayanımına bağlı olarak kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri kullanmışlardır. Harç birleşimlerinde de ortalama kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri sabit tutulmuştur. Çelik ile yığma duvar arasında ise sürtünme katsayısı tanımlanmıştır. Çalışmalarından elde ettikleri sonuçları literatürde daha önce yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Modelin, göçme yükünü tahmin etmede, düğüm noktalarındaki açılmaları, çelik çerçevede ve boşluk bölgelerde göçme modlarını tahmin etmede kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir [31].

(Akbarzade, ve Tasnimi, [32]) yaptıkları çalışmada, yığma duvarların analizlerinde elasto-plastik enterfaz modeli kullanmışlardır. Tuğla, harç ve ara yüzey elemanların ayırık eleman

olduğunu belirtmişlerdir. Tuğla ve harcın da plastik-hasar modeline uygun davranış gösterdiğini varsaymışlardır. Pekleşme parametreleri ve kırılma/akma kriterlerinin ihtiyaç duyduğu özellikler modelin uygulanmasındaki başlıca güçlüklerdir. Enterfaz elemanlarda ise kohezyon ve içsel sürünme açıları için kullanılan değerlerin değişken olduğu ve bir bağıntıya dayanmadığı görülmektedir. Yığma duvarların analizinde gerçekçi davranışının tahmininde mikro modellemenin en iyi yol olduğunu belirtmişlerdir. Literatürde yer alan (Ganz, ve Turlimann, [33]), (Raijmakers, ve Vermelfroort, [34]) tarafından gerçekleştirilen yığma duvar deneylerini irdeleyerek, plastik hasar modeli ile nümerik çalışma yapmışlardır. Kendi yaptıkları deneysel çalışmayı da nümerik olarak modelleyerek yöntemlerinin geçerliliğini savunmuşlardır. Önerilen modelin boyut ve malzeme özelliklerinde sınırlandırma olmadan yığma duvarlara uygulanabileceğini vurgulamışlardır. Göçme ve çatlak oluşumlarının kolayca tahmin edilebilirliğini belirtmişlerdir. Kullanılan malzemenin plastisite parametrelerin belirlenmesinin güç olduğunu ve bu değerler için yapılan kabullerin duvar kapasite ve davranışının belirlenmesinde önemli hatalara neden olacağını vurgulamışlardır.

(Al-Salloum, vd. [35]) yaptıkları çalışmada betondan yapılmış yığma blok duvarların LP ile güçlendirilmesi konusunda düşey yüklemenin uygulandığı yalın ve güçlendirilmiş duvar davranışları üzerinde çalışmışlardır. Yüksek çekme mukavemetine sahip lifli polimerler yalın duvarların kesme ve eğilme kapasitesini önemli ölçüde artırmaktadır. Güçlendirilmiş duvar dayanımında önemli artışlar gözlenmiştir. Çalışmalarında LP türleri ile ilgili bilgiler sunmuşlar, LP ile güçlendirmenin avantajlarını vurgulamışlardır [35]. Aynı ekibin devam niteliğindeki bir diğer çalışmalarında, (Almusallam, vd. [36]) yaptıkları çalışmalarında LP ile güçlendirilmiş kiriş, kolon ve duvarları incelemişlerdir. Bu çalışmada da LP sargının etkili bir kuşatma sağlayarak dayanım ve sünekliği arttırdığı vurgulanmıştır.

(Grande, vd. [37]) yaptıkları çalışmada güçlendirilmiş ve yalın yığma duvarların davranış modeli için iki farklı yaklaşım önermişlerdir. İlk yaklaşımda farklı bünyesel malzeme davranışlarının homojenize edildiği limit analiz yöntemi ile boşluklu ve dolu duvarlar incelenmiştir. İkinci olarak ise bünyesel malzemeler için farklı davranış ve akma kriterlerinin kullanıldığı sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Makro düzeydeki yaklaşımın yığmada oluşan hasarları ve çatlakları yansıtmada yetersiz olabileceği, fakat bilgisayarla modellemede zaman açısından mikro modellemeye oranla daha kolay ve kısa sürede gerçekleştirebileceği

vurgulanmıştır. Kırılma yükleri açısından her iki modelin de deneysel sonuçlara uygun olduğunu belirtmişlerdir [37].

(Milani, [38]) çalışmasında LP şeritlerle güçlendirilmiş çok katmanlı yığma duvarların 3 boyutlu sonlu eleman analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Tuğla ve harç birimler 4 düğümlü sonlu elemanlarla, LP ise 3 düğümlü üçgensel elemanlarla modellenmiştir. Özellikle LP şeritlerin yığma yüzeyleri ile olan bağları ve kırılma anındaki ayrışmaları üzerinde durulmuştur. Üç boyutlu sonlu eleman limit analiz modelini duvarların düzlem içi ve dışı davranışlarının incelenmesinde kullanmışlardır [38].

(Fouchal, vd. [39]) yaptıkları çalışmada yığma yapılarıdaki enterfaz davranışın modellenmesi amacıyla malzemeler ile enterfaza ait davranış karakteristiklerinin belirlenmesi için deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde küçük boyutlu duvar numuneleri tercih edilmiştir. Çalışmalarının ikinci kısmında ise yapışma yoğunluğu olarak adlandırılan bir model geliştirmişlerdir. Bu model ile dolu ve/veya boşluklu tuğlalar ile harç arasındaki enterfaz davranış ile harçta meydana gelen hasarları açıklamaya çalışmaktadırlar. Yığmanın kompozit bir yapı olduğunu, bu yapıların göçmesinin ise tuğla ve harç vs. gibi malzemelerin ve çeşitli elemanların yapışma özelliklerinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Çoğu modelleme çalışmaları yığma ara yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilmiştir [39].

(Gambarotta, vd. [40]) yaptıkları çalışmayı referans vererek çevrimsel yüklemeler altında tuğla duvarlarda oluşan hasar modelini araştırdıklarını belirtmişlerdir. Çalışmalarının esas amacının tuğla/ harç ara yüzeylerinde göçme ve kayma davranışını incelemek olduğunu belirtmişlerdir.

İki tür çatlak oluşumunu gözlemlemişlerdir:

1. Tuğla/ harç ara yüzeylerinde oluşan çatlamlar
2. Ara yüzeylerde oluşan ve harç birimlerine doğru yayılan çatlamlar.

Çatlamların harçta ve ara yüzeylerde birlikte oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Deneysel çalışmalarında ara yüzeylerde başlayan kırılma ve çatlamların harca intikal ettiğini belirtmişlerdir [40].

(Farshchi, vd. [41]) gerçekleştirdikleri çalışmalarında yalın duvarların düzlem içi davranışlarını incelemek amacıyla sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirmişlerdir. Çözümlemelerde doğrusal olmayan mikro-modelleme tekniğini kullanmışlardır. Yığmanın, kompozit bir

malzeme olmasından kaynaklanan karmaşık yapısı doğrusal olmayan davranış özelliklerini içermektedir. Harç elemanlar yatay doğrultuda ara yüzey elemanlarla, düşey doğrultudaki harçları ve tuğla birimleri ise 3 boyutlu sonlu elemanlarla modellemişlerdir. Düşey harçların duvar kapasitesi üzerinde etkisi araştırılmıştır ve yığma davranışı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı kanaatine varılmıştır. Duvarın yüksekliğinin genişliğine oranın yatay yükler altında göstereceği davranışa olan etkisi araştırılmıştır [41].

(Triantafillou, vd. [42]) yaptığı çalışmada, LP ile güçlendirilmiş duvarlarla ilgili analitik model geliştirmiştir. Modelleri etki eden kesme kuvvetine paralel ve dik doğrultuda yerleştirilen LP şeritleri ile sınırlıdır. (Ehsani, ve Saadatmanesh, [43]) yaptıkları çalışmalarında basit deneylerle LP'nin duvarların kayma ve kesmeye karşı dayanımını artırdığını göstermişlerdir. Deneysel çalışmayla sınırlı kalarak herhangi bir bağıntı gerçekleştirememişlerdir.

(Holberg, ve Hamilton, [44]) yaptıkları çalışmalarında yalın duvarları güçlendirmede LP malzeme kullanmışlardır, duvarların kaymaya karşı güçlendirilmesinde LP etkisini araştırmamışlardır.

(AC 125 ICBO E. S. [45]) şartnamesi LP ile güçlendirilmiş yığma ve betondan yapılmış duvarların kayma gerilmesi ile ilgili bağıntılar sunmaktadır. Bu bağıntılar, sadece LP'in beton ve ya yığma duvarların dış yüzeyine sargılanmasını ele almaktadır. Beton ve yığmadaki eksenel yük ile gerilme dağılımını ihmal etmektedir. (ACI 440 [46]) beton kirişlerde kullanılan LP'in bir etriye görevi yaptığı varsayımından yola çıkarak LP'den kaynaklanan gerilme dağılımlarını incelemişlerdir. Ancak, LP'nin göçme modu ile ilgili ve LP beton yüzeyinden ayrılması, sıyrılması ile ilgili bilgiler verilmemiştir. Adı geçen yönetmelikte sadece LP elemandaki gerilme dağılımı ele alınmıştır.

Rahman, ve Ueda, [47] yaptıkları çalışmada tuğla-harç ve tuğla-LP sargı enterfaz davranışları için basitleştirilmiş mekanik modeller önermişlerdir. Model bağıntılarını sonlu eleman analizlerine uygulamışlardır. Tuğla-harç enterfazı için kırılma enerjisi ve en büyük kesme gerilmesi değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Kohezyon tamamen kaybolduktan sonra ise kalan içsel sürtünme açısı değerinin kullanılması gerekmektedir. Bu şekilde en büyük kesme gerilmesine ulaşıldıktan sonra gerçekleşen yumuşama davranışı modellenmeye çalışılmıştır. LP sargı için ise doğrusal-elastik davranış kabul edilmiştir. LP-tuğla arasındaki enterfaz için ise epoksinin oluşturduğu bağ için bir davranış modeli kullanılmıştır. Bu modelde enterfaz için

kesme kırılma enerjisi kullanılmıştır. Tüm modellerin önemli varsayımlar içerdiği ve pratik bir şekilde ölçümlenmelerinin mümkün olmadığı açıktır. Deney sonuçları ile analitik çalışma arasında önemli farklar görülmektedir. Bunun nedeni olarak LP polimerlin kuşatma etkisinin sayısal modelde dikkate alınmaması öngörülmüştür [47].

(Köksal, vd. [48], [49]) yaptıkları çalışmalarda yığma prizmaların ve sıvalı beton prizmaların basınç dayanımlarını elasto-plastik yaklaşım ve izotropik hasar modeli kullanarak incelemişlerdir. Bu çalışmalarda izotropik hasar modelinin ve DP akma/kırılma kriterinin ihtiyaç duyduğu malzeme parametreleri için bağıntılar ve değerler önermişlerdir. Yığma basınç elemanları ile donatılı yığma kolonların eksenel kuvvet taşıma güçlerine ait bağıntılar geliştirmişler ve bu bağıntıları diğer yönetmeliklerde verilenlerle karşılaştırmışlardır. Tüm bu çalışmalarda yığma birimlerin taşıma güçleri özellikle yığma biriminden ve daha sonrasında ise yatay derzlerde bulunan harcın dayanımından etkilendiği görülmektedir. Bu çalışmada yığmanın basınç dayanımına önemli ölçüde birimin katkı sağlarken az da olsa harcın mukaveminin de dikkate alınması gerektiği belirtilmekte ve yığma basınç dayanımı için bağıntılar önerilmektedir [49].

(Köksal, vd. [50]) yaptıkları çalışmada LP sargılı beton kolonlar için Drucker-Prager kriterinin değiştirilmiş biçiminin kullanıldığı elasto-plastik bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, LP sargılı kolonların taşıma gücü daha önceki çalışmalarda öne sürülen (Turgay, [51]), (Turgay, vd. [52]) gerçekleştirdikleri yaklaşımla hesaplanmış ve sonrasında bu değer (Köksal, vd. [53]) yaptıkları üç eksenli basınç etkisindeki beton için önerdiği kırılma kriterinin basınç meridyeni üzerine yerleştirilmiştir. Bu noktaya çizilen teğetlerle elde edilen DP kriterine ait doğrusal basınç meridyeninden kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri bulunmuş ve elasto-plastik analizlerde kullanılmıştır.

(Doran, [54]), (Doran, vd. [55]) yaptıkları çalışmalarda dikdörtgen ve kare kesitli ve LP sargılı beton kolonların 3 (üç) boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman analizlerinde bu yaklaşımı kullanmaya devam etmişlerdir. 33 (otuz üç) adet küçük ve büyük ölçekli kolon modellenmiştir. Beton 8-düğüm noktalı izoparametrik katı eleman olarak dikkate alınırken LP sargılar için LUSAS programında ince plak seçeneğini kullanmışlardır. Yanal-eksenel birim şekil değiştirme eğrilerini elde ederek sargılama kalınlığı ve/veya tabaka sayısının kolonlardaki etkisini araştırmışlardır.

(Jafarov, ve Köksal, [56]) yılında yaptıkları çalışmalarında, bu tez çalışması sırasında gerçekleştirilen yığma yapıların temel taşıyıcı elemanı olan LP ile güçlendirilmiş yığma duvarların düşey ve yatay yükler altında elasto-plastik analizlerini sunmuşlardır. Bu bağlamda, plastik analizler için tercih edilen DP kırılma kriterinin ihtiyaç duyduğu malzeme parametreleri (kohezyon ve içsel sürtünme açısı) araştırılmıştır. Çalışmayı daha anlamlı kılmak adına literatürde yer alan (Stratford, vd, [9]) çalışmaları incelenmiş, deney elemanına ait sonuçlar dikkate alınarak nümerik simülasyon sonuçları kalibre edilmiş, anılan parametreler için bir takım bağıntılar önermişlerdir. LP'nin duvarın yatay yük taşıma kapasitesini ve sünekliğini artırdığını belirtmişlerdir. Duvarda oluşan düşey çatlamların “harç kalınlığı kadar” kabulü yaparak duvarın yük- yerdeğiştirme talebi açısından bakıldığında uygun sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir [56].

(Wisnumirti, vd. [57]) çalışmalarında yığma duvarlarda harcın basınç dayanımının değişmesinin ve artmasının yığmanın basınç dayanımı üzerinde etkisinin çok küçük olduğunu belirlemeye çalışmışlardır. Ancak literatürde yer alan diğer çalışmalar incelendiğinde, yığma ile harcın basınç dayanımı arasında en az 16-17 gibi bir oranla başlayan ve büyümeye doğru olan bir oran olması tartışılabilir. Literatürde yer alan ve çalışma kapsamında da incelenen (Alcaino, vd. [23]), (Santa- Maria, vd. [24], [25], [26]) gerçekleştirdikleri çalışmalarda güçlü harç- zayıf tuğla modelleri incelenmiştir. Çalışmalarından elde edilen deneysel verilere de bakıldığında harcın basınç dayanımı 28 MPa, tuğla birimler 12,4 MPa, yığmanın ise 11 MPa olduğu deneylerle tespit etmişlerdir. (Kaushik, vd. [58]) çalışmalarında basınç etkisinde kilden üretilen tuğla birimlerin gerilme- şekil değiştirme değerlerini inceleyerek, yığma duvarlarda yığmanın, tuğlanın ve harcın elastisite modüllerinin kalibre edilmesinde tuğla, harç ve yığmanın basınç dayanımının etkisini incelemişlerdir. Tavsiye ettikleri analitik modelin basitliğini, tuğla ve harç birimlerin basınç dayanımına bağlı olduğunu belirterek, bu birimlerin basınç dayanımlarının laboratuvar ortamında ve ilgili standartlardan kolayca bulunabileceğini savunmuşlardır. Deneysel çalışmalarına dayanarak, tuğla, harç ve yığmanın gerilme şekil değiştirme eğrilerini elde ederek, bu birimlerin elastisite modülünü basınç dayanımlarına bağlı olarak irdelemişlerdir. Yığmanın çekmeye karşı dayanımının düşük olmasının nedenini, yığmanın farklı özellikli iki malzemeden oluştuğuna ve tuğla-harç arasındaki zayıf etkileşimden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Yığmanın tuğla ve harç birimlerinin birleşimi olduğu göz önünde bulundurulursa, yığmanın dayanım ve rijitlik değerlerinin tuğla ve harç

dayanım ve rijitlik değerleri arasına olabileceği fikrini de çalışmalarında görmekteyiz. Bunun doğruluğunu, yığmayı oluşturan tuğla ve harç malzemelerinin mekanik özelliklerine bakıldığında güçlü tuğla- zayıf harç ve ya güçlü harç- zayıf tuğla ilkesi ile ilgilendirmişlerdir.

(Bennett, vd. [59]) çalışmalarında yığmanın basınç dayanımının tuğla birimlerin basınç dayanımına bağlı olduğunu belirterek aradaki ilişkinin lineer olduğunu savunmuşlardır.

Çalışmanın ikinci bölümünde (Kaushik, vd. [58]) ve (Bennett, vd. [59]) nümerik bağıntıları irdelenecek, basınç dayanımına bağlı elastisite modülü formülasyonlarından bahs edilecektir.

(Akhavessy, ve Desai, [60]) yaptıkları çalışmada, basınç dayanımının 10,5 MPa olduğu bir duvarda, elastisite modülünü basınç dayanımın 727 katı bir değerle çarparak hesaplarda 7635 MPa olarak kullanmışlardır. Yığma duvarlarda basınç dayanımı ile elastisite modülü arasındaki katsayılar (FEMA 306 [61]) şartnamesinde 550, (MSCJ [62]) belgesinde 700, (Canadian Standart Association [63]) ise 850 gibi bir katsayı ile çarpılarak elde edilebileceği belirtilmektedir.

(Gumaste, vd. [64]) çalışmalarında yığma duvarların basınç etkisinde elastisite modüllerini ve basınç dayanımlarını incelemişlerdir. Yığma basınç dayanım değerinin tuğla basınç dayanımın %25 ile %50 arasında olabileceğini belirtmişlerdir. Genellikle harcın basınç dayanımındaki artışın yığma basınç dayanımını artırmadığını belirtmişlerdir. Düşük dayanımlı harçlarda yığma duvarların göçme nedenlerinden birinin de tuğla/harç yüzeylerindeki oluşan zayıflamadan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Tuğla/harç yüzeyleri arasındaki belirsizlik yığmada da belirsizlik oluşturabilmektedir. Tuğla ile harç arasında etkileşim kaybından dolayı kayma/kesme göçmesi oluşuyorsa, tuğlalardaki yanal basınç değeri düşmekte ve çekme kopması oluşabilmektedir. Eğer duvardaki tuğlalardan bir tanesi bile zayıfsa, bu tuğla diğer tuğlalardaki çekme kopması ile ezilebilmektedir. Güçlü basınç dayanımına sahip harçtan oluşturulan duvarlarda ise düşey harç derzlerinde oluşan gerilmeler alttaki tuğlada kesme göçmelerine neden olabilirler [64].

(Köksal, vd. [65]) çalışmalarında literatürde bulunan yığma kolonların nümerik analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma ile ilgili ileriki bölümlerde sıkça bahsedilecektir.

1.2 Tezin Amacı

Tuğla, doğal taş gibi malzemelerden yapılan bağlayıcı malzeme olarak genellikle harç kullanılan taşıyıcı sistemi yığma kolon ve duvarlardan oluşan yapı sistemleri yığma yapı olarak adlandırılır. Tarihsel olarak incelendiğinde barınma ihtiyacını karşılayan yapılar arasında ilk sırayı yığma yapıların aldığı söylenebilir. Türkiye, Kanada, Şili, Akdeniz Ülkeleri, İran, Pakistan, Çin ve Hindistan başta olmak üzere çoğu ülkelerde önemli oranda yığma yapı mevcuttur ve halen yapımlarına da devam edilmektedir. Bu bölgelerin büyük çoğunluğu deprem açısından riskli bölgelerdir. Yığma yapıların bir kısmı büyük bir tarihsel öneme sahiptirler ve dünyanın çoğu ülkesinde deprem bölgelerinde yapılmış yığma yapılar günümüzün mühendislik tasarım ilkelerinin kabulünden önce yapılmıştır. Bu yüzden, yığma tarzda inşa edilmiş yapıların depreme karşı performanslarını artırmaya yönelik deneysel ve nümerik çalışmalara ihtiyaç vardır ve bu çalışmalar yetersiz de olsa yapılmaktadır. Yatay yükler altında yığma duvarlarda, harç dayanımının tuğla dayanımına oranla genellikle düşük olması nedeniyle harçta çatlaklar ve tuğla-harç yüzeyleri arasında ayrışmalar meydana gelmektedir ki, bu da eleman bazında yatay direnci azaltmaktadır. Bu durumda, bu tarz yapıların depreme karşı yeterli dayanımı ve istenilen davranışı gösterebilmeleri için güçlendirilmeleri gerekmektedir.

Türkiye’de de halen yığma yapılar yapılmaktadır. Özellikle kırsal kesimlerde inşa edilmiş bu yapıların çoğu dinamik yükler ve yatay yükler dikkate alınmadan yapıldıkları için depremlerde hasar görmekte, can ve mal kaybına neden olmaktadır. Son dönemlere kadar deprem yönetmeliklerinde de yığma yapılar konusunda eksiklikler mevcut idi. Buna en güzel örnek, 1997 yılı Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY)’nin yığma yapılarla ilgili esaslar kısmında yığma yapı gerilmeleri ve özellikle basınç dayanımı hakkında hükümler bulunmazken 2007 Deprem Yönetmeliğine yığma duvar gerilmelerinin hesabı başlıklı bir alt bölüm ilave edilmiş olmasıdır. Yığma yapıların, taşıyıcı sistemi betonarme ve çelik olan diğer yapılara oranla önemli eksileri vardır. Yığma yapıların en büyük eksik yönü oldukça ağır, hantal ve gevrek malzemeden inşa edilmiş olmaları ve deprem etkisinde sünek davranışının diğer taşıyıcılara oranla az olmasıdır. Bilindiği gibi yapı ağırlığı ne kadar fazla olursa deprem esnasında oluşacak atalet kuvvetleri de o kadar fazla olabilmektedir. Bu da yapı elemanlarının çok büyük iç tesirlere maruz kalması demektir. Gevrek malzemelerin ise olası bir deprem esnasında çok fazla deformasyon yapması beklenemez ve dolayısı ile ani göçmeler meydana gelmektedir. Yığma yapıların çerçeveli yapılara oranla rijit olmaları,

deprem sırasında daha fazla yatay yüke maruz kalmalarına sebebiyet vermektedir. Yığma yapı malzemelerinin basınç gerilmelerine karşı dayanıklılığı orta ve yüksek düzeyde, çekme gerilmelerine karşı dayanımları ise küçüktür. Yığma yapılar üzerine yapılan deneysel çalışmaların çoğunda yüksek rijitlikli tuğlalar ve daha zayıf harç kullanılmıştır. Bazı ender çalışmalarda ise dayanımı yüksek harç ve rijitliği düşük tuğlalardan oluşan deneyler gerçekleştirilmiştir.

Yığmanın deprem davranışı son derecede gevrek ve can ve mal kaybına kadar ulaşacak çeşitli hasarlara neden olabilmektedir. Bu nedenle yığma yapıların güçlendirilerek bu tarz eksik davranışlarını azaltacak derecede sismik performanslarının artırılması gerekmektedir. Başarılı bir güçlendirmenin ana prensibi gevrek davranıştan kaçınılacak derecede duvarların deprem davranışını iyileştirmektir.

Yalın duvarların güçlendirilmesinde kullanılan LP şeritler, plakalar, dokumalar ve çubuklar halinde bulunmaktadır. Yalın duvarları yük taşıyıcı olan- yalın ve taşıyıcı olmayan- dolgu çerçeveli olarak, betondan, tuğladan yapılmış duvarlar olarak inceleyebiliriz. Yığma duvarların düzlem dışı yükler altında göçmeleri malzeme hasarlarına ve insan kaybına sebebiyet vermektedir. Bu yüzden de etkili bir güçlendirme tekniğine ihtiyaç vardır. Yapısal açıdan bakıldığında LP'nin çok az ağırlığının olması yapının dinamik özelliklerinde de değişiklik göstermemesine neden olmaktadır. LP ile güçlendirilmiş yalın duvarların yüke karşı dayanıklılığı, yığmanın çekme gerilmesine, düzlem içi basınç gerilmesine, sınır şartlarına, yükseklik/ kalınlık oranına, malzeme özelliklerine ve LP ile yığma arasındaki bağ ilişkilene bağlıdır. Düzlem içi basınç kuvvetleri çatlama erteleyebilir/ geciktirebilir. Çatlamalardan sonra kemerlenme etkisi gözlenebilir. Analizler, rijit bir mesnetlenme durumu söz konusu olduğunda, etki ettirilmiş kuvvetlerin çatlama yükünü 2.5 katı kadar yükselttiğini göstermiştir. LP ile güçlendirilmiş duvarlardaki araştırmalar göstermiştir ki, LP'nin yığma yüzeyinden ayrışması göçme mekanizması kontrolündedir. Bu durum düzlem içi ve düzlem dışı yüklere karşı güçlendirilmiş duvarlarda daha belirgindir.

Bu tez çalışmasında amaç LP ile farklı biçimlerde güçlendirilmiş yığma duvarların sonlu eleman analizlerinde kullanılabilecek genel bir yaklaşım geliştirmektir. Literatürde bulunan karmaşık ve uygulama alanları birkaç duvarla sınırlı olan teorik yaklaşımların yerine yığmanın bünyesindeki malzemelerin mekanik davranışlarındaki belirsizlikler için olabildiğince az sayıda varsayım yapan pratik bir çözümleme tekniğine ulaşmaktır. Basitleştirilmiş mikro-

modelleme sınıfına giren yaklaşım çerçevesinde tüm yığma duvarlar için uygulanabilecek malzeme (tuğla, harç, LP) parametreleri için genel bağıntılar kullanırken kırılma durumunu tanımlayacak bir kriter geliştirilmesi de amaçlanmıştır. İncelenen duvarlar hem düşey hem de yatay yük etkisindeki deneysel elamanlardır. Literatürde bulunan 10 (on) farklı çalışmadan 17 (on yedi) adet duvarın modelleri oluşturulmuştur. Bu çalışmada güçlendirilmiş yığma duvarların doğrusal olmayan üç boyutlu sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir.

1.3 Bulgular

Taşıyıcı sistemi çelik, betonarme gibi yapılarla birlikte taşıyıcı sistemi yığma kolon ve duvarlardan oluşan yığma yapılar da dünya genelinde inşa edilmişler ve çeşitli ülkelerde yapımlarına devam edilmektedir. Bununla birlikte gerek deneysel ve gerekse tasarım yöntemleri açısından yığma yapılarla ilgili yönetmeliklerde eksiklikler bulunmaktadır. Literatürde yer alan deneysel çalışmalar ve bu deneysel çalışmalar için yapılan analiz sonuçları incelendiğinde, yığma yapıların modellenmesinde kullanılan yöntemlerin önemli oranda yığma yapıları oluşturan malzemelerin mekanik özelliklerine bağlı olduğu görülmektedir. Bu aşamada basitleştirilmiş mikro-modellerde enterfaz davranışı birimlerin davranışları ile birlikte düşünülmektedir. Detaylı mikro-modellemede ise enterfaz davranış için ayrı bağıntı ve teorik modeller gerekmektedir. Bu tür modellerde kullanılan malzeme parametreleri ve bunların belirlenmesindeki güçlüklerden yapılan çalışmalar özetlenirken bahsedilmiştir. Bir model ne kadar az parametreye ihtiyaç duyarak duvar davranışını açıklamakta ise o kadar gerçekçi kabul edilebilir. Literatürdeki modellerde özellikle çekme ve kesme altındaki kırılma enerjileri kullanılmaktadır. Ancak bu değerlerin ölçülmesi ve tasarım amacıyla genel bağıntılar olarak sunulması son derece güçtür.

Bu çalışmada kullanılacak yöntemin basit ve yığma duvarın gerçekçi davranışını yansıtacak şekilde olması hedeflenmiştir. Malzemelerin ölçülmesi en kolay olan mekanik özelliği basınç dayanımıdır. Bu yüzden malzeme parametreleri beton gibi yarı gevrek malzemelerde genellikle basınç dayanımına bağlı olarak ifade edilmektedir. Yapılacak kabul, uygulama alanı geniş, nümerik bağıntıları karmaşık olmayan, yığma duvarın gerçekçi davranışını yansıtacak şekilde olması gerekmektedir. Tez çalışması kapsamında ise uygulama pratiği açısından üstünlükleri olan ve yoğun olarak kullanılan Drucker-Prager kırılma kriteri tabanlı bir yaklaşım

tercih edilmiştir. Kriterin ihtiyaç duyduğu kohezyon ve içsel sürtünme açısı ile ilgili bağıntılar yığmanın sadece en kolay ölçülen sadece basınç dayanımına bağlı olarak ifade edilmiştir.

LP kullanımı yığma duvarların sismik performansına güç katmaktadır. Yüksek rijitliği ve düşük ağırlığı, diğer malzemelerle kıyaslandığında güçlendirmede kullanımını ön plana çıkarmaktadır. Yığma duvarların LP ile güçlendirilmesi ile düzlem içi ve düzlem dışı gerilmelerde dikkate değer artış görülmüştür. LP sargısının duvar üzerine etkisi literatürdeki tüm bu deneyler göz önüne alınarak modellenmiştir. Daha önce sadece yalın duvarlar için kullanılan yığma birimi bağıntılarının LP sargının kuşatma etkisini dikkate alacak şekilde geliştirilmesi sağlanmıştır. Harç için önerilen bağıntılarda ise enterfaz davranışın etkilerinin yansıtılması amaçlanmıştır. Bu yaklaşımla 10 (on) farklı çalışmadan 17 (on yedi) duvarın çözümleme sonuçları elde edilmiştir. Bu tezin başlıca amacı güçlendirilmiş yığma duvarların 3 boyutlu sonlu eleman modellerini oluşturarak doğrusal olmayan analizlerini gerçekleştirmektir. Modellemede DP akma/kırılma kriterinin ihtiyaç duyduğu kohezyon ve içsel sürtünme açısı parametreleri yığmanın en önemli ve en kolay ölçülebilen mekanik özelliğini olan basınç dayanımına bağlı olarak analizler sonucunda ifade edilecektir. Analizler üniversitemizde bulunan (LUSAS [66]) sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilecektir. Geliştirilen bünyesel model, literatürde bulunan (Stratford, vd [9]), (Capozucca, [10]), (ElGawady, vd. [18]), (Alcaino, ve Santa- Maria [23-26]) vs. gibi araştırmacıların deneysel çalışmaları ile karşılaştırılarak kontrol edilecektir. Modellemede özellikle düşey ve yatay yükün beraber etkidiği durumlar dikkate alınacaktır.

YIĞMA DUVAR BİLEŞENLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ**2.1 LP Sargılı Yığma Duvarların Doğrusal Olmayan Analizinde Temel İlkeler**

Malzemelerin dayanımları atomlararası bağ kuvvetleri ile içyapılarına bağlıdır. Malzemelerin içyapı özellikleri davranış performanslarını etkiler. Bunlardan en önemlisi mühendislik alanında elastisite modülüdür ve davranışı önemli oranda belirleyen başlıca malzeme parametrelerinden birisidir. Çoğu malzemenin elastisite modülü bağ rijitliği ve bölge başına düşen bağ yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Atomlararası bağ da yay gibi olup bir yay sabitine sahiptir. Elastiklik modülü bu anlamda $E = \frac{S}{r_0}$ olarak ifade edilebilir. Burada, S atomlararası bağ sabitini, r_0 ise atom boyutunu göstermektedir. Örneğin kovalent bağa sahip olan elmas için $S=0,2$ N/mm olarak alınabilir ve bu atomlararası bağın çok kuvvetli olduğunun bir göstergesidir. Metaller de elmas kadar olmasa da kuvvetli bağlara sahiptirler ve bu nedenle elastisite modülleri yüksektir. Elmasın elastisite modülü 1000000 MPa iken çeliğin elastisite modülü değeri yaklaşık 200000 MPa'dır.

Her ne kadar elastisite modülü oldukça kesin bir büyüklük ise de dayanım ve davranış söz konusu olduğunda belirsizlikler artmaktadır. Akma ve kırılma/kopma dayanımları birbirinden farklı davranış sınırları gösteren tanımlamalardır. Akmadan sonra kalıcı şekil değiştirmelerin, bir diğer ifadeyle plastik davranışın başladığı düşünüldüğünde tek bir elastisite modülü değerinin malzeme davranışını açıklamakta yetersiz kaldığı rahatlıkla söylenebilir. Gevrek malzemeler söz konusu olduğunda ise basınç ve çekme dayanım ve davranışları da birbirlerinden farklılaşmaktadır. Malzemelerin hasar mekanizmaları da içyapılarından kaynaklanan nedenlerden dolayı birbirlerinden farklıdır. Plastisite teorisi genel olarak metallerin davranışlarını açıklamak için geliştirilmiştir. Bunun nedeni atomlararası düzeyde

metalik bağın izin verdiği elektron serbestisinin neden olduğu sünek davranıştır. Bu açıdan bakıldığında bu çalışma kapsamında yığma duvarlarda elasto-plastik yaklaşımın tercih edilmesi eleştirilebilir. Ancak, yığmanın basınç altında önemli şekilde değişimler yaptığı bilinen bir gerçektir. Bu çalışmanın başlıca amacı ise LP malzeme ile sarılmış basınç etkisindeki yığma duvarların yatay yükler altındaki davranışlarının modellenmesidir. Bir polimer malzeme kimyasal olarak birbirine bağlı birçok parça ya da birimi içeren bir katı ya da birbirine bağlanarak bir katı oluşturan birimlerden oluşmaktadır. Plastik malzemeler ise alışlagelmiş polimer yapılardır. Bu nedenle, polimerlerin plastik davranış göstermesi ile yığmanın sargı etkisi altında artan şekilde değişirme yeteneğinden dolayı tüm sistem için elasto-plastik modelleme seçilmiştir.

2.2 Yığma Birimleri Olarak Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

(Üstündağ, [67]) çalışmasında yığma duvar doğal taşların ve ya tuğla, beton, briket, kumtaşı, gazbeton, blok ve diğer yapay taşların kireç, çimento gibi bağlayıcılardan oluşturulmuş harçlar kullanılarak örülmesi ile oluşturulan yapılar olduğu bilgisini vermiştir [67]. (Çöğür, [68]) tarafından gerçekleştirilen çalışmada Türkiye'nin bazı kırsal bölgelerinde de yapılmış yığma yapılarda, harç olarak çamur kullanılmış ve damları topraktan inşa edilmiş yapıların olduğu bilgisine rastlamak [68]. (Bayülke, [69]) çalışmasında, tarihsel niteliklere sahip olsun ve ya olmasın yığma yapıların deprem davranışı ve dayanımları can güvenliği açısından ve güçlendirilmeleri için yapısal davranışlarını bilinmesi gerektiğini vurgulamıştır. Yığma yapının dayanımı, yığma duvarları oluşturan bloklarla bağlayıcıların dayanımına ve aynı zamanda bu blok ve bağlayıcılardan oluşan yığma duvar dayanımına bağlı olabilmektedir. Yığma yapıların duvar kalınlıkları ve ağırlıkları bakımından ele alındığında rijit yapılar olduklarını söyleyebiliriz. Doğal titreşim periyotları $(0.05- 0.07) \times \text{“yapı kat adedi”}$ kadardır. Dört veya beş katlı bir yığma yapının titreşim periyodu yaklaşık olarak 0.25 sn kadar olarak bulunabilir. Yığma yapı/duvar malzemeleri tuğla, beton briket, doğal taş ve bağlayıcı harçtan oluşmaktadır [69].

2.2.1 Tuğla

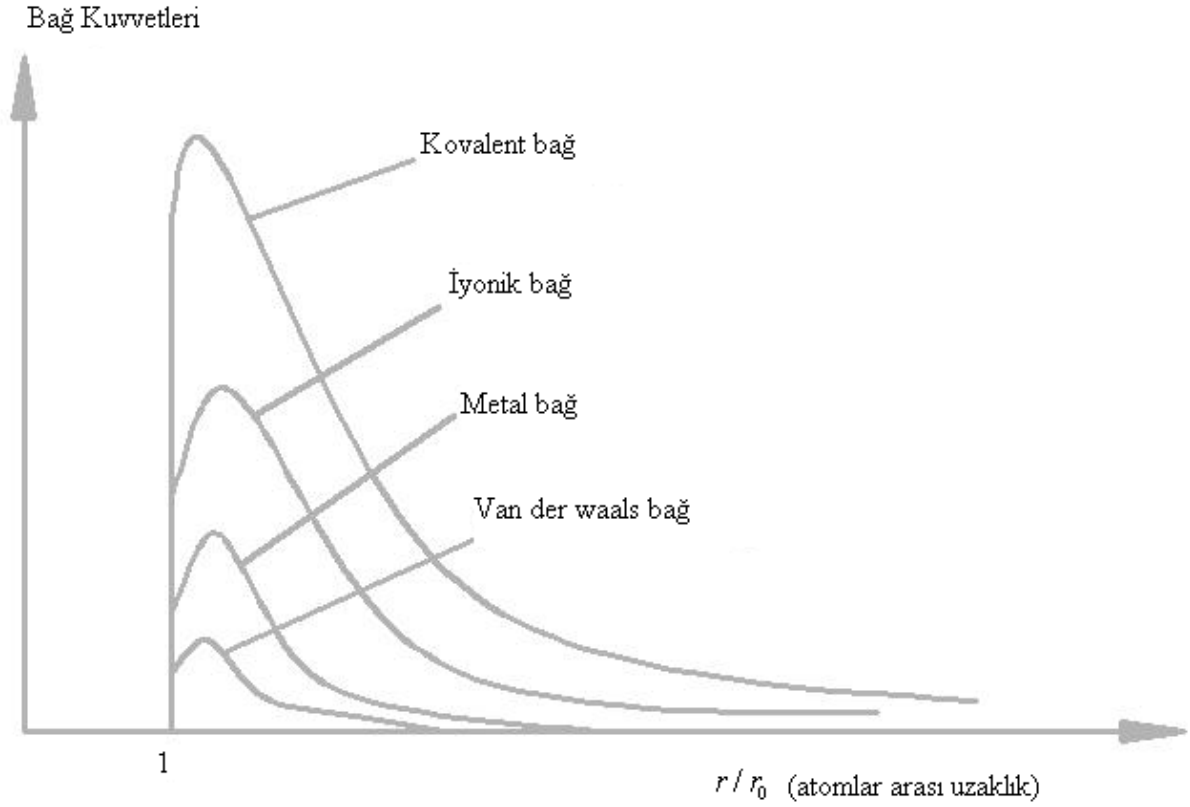
(Kuruşçu, [70]) yaptığı doktora tez çalışmasında “tuğla, killi toprak ve balçığın, kaolin veya benzer malzemeler içeren toprağın harman edilip, gerektiğinde kum, öğütülmüş tuğla veya kiremit tozu, kül veya benzeri katkı maddeleri katıp su ile yapılan hamurun kalıplanıp fırınlanmasıyla elde edilen bir yapı malzemesi” olduğu tanımlamasını yapmıştır [70].

(Celal Bayar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malzeme Ders Notları [71])’dan edinilen bilgilere göre tuğla iyonik bağa sahip seramik malzeme sınıfındandır. Bir atomdan diğerine elektron aktarımı ile oluşur. Metaller en dış kabuktaki valans elektronlarını vererek pozitif iyon, en dış kabuğundaki elektronları 8'e tamamlamak isteyen ametaller yeni elektronlar alarak negatif iyon oluştururlar. Pozitif iyonlarla negatif iyonların birbirlerini kuvvetli bir çekim kuvveti ile çekerek meydana getirdiği bağa iyonik bağ, metal ile ametalin oluşturduğu metal bileşiğine seramik malzeme adı verilir [71].

(Erol, [72]) çalışmasında seramiklerin farklı oranlarda kristal ve cam yapılı fazları ile çoğu kere porozite/boşluk içerdikleri bilgisini sunmuştur. Seramiklerin başlıca avantajları aşağıdaki biçimde özetlenebilir:

- 1) Isıya dayanıklılık
- 2) Çok sert olmaları
- 3) Metallere göre ucuz, hafif ve daha kolay üretilebilir olmaları
- 4) Oksitlenmeye ve aşınmaya dayanıklı olmaları
- 5) Basınç dayanımlarının yüksek olması [72].

İstenmeyen özelliklerinin başında ise yük etkisinde gevrek davranmaları gelmektedir. Bunun en önemli nedeni, metal ve ametal elementlerin birbirlerine birinci derece iyonik, kovalent ve/veya ortaklaşım bağıyla bağlandığı inorganik, metal dışı malzemelerden oluşmalarıdır. İyonik bağ yapıları nedeniyle erime sıcaklıkları yüksek, düşük tokluk ve sünekliktedirler. (Uludağ Üniversitesi, Kimya ders notları [73])’de iyonik bağ Şekil 2.1’den görüleceği üzere en kuvvetli bağlar sıralamasında ikinci sırada yer aldığı bilgisi verilmiştir..



Şekil 2.1 Atomlar Arası Uzaklığa Bağlı Olarak Bağların Kuvvetliliği [73].

Basınç dayanımı tuğlanın pek çok faktöre bağımlı, en önemli özelliğinden biridir. Tuğlanın porozitesi, pişirilme ısısı, üretim biçimi, delikli tuğla ise deliklerin miktarı, yeri, kenarlarının biçimi, yükleme yönü, vb. basınç dayanımı üzerinde etkili olan faktörlerdir. Tuğlanın yapıldığı toprağın cinsinin de tuğla basınç dayanımı üzerinde etkisi olduğu söylenebilir. Tuğlaların basınç dayanımı malzeme özelliklerine bağlı olarak 10 MPa'dan 30 MPa'a kadar değişebilir. Türkiye'de üretilen tuğlaların üzerinde düzenli bir basınç dayanımı saptama deneyleri yapılmamaktadır. Bunun nedeni yönetmeliklerde Amerika ve Kanada'da olduğu gibi basınç deneyi için standartların bulunmamasıdır. Yazar, bu konuda tarihi bir kalenin 4000 mm kalınlığındaki duvarından karot alınma talebiyle bile karşılaşmıştır. Türkiye'de yığma yapıların tasarımı küçümsenmiş ve basit yaklaşımlarla çözümlenmeye çalışılmıştır. Oysa ki dünyadaki literatür incelenirse, özellikle 1980'lerden sonra giderek artan doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin gerek düşey yük altındaki yığma elemanlarında ve gerekse yatay yük etkisindeki duvarlar için çok sayıda ileri düzey analizlerin yapıldığı rahatlıkla saptanabilir. Ancak Türkiye'de bulunan ve son derece önemli kültürel ve tarihi değere sahip yapılarda bile basit statik çözümlerle güçlendirme ve restorasyonların gerçekleştirildiği bir gerçektir. Basınç dayanımıyla ilgili bağıntılar ve yaklaşımlar ileriki kısımlarda daha kapsamlı

incelenecektir.

Kırılma sırasındaki basınç gerilmesi değeri ölçülürken tuğladan tuğlaya önemli oranda değişimler gösterse de birim uzama ya da kısalma genel olarak 0.001 civarındadır. Bu nedenle eğer tuğlanın doğrusal elastik davranış gösterdiği düşünülürse elastisite modülü değerinin basınç dayanımının 1000 (bin) katı kadar alınması makul gözükebilir. Ancak, kabul edilmesi gereken, elastisite modülü için bu değerinin bir üst sınır olduğu gerçeğidir. Tuğlanın Poisson oranı 0.18-0.25 değerleri arasında alınabilir. Taşıyıcı blok tuğlanın en çok % 35 kadar düşey delikli olması gerekmektedir. Ancak bu boyutta ve az delik oranlı tuğla pişirilmeden önce kontrollü bir biçimde ve özel fırınlarda kurutulması gerekmektedir. Yoksa et kalınlığının daha çok olması nedeni ile pişme aşamasında çatlaklar ve kırılmalar oluşabilir [69].

(Berto, vd. [74]) tuğla- harç prizmalardan oluşan mevcut literatürdeki deneysel çalışmaları nümerik olarak modellemişlerdir. Analizlerde 3 tuğla ve 2 harç yüzeylerlerden oluşan 3'lü prizmalar modellenmiştir. 204 mm boyunda ve 115 mm genişliğinde olan her bloğun boyu yaklaşık 600 mm, kullanılan harç kalınlığı ise 12 mm kadardır. İlk olarak zayıf harç/ kuvvetli tuğla durumu incelenmiş, ikinci aşamada ise kuvvetli harç/ zayıf tuğla durumu incelenmiştir. Zayıf harç durumunda harcın yüksek şekil değiştirme yeteneğinden dolayı harcın Poisson oranının tuğlanın Poisson oranına yakın değerler alınabileceğini savunmuşlardır. Aynı durumun elastisite modülleri için de korunduğunu belirtmişlerdir [74].

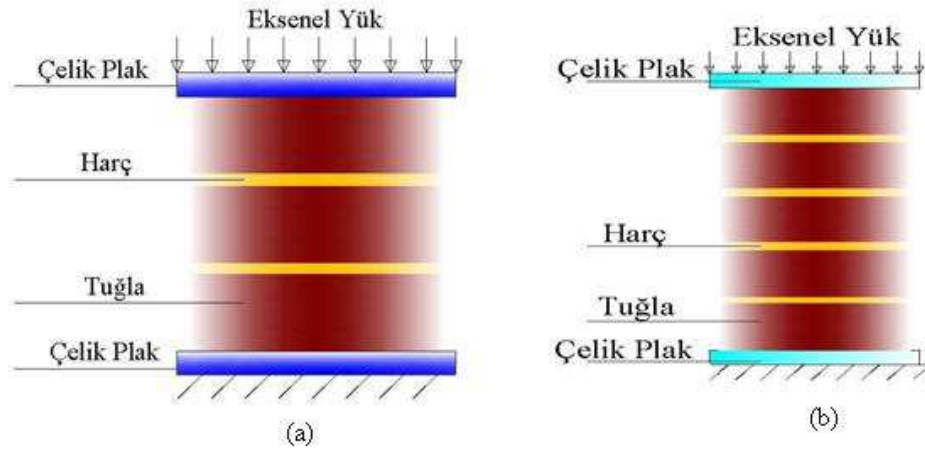
Analizlerinde DP kırılma kriterini temel alan izotropik hasar modeli kullanmışlardır. Harcın tuğla birimlerden kuvvetli olduğu durumlarda gerilme birim şekil değiştirme davranışlarında daha iyi tahminler elde edildiğini belirtmişlerdir. Berto, vd. çalışmalarında tuğla basınç dayanımı 14.9 MPa iken yığma basınç dayanımı 16.3 MPa olarak bulunmuştur. Dayaratmanın çalışmasında tuğla basınç dayanımı 14.9 MPa iken yığma basınç dayanımı 4.58 MPa, Köksal, vd. 2005 çalışmasındaki bağıntı ile 14.9 MPa değerinde tuğla basınç dayanımına sahip yığmanın basınç dayanımını 15.77 MPa olarak elde edilmektedir. Köksal, vd. 2005 bağıntısındaki bloğun basınç dayanımının yığmanın basınç dayanımına katkısı harç değeri düştükçe azlatılmalıdır. Bu oran (harç /blok) =1/3 olması durumunda blok katsayısı 0.30, 1/6 nin altında ise blok katsayısı 0,1'e kadar düşürülebilir.

(Horng, [75]) tarafından gerçekleştirilen tez çalışmasında ise yığma prizmaların eksenel yükler altında davranışını incelemiş, deneysel ve nümerik olarak gerçekleştirdiği çalışmasında tuğla birimler için Poisson oranını 0,10 MPa, harç için ise 0,25 MPa olarak elde

etmiştir. 215x65x100 mm³ ölçülü tuğla ve bağlayıcı malzeme olarak 10 mm kalınlığında harç kullanarak şematik ölçüleri aşağıda verilmiş düz örgülü yığma prizmaları aksel kuvvet altında test etmiştir. Harç birimlerin kalınlıklarını artırarak, tuğla birimlerin ölçüsünü sabit tutularak harcın yığma üzerinde etkisini irdelemiştir. Harç kalınlığının artırılması ile prizma basınç dayanım değerlerinde azalma olduğunu savunmuştur. Beş sırada örülmüş düz örgülü prizma ve şaşırtmalı örgülü küçük yığma duvarları aksel yükleme etkisinde test ederek tuğlaların kırılma biçimlerini incelemiştir. [75].

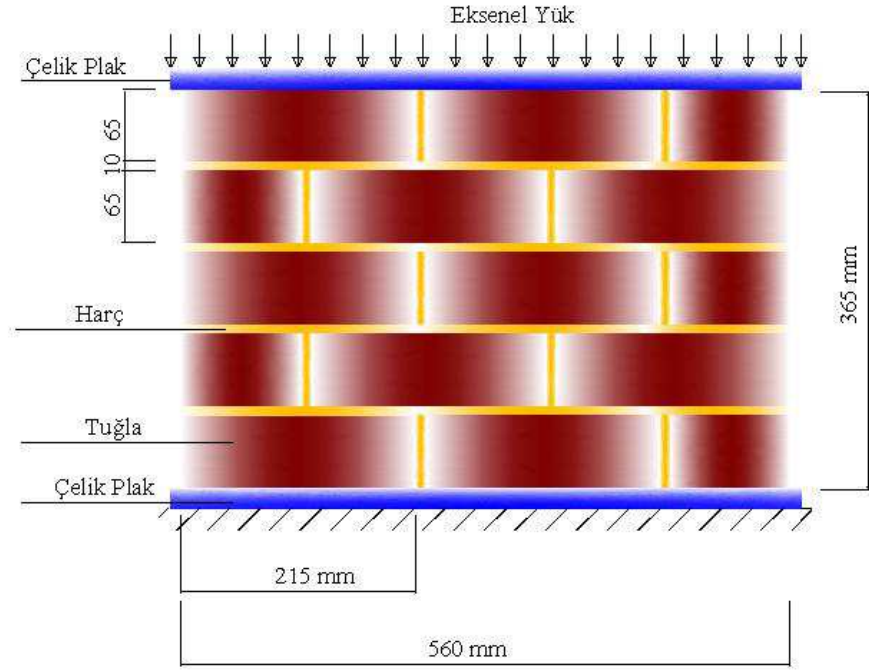
(Vyas, ve Reddy,[76]) gerçekleştirdikleri çalışmalarında William Wranke'nin 5 parametrelilik malzeme kriterini kullanarak yığma prizmaları sonlu elemanlarla modellemiştir. Analizlerde mikro modelleme tekniği kullanmışlardır. 5 adet tuğla ve bağlayıcı malzeme olarak 10 mm harç kullanarak 260x80x120 mm³ ölçülü 440 mm boyutunda yığma prizma modellemiştir. Yük etkisinde oluşan çatlakları da modellemede ayrıca dikkate almışlardır [76].

(Kaushik, vd. [58]) çalışmalarında da 5 tuğla üst üste konularak ve tuğla aralarında bağlayıcı malzeme olarak 10 mm harç kullanarak toplam yüksekliği 400 mm olan düz örgülü yığma prizmaları deneysel olarak test etmişlerdir [58].



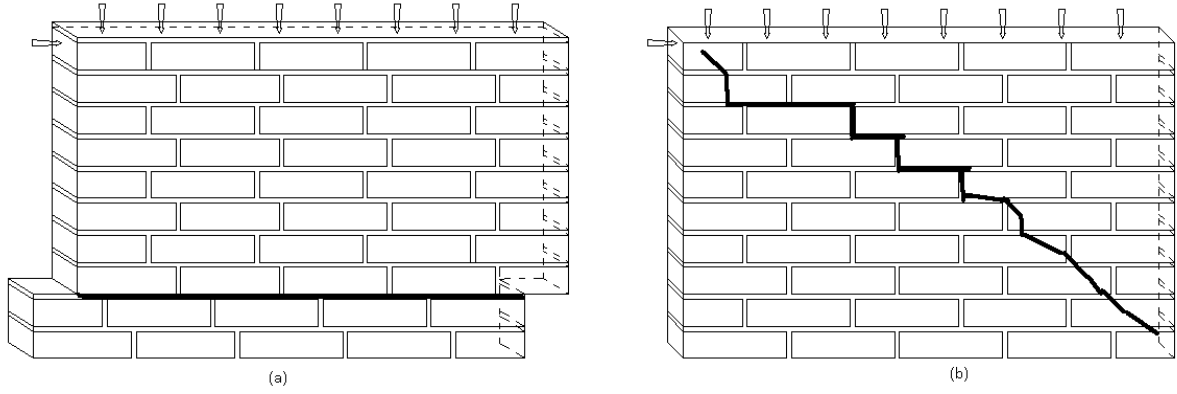
Şekil 2.2 Üçlü (a) ve Beşli (b) Yığma Prizmanın Şematik Gösterimi

Ölçüleri şekil üzerinde verilen beş sıralı tuğlalardan şaşırtmalı şekilde örülmüş yığma duvarın aksel basınç yükü etkisinde şematik şekli aşağıda Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 Eksenel Kuvvet Etkisinde Şaşırtmalı Örgülü Yığma Duvar

(Tomazeviç,[77] gerçekleştirdiği çalışmasında değişik boşluk tiplerine göre üretilmiş tuğlaları test ederek, bu tuğlalardan oluşturulmuş duvarları düşey ve yatay yük etkisinde deneysel olarak irdelemiştir [77]. Çalışmasında (Eurocode 6 [78]) şartnamesini dikkate alarak çalışmasını gerçekleştirmiştir. Tomazeviç, yığmayı basınç yüklerini taşıyabilme özelliğine sahip, ancak çekme ve kayma kapasitesi düşük kompozit malzeme olarak tanımlamıştır. Duvardaki eksenel basınç ve aynı zamanda harç basınç değeri de düşük olduğu durumlarda, yatay kuvvetlerin duvar tabanı boyunca kesme yaratarak duvarı yanıl doğrultuda öteleyebileceğini belirtmişlerdir. Buna taban kesme kırılması denilebilir. Bu durum genellikle binaların çatı katında ve yükün az olduğu üst katlarda oluşabilmekte, düşey yükün fazla olduğu alt katlarda bu durum nadir gözlenebilmektedir. Alt katlarda yatay yükler etkisinde ise köşegen doğrultuda çatlamlar oluşabileceğini vurgulamışlardır. Bu durum Şekil 2.4'te şematik olarak gösterilmiştir [77].



Şekil 2.4 (a) Taban Kayması, (b) Diyogonal Çatlamalar [77]

Yığma birimin ve harcın kalitesine bağlı olarak diyogonal çatlaklar düşey ve yatay derzleri izleyerek veya birimleri de keserek kısmen de derzleri izleyerek ilerleyebilirler. Birimleri kesmesi için harcın mukavetinin birim mukavemetine çok yakın veya büyük olması gerektiğini söyleyebiliriz. Duvarlar için yanal yükler için en önemli parametre dayanımları olmasına rağmen şekil değiştirebilme, süneklik ve enerji tüketme kapasiteleri de analizlerde dikkate alınmalıdır. İki kırılma biçimine göre de duvarlar kontrol edilmelidir. Diyogonal kırılma için daha fazla kuvvet gerekebileceğini söyleyebiliriz. Tuğla çeşitlerini yapımlarına ve dayanım değerlerine göre aşağıdaki şekilde inceleyebiliriz:

Harman tuğlaları kil, killi toprak veya balçığın birlikte veya ayrı ayrı olarak kum, su ve kiremit tozu gibi benzeri malzemelerde karıştırılması ile elde edilmektedir. Dolu ve boşluklu olarak üretilmektedir. Basınç dayanımları orta ve az dayanımlı olarak sınıflandırılabilir. Dolu ve boşluklu harman tuğlalarının basınç dayanımları, orta basınç dayanımı için 5 MPa, az basınç dayanımı için ise 3 MPa olarak verilmiştir. Bu değerler dolu ve boşluklu tuğla değerlerinde aynıdır [79]. Dolu oldukları için delikli tuğlalara göre daha fazla ses ve ısı yalıtımı sağlar. Basınç dayanımları için ise Türkiye’de yapılmış olan bir araştırmadaki sonuçlar değerlendirilebilir. 1964-1975 yıllarında o zamanki İmar ve İskan Bakanlığı Yapı Malzemesi Genel Müdürlüğü Laboratuvarlarında 43 değişik seri harman tuğlası üzerinde yapılmış basınç dayanımı deneylerinde ortalama basınç dayanımı 5.40 ± 1.76 MPa; deney yapılan seriler içinde rastlanan en büyük ortalama basınç dayanımı 10.29 MPa, en küçük ortalama basınç dayanımı 2.25 MPa olarak bulunmuştur [80].



Şekil 2.5. Harman Tuğlası

Harman tuğlasının yerini alan fabrika tuğlalarının taşınması ve yapım işçiliği daha az olduğu için bu tuğlalar delikli ve blok olarak üretilmektedir. Harman tuğlası yaklaşık 55 mm x 110 mm x 230 mm boytunda, blok tuğla 85 mm x 190 mm x 380- 400 mm gibi boyutlarda üretilmektedir.

1970'li yıllara kadar Türkiye'de yapılan yığma yapıların duvarlarında dolu harman tuğlası kullanılmıştır. Kullanılırken bu tuğlaların üst ve alt yüzeyi harçla kaplanmaktadır. Bu durum, basınç dayanımı düşük olan harman tuğlasından yapılmış duvarlarda kesme dayanımını önemli ölçüde artırmaktadır [69].

(TS 500 [81]) şartnamesi, fabrika tuğlası ile ilgili bilgiler sunmaktadır. Yapımı harman tuğlasına benzerdir. Basınç dayanımları az delikli, seyrek delikli ve dolu tuğla tiplerine göre (4.4- 18.6) MPa arasında değişebilmektedir [81].

(Bayülke, [82]) çalışmasında çok delikli fabrika tuğlalarında harç-tuğla etkileşimini irdelemiştir. Bu durum tuğla ile harç arasındaki bağı azaltmakla birlikte, çatladıktan sonra

harç-tuğla ve tuğla-tuğla ara yüzeyinde sürtünme ile kesme kuvveti taşınmasını da azaltabilir. Tuğla ya da beton briketlerdeki boşlukların düşük dayanımlı bir harç ile doldurulmuş olmasının kesme dayanımını artırdığı Deprem Araştırma Dairesi Sarsma Tablasında yapılan deneylerde gözlenmiştir [82].

2.2.2 Doğal Taş

En eski yığma malzemesi olduğunu söyleyebiliriz ve her yerde kolaylıkla bulunabilir. Basınç dayanımı yüksek ve çekme dayanımı düşük bir malzemedir. Özellikle basınca çalışan duvarlarda kullanılması uygundur. Elastisite modülü değeri betona eşit ve betondan büyük değerlere sahiptir. Dış etkilerden dolayı bünyesinde bozulmalar meydana gelebilir. Basınç dayanımının çekme dayanımına oranı 11-12 civarında olabilmektedir [8].

Doğal taş, tuğladan yapılmış yığma yapıların temel ve bodrum, dış ve bazen de iç duvarlarında kullanılabilmektedir. Taş duvarlar yaklaşık 500-600 mm kalınlıktadır. Örgü biçimlerinin çok iyi olduğu söylenemez. Ancak kalınlıklarının büyük olmasından dolayı düşey gerilme değerleri düşüktür [69]. Aşağıda Çizelge 2.1’de basınç, çekme, kayma mukavemetine ve elastisite modüllerine göre taş çeşitleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Doğal Yapı Taşlarının Ortalama Fiziksel Özellikleri [8]

Taşın Cinsi	Basınç Dayanımı(MPa)	Kayma Dayanımı(MPa)	Çekme Dayanımı(MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Granit	30-70	14-33	4-7	30000-55000
Mermer	25-65	9-45	1-15	25000-70000
Kireç taşı	18-35	6-20	2-6	10000-55000
Kumtaşı	5-30	2-10	2-4	13000-50000
Kuvars	10-30	3-10	3-4	15000-55000
Serpantin	7-30	2-10	6-11	23000-45000

2.2.3 Kerpiç

(Gürfidan, [83]) çalışmasında kerpicin killi toprağın içine saman ve ya bitkisel lifler gibi katkı maddeleri eklenerek su ile karıştırılması sonucu elde edildiğini anlatmıştır. Malzemenin ana maddesi olan toprak tane büyüklüklerine göre kil, silt ve kumdan oluşmaktadır. Burada kil daha çok bağlayıcılık rolünü üstlenmektedir, kum ise içyapının ana maddesidir [83]. Kerpicin basınç mukavemetinin fazla olduğu söylenemez ama günümüzde de kullanımı yaygındır. Yangına, ısıya dayanıklılığı ve maliyet değerleri de göz önünde bulundurulursa kullanımına

bundan sonra da devam edileceği söylenebilir. Suya karşı dayanıklı bir malzeme değildir. Eğilme, darbe gibi durumlara karşı da dayanıksızdır. Kireç gibi katkı maddesi ve güçlendirilme teknikleri ile dayanıklılığı artırılabilir [83].

2.2.4 Beton Biriketler

Çimento, agrega, su ve katkı maddelerinden oluşturulan malzemedir. Taşıyıcı duvarlarda dolu, taşıyıcı olmayan duvarlarda boşluklu beton briket olarak kullanılabilir [84].

(Barbosa, vd. [85]) kendi ürettikleri beton briket ve harçlardan oluşan yığma numunelerini basınç deneylerinde kullanmışlardır. Dört farklı harç -blok dayanım kombinasyonundan oluşan yığma prizmalarda kırılma biçimlerinin beton briket ve harcın mekanik özellikleri arasındaki farklılıklar tarafından belirlendiğini saptamışlardır. Kırılma, harcın ezilmesi veya düşey çatlaklarla oluşmaktadır. Plastik analiz yöntemlerinin bu prizma davranışını modelleme kullanılabileceğini vurgulamışlardır. Kısaca blok/harc basınç dayanımı değerleri arasındaki oranın kırılma davranışını belirlediğini vurgulamışlardır. Şekil 2.6'da beton briket örneği verilmektedir.



Şekil 2.6 Beton Briket

Yığmada yapılacak bünyesel modelleme ve analizlerin ilk ve en önemli aşaması yığma ve bileşenleri için gerçekçi ve kabul edilebilir elastisite modülü değerleri kullanmak olacaktır. Yığma duvarlarda tuğla, harç ve yığmanın elastisite modülü ile ilgili literatürde birçok bilgiler sunulmuştur ve bunlardan bazıları aşağıda irdelenmiştir. (Köksal, vd. [86]) çalışmalarında yığmanın en temel özelliğinin basınç dayanımı olduğunu ve diğer parametrelerin basınç dayanımının bir fonksiyonu olarak ifade edilebileceğini belirtmişlerdir. Yığmanın basınç dayanımı ise

- yığma biriminin dayanımına,
- birimin geometrisine,
- kullanılan harç dayanım ve özellikleri ile
- örülme biçimine

bağlı olduğu dikkate alındığında literatürde de basınç dayanımı ölçülmesi için üzerinde anlaşılabilmiş bir standart bulunmadığı görülebilir. Genel olarak, 2 (iki) ile 7 (yedi) birimin üst üste konularak kırılması ile özellikle beton briketler için dayanım değerleri ölçülmektedir. Araştırmacıların en çok kullandıkları deney numunelerinde ise 3 (üç) ile 5 (beş) birim düz/bindirmesiz olarak örülerek test edilmektedir. Bunun başlıca nedeni bu sayıdaki briketlerde basınç dayanımının yaklaşık olarak sabit kalmasıdır. Derz sayısının artmasının basınç dayanımına olan etkisi ise bazı düzeltme katsayıları kullanılarak dikkate alınmaktadır. Köksal, vd. çalışmalarında [87, 88] verilen tabloları irdemişlerdir. Briketin en küçük yatay boyutunun yüksekliğe oranı 0,6 olan ve en küçük yatay boyutun yüksekliğe oranının 2 ile 4 arasında değişen boşluklu beton briket bloklardan yapılmış prizmaların basınç dayanımlarını irdemişlerdir. Beton briket basınç değerleri 2,8 ile 35 MPa değerinden daha büyük durumlarda seçilen 4 tip harç sınıfına göre yığma prizma basınç dayanımları tabloda verilmektedir [86].

Prizma ve yığma duvarlar yığma birimler ve harç malzemelerinden oluşmakta ve bunların mekanik özellikleri birbirinden farklı değerlere sahiptir. Dolayısı ile yığma prizmanın veya duvarın elastisite modülü ve basınç dayanımı gibi değerlerinin ölçülmesindeki belirsizliklerden dolayı yığma birim veya beton briket blokların basınç dayanım değerlerinin ölçülmesi ve elastisite modülünün elde edilmesi yığma duvar ve prizmada daha belirleyici olacaktır. Boşluklu beton briketlerde ve boşluklu tuğla bloklarda net kesit alanı kullanılması ile basınç mukavemeti bulunmaktadır [86].

2.2.5. Yığma Birimlerinin Basınç Dayanımları

Köksal, vd. [48] tarafından yapılan araştırmalar ve deneysel çalışmalarda beton briketten oluşan yığma prizmaların basınç dayanımlarını bulmak için aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir:

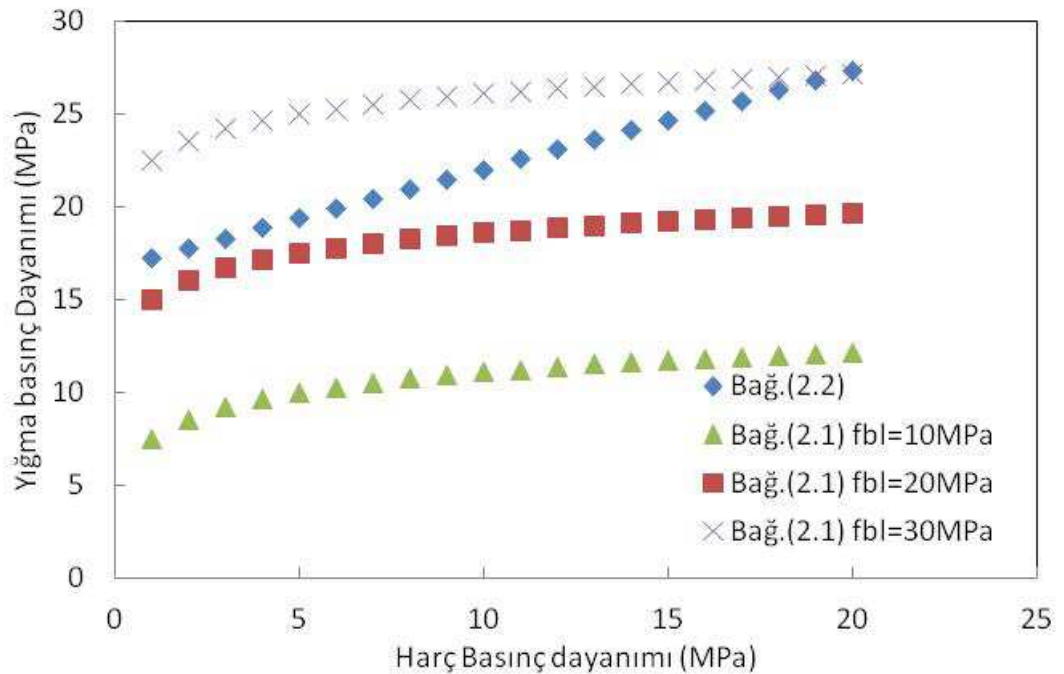
$$f'_m = 1.57 \ln(f_{mr}) + 0.75f_{bl} \quad (2.1)$$

Bu bağıntıdaki f_{bl} tuğla birimin basınç dayanımını, f_{mr} harcın basınç dayanımını ve f'_m ise yığma basınç dayanımını belirtmektedir.

(Wisnumirti ve MD, [57]) yaptıkları çalışmada, yığma basınç dayanımında, duvarlarda harç basınç dayanımının çok az beliryeci olduğunu ileri sürerek yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki bağıntıyı geliştirmişlerdir [57]:

$$f'_m = 16.736 + 0.053f_{mr} \quad (2.2)$$

Harç basınç dayanımının yığma basınç dayanımını üzerinde etkisinin çok küçük olduğunu savunmuşlardır. Her iki bağıntı aşağıdaki Şekil 2,7'de karşılaştırılsa özellikle birim dayanımı 20 MPa olduğu zaman bağıntıların yaklaşık olarak aynı sonuçları verdikleri görülmektedir. Bunun nedeni (Wisnumirti, vd. [57]) tarafından öne sürülen bağıntılarda kullanılan birim dayanımlarının 20 MPa ve üzerinde olmasından kaynaklandığı anlaşılmaktadır.



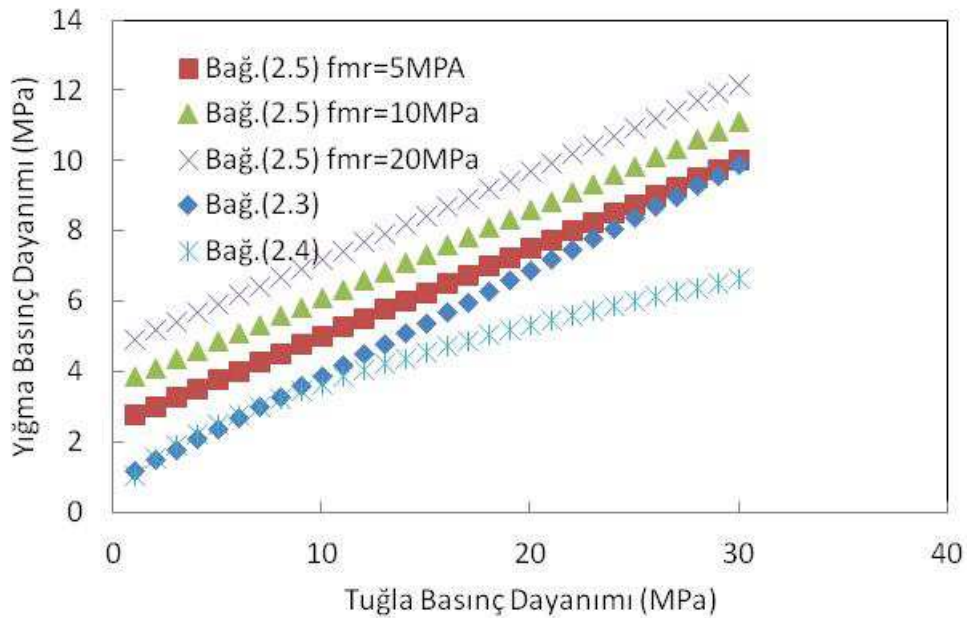
Şekil 2.7 Harç Basınç Dayanımını Yığma Basınç Dayanımı Üzerinde Etkisi

Bir diğ er araştırmacı (Bennett, vd. [59]) yaptıkları çalışmada ise tuğla birimlerin basınç dayanımının yığma basınç ayanımı üzerindeki etkisini araştırarak, deney sonuçlarından istatistiksel olarak iki bağıntı üretmişlerdir. Bu bağıntılar aşağıda denklem (2.3) ve (2.4)'te verilmiştir [59].

$$f'_m = 0.9 + 0.3f_{bl} \text{ (MPa)} \quad (2.3)$$

$$f'_m = 1.06(f_{bl})^{0.54} \text{ (MPa)} \quad (2.4)$$

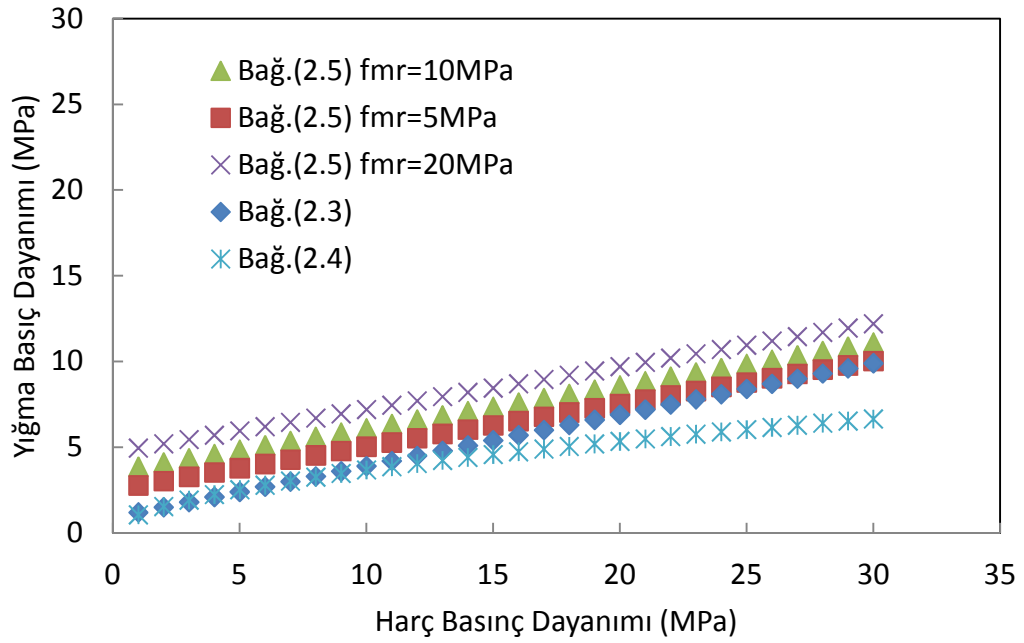
Araştırmacılar bu bağıntılarıyla, bir önceki çalışmanın tersi yönde yığmanın basınç dayanımının yığma biriminden etkilendiğini ve harcın etkisinin ihmal edilebileceğini göstermektedirler.



şekil 2.8 Tuğla Basınç Dayanımının Yığma Basınç Dayanımı  zerinde Etkisi

şekil 2.8'den g r leceğı üzere bağıntı (2.1) farklı harç tipleri için bir birne çok yakın doğrusal bir eğıri vermektedir. Bu ise Bennet, vd. tarafından verilen bağıntıda harcın dikkate alınmaması düşüncesinin doğruluğı önemli oranda desteklemektedir. Ancak iki tahmin arasındaki büyük fark, Köksal, vd. tarafından öne sürülen bağıntıdaki blok katkısını ifade eden 0,75 katsayısının azaltılabileceğini göstermektedir. Bağıntı (2.1)'in beton briket prizmalar için öne s r ld ğı de düşünülürse Bennett, vd. sadece dolu tuğla için önerdikleri bağıntıya yaklaşacak tarzda yeniden düzenlenmesi mümkündür:

$$f'_m = 1.57 \ln(f_{mr}) + 0.25f_{bl} \quad (2.5)$$



Şekil 2.9. Harç Basınç Dayanımının Yığma Basınç Dayanımı Üzerinde Etkisi

Bağıntı (2.5), (Bennett, vd. [59])’un harcın etkisini dikkate almayan bağıntılarında üstün olduğunu söylemek mümkündür. Yeni bağıntıda 0,30 katsayısının kullanılması da mümkündür. Ancak, Kaushik vd (2007) çalışmasında dikkate alınan deneysel sonuçlar farklı bir duruma işaret etmektedir. Bu farklılık yığma prizma ile yığma duvar için alınacak basınç dayanımı değerlerinin birbirine karışmasından kaynaklanmaktadır. Bağıntı (2.1) üst üste konulmuş üç adet beton briketten elde edilen basınç dayanımı değerlerini ifade etmektedir. Tıpkı beton silindirlerin kırılması ile bulunan karakteristik basınç dayanımı olarak düşünülmelidir. Ancak bu daha büyük boyutlardaki deneysel elemanlarda stabilite ve boyuta bağlı olarak daha düşük sonuçlar verecektir. Bu nedenle Bağıntı (2.1) bu duruma uygun olarak değiştirilerek Bağıntı (2.5) elde edilmiştir.

(MSJC [62]) şartnamesi olarak çalışmanın literatür araştırması kısmında da irdelenen yığma yapılarla ilgili şartname ise (2.6) daki adı geçen çalışmaları tuğla basınç dayanımının yığma basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırılmıştır ve denklem (2.6)'da verilmiştir.

$$f'_m = A(400 + Bf_{bl}) \text{ (psi)} \quad (2.6)$$

Burada A katsayısının yığma yapılar için 1 alınabileceğini, B katsayısının ise 0,20 ile 0,25 arasında değişebileceği belirtilmiştir. Kaushik, vd. [58] çalışmalarında tuğla ve harcın basınç dayanımlarını yığma basınç dayanımları üzerindeki etkisini de araştırmışlar ve Eurocode 6 (CEN 1996) [86] genel deneklemi (2.7) bağıntısında verilmektedir.

$$f'_m = K f_{bl}^\alpha f_{mr}^\beta \quad (2.7)$$

Burada K , α ve β değerlerinin sabit değerler olduğunu, K 'nın 0,40-0,60 arasında değişebileceğini, $\alpha = 0,65$ ve $\beta = 0,25$ alınabileceği belirtilmektedir [89].

Dayaratnam (1987) [90] çalışmasında K değerinin 0,275, $\alpha = 0,50$ ve $\beta = 0,50$ alınabileceği vurgulayarak deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir.

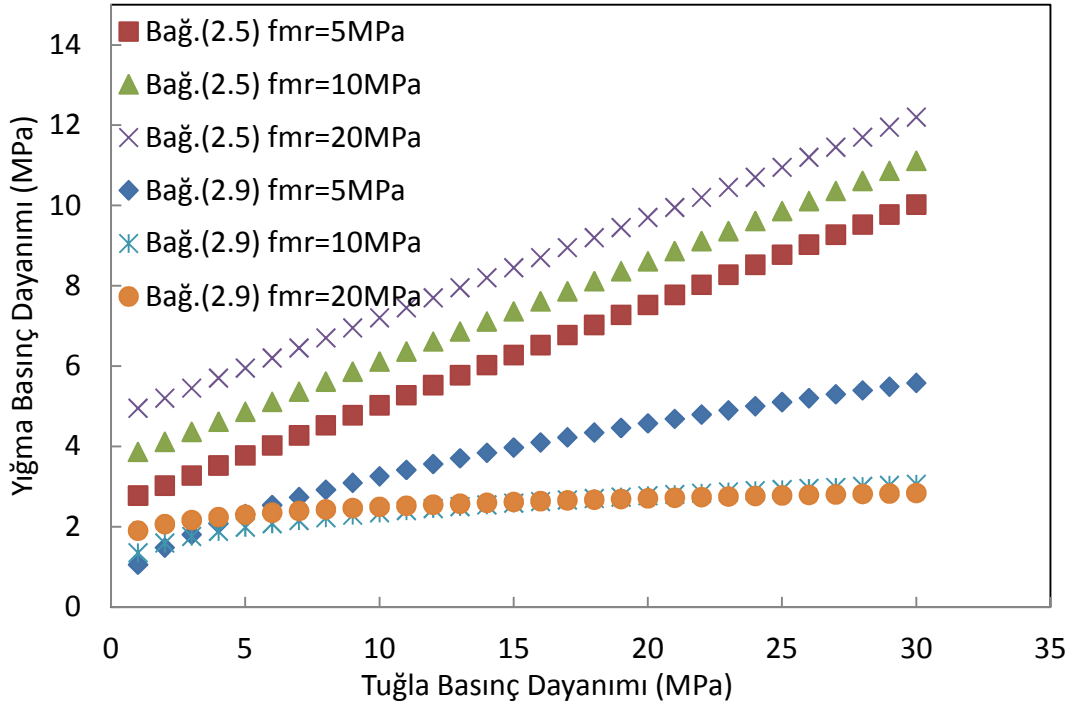
$$f'_m = 0,275 f_{bl}^{0.5} f_{mr}^{0.5} \quad (2.8)$$

(Kaushik, vd. [58]) çalışmasında [89] ve [90] çalışmalarını irdeleyerek ve kendi gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalardan elde ettikleri sonuçları nümerik bağıntıya dönüştürürken (2.7)'de verilen genel bağıntıyı aşağıdaki şekle dönüştürmüşlerdir.

$$f'_m = 0.63 f_{bl}^{0.49} f_{mr}^{0.32} \quad (2.9)$$

(2.9) bağıntısını (2.7) ve (2.8) bağıntıları ile karşılaştırıldığında, K katsayısını çok küçük de olsa artırdığını, [89] önerdiği bağıntıda (2.7) bağıntısındaki β değerini 0,25'den 0,32'ye çıkararak harcın etkisini artırdığını söyleyebiliriz.

(2.1) ve (2.9) bağıntılarının karşılaştırılması olarak Şekil 2.10'da incelenmiştir. Harç basınç dayanımının 5, 10 ve 20 MPa değerleri için her iki bağıntıda tuğla basınç dayanımının yığma basınç dayanımı üzerinde etkisi karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 2.10. Tuğla Basınç Dayanımının Yığma basınç Dayanımı Üzerinde Etkisi

(2.1) bağıntısı beton briketlerden yapılmış yığma prizmaların basınç dayanımını irdelemekte ve briket ve harcın katkısını göstermektedir. Betondan üretilen briketin katkısı $0.75f_{bl}$ kadardır.

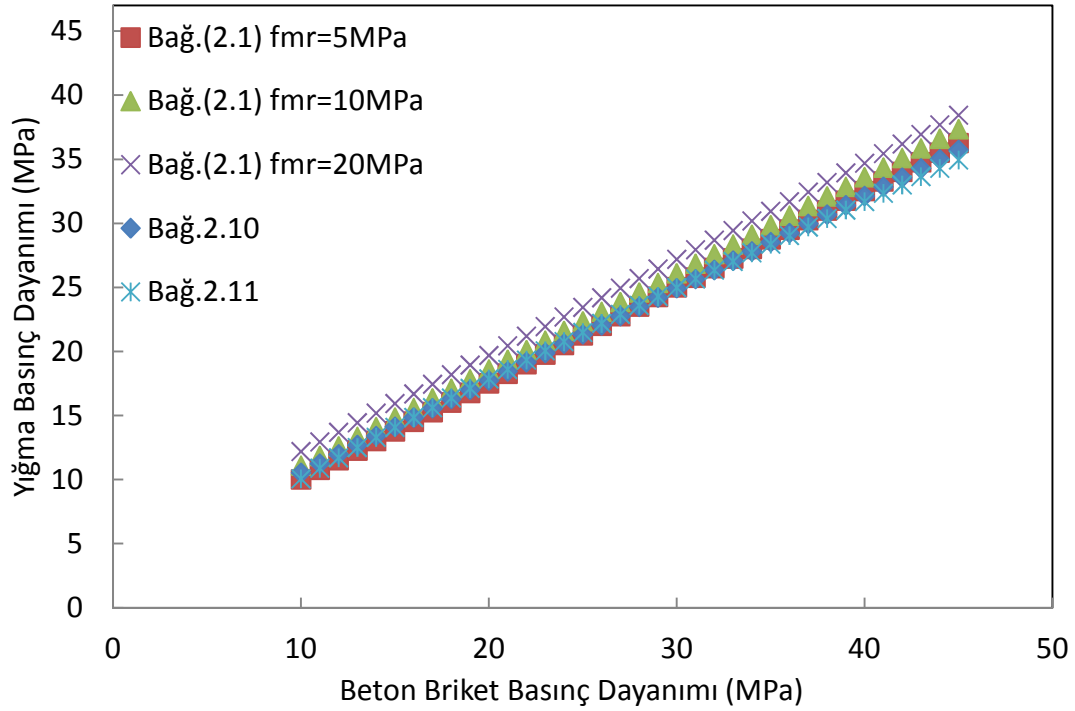
(Barbosa, ve Hanai, [91]) gerçekleştirdikleri çalışmada içi dolu silindir şeklinde ve boşluklu küp şekilli beton briketleri ve bunlardan üretilen yığma beton prizmaları test etmişlerdir. Boşluklu beton briketlerin basınç dayanım aralıkları 14 MPa değerinden başlayarak üst değerlere doğru çıkmaktadır. DeneySEL testler sonucunda yığma beton prizmanın basınç dayanımının beton briket blok basınç dayanımına bağlı olduğunu savunarak bağıntılar üretmişlerdir. Basınç dayanımları için geliştirdikleri bağıntılarda (14-45) MPa arasında briket basınç dayanımlarını kullandıklarını belirtmişlerdir. Barbosa, ve Hanai, (2.10 ve 2.11) ve Köksal, vd. (2.1) bağıntısını geliştirdikleri çalışma da beton briket basınç dayanımından beton prizma basınç dayanımını tahmin etmeye yöneliktir.

(Barbosa, ve Hanai, [91])'in bağıntıları sırası ile (2.10) ve (2.11)'de verilmektedir [91].

$$f'_m = 0.72f_{bl} + 3.34 \quad (2.10)$$

$$f'_m = 1.5f_{bl}^{0.8271} \quad (2.11)$$

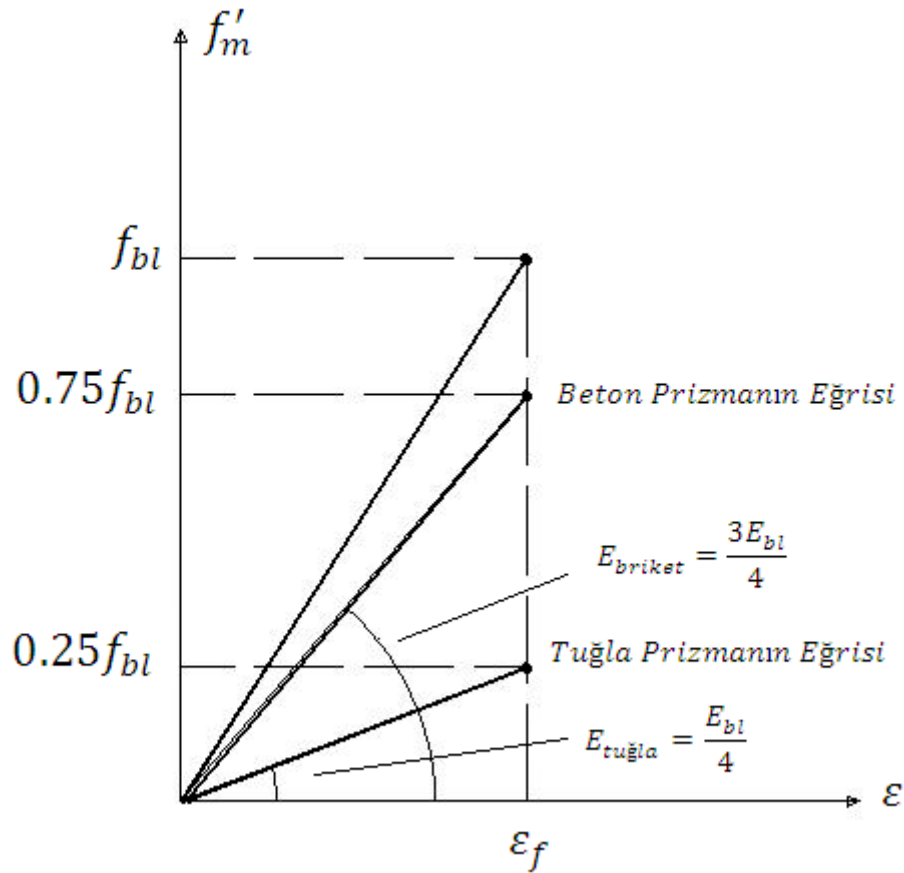
(Barbosa, ve Hanai, [91]) çalışmasında (14-45) MPa basınç dayanımına sahip briketleri test ettikleri için karşılaştırma amacı ile (2.1) bağıntısında da (14-45) MPa aralığına dikkat edilmiştir. Karşılaştırılmalı grafikler Şekil 2.11’de gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Beton Briket Basınç Dayanımının Yığma Basınç Dayanımına Etkisi

Denklem (2.1)’de geliştirilen bağıntı, tuğla ve harç basınç dayanımlarının yığma basınç dayanımı üzerinde etkisini ifade etmektedir [48]. (Bennett, vd. [59]), çalışmalarında ise tuğla birimlere bağlı basınç dayanımların yığma basınç dayanımı üzerinde etkisini incelemişlerdir. (Bennett, vd. [59]), (Köksal, vd. [48]) ve (Kaushik, vd. [58]) çalışmalarının tuğla-yığma basınç dayanımları arasındaki ilişki aşağıda grafik üzerinde karşılaştırılmıştır. Bağıntı (2.1) ile (2.5) sırası ile beton briket ve tuğla birimlerden üretilmiş blokların basınç dayanımlarının yığma basınç dayanımı üzerinde etkisini irdelemektedir. Bu bağıntılardaki basınç dayanımlarının ve bunlara bağlı elastisite modüllerine ait grafikler aşağıda Şekil 2.12’de verilmiştir. Beton briketlerden üretilmiş birimlerin yığma basınç dayanımı üzerinde etkisi 0.75 kadar olurken, kil/tuğla birimlerden üretilen birimlerin etkisi 0.25-0.30 kadar olabilmektedir. Elastisite modülünün basınç dayanıma bağlı olan ilişkisi ile ilgili denklemler bu bölümde irdelenmiştir ve bağıntı (2.16)’da verilmiştir.

Şekil (2.12)'de beton briketlerden ve tuğladan üretilmiş yığma prizmaların basınç etkisinde test edilirken yığmaya olan katkıları açıklanmaya çalışılmıştır. Literatürde de betondan üretilen briketlerin basınç dayanımı ve elastisite modülleri arasındaki katsayı değerleri 500 ve 1500 kadar aralıklarla ele alınmıştır [86]. Şekil 2.12'de verilen ε_f değeri maksimum şekil değiştirmenin olduğu değerdir.

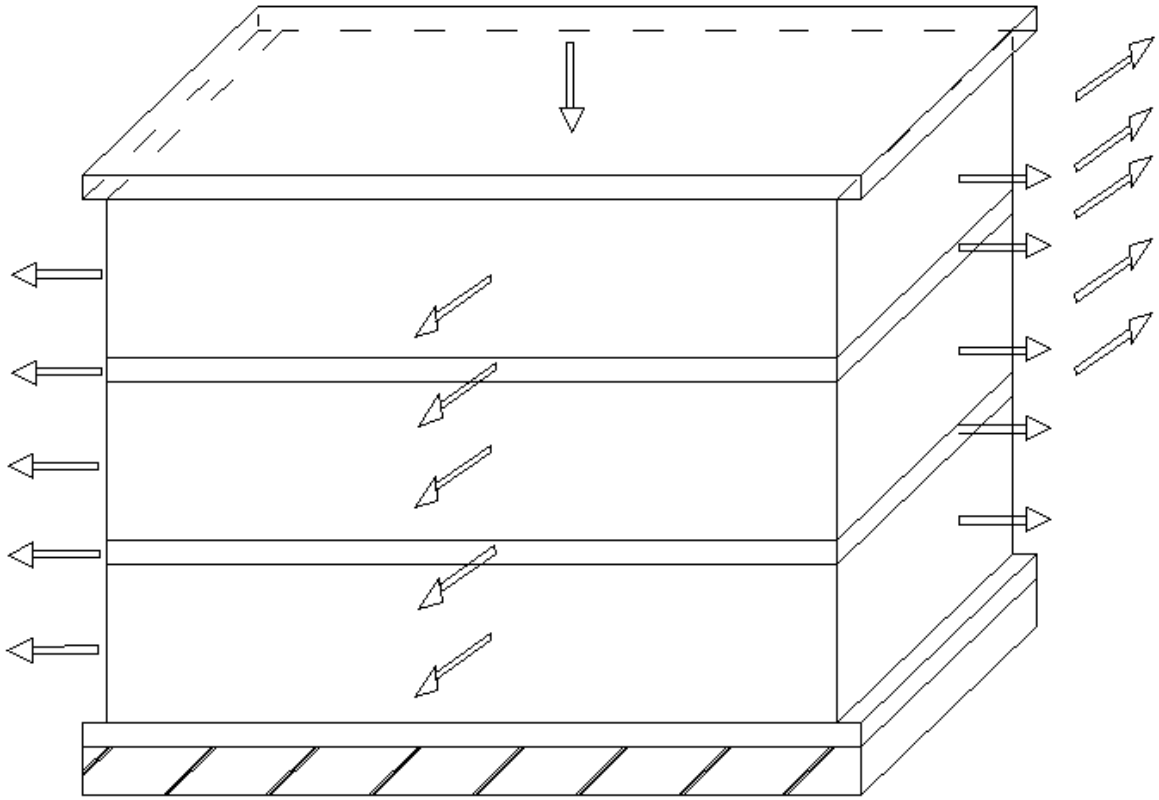


Şekil 2.12 Beton Briket ve Tuğla Blokların Yığma Duvar Üzerinde Etkisi

Betondan üretilen briket ve tuğladan yapılmış blokların ayrı ayrı basıç altında test edilirken elde edilecek elastisite modülleri değerleri yığma prizma elastisite modülü değerinden genellikle yüksek olabilmektedir. Prizma ve duvarlarda harç kullanımı ile yığma prizma ve duvarlarda yığmaya ait elastise modülü değerinde azalma olacaktır. Bunun nedeni beton briket ve tuğla birimlerle kıyaslamada küçük basınç dayanımına sahip harcın etkisinin olduğu söylenebilir. Bu durum özellikle güçlü blok (beton briket ve ya tuğla) ve zayıf harç kullanımında daha yaygındır. Genellikle güçlü blok ve zayıf harç kullanımı daha yaygın tercih edilmektedir. Yığma prizma ve ya duvarlar basınç etkisinde test edilirken eksenel basınç kuvveti blok ve harç birimlerde düşey doğrultuda basınç, yanal doğrultularda çekme

gerilmeleri oluşturacaktır. Daha dūřuk basınç dayanımına sahip harç ezilme ve tuğladan daha fazla yanal şekildeğiştirmeler oluşturacaktır ve bu durum tuğlada kesme kırılmalarına da sebep olacaktır. Basınç etkisinde oluşan yanal ekmelerin blok ve harç birimler üzerinde gösterimi şematik olarak şekil 2.13’de verilmiştir. Bu yükleme durumunda beton briketlerden üretilmiş blokların yığma basıncına katkısı 0.75’lerde olurken tuğla bloklarda bu durumu 0.25’lere dūřmektedir. Kısaca olarak yığma elastisite modülünün yığma basınç dayanımına bağlı katsayısı 1000 ise, beton briketlerin elastisite modülünün beton briket basınç dayanımına bağlı katsayısı 750, tuğla blokların elastisite modülünün tuğla birimlerin basınç dayanımına bağlı katsayısı (300-700) kadardır. Eęer prizma ve duvardaki blokların kırılma anında tek eksenli basınç deneyindeki en büyük birim kısalmaya (ϵ_f) ulaştıkları varsayılırsa (şekil 2.12) blokların elastisite modüllerinin tuğla birimlerde alt sınır olarak 250-300 ve beton briketlerde ise 500 gibi bir katsayı alınabilir.

Bu tez çalışmasında bünyesel modellemelerde bu alt sınırın değerleri özellikle incelenerek kullanılmıştır. Özellikle birim ve harç arasındaki mukavemet farkının büyük olduğu durumlarda bu değerler tercih edilmiştir. Dikkat edilmesi gereken nokta, analizlerde kullanılan değerlerin birimlerde kullanılan beton veya tuğlanın gerçek tek eksenli basınç yüklemesine ait elastisite modülü değerleri olmadığıdır. Dolayısı ile analizlerde blok/birim için kullanılan elastisite modülleri blok/birim değerleri ile birim harç etkileşimini de yansıtacak şekilde dūřnlen değerlerdir.



Şekil 2.13 Prizmada Eksenel Yük Etkisinde Harç Birimlerinde Çekme Oluşumu

Yığma davranışı doğrusal elastik olduğu varsayılırsa, bağıntı (2.1), beton briket prizmanın, bağıntı (2.3) ve (2.4) ise tuğladan yapılmış yığmanın basınç dayanımını irdelemek için kullanılan bağıntılardır. Bu tezde daha ağırlıklı tuğla birimlerden üretilen yığma duvarlar modelleneceği için bağıntı (2.1) bağıntı (2.5)'deki verildiği gibi düzenlenmiştir ve bu tez çalışmasında (2.5) bağıntısı kullanılacaktır. Bağıntılardan görüleceği üzere beton briketlerden üretilen yığma duvarlarda briket basınç dayanım katkısı $0.75f_{bl}$ kadar, tuğla/blok birimlerden üretilen yığma duvarlarda ise tuğla/blok basınç dayanım katkısı $0.25f_{bl}$ ile $0.30f_{bl}$ olduğunu saptamak mümkündür. Blokların birimlerin arasında bulunan harcın yaratacağı blok kesitindeki iki eksenli çekme etkisi (Şekil 2.13) ile yığmanın basınç dayanımına yaptıkları katkı bağlantılardaki katsayılar oranında düşünülebilir.

Yığma yapıların basınç dayanımı duvar malzemesi olan pişmiş toprak ya beton blokların basınç dayanımı ile bu blokları birbirine bağlayan harçların basınç dayanımlarına bağlıdır. Bunlarla birlikte harç derz kalınlığı ve düşey delikli taşıyıcı tuğlalardaki boşluk oranının artması da kesme/basınç dayanım değerlerini düşürebilmektedir. Genellikle duvar basınç dayanımı düşük basınç dayanımlı bloklarda blok basınç dayanımının % 50'si, yüksek

dayanımlı bloklarda % 25 'i kadardır [69]. Harç basınç dayanımının tuğla birimlerin basınç dayanımından yüksek olması, yığma duvar basınç dayanımını çok az artırmaktadır. Aynı harç dayanımının yanında yüksek basınç dayanımına sahip tuğla kullanılması duvar basınç dayanımını önemli oranda artırmaktadır. Standartlar ve şartnamelerde taşıyıcı tuğlalardaki düşey delik oranı % 35 ve daha az olma şartı vardır. Ancak üretilen ve kullanılan kullanılan tuğlaların delik oranları ortalama % 45 civarındadır. Delik oranının % 60 kadar olan tuğlalarda kullanılmaktadır. Delik oranının artması, düşey yük taşıyan duvar alanını düşürerek, duvar dayanımını azaltmaktadır. Tuğladaki delikler arasındaki et kalınlığının küçük olması, delik biçimleri ve yerleri de tuğla ve dolayısı ile yığma duvar dayanımını azaltmaktadır [69].

2.2.6 Kayma Dayanımı

Yığma yapılarda deprem yükleri duvarlarda kesme/kayma gerilmeleri oluşturur. Tuğladan üretilmiş yığma yapının deprem dayanımı büyük ölçüde duvarlarının kesme kuvveti taşıma gücü değerine bağlıdır. Duvar kayma dayanımı tuğla ile harç arasındaki aderans, tuğla-harç ve tuğla-tuğla arasındaki sürtünmelere bağlı olabilmektedir [69]. Duvar çatlama dayanımı farklı malzemeler için aşağıda çizelgede verilmektedir. Bu çizelge 2007 Deprem Yönetmeliğinden alınmıştır (DBYBHY [83]). Genel olarak yüksek dayanımlı harcın kesme dayanımını artırdığı söylenebilir. Düşey delikli tuğlada boşluk oranının azalması da duvar kesme dayanımını artırmaktadır [69]. (DBYBHY [83]) duvarlarda kayama dayanımı ile ilgili bilgiler vermiştir.

Çizelge 2.2 Duvarlarda Kayma Dayanımı [83]

Duvar Cinsi	Kayma veya Çatlama Dayanımı (τ)
Düşey Delikli Blok Tuğla Delik Oranı <%35 Çimento Kireç Harçlı	(0.24 MPa)
Düşey Delikli Blok Tuğla Delik Oranı >%35 Çimento Kireç Harçlı	(0.12 MPa)
Dolu Blok Tuğla Harman Tuğlası Çimento Kireç Harçlı	(0.147 MPa)
Taş Duvar Çimentolu Kireç Harçlı	(0.098 MPa)
Gaz Beton Özel Harçlı	(0.147 MPa)
Dolu Beton Briket Çimentolu Kireç Harçlı	(0.19 MPa)

2.3 Harcın Yığma Davranışı Üzerinde Etkisi

Harcın malzeme özellikleri yığmanın yapısal performansını önemli oranda etkilemektedir. Bu açıdan bakıldığında harcın oluşturacağı aderansın yığmanın basınç dayanımından daha

önemli olduğu belirtilmelidir. Gene harcın işlenebilirliği de son derece önemlidir. Farklı harç içeriklerinin yığmada istenilen davranışı elde etmek için önceden belirlenmesi gerekmektedir. Sertleşmiş harcın yapıdaki işlevi, yığma birimleri arasında oluşacak basınç, çekme ve kesme gerilmelerini iletmeektir. Harcın bu işlevi yerine getirmesini sağlayan bağlayıcılık özeliğidir. Çekme kuvveti, harç üzerinden birimleri bir birimden ayırmak için bağ dayanımı olarak tanımlanabilir. Bu konuda en önemli belirleyici etken harçta kullanılan çimento miktarıdır, çimento miktarı fazlaştıkça bağ dayanımı artar. Artan boşluk miktarı da birim yüzeyi ile olan bağı azaltır. Harcın basınç dayanımının yönetmeliklerde ön planda bulunmasının en önemli nedeni göreceli olarak diğere malzeme parametrelerine göre ölçülmesinin kolay olmasıdır. Özellikle birimlerin mukavemeti aşmayacak şekilde bir harç seçilmesi gereklidir.

Yığma duvarlarda çimentolu kireç harcı kullanımı yaygındır. Kireç, harcın sertleşmesini ve su kaybını yavaşlatmakta, çimento ise harcın dayanımı artırmaktadır. Duvarların örülmesi hızlı bir iş olmadığı için harçtaki yavaş sertleşme de bu durumla uyum içerisindedir. Genellikle 1:3:6-7 oranlarında çimento, kireç ve kum karışımı kullanılmakta ve bu harcın basınç dayanımı da 2.45-2.94 MPa kadar olmaktadır. Harcın en büyük eksik yanı iyi pişmemiş tuğlanın harcın suyunu emerek yeterince sertleşmesi ve dayanım kazanmasının önlenmesidir. İyi pişmemiş tuğlalar kullanıldığı zaman, yeterli harç dayanımı sağlanamayabilir [69].

(Coşgun, vd. [84]) çalışmasında çok fazla çimento kullanmak harcın şekil değıştirme yeteneğini azaltarak rijit davranış göstermesine ve bu nedenle harç birleşimlerinde gerilme yığılmaları oluşmasına neden olduğu bilgisini sunmuştur. Basınç dayanımını etkileyen diğere faktörler kum tane büyüklükleri, içerisindeki hava ve su miktarıdır. Kum, boşluk ve su miktarının artması dayanımın düşmesine neden olacaktır. Her ne kadar harcın dayanımının, yığmanın basınç mukavemeti üzerine olan etkisi birimlerin etkisinin yanında düşük kalsa da yatay yükler altında oluşacak şekil değıştirmelerde, harç rijitliğinin önemli etkisi olacaktır. Rijit bir harç kullanıldığı zaman, harç birleşimlerindeki gerilmeler artacak ve yığma genelinde çatlamlar oluşacaktır [84].

(Barbosa, vd. [85]) tarafından yapılan çalışmada düşük dayanımlı harçların daha sünek duvar davranışına neden olmasını anlatmışlardır. Harç üzerinde de artan yanal kuşatma etkisinde de normal kuvvet doğrultusundaki şekil değıştirmeleri arttırdığı gözlemlenmiştir. Taşıma

gücü temel alındığında basınç dayanımı ile yanal kuşatma etkisi arasında doğrusal bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir [85]. LP ile kuşatılmış harcın plastik özelliklerinin artacağı rahatlıkla söylenebilir. Zayıf harçlar için artan yanal kuşatmayla elastisite modülünde bir azalma gözlemlenmiştir [92]. Kuvvetli harç durumunda ise bu durumun tam tersi söz konusudur [93]. Zayıf harçların gözenekli yapısı yanal gerilmeler altında çatlak oluşumu kolaylaştırma ve bu durum rijitlik azalmasına neden olmaktadır. Bu durumda da harç kaynaklı şekil değiştirmeler artacaktır. Kireç kökenli harçlar şekil değiştirebilir ve elastik özellik gösterirler ve birimlerle aralarında aderansı sağlayarak yanal gerilmeler altında yığmanın sünek davranış göstermesine neden olurlar [90]. (Verhelst, vd. [94]) daha fazla su bulunduran yüksek dayanımlı harçların yatay yükler altında duvar davranışını belirlemekte olduğunu savunmuşlar, harç mukavemetinin artması ile yığma birimin duvar davranışı üzerinde daha etkil olacağını belirtmişlerdir. Harcın basınç dayanımının birim basınç dayanımından küçük olduğu durumda yanal yükler altında yığmanın davranışını harç belirlemektedir. Harcın davranışı birime yaklaştıkça yığma davranışı üzerinde birim daha belirleyici olmaktadır.

Bu çalışmada seçilen yöntemin elasto-plastik modelleme olmasının da başlıca çıkış noktası, harcın bu belirleyici özelliğinin LP sargı etkisiyle artan bir plastik davranışa neden olacağı düşüncesidir. Bu aşamada malzemelerin davranışlarını modellemede kullanılan başlıca akma/kırılma kriterlerini incelemek gereklidir.

2.4 Yığmanın Elastisite Modülü

Doğal olarak, modellemenin ilk ve en önemli aşaması yığma için gerçekçi ve kabul edilebilir bir elastisite modülü değeri kullanmak olacaktır. Yığma duvarlarda tuğla, harç ve yığmanın elastisite modülü ile ilgili literatürde birçok bilgiler sunulmuştur ve bunlardan bazıları aşağıda irdelenmiştir. (Kaushik, vd. [58]) deneysel çalışmalarında tuğla, harç ve yığmanın elastisite modülünün adı geçen malzemelerin basınç dayanımına bağlı olduğunu ifade ederek aşağıdaki bağıntıları sunmuşlardır. Dört tip tuğla ve üç tip harçla çalışarak, yığma basınç dayanımı için 84 blok, tuğla elastisite modülü için 40 tuğla, harç elastisite modülünün belirlenmesinde ise 27 harç deney numunesini test etmişlerdir.

Yığma için alt ve üst sınırın 250-1100 değerleri arasında oluştuğunu belirterek, yığmanın elastisite modülünün basınç dayanımının ortalama olarak 550 katı olabileceğini belirtmişlerdir [58]:

$$E_m \approx 550f'_m \quad (2.12)$$

Tuğla birimler için yaptıkları deneylerde elastisite modülünün tuğla basınç dayanımının 150-500 katları arasında değişebileceğini elde ederek ortalama olarak 300 katı üzerinde yoğunlaşmışlardır [58]:

$$E_{bl} \approx 300f_{bl} \quad (2.13)$$

Harç birimler için yaptıkları deneylerde elastisite modülünün harç basınç dayanımının 100-400 katları arasında değişebileceğini elde ederek ortalama olarak 200 katı üzerinde yoğunlaşmışlardır [58]:

$$E_{mr} \approx 200f_{mr} \quad (2.14)$$

(Haider,[96]) çalışmasında yığmanın elastisite modülünün aşağıdaki formülasyonla belirlenebileceğini savunmuştur:

$$E_m \approx X f'_m \quad (2.15)$$

Burada, X değerinin 500 ile 1000 arasında değişebileceğini savunmuşlardır. (AS3700 [97]) şartnamesi ise tuğla birimlerin harç dayanımının 30 MPa değerinden büyük olduğu durumlarda bu katsayının 1000 alınabileceğini belirtmişlerdir. (Drysdale ve Gazzola [98]) deneysel çalışmalarında bu değer 1000 alınabileceğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada ise yığma elastisite modülünün tuğla basınç dayanımına bağlı denklemi

$$E_{bl} = (300 \sim 700)f_{bl} \quad (2.16)$$

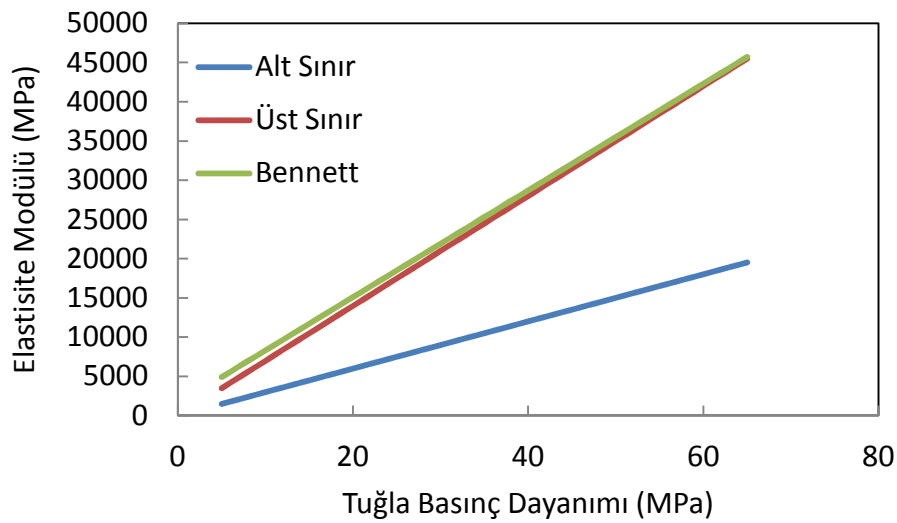
şeklinde. Bu çalışmada, literatürde yer alan farklı deneysel çalışmalara ait veriler dikkate alınarak, yük-yer değiştirme eğrilerinde aynı başlangıç eğimini veren elastisite modülü dikkate alınmıştır. Bazı durumlarda ise deneysel verilerle uyumlu olacak şekilde elastisite modülünün bağıntılarda verilen sınırların dışına çıktığı belirlenmiştir. Benzer şekilde Poisson oranı değeri de 0,15 alınabilir.

Bennett, vd. tuğla basınç dayanımı ile yığma elastisite modülü arasında ilişki olduğunu belirterek aşağıdaki bağıntıyı önermiştir [59].

$$E_{bl} = 0.68f_{bl} + 1.5 \quad (2.17)$$

Elastisite modülü (GPa) cinsinden ifade edilmiştir.

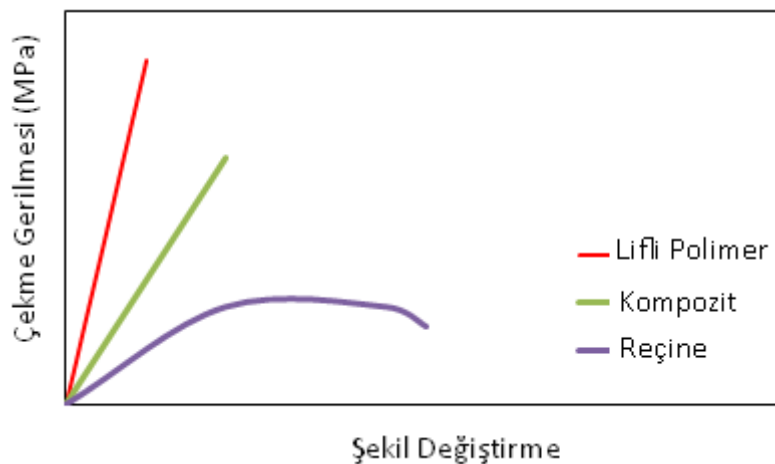
Bu tez çalışmasında kullanılan (2.16) bağıntısı, (2.17) bağıntısı ile karşılaştırılmalı olarak aşağıda Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Elastisite Modülü- Tuğla Basınç Dayanımı ilişkisi

2.5 LP'nin Yapısına Göre Sınıflandırılması

FRP, yüksek dayanıma sahip fiberlerin içine reçinelerin aşılması ile elde edilen kompozit malzemelerdir. Fiber, reçine ve kompozite ait çekme dayanımı ve şekil değiştirme eğrileri aşağıda grafik üzerinde verilmektedir.



Şekil 2.15. Lifli Polimer, Kompozit ve Reçinenin Çekme Gerilmesinin Karşılaştırılması

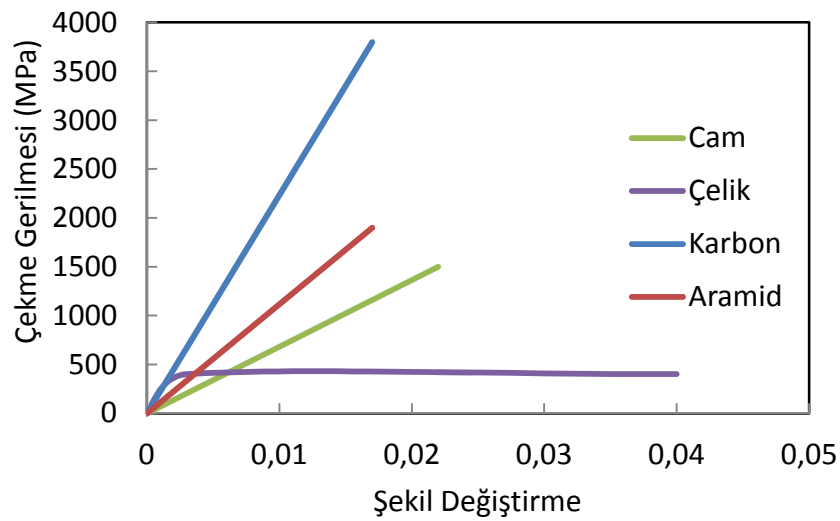
FRP, fiberler doğrultusunda kuvvetli, fiberlere dik doğrultuda ihmal edilebilir değerde çekme dayanımına sahiplerdir. Aynı zamanda çekmede düşük elastisite modülüne ve düşük basınç dayanımına sahiplerdir. Yapımları, çubuk, tendonlar ve dokuma şeklinde üretilebilmektedir. Yapılarda kullanımına göre üç sınıfa ayrılmaktalar:

Karbon Fiberler: Bünyesinde (%93-%95) oranında karbon bulunan organiklerden üretilen fiberlerdir. Maliyeti cam fiberlere (elyaflara) oranla yüksektir. Ancak rijitlik, dayanım, elastisite modülü, çekme gerilmesi, kopma gibi değerlerinin daha büyük olması tercih edilme sebeplerindendir.

Aramidler: İplik ve dokumalar halinde bulunabilmektedir. Karbon ve cam fiberlerle kıyaslamada orta büyüklüklerde elastisite modülü değerine ve düşük yoğunluklara sahiptirler. Elektrik ve ısı iletkenlik özelliklerine sahiptirler. Yağ, yakıt ve organik çözeltilere karşı dayanıklıdır.

Cam Fiberler: İnorganik ürünlerin eritilip kristalleşmeden soğutulması ile elde edilebilmektedir. Maliyeti ve dayanım değerleri göz önünde bulundurulduğunda çoğu inşaat mühendisliği uygulama alanlarında ilk sırada tercih edilebildiğini söyleyebiliriz.

Karbon, Aramid, Cam ve Çelik malzemelerinin çekme gerilmesi ve şekil değiştirme değerlerinin karşılaştırılması aşağıdaki Şekil 2.14'te, cam elyafın şerit halinde gösterimi ise Şekil 2.15'te verilmektedir [95].



Şekil 2.16. Cam, Aramid, Karbon ve Çelik Malzemelerin Karşılaştırılması [96]



Şekil 2.17 Şerit Halinde Cam Elyaf [97]

GÜÇLENDİRİLMİŞ YIĞMA DUVARLARIN ELASTO- PLASTİK ANALİZİ İÇİN AKMA/KIRILMA KRİTERLERİ**3.1 Akma/Kırılma Kriterleri**

Akma yüzeyini (Chen,[99]) çalışmasında, matematiksel fonksiyonların asal gerilmeler uzayında belirlemiş olduğu üç boyutlu bir yüzey olarak tanımlamıştır. Akma kriteri ise gerilmelere ve malzeme parametrelerine bağlı olarak belirlenen bir matematiksel ifadedir. Yükleme fonksiyonu olarak da anılan bu fonksiyon sayesinde mevcut gerilme durumunun elastik ya da plastik safhada olup olmadığına karar verilmektedir. Eğer fonksiyonun değeri sıfırdan küçükse gerilme durumu elastik, diğer durumlarda ise plastik aşamadır. Bu durum şematik olarak Şekil 3.1’de verilmektedir. En genel ifadeyle akmanın başladığı gerilme durumuna karşılık gelen akma kriter/fonksiyonu:

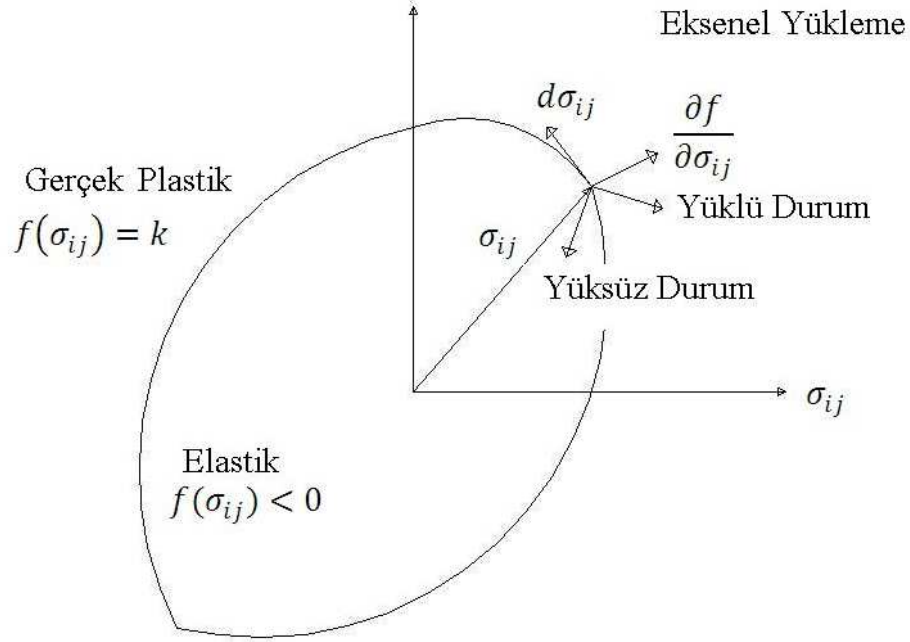
$$f(\sigma_{ij}) = f_i \quad (3.1)$$

biçimindedir. Buradaki f_i değeri ideal bir plastik malzeme için bir malzeme sabiti olarak düşünülürken, pekleşmeli bir malzeme için ise bu değer değişkendir ve farklı yük seviyelerine bağlıdır. Bu çalışmada ideal plastik davranış söz konusu olmadığından ya da bir başka deyişle kademeli bir yük artışına bağlı olarak artan bir plastik davranış dikkate alınacağından bir akma kuralı tanımlamak gerekecektir. Ancak, başlangıçtaki yüzey düşünüldüğünde elastik davranış için $f < f_i$ olması durumu ya da yükleme durumunun ilk akma yüzeyinden geri yüklemeyi işaret eden

$$f = f_i \text{ iken } df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} < 0 \quad (3.2)$$

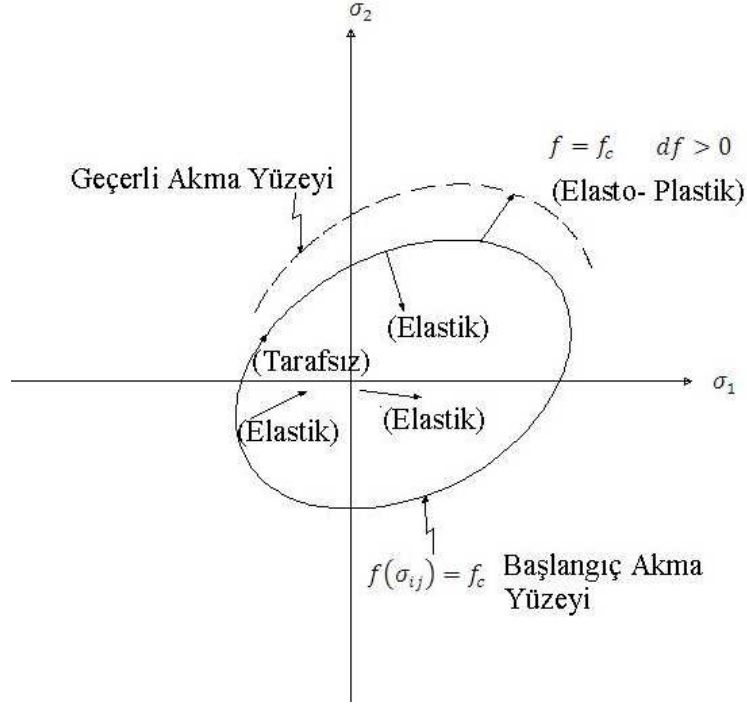
eşitsizliği geçerli olduğunda elastik şekil değiştirmelere geri döneceği anlaşılabacaktır (Şekil 3.1). Bunun dışında gerçekleşecek plastik davranış bir akma kuralının tanımlanması gereklidir:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3.3)$$



Şekil 3.1 Yüklü ve Yüksüz Durumlarda Akma Yüzeyi [99]

Bu bağıntıdaki $d\lambda$, gerilme durumu ve yükleme öncesine bağlı pozitif bir orantılılık skaleridir. Burada plastik potansiyel fonksiyonu olarak gösterilen g eğer akmanın başladığı ilk andaki gerilme yüzeyi biçimiyle aynı alınırsa ($f=g$) birleşik akma yasası eğer farklı alınırsa ($f \neq g$) birleşik olmayan tipte bir akma yasası geçerli olacaktır. Aşamalı bir akmanın gerçekleştiği pekleşme durumunda ise akma yüzeylerinin ardışık değişimleri için akma yüzeyinin merkez koordinatlarının aynı kalıp boyutlarının artması durumuna izotropik pekleşme ismi verilmektedir. (Chen, ve Mizuno, [100]) tarafından gerçekleştirilen çalışmada boyutların aynı kalıp merkezin gerilme uzayında ötelenmesi durumuna ise kinematik pekleşme denildiği bilgisini vermişlerdir. Bu çalışmadaki tüm modellemelerde izotropik pekleşme kullanılmıştır.



Şekil 3.2 Pekleşmiş Malzemenin akma Yüzeyi [100]

Genel olarak bir akma kriteri:

$$f(I_1, J_2, J_3) = f_i \quad (3.4)$$

I_1 asal gerilme tansörünün birinci invaryantıdır:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (3.5)$$

Burada, $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ değerleri, σ' 'ya bağlı asal gerilme değerleridir. Pekleşmenin olduğu aşamalı olarak gelişen plastik davranış için ihtiyaç duyulan yükleme fonksiyonu ya da ardışık akma yüzeylerinin de geometrik olarak gerilme uzayında ifade edilmeleri gereklidir. Bu yüzeyin geometrisi plastik akışa bağlı olarak değişebilir. Genel olarak, bu değişimi plastik birim şekildeğiştirme tansörü ε_{ij}^p ve bir pekleşme parametresi kullanılarak dikkate alınabilir ve bu durumda yükleme fonksiyonu:

$$f = f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p, k) \quad (3.6)$$

şeklindeki genel ifadeyle yazılabilir (Şekil 3.2). Plastik şekil-değiştirmeler sırasındaki yükleme fonksiyonu:

$$f = 0 \text{ iken } df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} > 0 \quad (3.7)$$

şeklinde tanımlanabilir. Elastik davranış ise aşağı durumda gerçekleşir:

$$f < 0 \text{ veya } f = 0 \text{ iken } df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} < 0 \quad (3.8)$$

Deviatorik asal gerilme tansörünün

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sigma_m \\ \sigma_m \\ \sigma_m \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Bağıntıdaki σ_m üç asal gerilmenin ortalamasını göstermektedir. Başka bir ifade ile $I_1/3$ 'e eşit olan bu değer aynı zamanda hidrositatik eksen üzerindeki herhangi bir nokta ile aşağıdaki bağıntı kurulabilir:

$$\sqrt{3}\sigma_m = \frac{1}{\sqrt{3}}I_1 \quad (3.10)$$

J_2 ve J_3 ise deviatorik gerilme tansörünün ikinci ve üçüncü invariantlarıdır ve aşağıda bağıntı (3.11) ile (3.12)'de verilmiştir:

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \quad (3.11)$$

$$J_3 = s_1 s_2 s_3 \quad (3.12)$$

Gerilme bileşenlerinin geometrik olarak gösteriminde r , deviatorik uzunluk, ξ , hidrostatik uzunluk, θ açı olmak üzere, kriterin çekme- basınç gerilmesi meridyenleri, ve deviatorik düzlemde oluşan akma yüzeyleri Şekil 3.3'te gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \xi \\ \xi \\ \xi \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{2}{3}} r \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \xi \\ \xi \\ \xi \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{2}{3}} r \begin{bmatrix} \cos \theta \\ -\sin \left(\frac{\pi}{6} - \theta \right) \\ -\sin \left(\frac{\pi}{6} + \theta \right) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Burada;

$$\xi = \frac{I_1}{\sqrt{3}} \quad (3.14)$$

$$r = \sqrt{2J_2} \quad (3.15)$$

Lode açısının literatürdeki farklı bir tanımlaması aşağıda verilmiştir.

$$\sin 3\theta = -\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \quad (3.16)$$

Başka ifade ile:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \xi \\ \xi \\ \xi \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{2}{3}} r \begin{bmatrix} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta \\ \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \xi \\ \xi \\ \xi \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{2}{3}} r \begin{bmatrix} -\cos(\frac{\pi}{6} - \theta) \\ \sin\theta \\ -\cos(\frac{\pi}{6} + \theta) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Denklemler incelendiğinde θ açısının -30 ile +30 arasında değişebileceği söylenebilir. Daha sonra ise simetriden faydalanarak tüm deviatorik yüzey çizilebilir.

Çok eksenli gerilme altında yığma yapıların dayanımı bu gerilme durumlarının bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Basınç ve yanal yüklemeler altında yığma duvarların göçmesini basit çekme, basit basınç ve basit kayma gibi değerlerinin birbirinden bağımsız gibi düşünerek açıklamak yetersiz kalmaktadır.

Göçme kriterleri oluşturulmadan önce yapıda göçmeye neden olan durum incelenmeli ve bu durum tanımlanmalıdır. Örneğin göçme bazen akmayı, bazen çatlamların oluştuğu anı, taşıma kapasitesine ulaşmayı, fazla deformasyon yapmayı da ifade edebilir. Örneğin LP ile güçlendirilmiş yapılarda göçme LP elemanın kopma durumunu veya LP elemanın kopma durumundan sonra da yığmada hasar yoksa LP koptuktan sonra da yük etkisinde yapının ayakta kaldığı durumu da kapsayacak şekilde tariflenebilir.

Yığmanın davranışı karmaşıktır ve birçok faktöre bağlıdır. Yığmayı oluşturan ana malzeme olan birim ve harcın mekanik özelliklerinden, harç ve birimlerdeki çimento su gibi malzeme bileşenlerinden, yükleme biçimi ve mesnetlenme durumu da dikkate alındığında tek bir matematiksel ifade ile tanımlamanın imkânsız olduğu açıktır.

Literatürdeki akma/kırılma kriterleri dikkate aldıkları parametre sayıları kadar hassastırlar (Mohr- Coulomb iki, Drucker- Prager iki, William Warnke beş parametre gibi.)

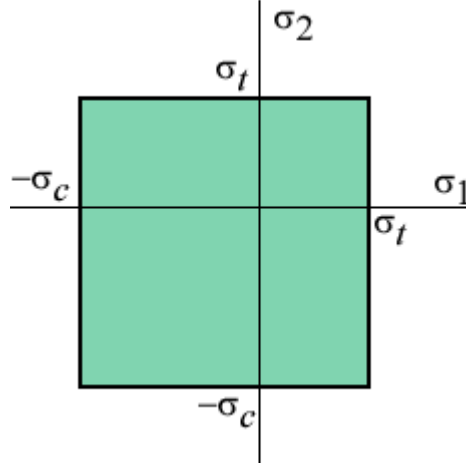
3.2 Rankine Kriteri

Yığma gibi gevrek malzemeler için ilk kullanılan kriter en büyük gerilme kriteri olarak da adlandırılan Rankine kriteridir. Asal gerilmeler için en büyük basınç ve çekme gerilmeleri aralığının belirlenmesi olarak basitçe kriteri ifade edebiliriz:

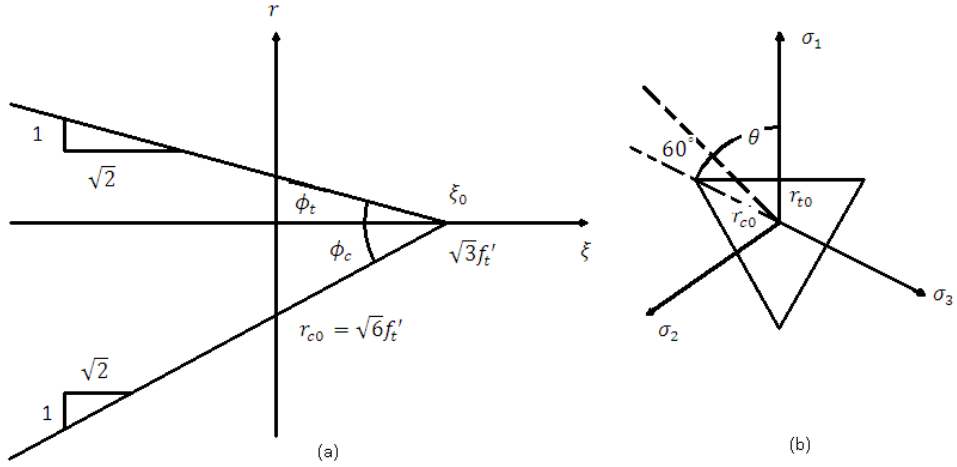
$$\sigma_c < \max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) < \sigma_t \quad (3.18)$$

Çekme ve küçük basınç gerilmeleri altında betonun gevrek davranışını tanımlayabilen ve maksimum çekme gerilmesi kriteri olarak Rankine tarafından önerilmiştir. Denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [95,96].

$$f(I_1, J_2, J_3) = 2\sqrt{3}\sqrt{J_2} \cos \theta + I_1 - 3f_i = 0 \quad (3.19)$$



Şekil 3.3 En Büyük Normal Gerilme Hipotezine Göre Gerilme Alanı



Şekil 3.4. Rankine Maksimum Asal Gerilme Kriteri (a) Meridyen Düzlemde, $\theta = 0^\circ$; (b) π Düzleminde [99]

3.3 Tresca ve von Mises Kriterleri

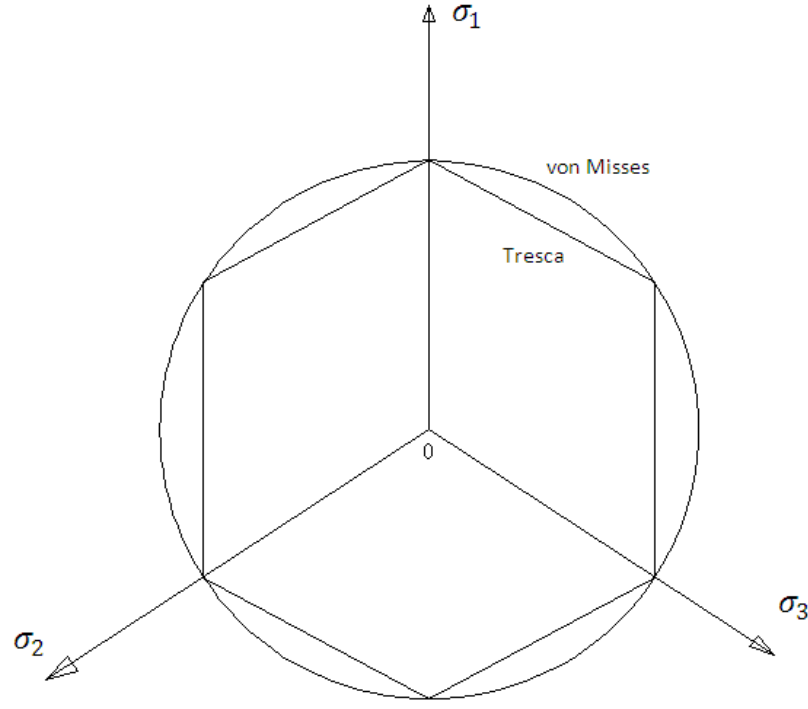
Günümüzde metaller için bilinen ilk kriter Tresca, bir başka deyişle maksimum kayma gerilmesi kriteridir. von Mises 1913 yılında metaller için Tresca kriterine oranla nümerik çözümlemelerde daha pratik ve elverişli bir kriter ortaya koydu. Bu kriter günümüzde von

Misses kriteri ile birlikte oktahedral kayma veya çarpıtılmış enerji kriteri olarak ta bilinmektedir [100].

Genellikle akma fonksiyonu gerilme, şekil değiştirme, yükleme durumu gibi çeşitli parametrelere bağlıdır[100]. Tresca kriteri veya maksimum kayma gerilmesi kriterine göre metallerde maksimum gerilme değeri kritik bir düzeye ulaştığında akma sözkonusudur. Özel bir durum için ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) Tresca kriteri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = k \quad (3.20)$$

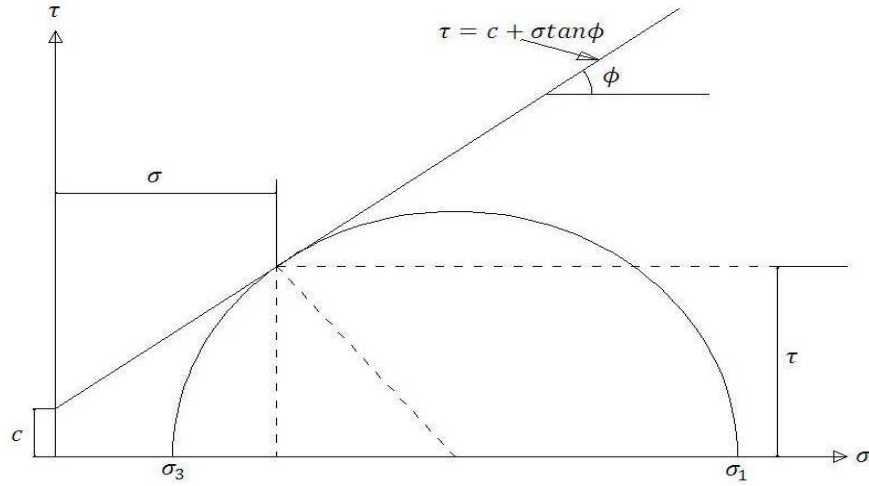
Burada σ_1 ve σ_2 sırası ile büyük ve küçük asal gerilemeler, k ise kayma gerilme testinden elde edilen malzeme akma gerilme parametresidir. Tresca akma kriterinin 3 boyutlu gösterimi aşağıda şekilde von Misses kriteri ile birlikte verilmektedir. Kesiti altıgen şekilli ve eksen çizgisi hidrostatik eksenlere($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) paraleldir. Von Misses kriterinin en kesiti π düzleminde dairesel silindir şeklindedir ve eksen hidrostatik eksenlere paraleldir. Altıgen ve dairesel silindir eksenlerinin çakıştırıldığı durumdan da görüleceği üzere iki kriter arasında farkın %15'i gemeyeceğidir. von Misses kriteri başlangıç asal gerilemelerini akma kriterinde dikkate almaktadır, ancak Tresca kriteri asal gerilemeni ihmal ederek sadece maksimum kayma gerilmesini dikkate almaktadır [100]. Olası nümerik analizlerde tresca altıgeninin kenar çizgileri ve köşeleri için karmaşık hesaplamalar gerekebilir, fakat von Misses kriteri, Trescaya oranla matematiksel zmlemesi karmaşık olmayan ve pratikte kullanımı basit olan kriterdir. Her iki kriterin ağırlıklı kullanım alanı metallerdir, zemin türü yapılar da kullanımı uygun değildir [100]. Zemin türü ve ya daneli yapılar için geliştirilen von Misses ve Tresca kriterlerine “genişletilmiş von Misses” ve “genişletilmiş Tresca” kriterleri olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 3.5 π Düzleminde von Misses ve Tresca Kriterinin Gösterimi [100]

3.4 Mohr- Coulomb Kriteri

Mohr- Coulomb kriteri hidrostatik basınç etkisini taneli malzemelerin basıncında dikkate alan ilk kriterdir. Mohr- Coulomb kriteri de Drucker- Prager kriteri gibi içsel açısı ve kohezyona bağlı parametreleri kullanan kriterdir. Mohr- Coulomb kriterine göre kayma gerilmesinin aşıldığı düzlem boyunca kaymadan dolayı göçme meydana gelir. Bu kayma gerilmesi kohezyona (c), sürtünme direncinin toplamına eşittir. Burada sürtünmeye ait direncin anlamı içsel sürtünme açısıdır ve ϕ ile tanımlanmaktadır. Sürtünmesiz malzemelerde içsel sürtünme açısı değeri $\phi = 0$ alınabilir [100]. Bu durum Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Akmanın oluşma durumu doğrusal kabul edilebilir ve Şekil 3.6'da verilen denklemde gösterilmiştir. Şekil 3.6'da gösterilen bağıntının alt sınır değerlerinde büyük kayma gerilmesi olduğunda (Tresca kriteri), $c = \tau$ ve c tekrar akma gerilmesi parametresi olan k değerine eşitlenir.



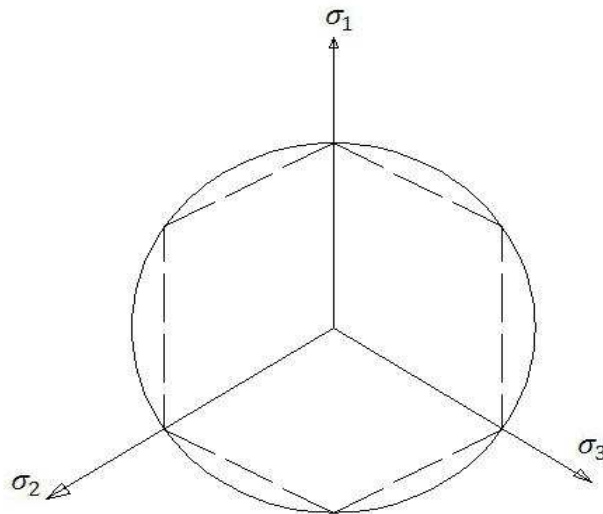
Şekil 3.6 Mohr Coulomb Kırılma/Göçme Yüzeyi [101]

Yukarıda şekilde verilen eşitlikten de görüldüğü gibi Mohr-Coulomb kriteri kohezyon ve içsel sürtünme açısına bağlı parametrelerden elde edilen bir kriterdir. Betondan üretilen briket prizmalar ve ya blok birimlerden üretilen prizmalarında üç eksenli basınç deneyleri yardımı ile bu değerler elde edilebilir.

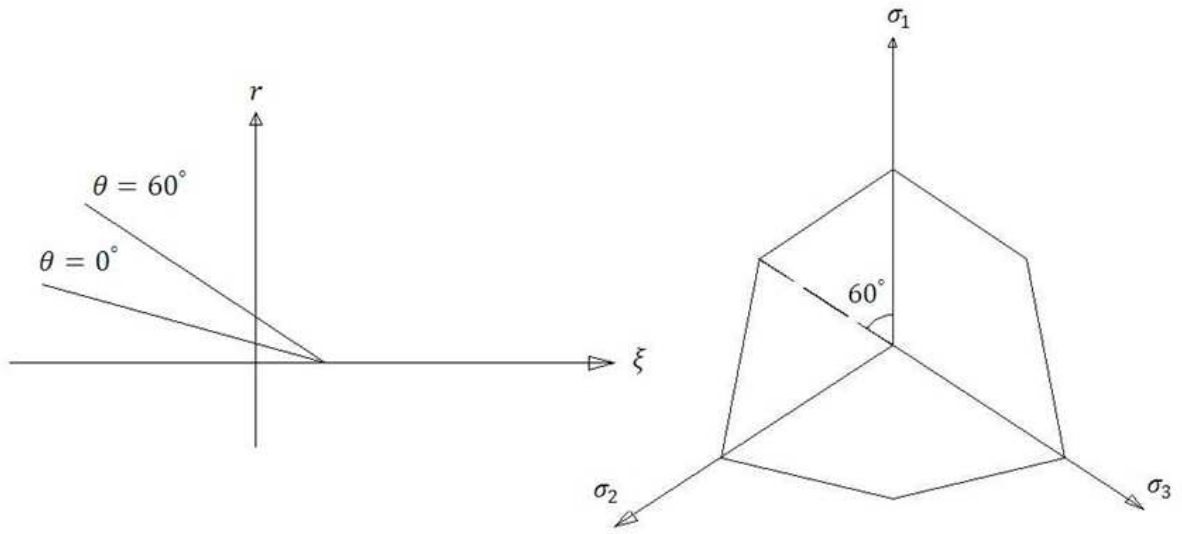
$$f = I_1 \sin \theta + \frac{1}{2} \left[3(1 - \sin \theta) \sin \theta + \sqrt{3(3 + \sin \theta)} \cos \theta \right] \sqrt{J_2} - 3c \cos \theta \quad (3.21)$$

denklemleri ile ifade edilebilmektedir. Bu kriterle ait akma yüzeyi ve göçme yüzeyi aşağıda Şekil 3.6 ve 3.7’de verilmiştir[100].

(Davis, ve Selvadurai, [101]) tarafından gerçekleştirilen çalışmada Mohr- Coulomb kriteri σ_2 asal gerilme değerinden bağımsız olarak tanımlanmakta ve göçme durumuna ulaşmada bu asal gerilmenin etkisi olmadığı söylenmiştir ve bu durum Şekil 3.8(b)’ de verilmiştir [101].



Şekil 3.7 Mohr- Coulomb Akma Yüzeyi [101]



Şekil 3.8 (a) Mohr Coulomb Meridyen Düzleminde (b) Mohr Coulomb Deviatorik Düzlemde
[101]

Çizelge 3.1 Akma Kriterlerinin Sınıflandırılması

Parametre Sayısı	Kriter
1	Rankine
	Tresca
	Von Mises
2	Mohr- Coulomb
	Drucker- Prager
3	Bresler- Pister
4	Ottosen
	Hsieh Ting Chen
5	William- Warnke

3.5 Drucker-Prager Kriteri

Drucker ve Prager (DP) metaller için de başarı ile kullanılabilen von Misses kriterine bir terimin eklenmesi ile hidrostatik duruma daha duyarlı hale getirilerek, zemin, kuşatılmış ve kuşatılmamış beton, yığma gibi malzemeler için de kullanılabilen bir kriter haline getirmişlerdir.

(DP) akma kriteri hidrostatik malzemenin göçme durumuna gelmesi ve elastik ötesi şekil değiştirmeler yapabilmesini tanımlayan basınç-bağımlı bir akma kriteridir:

Aşağıda bağıntı (3,22)'de uzun ve sabit eksenli bir silindirik akma yüzeyini temsil eden von Misses denkleminin bağıntısı verilmiştir.

$$f(J_2) = \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (3.22)$$

von Misses kriterine bir terim eklenmesi ile genişleyen bir koni yüzeyi elde edilir ve bu durum bağıntı (3,23)'de verilmektedir.

$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (3.23)$$

Bu bağıntıda α ve k bünyesel davranışı belirleyen malzeme parametreleridir. I_1 gerilme tansörünün birinci invariantı, J_2 ise deviatorik gerilme tansörünün ikinci invariantıdır:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (3.24)$$

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \quad (3.25)$$

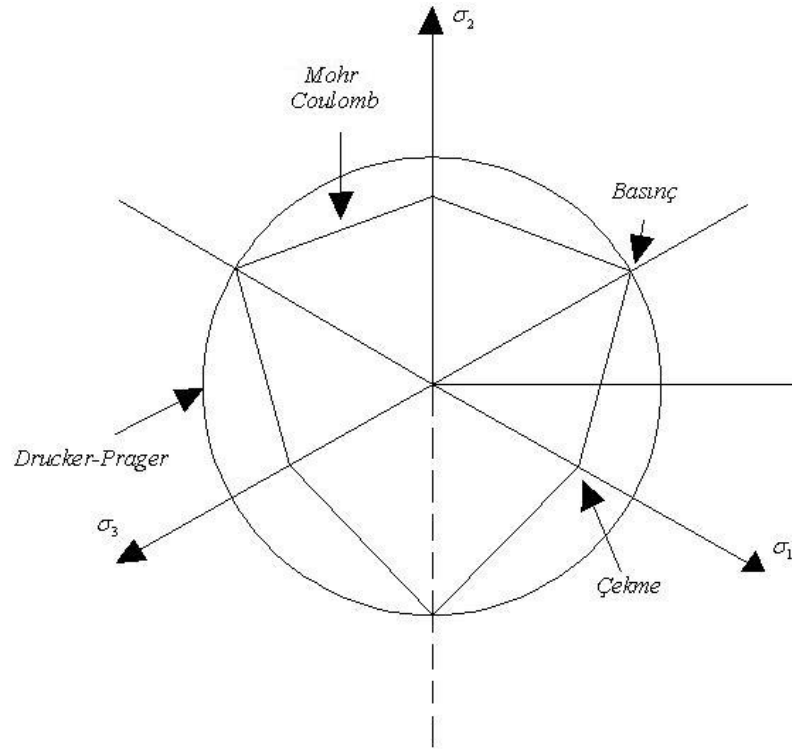
Burada, $(\sigma_1, \sigma_2$ ve σ_3 değerleri, σ' 'ya bağlı asal gerilme değerleridir.

Bu bağıntı görüldüğü üzere asal gerilmeler ile oktahedral kayma gerilmeleri arasında doğrusal bir bağıntı bulunmaktadır. Bu durumda hidrostatik basınç altındaki gerilme ve şekil değiştirmeler ile kesme gerilmeleri ve biçim değişiklikleri arasında doğrusal bir ilişki tanımlanmaktadır [69].

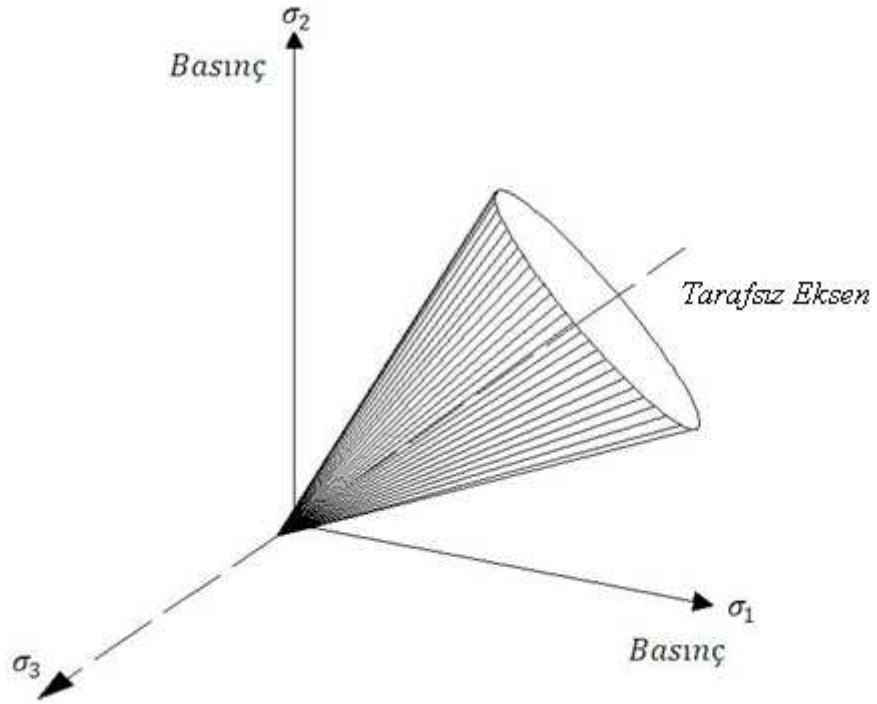
DP kriterine ait bir akma yüzeyi, malzemenin karakteristik parametreleri olan içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri ile tanımlanabilir. Bu açıdan DP kriteri ile Mohr-Coulomb kriteri arasında bir ilişki kurulabilir. Bu ilişki genel olarak iki türlü kurulmaktadır. (Conil, vd. [102]) çalışmasında, DP kriterine ait basınç meridyeni Mohr-Coulomb kriterinin basınç meridyeni ile karşılaştırılarak α ve k için aşağıdaki bağıntıların elde edildiği bilgisini vermiştir, DP ve Mohr-Coulomb eksenlerinin karşılaştırılması durumunu Şekil 3.9'da göstermiştir.

$$\alpha = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)} \quad (3.26)$$

$$k = \frac{6c\cos\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)} \quad (3.27)$$



Şekil 3.9 Mohr- Coulomb ve DP Eksenlerinin Çakıştırılması [102]



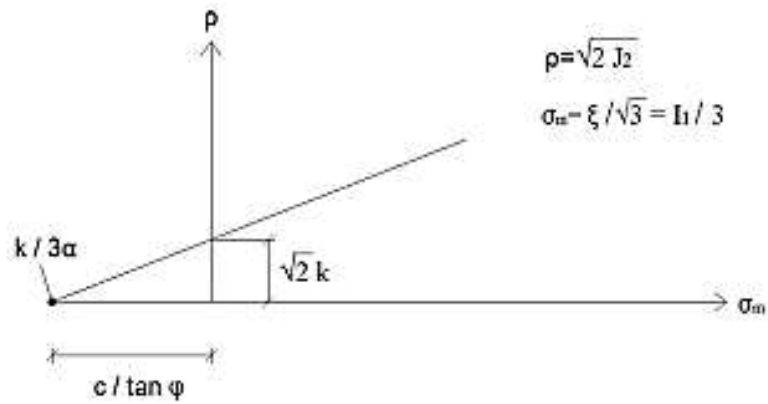
Şekil 3.10 DP Kriterinin Asal Gerilme Uzayında Gösterimi [103]

Lode açısının literatürdeki farklı bir tanımlaması aşağıda verilmiştir.

$$\sin(3\theta) = -\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \quad (3.28)$$

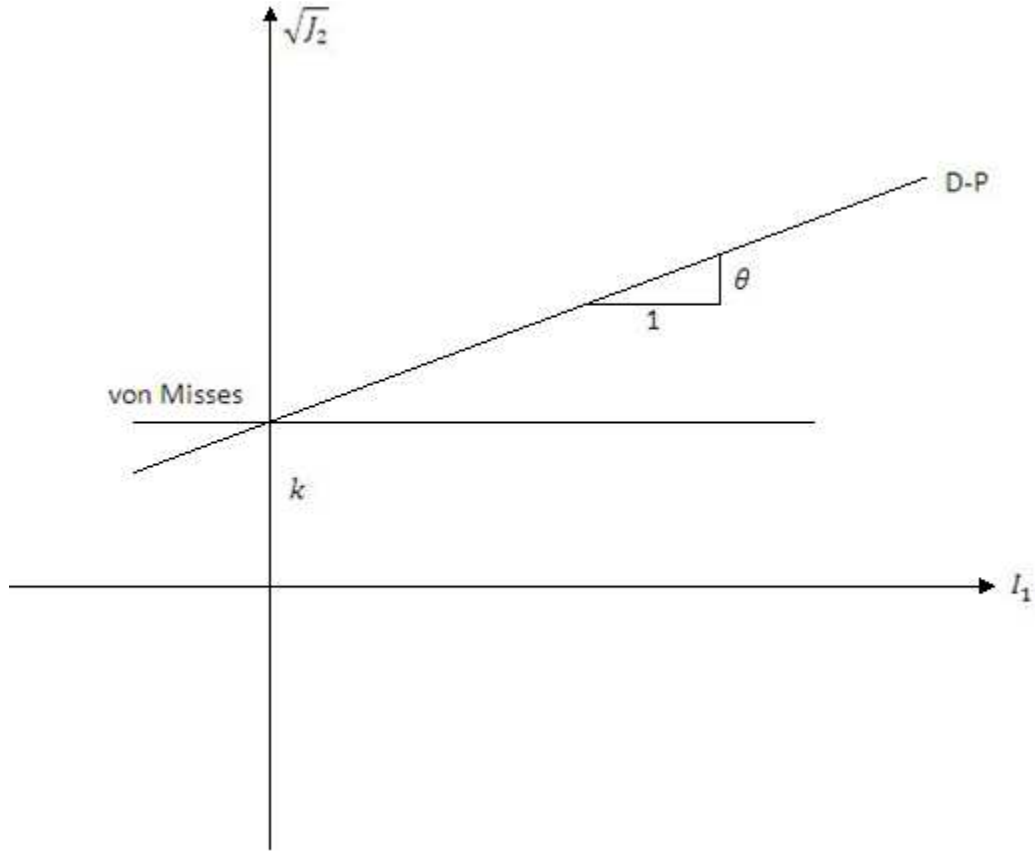
ile ifade edilebilir.

Denklemler incelendiğinde θ açısının -30 ile $+30$ arasında değişebileceği söylenebilir. Daha sonra ise simetriden faydalanarak tüm deviatorik yüzey çizilebilir.



Şekil 3.11 Basınç Bölgesinde DP Kriteri

von Misses kriterinin sabit bir silindirik yüzey olduğunu ve DP kriterinin ise genişleyen bir koni yüzeyine sahip olduğu yukarıda anlatılmıştır. Birinci ve ikinci invaryatlar düzleminde von Misses ve DP kriterinin gösterimi aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.12 $I_1 - \sqrt{J_2}$ Düzleminde DP Akma Yüzeyi [104]

Nümerik olarak çözülen yığma duvarların analizinde DP kriterinin parametreleri olan kohezyon (c_{bl}) ve yığma birimlerin içsel sürtünme açısı (ϕ_{bl}) değerlerine bağlı α ve κ katsayıları hesapla bulunmuştur. Bu değerlerden yola çıkılarak bağıntı (3.13)' te verilen asal gerilme değerleri bileşenleri σ_1 , σ_2 ve σ_3 nümerik olarak Ek 1'de yazılan kısa programla elde edilmiştir. Bu değerlerden oluşan yüzey aşağıda Şekil 3.13'te verilmiştir.

Blok birimlere ait analizler sonucu nümerik olarak elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri bağıntı (3.26) ve (3.27)' de yerine konularak α ve κ değerleri bulunabilir. Bağıntılar incelendiğinde θ açısının $-30^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$ olacağı söylenebilir. Bu durumda α ve κ değerleri r ve ξ değerlerine bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\sqrt{6}\alpha\xi + r = \sqrt{2}k \quad (3.29)$$

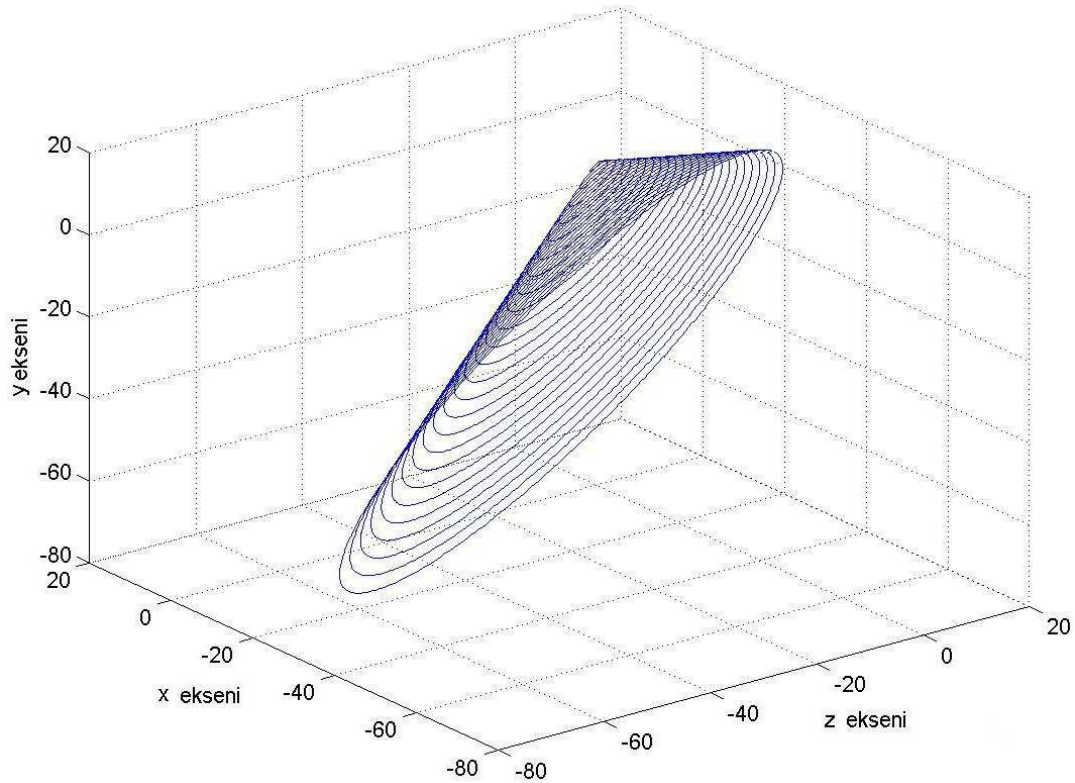
$\xi \leq 0$ durumunda basınç, $\xi \geq 0$ durumunda çekme oluşacağından, basınç durumu için bağıntı (3.30)'da olduğu gibidir.

$$r = \sqrt{2}k - \sqrt{6}\alpha(-\xi) \quad (3.30)$$

Çekme durumu için ise:

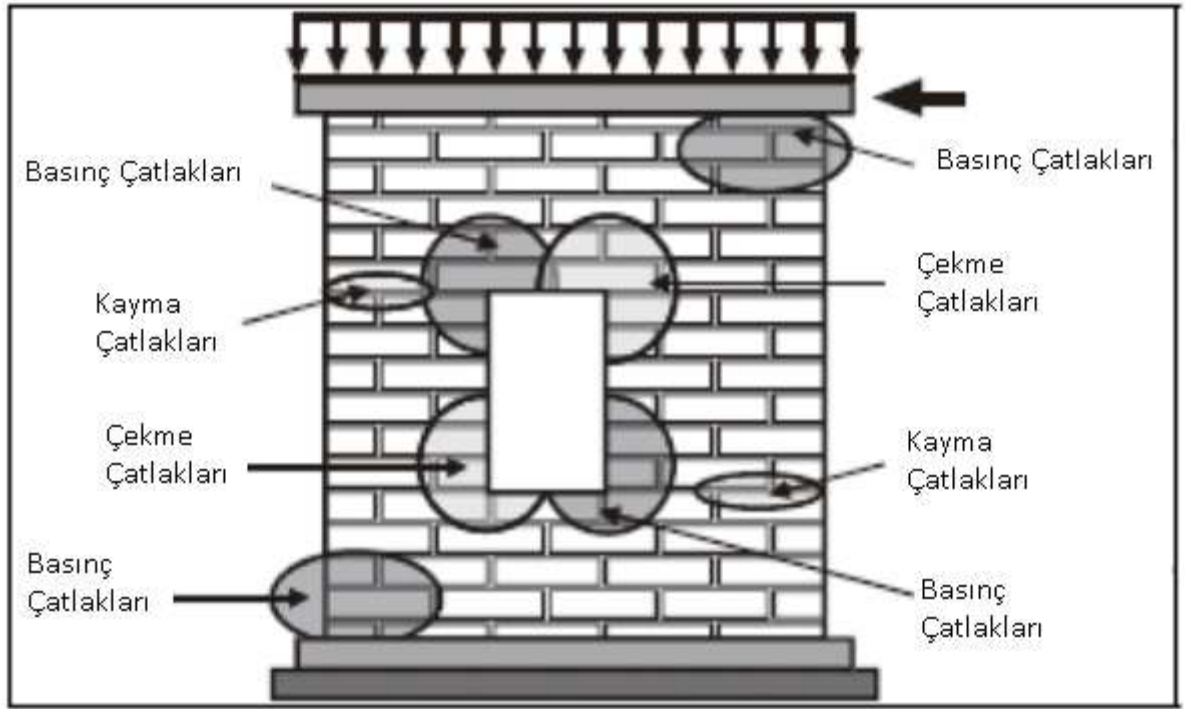
$$r = \sqrt{2}k - \sqrt{6}\alpha\xi \quad (3.31)$$

şeklini alabilmektedir. Bu değerlerden çizilen DP akma yüzeyi Şekil 3.13'te verilmektedir.

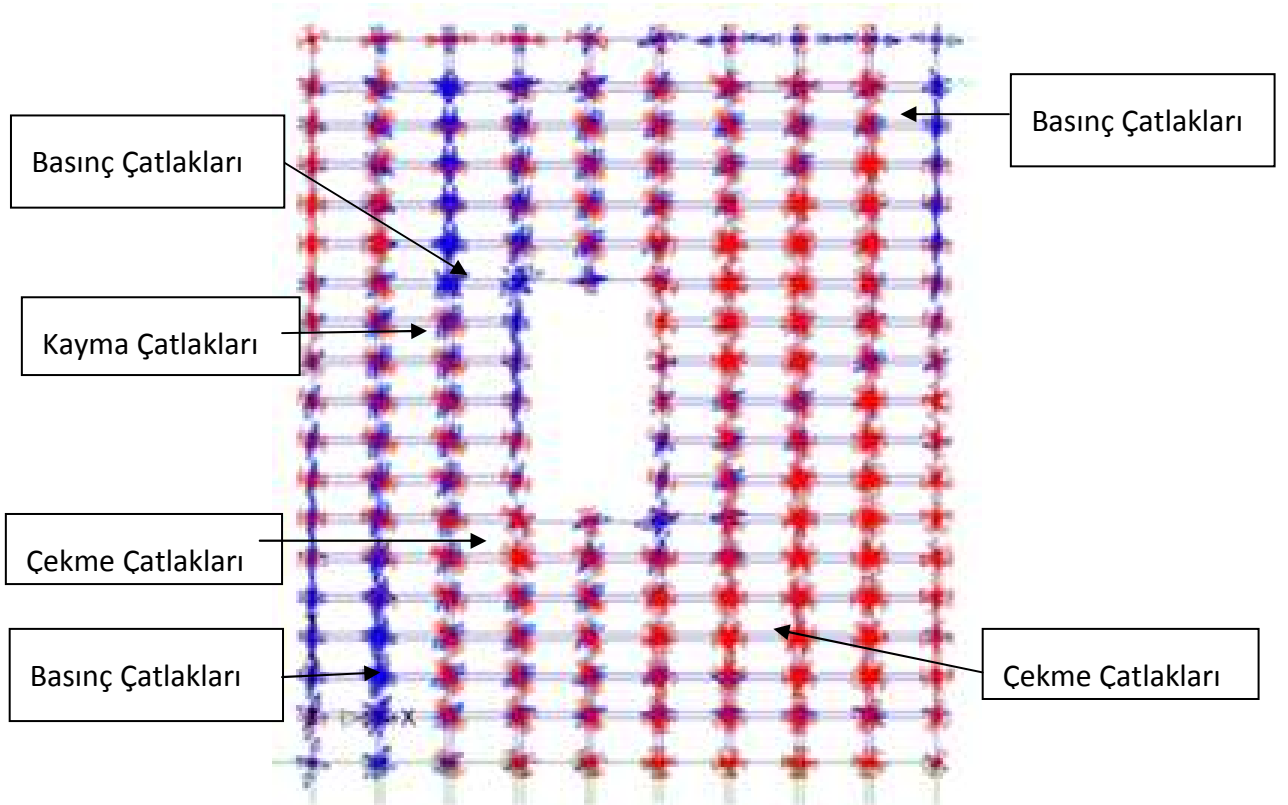


Şekil 3.13 Nümerik Olarak Elde Edilen DP Kriteri Akma Yüzeyi

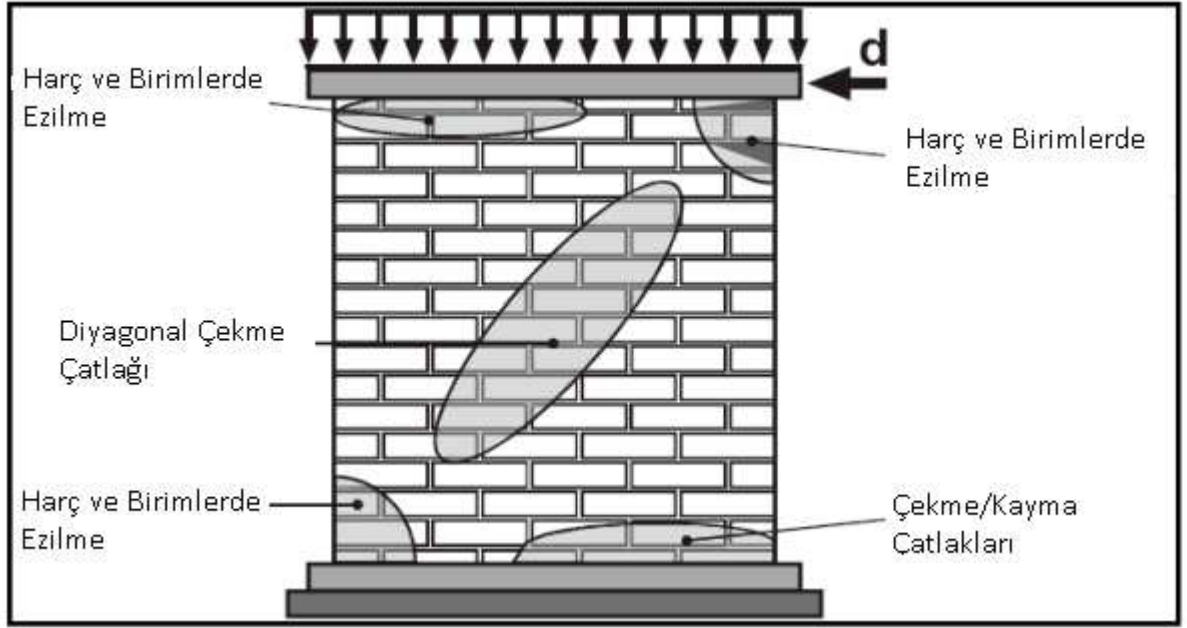
(Mohamed,[108]) çalışmasında yığma duvarlarda oluşabilecek basınç ve çekme çatlakları ile bilgiler vermiştir. Şekil 3.14'de düşey ve kademeli artırılmış yatay yüke maruz orta bölgesinde boşluk bulunan yığma duvar için sırası ile fiziksel duruma ait çatlak oluşumları, Şekil 3.15'de ise nümerik modele ait asal gerilme vektörleri verilmiştir. Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de ise yığma duvarın fiziksel duruma ait çatlak oluşumları ile nümerik modele ait asal gerilme vektörleri verilmiştir. Şekiller karşılaştırıldığında, yukarıda detaylı şekilde anlatılmış olan kırılma kriteri yardımıyla elde edilen sonuçların fiziksel duruma ait sonuçlarla benzer eğilimi gösterdiği anlaşılmaktadır. Şekil 3.15 ve Şekil 3.17'de kırmızı renk çekme, mavi renk ise basınç gerilmelerini işaret etmektedir [66].



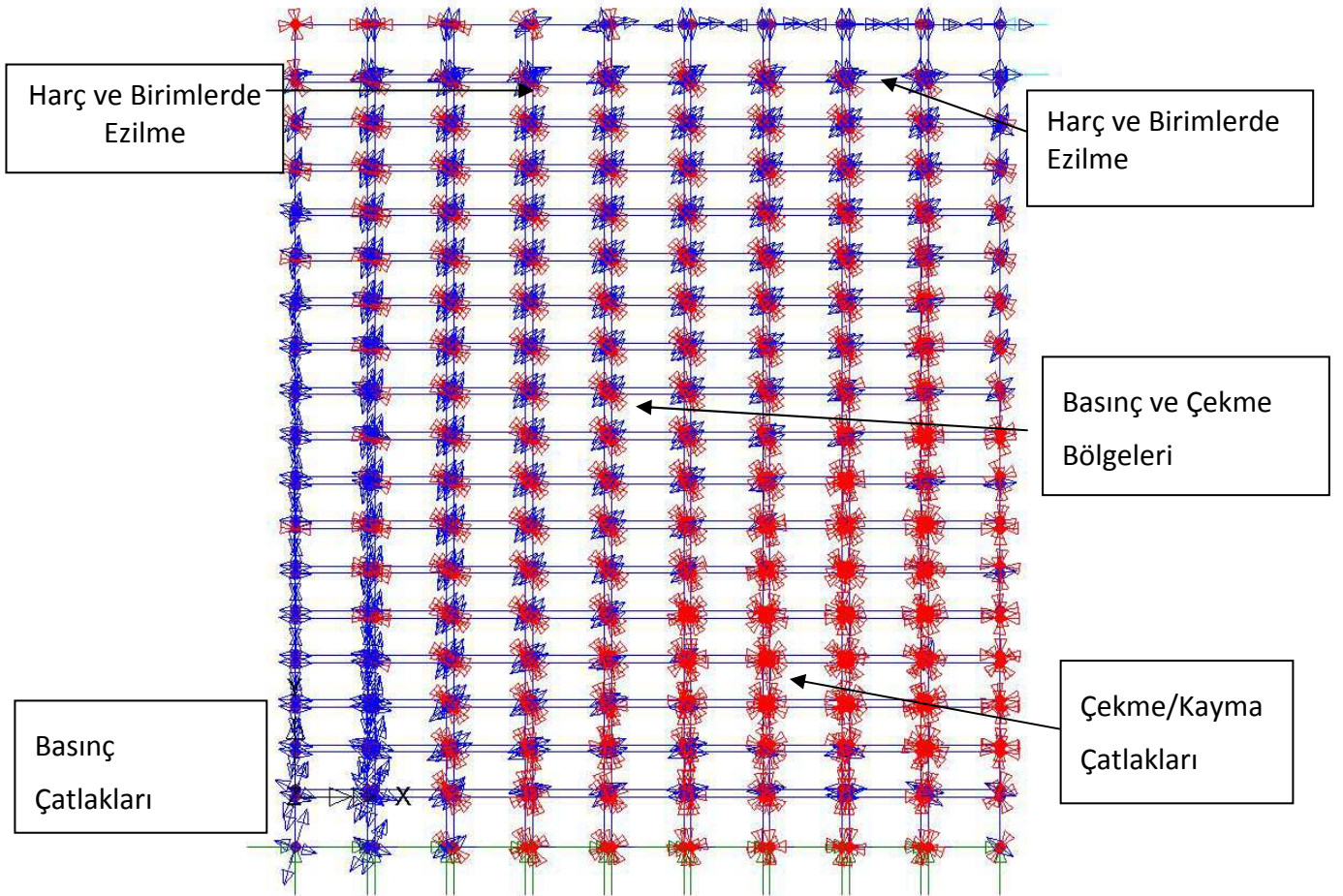
Şekil 3.14 Boşluklu Duvarın Fiziksel Duruma Ait Çatlak Oluşumu [108]



Şekil 3.15 Boşluklu Duvarın Nümerik Model Asal Gerilme Vektörleri



Şekil 3.16 Dolu Duvarın Fiziksel Durumuna Ait Çatlak Oluşumu [108]



Şekil 3.17 Dolu Duvarın Nümerik Model Asal Gerilme Vektörleri

LP İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ YIĞMA DUVARLARIN ELASTO-PLASTİK ANALİZLERİ**4.1 Giriş**

Bu tez çalışması içerisinde, yalın duvarlar ile LP sargı kullanılarak farklı biçimlerde güçlendirilmiş yığma duvarların doğrusal olmayan üç boyutlu sonlu eleman analizleri için genel bir yaklaşım geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşımın doğruluk ve davranışı tahmin kapasitesini kontrol edebilmek amacıyla, literatürde yeralan ve detayı birinci bölümde açıklanan çalışmalardaki veriler kullanılarak deneysel sonuçları bulunan yığma duvarlara ait numerik modeller oluşturulmuş ve anılan yaklaşım ile doğrusal olmayan sonlu eleman çözümlemeleri gerçekleştirilmiştir. Düşey ve yatay yük etkisi altındaki deney panellerine ait deneysel yük-yerdeğiştirme eğrileri ile doğrusal olmayan sonlu eleman yöntemleri (SEY) sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, duvarlara ait mekanizma durumları ile nümerik çözümlemelere ait şekil değiştirme dağılımları karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Literatürde bulunan 10 (on) farklı çalışmadan 17 (on yedi) adet duvarın sonlu eleman modelleri (SEM) oluşturulmuştur.

4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi

SEY; karmaşık olan mühendislik yapı ya da elemanlarının daha basit alt parçalara/kısımlara ayrılarak her birinin kendi içinde ayrı olarak davranışının belirlenmesi yoluyla sistem davranışının çözümlendiği sayısal yaklaşımlar bütünüdür. Yöntemin üç temel niteliği vardır: İlk olarak, geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi, sonlu elemanlar olarak isimlendirilen geometrik olarak basit alt bölgelere ayrılır. Sonra ise her elemandaki şekil değiştirme, yerdeğiştirme vb. dağılım alan fonksiyonları, cebirsel polinomların doğrusal

kombinasyonu olarak tanımlanır. Yöntemin üçüncü temel özelliği ise, aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin istenilen sayıdaki belirli düğüm noktaları değerleri elde edilmesinin problemin çözümünde yeterli olmasıdır. SEY, değişik ve karmaşık özelliklere sahip her türlü malzemelerde kullanılabilir. Örneğin, anizotropi, doğrusal olmayan, zamana bağlı malzeme özellikleri gibi malzeme özellikleri dikkate alınabilir [105].

Sonlu elemanlar yönteminin avantajlarının yanı sıra eksi yönleri de mevcuttur.

- Bazı problemlere uygulanmasında zorluklarla karşılaşabiliriz.
- Elde edilen sonucun doğruluk değeri kullanılan verilerin doğruluğuna bağlıdır.
- Çıkabilecek sonuç önceden tahmin edilmeli ve sonuç ona göre test edilmelidir.

Sonlu elemanlar metodunda kullanılan elemanlar boyutlarına göre temel olarak üç kısma ayrılabilir:

a) Tek boyutlu elemanlar: Bu elemanlar tek boyutlu olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılır.

b) İki boyutlu elemanlar: İki boyutlu problemlerin çözümünde kullanılır, temel elemanı üç düğümlü üçgen elemandır. İki üçgen elemanın birleşmesiyle meydana gelen dörtgen eleman, problemin geometrisine uyum sağladığı ölçüde kullanımı uygun olan bir elemandır. Dört veya daha fazla düğüm noktasına sahip olabilir. Dörtgen eleman çoğu zaman özel durum olan dikdörtgen eleman şeklinde kullanılır.

c) Üç boyutlu elemanlar: Bu grupta temel eleman üçgen piramittir. Bunun dışında dikdörtgenler prizması veya daha genel olarak altı yüzeyli elemanlar, üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipleridir.

Sisteme Etki Eden Kuvvetlerin Bulunması: Bir problemde sisteme etki edebilecek kuvvetler aşağıda verilmiştir:

-Tekil Kuvvetler: Tekil kuvvetler hangi elemanın hangi düğüm noktasına ne yönde etki ediyorsa genel kuvvet vektöründe etki ettiği düğüm noktasına karşılık gelen satıra yerleştirilir. Problemin cinsine göre tekil yük kavramı değişebilir.

-Yaylı Kuvvetler: Bu kuvvetler bir kenar boyunca veya bir alan üzerinde etkili olur.

–**Kütle kuvvetleri:** Eleman hacmi için geçerli olan merkezkaç kuvveti ve ağırlık kuvvetleri gibi kuvvetlerdir.

Sınır Şartlarının Belirlenmesi: Her problemin doğal olarak ya da yapay sınır şartları vardır. Sınır şartları, cismin çeşitli kısımlarındaki elastik yerdeğiştirmelerin ölçülebileceği bir referans sağlamaktadır.

Sistem Denkleminin Çözümü: Çözüm için, sistemin sınır şartları da göz önüne alınarak matrisin tersini almak yeterlidir. Fakat büyük matrislerin çözümü zaman açısından sorun yaratacağından ters alma işlemi ile yapmak yerine Gauss eliminasyon gibi yöntemlerle daha az kapasite ve daha kısa sürede çözüm yapmak mümkün olmaktadır. Doğrusal olmayan çözümlemelerde ise doğal olarak çözüm zamanı artacak ve sistem rijitlik matrislerinin artan yük aşamalarına göre yenilenmeleri gerecektir. Denklem sistemlerinin çözümünde kullanılan farklı yaklaşımlar mevcuttur.

4.2.1 Sonlu Eleman Formülasyonu

Bir düzlem elemandaki yerdeğiştirmeler (u, v), düğüm noktasal yerdeğiştirmelerin (u_i, v_i) şekil fonksiyonu (N_i) kullanılarak bağıntı (4.1)'deki gibi elde edilir:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & \dots \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \vdots \end{Bmatrix} \rightarrow u = Nd \quad (4.1)$$

N : Şekil fonksiyon matrisi

u : Yer değiştirme vektörü

d : Düğüm noktasal yerdeğiştirme vektörü [104].

4.2.2 Üç Boyutlu Problemler

Sonlu eleman analizinde bir ve iki boyutlu olarak yapılan analizler yeterli derecede doğru sonuçlar vermediğinden, daha hassas sonuçlar veren üç boyutlu çözümler tercih edilmektedir. Üç boyutlu durumda yerdeğiştirme bileşenleri aşağıda (4.2) bağıntısında verilmiştir.

$$\{u\} = [u \ v \ w]^T \quad (4.2)$$

Burada, u, v, w sıra ile x, y ve z doğrultularındaki yerdeğiştirme bileşenlerini ifade etmektedir. Gerilme ve şekil değiştirme bileşenleri ise sıra ile bağıntı (4.3) ve (4.4)'te verilmektedir.

$$\{\sigma\} = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{yz} \ \tau_{zx} \ \tau_{xy}]^T \quad (4.3)$$

$$\{\varepsilon\} = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx} \ \gamma_{xy}]^T \quad (4.4)$$

Gerilme ve şekil değiştirme arasındaki ilişki ise:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (4.5)$$

şeklindedir ve $[D]$ burada 6x6 boyutunda rijitlik matrisini belirtmektedir. Bu matris incelenen elemanın yapıldığı malzemenin davranışını belirlemekte ve bünye denklemlerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Sistem ya da elemanın tahmin edilmesi istenen davranışının belirlenmesi malzeme matrisinin gerçek davranışı yansıtabilme kapasitesi ile orantılıdır. Doğrusal olmayan çözümlemelerde bu matris artan yüklemeye paralel olarak ilerleyen birim şekil değiştirmelere ve gerilmelere bağlı olarak değişen bir yapıya sahip olmaktadır.

4.2.2.1 Altı Yüzlü, Sekiz Düğüm Noktalı Eleman

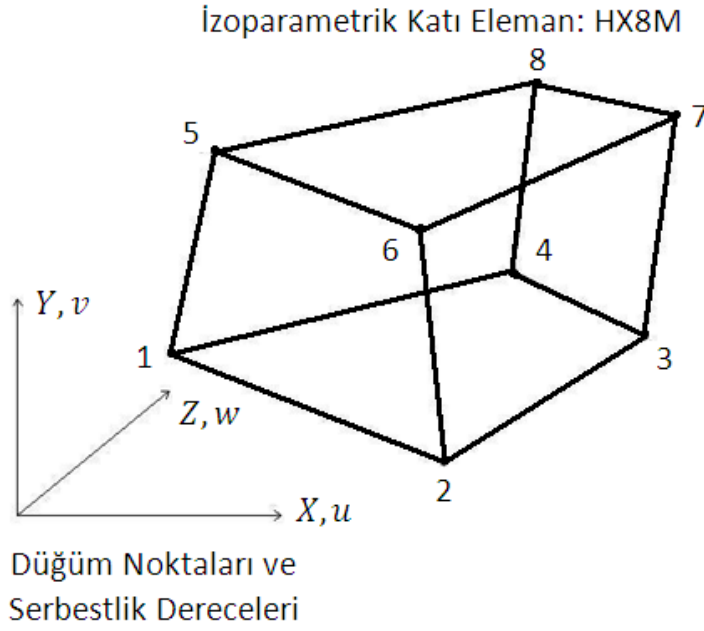
Küp şekilli izoparametrik eleman olup, 4 düğümlü düzlem gerilme eleman tipine benzemektedir. Bu eleman tipi tez kapsamında yer alan duvar çözümlemelerinde yığma birimleri ile harcın modellenmesinde LUSAS [66] içerisinde kullanılmıştır. Eleman üzerinde şekil fonksiyonu aşağıda (4.6) numaralı bağıntıda verilmektedir.

$$N_i = \frac{1}{8}(1 + rr_i)(1 + ss_i) + (1 + tt_i) \ i = 1, \dots, 8 \quad (4.6)$$

Burada r_i , s_i ve t_i eleman üzerindeki düğüm noktalarını vermektedir ve eleman düğüm noktalarının 24 elemanı bulunmaktadır [105].

$$\{q\} = [q_1, q_2, \dots, q_{24}] \quad (4.7)$$

Bu çalışmada tuğla ve harç birimlerin sonlu eleman modellenmesinde seçilen üç boyutlu sonlu eleman tipi aşağıda Şekil 4.1'de verilmektedir.



Şekil 4.1 İzoparametrik Katı Eleman [66]

Eleman içindeki her hangi bir noktadaki yerdeğiştirmeler şekil fonksiyonları aracılığı ile aşağıda bağıntı (4.8)'de verildiği gibi hesaplanır.

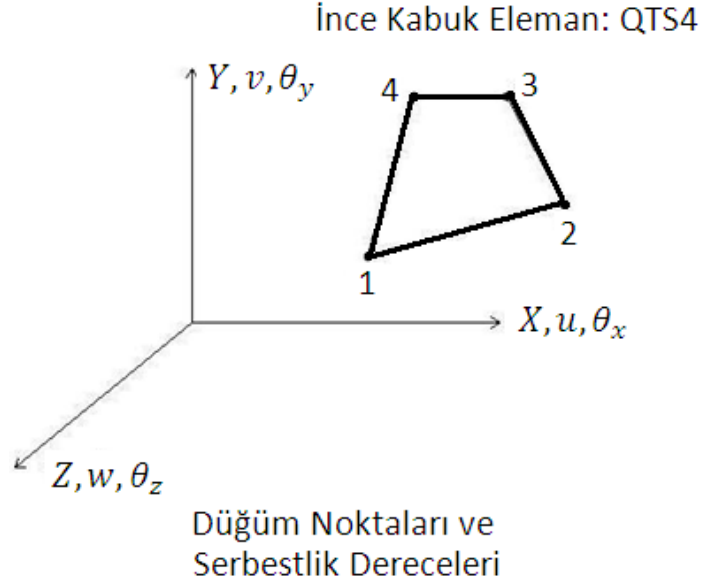
$$\begin{aligned}
 u &= N_1 q_1 + N_2 q_4 + N_3 q_7 + \dots \dots \dots N_8 q_{22} \\
 v &= N_1 q_2 + N_2 q_5 + N_3 q_8 + \dots \dots \dots N_8 q_{23} \\
 w &= N_1 q_3 + N_2 q_6 + N_3 q_9 + \dots \dots \dots N_8 q_{24}
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

Koordinatlar ise aşağıda bağıntı (4.9)'da verildiği gibidir [105]:

$$\begin{aligned}
 x &= N_1 x_1 + N_2 x_2 + N_3 x_3 + N_4 x_4 \\
 y &= N_1 y_1 + N_2 y_2 + N_3 y_3 + N_4 y_4 \\
 z &= N_1 z_1 + N_2 z_2 + N_3 z_3 + N_4 z_4
 \end{aligned}
 \tag{4.9}$$

4.2.2.2 Tek Yüzlü, Dört Düğüm Noktalı, İki Boyutlu Eleman

Bu tez çalışmasında sonlu eleman ağı oluşturulurken, katı elemanla modellenen birim ve harç elemanların her çizgi eleman tek parçaya bölünerek sonlu eleman ağı oluşturulmuştur. Güçlendirilmiş duvarlarda da bu durum izlenmiştir ve ince kabuk elemanla modellenen LP de iki doğrultuda her çizgi eleman tek parçaya bölünerek ağ oluşturulmuştur ve LP yüzeylerindeki düğüm noktaları harç ve birim düğüm noktaları ile çakıştırılmıştır. Başka bir deyimle, LP ile yığma birim yüzeyi arasında tam aderans sağlanmıştır. LP eleman için seçilen eleman tipi de Şekil 4.2'de verilmektedir.



Şekil 4.2 Dört Düğüm Noktalı Kabuk Eleman [66]

Dört düğüm noktalı elemanlara ait şekil değiştirme fonksiyonu ve yerdeğiştirme

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + rr_i)(1 + ss_i) \quad (4.10)$$

bağıntısında olduğu gibidir. Elemandaki her hangi bir noktanın yerdeğiştirmesi ise şekil fonksiyonu yardımı ile bağıntı (4.11)'deki gibi yazılabilir[105].

$$\begin{aligned} u &= N_1q_1 + N_2q_3 + N_3q_5 + N_4q_7 \\ v &= N_1q_2 + N_2q_4 + N_3q_6 + N_4q_8 \end{aligned} \quad (4.11)$$

Matris formunda ise aynı ifade:

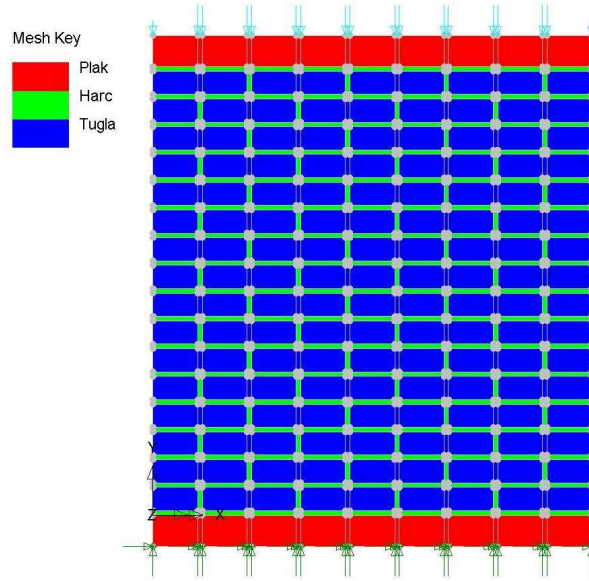
$$\{u\} = [N]\{q\} \quad (4.12)$$

olarak yazılabilir.

$$\begin{aligned} x &= N_1x_1 + N_2x_2 + N_3x_3 + N_4x_4 \\ y &= N_1y_1 + N_2y_2 + N_3y_3 + N_4y_4 \end{aligned} \quad (4.13)$$

Eleman içindeki her hangi bir noktanın koordinati ise (4.13) bağıntısındaki gibi yazılabilmektedir [105].

Bu çalışmada kullanılan LUSAS [66] programında tuğla ve harç birimlerden oluşturulmuş yığma duvarların sonlu eleman modeli aşağıdaki Şekil (4.3)'de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.3 Yığma Duvarın Sonlu Eleman Ağına Bir Örnek

4.3 Önerilen Nümerik Model

Bu çalışmada kullanılan bağıntılar; tuğla, harç ve LP mekanik özelliklerini, uygulanan düşey yük değerini, düşey yük ile tuğla eleman arasındaki basınç dayanımına bağlı ilişkiyi, LP'nin yığma duvarların tüm yüzeylerine, karşılıklı yüzeylerinin tamamına ve bu yüzeylere şeritler halinde aralıklarla yatay/düşey tek yüzeyin tamamına ve tek yüzeye şeritler halinde uygulama durumlarını kapsayacak şekilde basit ve karmaşık olmayacak niteliktedir. Tuğla ve harç gibi malzemelerin ölçülmesi en kolay mekanik özelliği basınç dayanımıdır. Drucker-Prager kırılma kriterinin temel parametreleri malzemenin içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleridir. İçsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinin elde edilmesi için tuğla ve harcın basınç dayanımına bağlı bağıntılar geliştirilmiştir [65].

$$c_{mr} = 1.55 \sqrt[3]{f_{mr}} \quad (4.14)$$

$$\phi_{mr} = 1.519 f_{mr} (MPa) \quad (4.15)$$

Burada f_{mr} harç elemanın basınç dayanımını, ϕ_{mr} harç eleman yüzeylerindeki içsel sürtünme açısını, c_{mr} ise kohezyon değerini ifade etmektedir. Tuğla elemanlar için kohezyon ve içsel sürtünme açısı için önerilen bağıntılar aşağıdaki gibidir:

$$\frac{c_{bl}}{f_{bl}} = \frac{\tan \phi_{bl}}{3} \sqrt{\frac{\sigma_m}{f_{bl}}} \leq \frac{c_{bl}}{f_{bl}} \bigg|_{\frac{\sigma_m}{f_{bl}}=1} \quad (4.16)$$

$$\phi_{bl} = \phi_i - \frac{\sigma_m}{f_{bl}} \geq \phi_f = \phi_{bl} \Big|_{\frac{I_1}{f_{bl}}=1} \quad (4.17)$$

Burada σ_m ortalama gerilme değeridir ($= \frac{I_1}{3} = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/3$) ile hesaplanmaktadır.

ϕ_i ve ϕ_f değerleri ise başlangıç ve bitiş sürtünme açıları değerleridir. Bir başka deyişle bağıntılar, yükleme altında içsel sürtünme açısının değişimini dikkate almaktadır. ϕ_i tuğla elemanlar için yaklaşık olarak $\frac{\pi}{3}$ alınabilir. c_{bl} , tuğla elemanlarda kohezyonu, ϕ_{bl} ise tuğla yüzeylerindeki içsel sürtünme açısını, f_{bl} ise tuğla elemanların basınç dayanımını ifade etmektedir[65].

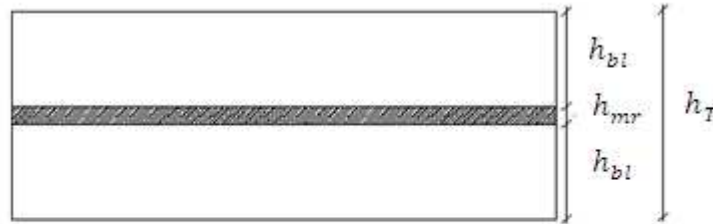
İlk olarak LP sargılı yığma kolonlar için bu tür bir modelleme çalışması yapılmıştır [65]. Ancak yığma duvarlar, yığma kolonlara oranla daha düşük basınç yükleri taşımakta ve etkisinde kalmaktadır. Yığma duvarların davranışlarını belirleyen gerilme bölgesinin irdelenmesi gerekmektedir. Ayrıca yığma kolonlardaki sargılama biçimi tektir sadece sargı kalınlığı değişmektedir. Bu nedenle, LP ile sargılanmış duvarların karşılıklı ve yanal yüzeylerinin tamamına ve bu yüzeylere şeritler halinde aralıklarla yatay/düşey veya çapraz şekilde olan LP uygulamalarda kuşatma etkisi dikkate alınmalıdır. Tek yüzeylere yukarıda adı geçen şekilde LP uygulamalarında kuşatma etkisi dikkate alınırken, yük ve süneklik bakımından deneysel duvarlarla uyum sağlanamadığı için, kuşatma etkisi dikkate alınmamış, yığma duvarlar için geçerli olan (4.16) ve (4.17) bağıntılarındaki tuğla birimine ait parametreler dikkate alınarak yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde tam bir sargılamanın gerçekleşmediği şerit sargılamada da, duvarların davranışı üzerinde kuşatma etkisinin olmadığı analiz sonuçlarında görülmüş ve model duvarlarının bünyesel davranışları için tam bir sargılamanın gerçekleşmediği durumlarda (4.16) ve (4.17) bağıntılarındaki tuğla birimine ait parametreler kullanılmıştır. Kuşatma etkisinin dikkate alındığı durumlarda ise aşağıda (4.18) bağıntısı kullanılarak kuşatma gerilmesi belirlenmiştir:

$$f_l = \frac{2ntE_{frp}\varepsilon_{rup}}{D} = \frac{b+h}{bh}ntE_{frp}\varepsilon_{rup} \quad (4.18)$$

E_{frp} lifli polimer malzemenin elastisite modülünü, t lifli polimerin kalınlığını, ε_{rup} ise LP elemanın kopma, yırtılma birim deformasyonudur. (Köksal, ve Doran, [106]) çalışmalarında bu değer 0,008 alınabileceğini anlatmışlardır. b ve h değerleri ise duvarın genişliğini ve

kalınlığını ifade etmektedir, n sayısı ise LP elemanın duvar yüzeyine sarım sayısını, D ise dairesel kolonlarda kolon çapını ifade etmektedir [65].

Şekil 4,4'te, h_{mr} : harç yüksekliğini, h_{bl} tuğla yüksekliğini, h_T : ise iki sıra tuğla ve aradaki harcın toplam yüksekliğini ifade etmektedir. Maksimum birim şekil-değiştirme durumu aşağıda bağıntı (4.19)'da gösterilmiştir.



$$\varepsilon_{max} = \frac{h_{mr}}{2h_{bl} + h_{mr}} \quad h_T = 2h_{bl} + h_{mr}$$

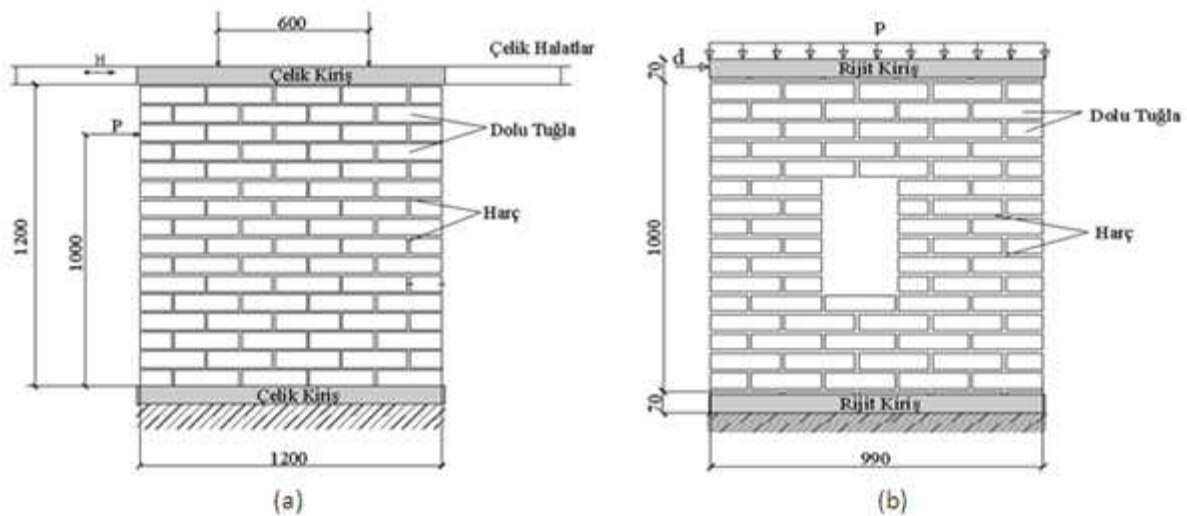
Şekil 4.4 Tuğla-Harç Etkileşimi ve Maksimum Şekil Değişimi Varsayımı

$$\varepsilon_{max} = \frac{h_{mr}}{2h_{bl} + h_{mr}} \quad (4.19)$$

Bu çalışmada duvarlarda düşey doğrultuda oluşabilecek en büyük çatlak genişliğinin harç yüksekliğine eşit olduğu kabulü yapılmıştır [56]. Yığma duvarların nümerik çözümlemesinde analizin sonlandırılması konusu tartışılabilir. Yığma duvar bileşenlerinin basınç, çekme gibi mekanik özelliklerine bağlı olarak duvar gerilme veya şekil değiştirme değerleri deneysel verilerden alınmış basınç veya çekme mukaveti değerlerine ulaştığında analizlerin sonlandırılması kabul edilebilir. Çoğu zaman göçme bazen akmayı, bazen çatlama oluştuğu anı, taşıma kapasitesine ulaşmayı, fazla deformasyon yapmayı da ifade edebilir. Yukarıda adı geçen çatlama, akma, fazla deformasyon yapabilme özellikleri de göz önünde bulundurularak analizler sonlandırılabilir. Örneğin LP ile güçlendirilmiş yığma duvarların nümerik analizinde, analizin sonlandırıldığı durum LP elemanın çekme gerilmesi ve elastisite modülüne bağlı şekil değiştirme değerini yakaladığı durum olabilir. Bu tez çalışmasında da LP ile güçlendirilmiş duvarlarda LP kopma birim şekil değiştirme değerine bağlı, yalın duvarlarda ise bağıntı (4.19)'a göre analizlerin sonlandırılması gerçekleştirilecektir. Ancak, LP kopma birim şekil değiştirme değerine ulaştığı zaman duvar tamamen taşıyıcılık özelliğini kaybetmiştir diye bir tanımlamanın da yapılması doğru olmayabilir. LP kopma durumunu yakaladıktan sonra ve laboratuvar ortamında LP elemanda kopma /yırılma veya yüzeyden

ayırışma gibi durumlarda bile bazen yığma yapı ayakta kalabilmekte ve belli süreliğine de olsa taşıyıcılık özelliklerini sürdürebilmektedir. Sadece, LP sargının duvarı bir arada, bir bütün olarak tutarak plastiklik özelliği kazandırdığı düşünülebilir. LP sargının koptuğu durumdan sonra ayakta kalan yığma duvarın yük etkisi devam ettiği sürece, bu kuvvete karşı fazla davranış gösteremeyeceği ve belli süreden sonra taşıyıcılığını kaybettiğini de söylemek mümkündür. Özellikle, tam bir sargılamanın söz konusu olduğu durumların bu açıdan da değerlendirilmesi daha doğru olacaktır. Ayrıca duvarların boyutları kolonlardan çok daha büyüktür, sürtünme kuvvetlerinin işlevini devam ettirmesi durumunda tam bir göçme gerçekleşmeyecektir. O nedenle maksimum şekil değişimi yaklaşımı bu sürtünme kuvvetlerinin bitmesi anlamına da geleceğinden göçme/kırılma için daha kapsayıcı bir yaklaşım sunmaktadır.

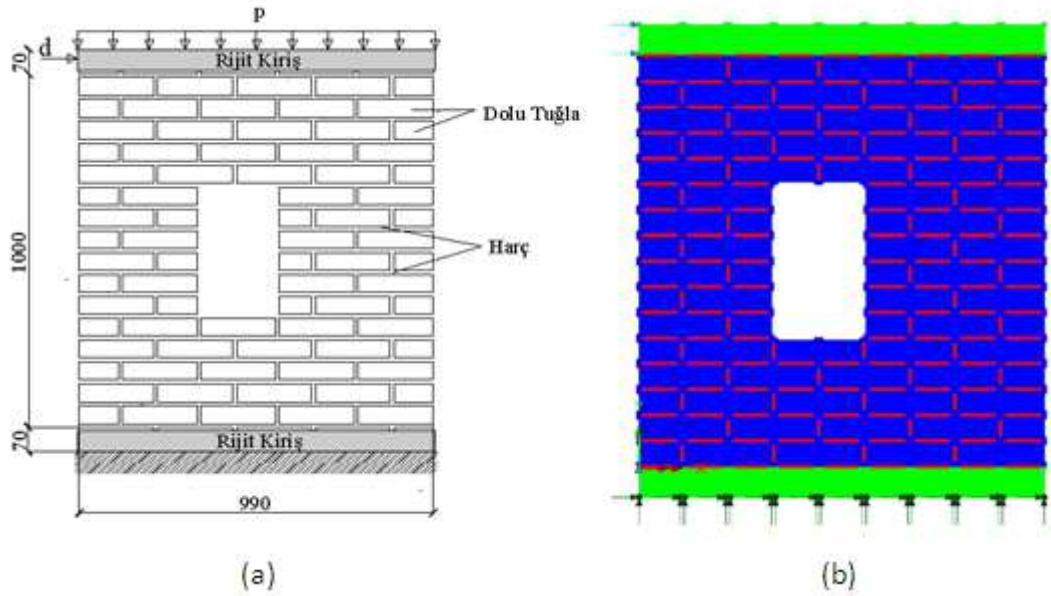
Türkiye’de bina adedi açısından bakıldığında en çok olarak kullanılan yapılar yığma yapılardır. Maliyetinin az olmasından dolayı özellikle kırsal kesimlerde tercih edilmektedir. Sadece statik yükler etkisinde değil de, deprem ve dinamik yüklerin de etki etmesi durumu incelendiğinde gerçeğe yakın davranışı belirlemek üzerine, özellikle düşey yük ve yatay yüklerin birlikte düşünüldüğü deneysel ve nümerik çalışma kısıtlı sayıdadır. Düşey ve yatay yükün birlikte etkilediği başlıca duvar örnekleri, literatürde (Eindhoven deneyleri, ElGawady, Stratford, Capozucca deneyleridir [1, 9, 10, 18-20]). Bu deneylerde düşey ve yatay yükler altında duvar elemanlarının kesme kuvveti ile yatay yük- yerdeğiştirmesi arasındaki ilişki ve duvarın yük taşıma kapasitesi belirlenmektedir. Şekil 4,5’de literatürde bulunan ve bu çalışma kapsamında da incelenen deneysel duvar örnekleri şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.5 Literatürde Bulunan Yığma Duvar Örnekleri [1,9]

4.4 Deney Duvarı No.1

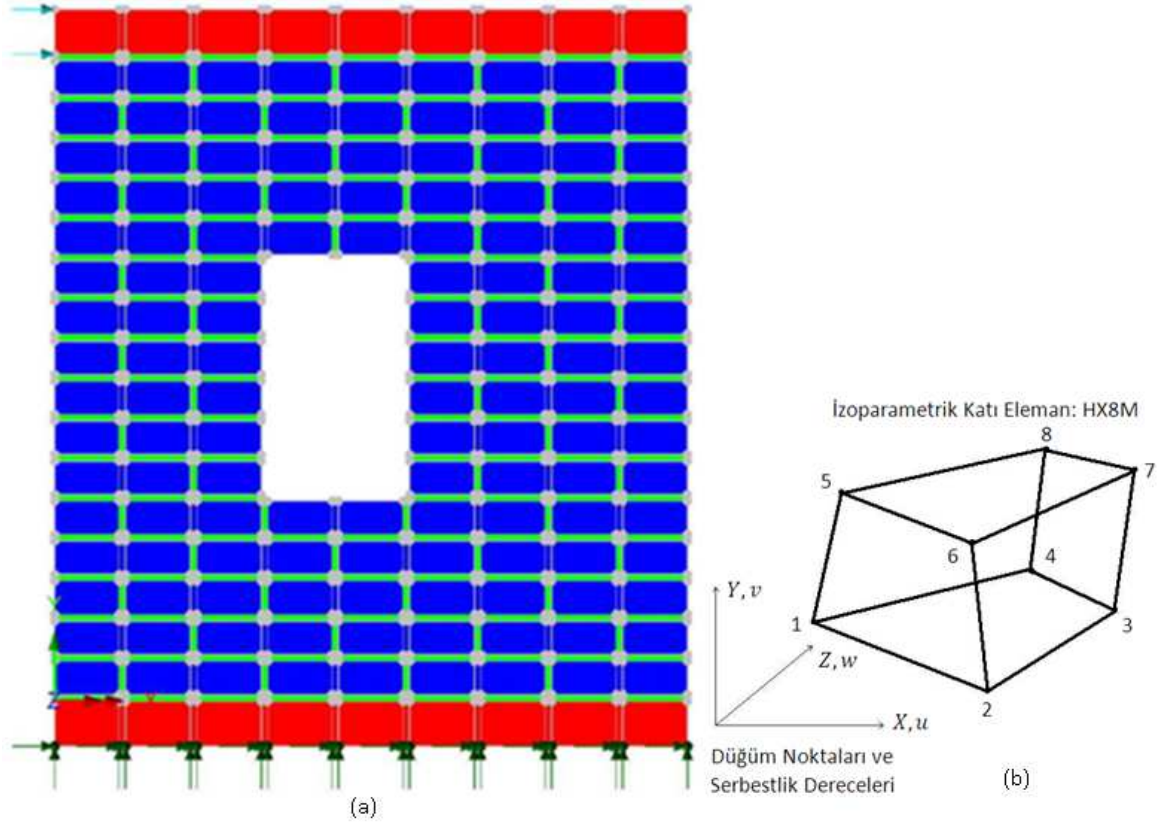
(Lourenço, [1]), çalışmasında tuğla ölçüleri $210 \times 52 \times 100 \text{ mm}^3$ olan, bağlayıcı malzeme olarak 10 mm harç kullanılan ve toplam duvar boyutu $990 \times 1000 \times 100 \text{ mm}^3$ olan dolu ve boşluklu duvar paneller üzerinde bir dizi deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Deney duvarının orta bölgesinde düşey sıralamada 6 adet tuğla kadar boşluk bırakılmıştır. Tuğlalar 16 tam sıra ve taban ile üste konulan 2 yarım tuğla olarak toplam 18 sıra şeklinde, alta ve üste konulan çelik I profil kiriş içine oturtularak inşa edilmiştir. Duvarın üst kısmına yerleştirilen çelik profilin asıl amacı düşey yüklerin düzgün yayılmasını sağlamaktır. Deney duvarının fiziksel durumu Şekil 4.6 (a) ve modelin nümerik durumu Şekil 4.6 (b)'de verilmiştir.



Şekil 4.6 (a) Deney Duvarı No.1 Fiziksel Durumu [1] (b) Nümerik Model

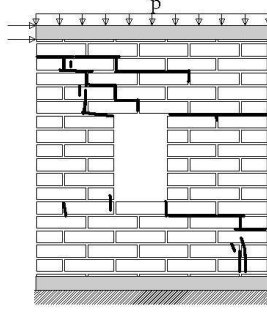
Bu çalışma kapsamında, J2G kodlu boşluklu duvarın, fiziksel deney koşulları da dikkate alınacak şekilde Bölüm 3'de verilen yaklaşım doğrultusunda nümerik simülasyonu 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik parametreler tuğla basınç dayanımı $f_{bl} = 24 \text{ MPa}$, harç basınç dayanımı $f_{mr} = 2,3 \text{ MPa}$, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak deneysel verilerden alınmıştır [1]. Boşluklu deney duvarı önce düşeyde 0,30 MPa kadar düzgün yayılı yükle yüklendikten sonra düşey yük sabit tutularak, yatay yükler kademeli olarak artırılmıştır. Önerilen nümerik modelde, çelik profil, tuğla ve harç birimler, 3 boyutlu, 8 düğüm noktalı izoparametrik katı elemanlar ile modellenmiş ve 4084 düğüm noktasına sahip toplamda 535 katı eleman kullanılmıştır. Bunların 187 adedi tuğla, 315 adedi harç, 34 adedi ise duvarın alt ve üst kısmına konulan I profil çelik elemana ait malzeme

özelliklerini içermektedir. I profil çelik elemanlar için malzeme doğrusal elastik kabul edilmiş, tuğla ve harç elemanlara ait malzeme özellikleri ise elasto- plastik malzeme modelleri yardımıyla tanımlanmıştır. Duvarların çelik üzerine oturduğu taban kesitlerinde mesnetlenme şekli ankastre olarak kabul edilmiştir. Sonlu eleman ağı Şekil 4.7a'da, kullanılan katı elemana ait geometri ve düğüm noktası serbestlikleri şematik olarak Şekil 4.7b'de verilmiştir.



Şekil 4.7 (a) Deney Duvarı No.1 Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66]

Bölüm 3'de verilmiş olan bünyesel bağıntılar kullanılarak harç ve tuğla için Drucker- Prager kriterinin ihtiyaç duyduğu kohezyon ve içsel sürtünme açıları elde edilmiştir. Elastisite modülleri, Poisson oranları ve plastisite özellikli olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri doğrusal olmayan sonlu elemanlar LUSAS'da [66] plastik analiz modülünde tanımlanmıştır. Tabanda ankastre mesnetlenmeyi, üst tarafta ise düşey yükün düzgün dağılmasını sağlayan çelik malzeme doğrusal elastik kabul edilmiştir. Anılan deneysel çalışmada, taşıma gücüne ulaşan duvara ait mekanizma durumu ve duvarda oluşan çatlakların dağılımı şematik olarak Şekil 4.8'de verilmiştir[1].



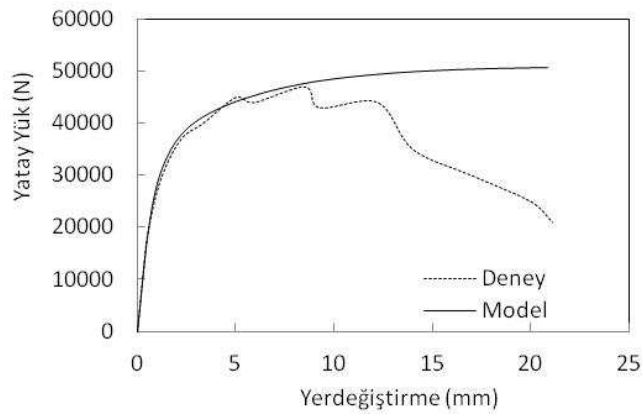
Şekil 4.8 Deney Duvarı No.1'e Uygulanan Yükler ve Çatlak Oluşumu [1]

Önerilen nümerik modelde tuğlanın basınç dayanımı ile düşey basınç gerilmelerine bağlı olarak tuğla birimler için içsel sürtünme açısı (4.17) bağıntısı ile $\phi_{bl} = 59,82^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Tuğla elemanlardaki kohezyon değeri (4.16) bağıntısı ile $c_{bl} = 0,88$ MPa olarak bulunmuştur. Tuğla birimler için elastisite modülü ise $E_{bl} = 7200$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak alınmıştır. Harç birimler için içsel sürtünme açısı 4.15 bağıntısı ile $\phi_{mr} = 3,49^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Harç birimler için kohezyon değeri ise 4.14 bağıntısı ile $c_{mr} = 2,05$ MPa olarak bulunmuştur. Elde edilen değerler Çizelge 4.1 de verilmektedir.

Çizelge 4.1 Deney Duvarı No.1 Modelinin Mekanik Özellikleri

Tuğla						Harç				
Duvar adı	E_{bl} (MPa)	f_{bl} (MPa)	Poisson Oranı	c_{bl} (MPa)	$\phi_{bl}(^\circ)$	f_{mr} (MPa)	E_{mr} (MPa)	Poisson Oranı	c_{mr} (MPa)	$\phi_{mr}(^\circ)$
J2G	7200	24	0,20	0,88	59,82	2,3	1100	0,20	2,05	3,49

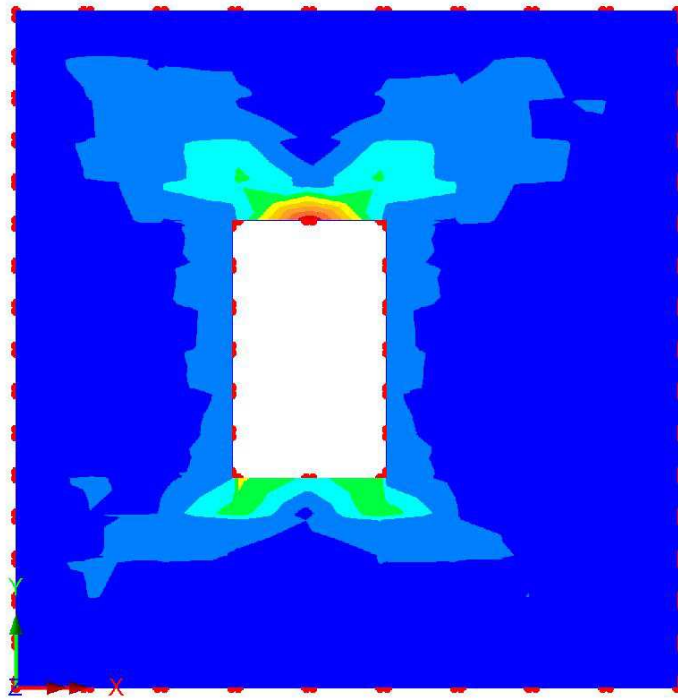
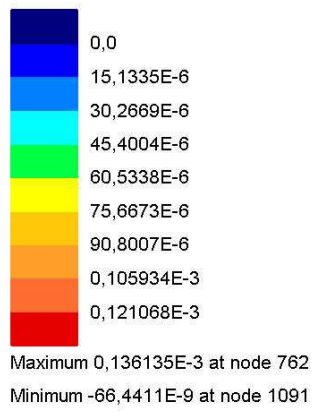
Analizin sonlandırıldığı an için tuğla- harç etkileşimi dikkate alınarak Bölüm 4.3'te bağıntı (4.19) ile maksimum birim şekil değiştirme, $\varepsilon_{max} = 10/(2 * 52 + 10) = 0,087$ olarak belirlenebilir. Şekil 4.9'da duvarın fiziksel durumuna ve nümerik modeline ait yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.9 Deney Duvarı No.1 Yatay Yük-Yerdeğiştirme Eğrisi

Plastik şekil değiştirmeler, gerilmeler açısından kritik kesimler olan boşluğun alt ve üst kesimlerinde yoğunlaşmaktadır. Fiziksel modelde yatay yük etkisinde çatlaklar yükün uygulandığı bölgeden itibaren diyagonal doğrultuda mesnet kesimine doğru yayılmaktadır. Nümerik modelde yatay yükün % 94 değerine ulaştığı anda (47,79 kN/50,65 kN), plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı bölgelerin diyagonal doğrultuda olduğu ve fiziksel model ile son derece uyumlu olduğu Şekil 4.11’den görülebilir.

Loadcase: 1:Increment 1
Results file: J2G.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



Şekil 4.10 Sadece Düşey Yükün Uygulandığı Durumda Deney Duvarı No.1’de Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımı

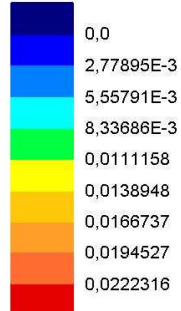
Şekil 4.11’de ise ileri seviyede yatay yük uygulandığında oluşabilecek şekil değiştirme dağılımları diyagonal doğrultuda şekillenmektedir. Yatay yük duvarın sol üst yüzeyinin tepe noktalarından uygulandığı için boşluk bulunan J2G duvarında boşluk kısmının sol tarafında uygulanan yük etkisinde fazla şekil değişimi gösterdiğini söylemek mümkündür. Asal şekil değiştirmenin 0,087 değerine ulaştığı ve analizin sonlandırıldığı ana ait şekil değiştirmeler Şekil 4.12’de verilmiştir.

Loadcase: 46:Increment 46 Load Factor = 2.46303

Results file: J2G.mys

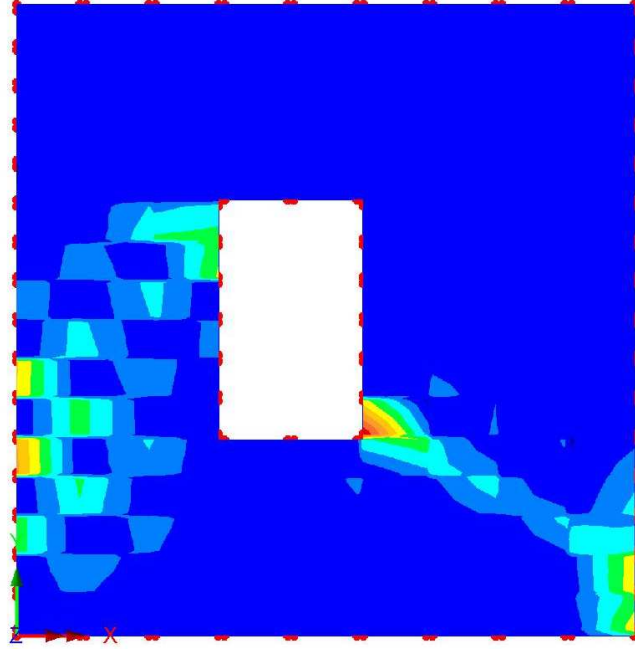
Entity: Strain - Solids

Component: E1



Maximum 0,024609 at node 362

Minimum -0,401627E-3 at node 416



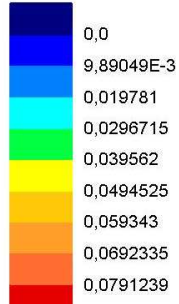
Şekil 4.11 Yatay Yükün Göçme Yükünün % 94 Olması Durumunda Deney Duvarı No.1 Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımı

Loadcase: 79:Increment 79 Load Factor = 2.54570

Results file: J2G.mys

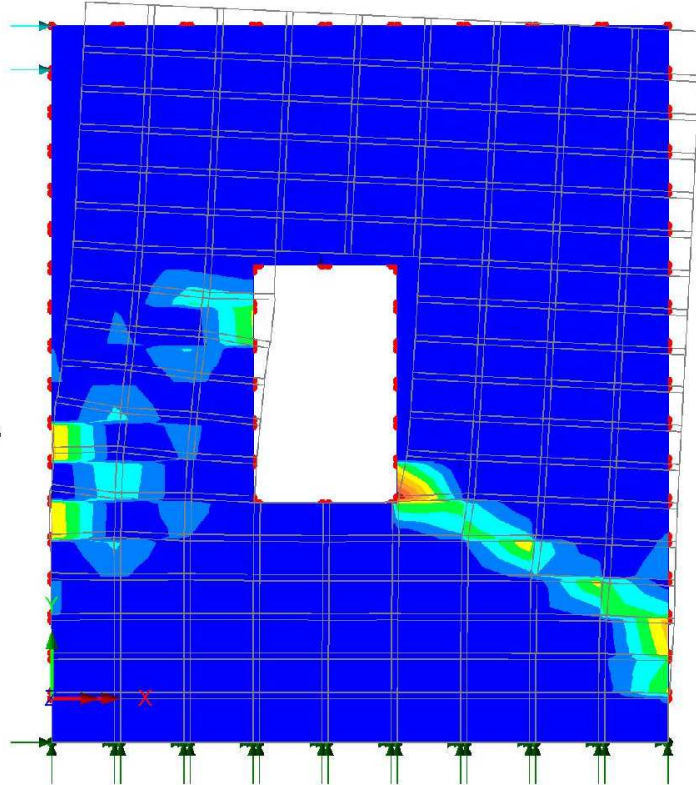
Entity: Strain - Solids

Component: E1



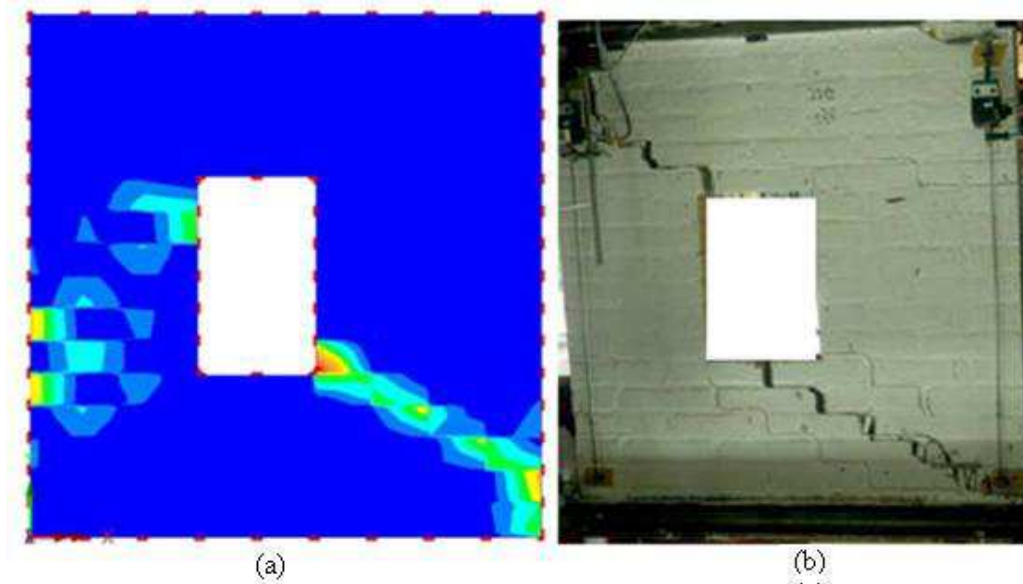
Maximum 0,0880677 at node 361

Minimum -0,946751E-3 at node 415



Şekil 4.12 Deney Duvarı No.1’de Maksimum Şekil Değişiminin Olduğu Durum

Şekil 4.13’de ise mekanizma durumuna ait fiziksel model ile nümerik model karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Her iki modelin de uyumlu olması, önerilen bünyesel modelin doğruluk derecesi hakkında bir fikir vermektedir.

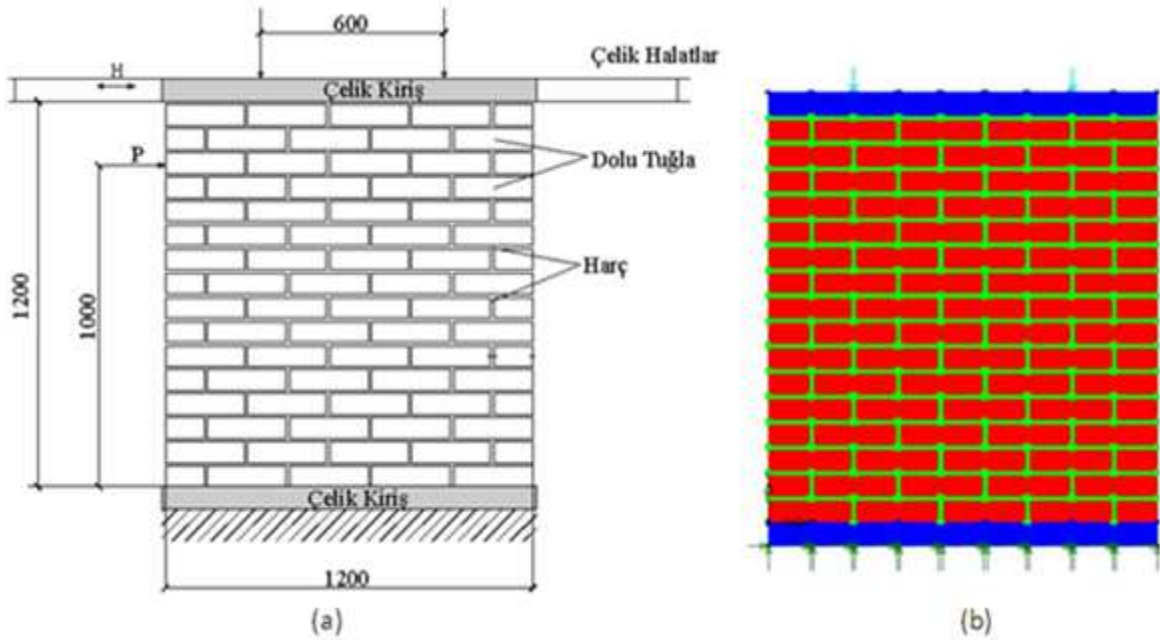


Şekil 4.13 Deney Duvarı No.1 (a) Nümerik Modelde Oluşan Asal Şekil Değişirme (b) Deney Duvarında Çatlak Oluşumu [107]

4.5 Deney Duvarı No.2

(Stratford, vd. [9]) çalışmasında tuğla ölçüleri $228 \times 65 \times 60 \text{ mm}^3$ olan, bağlayıcı malzeme olarak 10 mm harç kullanılan ve toplam duvar boyutu $1200 \times 1200 \times 60 \text{ mm}^3$ olan kil/tuğla ve betondan üretilen paneller üzerinde bir dizi deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, altı adet yığma panelin davranışını düşey ve yatay yükleme etkisinde incelemişlerdir. Bu panellerden üç tanesi kil/tuğla birimlerden diğer üç tanesi ise beton bloklardan yapılmıştır. Her üç deney panelinden bir tanesi güçlendirilmeden yalın olarak test edilmiş, diğer ikisi ise lifli polimerle güçlendirildikten sonra düşey ve yatay yük etkisinde incelenmiştir. Tek yüzeye düşey ve yatay harç derzleri doğrultusunda olacak biçimde her iki doğrultuda LP uygulaması yapılmıştır. LP tabandan ve duvar üst bölgesinden duvara ankrajlanmıştır, arta kalan kısımları ise duvarın alt ve üst kısımda döndürülerek duvar kalınlığı boyunca duvara uygulanmıştır. Deneysel duvar modeli tabanda çelik kiriş üzerine konularak inşa edilmiştir, duvar üst kısmına çelik kiriş konularak düşey yük iki noktadan etki ettirilerek, çelik halatlarla tutulmuş rijit çelik kiriş aracılığı ile deney duvarına iletilmiştir. Tek yüzeye her iki doğrultuda (düşey ve yatay harç derzleri doğrultusunda) LP uygulaması yapılmıştır. LP tek

yüzeye uygulandığı için kuşatma etkisi dikkate alınmamıştır. Yatay yük duvar tabanından 1000 mm yukarıdan etki ettirilmiştir. Kil/tuğla birimlerden üretilen duvarlar (Clay), betondan üretilenler ise (Concrete) olarak isimlendirilmişlerdir. Yalın duvarda (Clay 1) oluşan hasar duvar taban bölgesine yakın kısımlarda tuğla harç yüzey aralarında oluşmuştur. Betondan üretilen (Concrete 1) duvarında ise oluşan hasar yatay yükün uygulandığı yerden tabana doğru olarak çapraz şekildedir. Güçlendirilen kil/tuğla ve beton duvarlar (Clay 2-3 ve Concrete 2-3), yalın kil/tuğla ve beton duvarların (Clay 1, Concrete 1) göçmeye başladığı yük değerine kadar yalın duvarlara benzer davranış göstermişlerdir. LP sargısının etkisi bu değerden sonra kendini göstermeye başlamış ve özellikle yük taşıma kapasitesinde etkili olmuştur. Güçlendirilmiş duvarların LP sargı uygulanmamış yüzeyindeki kırılma biçimi tek yönlü ve çapraz doğrultuda oluşmuştur. Duvarın üst kısmına konulan çelik kirişin amacı düşey yüklerin düzgün şekilde yayılmasını sağlamaktır. Deney duvarının fiziksel durumu Şekil 4.14(a) ve modelin nümerik durumu Şekil 4.14 (b)'de verilmiştir. Çizelge 4,2'de ise geometrik ölçüler ve göçme yük değerleri verilmektedir [9].



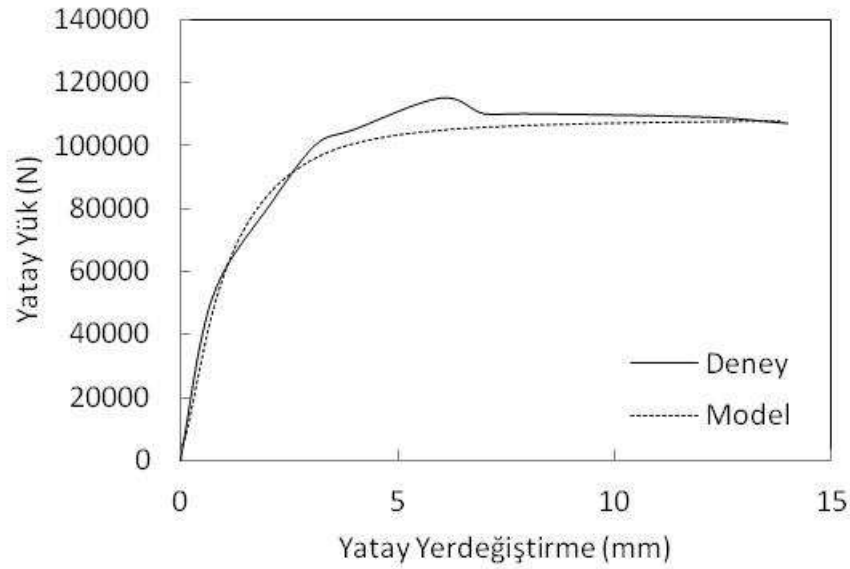
Şekil 4.14 Clay 1 Duvarı (a) Fiziksel Model [9] (b) Nümerik Model

Çizelge 4.2 Stratford vd. Deneyleri Geometrik ve Yük Değerleri

Duvar isimleri	Duvar boyutları (mm)	Eleman boyutu (mm)	Ugulanan düşey yük (kN)	Düşey yükte gerilme (Mpa)	Max. yatay yükler (Deneysel)	Max. yatay yükler (Nümerik)
Clay 1	1200x1200x60	228x65x60	100	1,38	115	100
Clay 2	1200x1200x60	228x65x60	100	1,38	195	195
Clay 3	1200x1200x60	228x65x60	100	1,38	190	195
Concrete 1	1200x1200x60	228x65x60	100	1,38	80	90,83
Concrete 2	1200x1200x60	228x65x60	100	1,38	110	129,13
Concrete 3	1200x1200x60	228x65x60	100	1,38	130	129,13

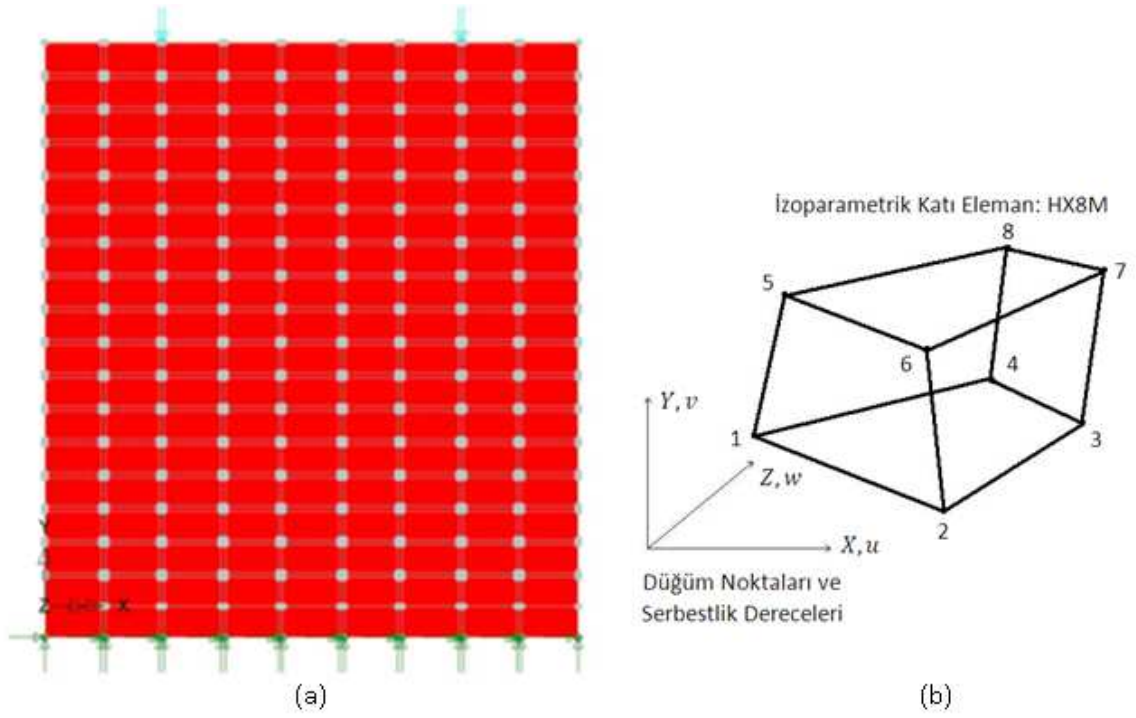
Altı (6) adet duvarın üst kısmına konulan çelik kiriş üzerine 2 noktadan yük ettirilerek 100 kN değerine ulaştıktan sonra yatay yük kademeli olarak uygulanmıştır. Bütün duvarlara düşeyde 100 kN kadar yük uygulanmıştır. 100 kN değeri MPa cinsinden 1,38 MPa olarak Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bu değer düşey yükün duvar kesit alanına oranı olarak elde edilmektedir. Bu çalışma kapsamında, (Clay 1-2-3) ve (Concrete 1-2-3) kodlu duvarların fiziksel deney koşulları da dikkate alınacak şekilde Bölüm 3’te verilen yaklaşım doğrultusunda nümerik simülasyonu 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik parametreler kil/tuğla duvarlarda tuğla basınç dayanımı $f_{bt} = 62$ MPa, harç basınç dayanımı $f_{mr} = 11$ MPa, beton duvarlar için blok basınç dayanımı $f_{bt} = 36$ MPa, harç basınç dayanımı ise $f_{mr} = 5,5$ MPa olarak verilmiştir. Poisson oranı değeri $\mu = 0,20$ olarak alınmıştır. Duvar üst kısmına ve duvar tabanına konulan çelik kiriş ise doğrusal elastik özellikli tanımlanarak, elastisite modülü $E = 210000$ MPa, Poisson oranı değeri $\mu = 0,30$ olarak alınmıştır. Önerilen nümerik modelde, çelik profil, tuğla/beton ve harç birimler 3 boyutlu 8 düğüm noktalı izoparametrik katı elemanlar ile modellenmiş ve 4301 düğüm noktasına sahip, toplamda 578 katı eleman kullanılmıştır. Bunların 208 adedi tuğla, 336 adedi harç, 34 adedi ise alt ve üste konulan çelik elemanlara ait malzeme özelliklerini içermektedir. Rijit çelik profil için malzeme doğrusal elastik kabul edilmiş, tuğla ve harç elemanlara ait malzeme özellikleri ise elasto-plastik malzeme modelleri yardımıyla tanımlanmıştır. Duvarların rijit çelik üzerine oturduğu taban kesitlerinde mesnetlenme şekli ankastre olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.15’de kil/tuğla birimlerden üretilen yalın duvar için yatay yük-yerdeğiştirme eğrisi verilmiştir. Analizin sonlandırıldığı an için tuğla-harç etkileşimi dikkate alınarak Bölüm 4.3’te bağıntı 4.19 ile

maksimum birim şekil değiştirme, $\varepsilon_{max} = 10/(2 * 65 + 10) = 0,071$ olarak belirlenebilir. Bu değere göre yük- yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4.15 Clay 1 Duvarı Yük-Yerdeğiştirme Eğrisi

Önerilen nümerik modelde tuğlanın basınç dayanımı ile düşey basınç gerilmelerine bağlı olarak tuğla birimler için içsel sürtünme açısı 4.17 bağıntısı ile $\phi_{bl} = 59,98^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Tuğla elemanlardaki kohezyon değeri 4.16 bağıntısı ile $c_{bl} = 3,04$ MPa olarak bulunmuştur. Tuğla birimler için elastisite modülü ise $E_{bl} = 18600$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak alınmıştır. Harç birimler için içsel sürtünme açısı 4.15 bağıntısı ile $\phi_{mr} = 16,709^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Harç elemanlardaki kohezyon değeri 4.14 bağıntısı ile $c_{mr} = 3,269$ MPa olarak bulunmuştur. Elde edilen bu değerler Çizelge 4.3’ de verilmektedir. Tek yüzeye LP sargısı yapıldığı için kuşatma etkisi bu duvarlarda dikkate alınmamıştır dolayısı ile, tuğla birimlerin kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri yalın ve güçlendirilmiş duvarlarda aynı değerler seçilmiştir. Sonlu eleman ağı Şekil 4.16 a’da, kullanılan katı elemana ait geometri ve düğüm noktası serbestlikleri şematik olarak Şekil 4.16 b’de verilmiştir.

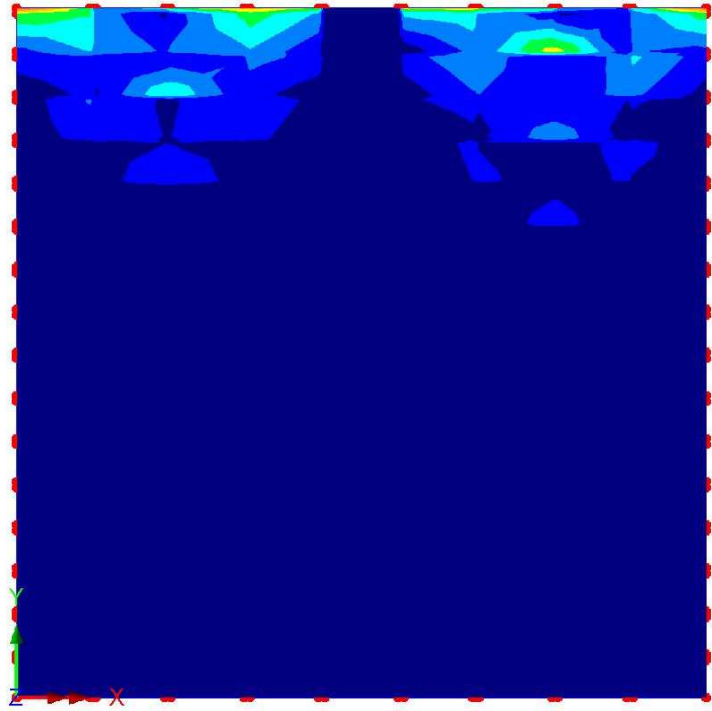
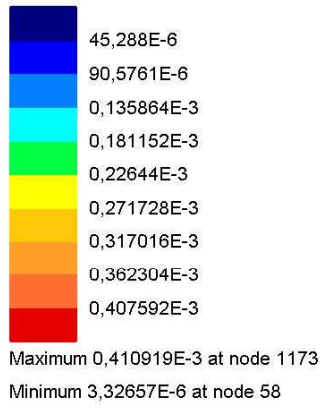


Şekil 4.16 Clay 1 Duvarı (a) Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66]

Çizelge 4.3 Stratford, vd. Nümerik Model Mekanik Parametreleri

Tuğla						Harç				
Duvar adı	E_{bl} (MPa)	f_{bl} (MPa)	Poisson Oranı	c_{bl} (MPa)	$\phi_{bl}(^{\circ})$	f_{mr} (MPa)	E_{mr} (MPa)	Poisson Oranı	c_{mr} (MPa)	$\phi_{mr}(^{\circ})$
Clay 1	18600	62	0,2	3,04	59,98	11	3250	0,2	3,269	16,709
Clay 2	18600	62	0,2	3,04	59,98	11	3250	0,2	3,269	16,709
Clay 3	18600	62	0,2	3,04	59,98	11	3250	0,2	3,269	16,709
Concrete 1	30000	36	0,2	2,29	59,45	5,5	1500	0,2	2,736	8,354
Concrete 2	30000	36	0,2	2,29	59,45	5,5	1500	0,2	2,736	8,354
Concrete 3	30000	36	0,2	2,29	59,45	5,5	1500	0,2	2,736	8,354

Loadcase: 1:Increment 1
Results file: CLAY 1.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



Şekil 4.17 Sadece Düşey Yük Etkidiği Durumda Clay 1 Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımı

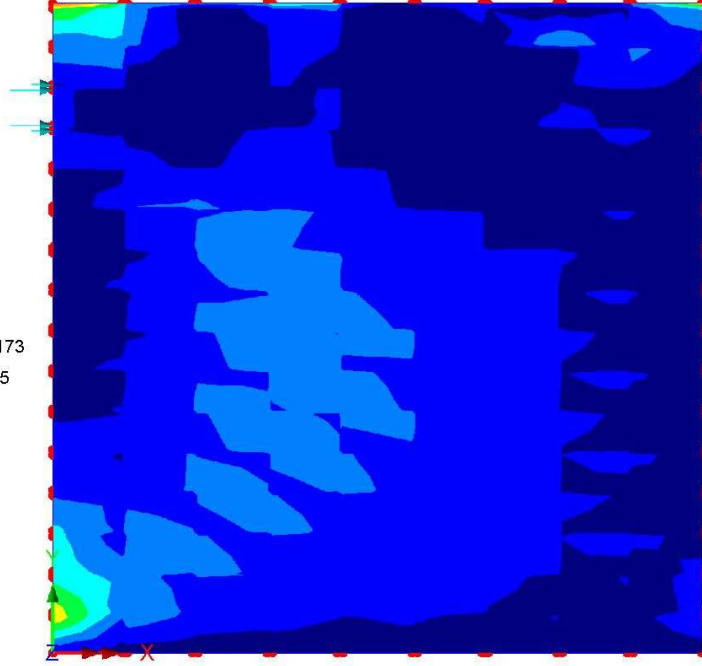
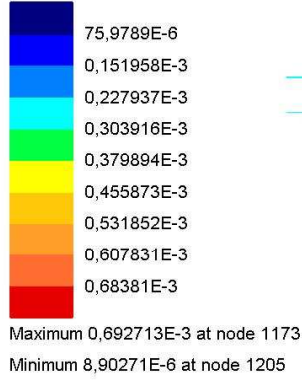
Şekil 4.17’de sadece düşey yükün etkidiği durumda oluşan şekil değiştirme dağılımları verilmektedir. Şekil 4.18’de ise yatay yükün göçme yükünün % 31 değerine ulaştığı durumda (33,77 kN/107,800 kN) oluşan şekil değiştirme dağılımları verilmektedir. Şekil 4.19’da ise ileri seviyede yük uygulanması durumunda oluşan şekil değiştirme durumu verilmektedir [66]. Nümerik modelde yatay yükün % 99 değerine ulaştığı anda (107,018kN/107,800 kN), plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı bölgelerin duvar panelinin taban bölgesinde olduğu ve fiziksel modelle ile de uyumluluğu Şekil 4.19’dan da görülebilir. Bu şekil değiştirme dağılımlarına bakıldığında yatay yükün etkimesi ile şekil değiştirme dağılımları duvar taban bölgesine doğru yayılmaktadır. Asal şekil değiştirmenin 0,071 değerine ulaştığı ve analizin sonlandırıldığı ana ait şekil değiştirmeler Şekil 4.20’de verilmektedir. Şekil 4.21’de ise mekanizma durumuna ait fiziksel model ile nümerik model karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Her iki modelinde uyumlu olması önerilen bünyesel modelin doğruluğu hakkında fikir vermektedir.

Loadcase: 5:Increment 5 Load Factor = 1.19821

Results file: CLAY 1.mys

Entity: Strain - Solids

Component: E1



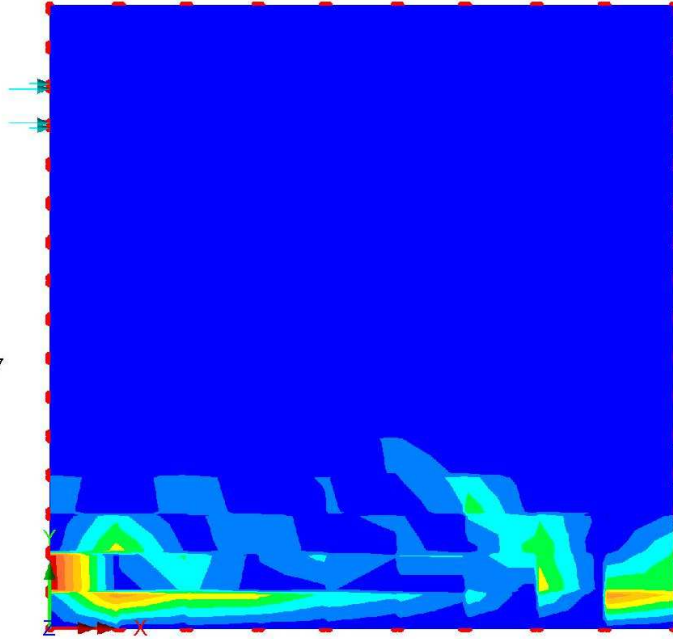
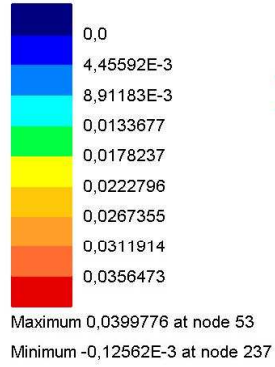
Şekil 4.18 Yatay Yükün Göçme Yükünün % 31 Değerinde Clay 1 Duvarında Oluşan Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 40:Increment 40 Load Factor = 5.34393

Results file: CLAY 1.mys

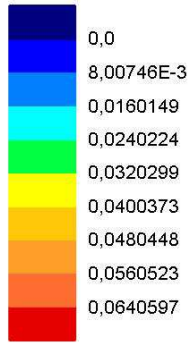
Entity: Strain - Solids

Component: E1

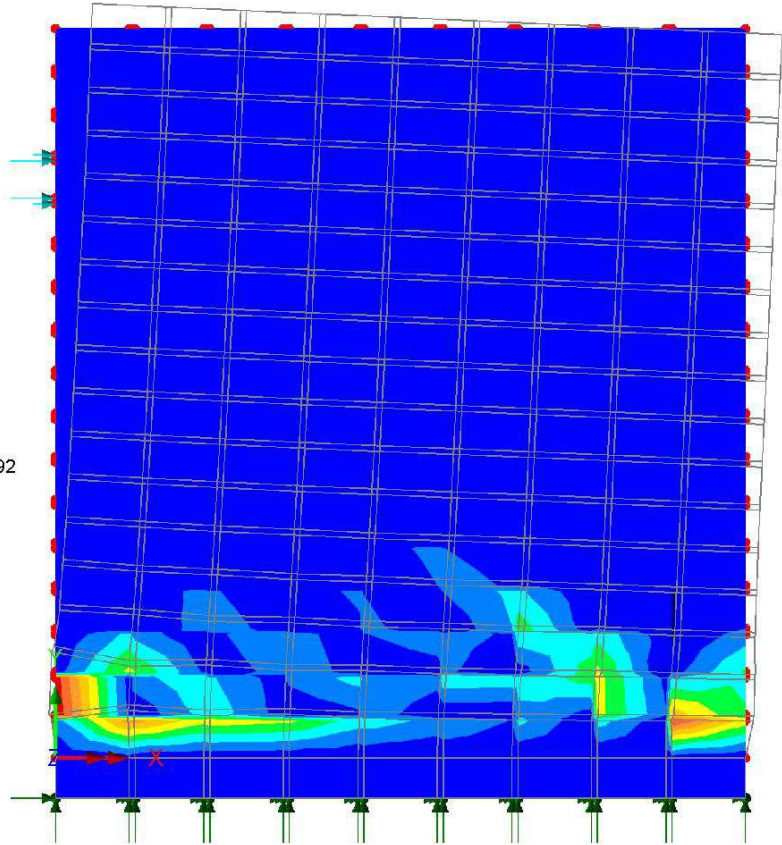


Şekil 4.19 Yatay Yükün Göçme Yükünün % 99 Değerinde Clay 1 Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 56:Increment 56 Load Factor = 5.39546
Results file: CLAY 1.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



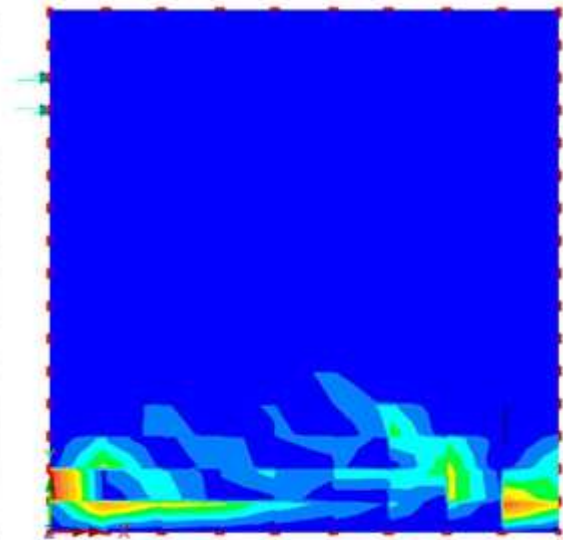
Maximum 0,0713015 at node 49
Minimum -0,765679E-3 at node 292



Şekil 4.20 Deforme Olmuş Clay 1 Duvarında Maksimum Asal Şekil Değiştirme Dağılımları



(a)

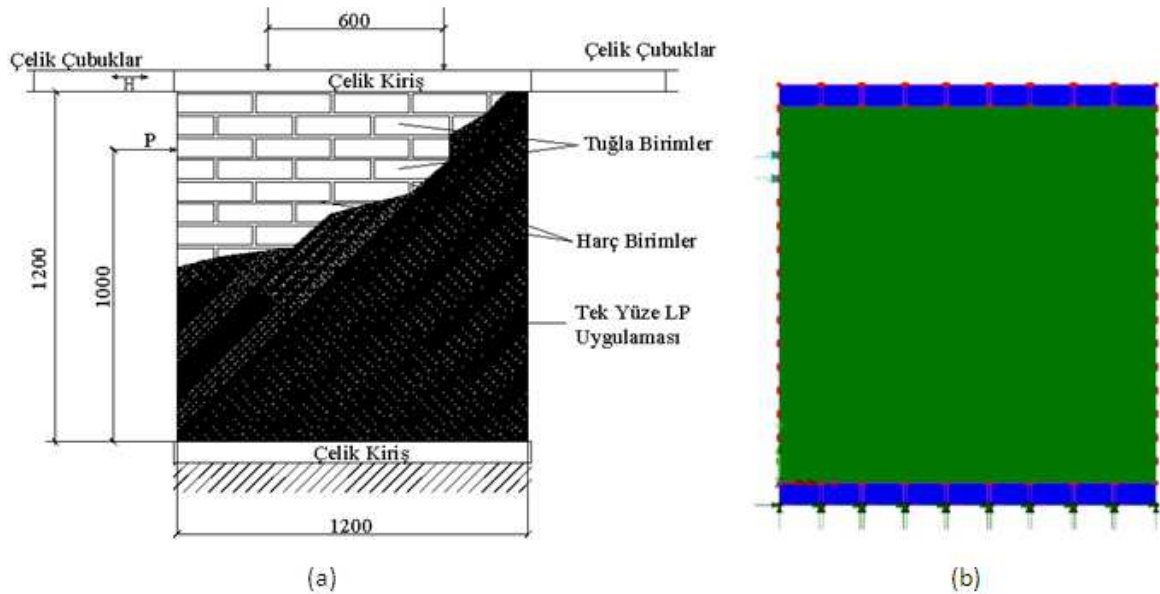


(b)

Şekil 4.21 Clay 1 Duvarı (a) Fiziksel Durumda Çatlak Oluşumu [9] (b) Nümerik Modelde Oluşan Şekil Değiştirme Dağılımları

LP ile güçlendirilmiş kil/tuğla malzemeden üretilmiş Clay 2 ve Clay 3 olarak isimlendirilen duvarlar da bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Clay 2 ve Clay 3 kodlu duvarlar geometrik,

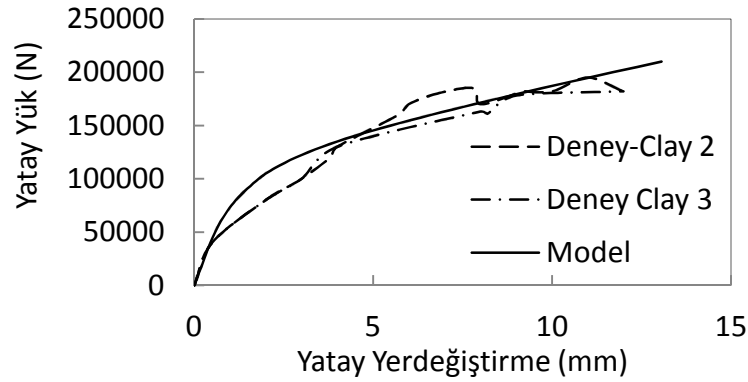
yükleme şekli ve mekanik özellikler bakımından yalın Clay 1 adlı duvarla aynı özelliklere sahiplerdir. Bu duvarlar LP ile tek yüzeyi güçlendirildikten sonra düşey ve yatayda kademeli olarak artımsal yük etkisi ile deneysel olarak test etmişlerdir. Fiziksel duvar LP elemanın duvar yüzeyinden kopması ile hasara uğramıştır. Bu tez kapsamında oluşturulan nümerik modelde LP elemana ait büyüklükler, çekme gerilmesi $f_t = 986$ MPa, ve elastisite modülü ise $E_{FRP} = 73300$ MPa, LP elemanın kalınlığı ise 0,15 mm olarak deneysel çalışmadan alınmıştır [9]. LP için malzeme özellikleri ortotrop tanımlanmıştır. LP elemanın kopma birim şekil değiştirme değeri çekme gerilmesinin elastisite modülüne bölünmesi ile 0,013 olarak hesapla bulunmuştur. Nümerik modellemede analiz LP elemanın asal şekil değiştirme değerinin 0,013 değerine ulaştığı durum yani LP elemanın koptuğu durumda sonlandırılmıştır. Analiz LP elemanın kopma değerinde sonlandırılmıştır. Şekil 4.22 (a)'da Clay 2-3 duvarının fiziksel durumu ve Şekil 4.22 (b)'de nümerik modeli karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.22 Tek Yüze LP Uygulanmış Clay 2-3 Duvarlarının (a) Fiziksel Durumu [9] (b) Nümerik Model

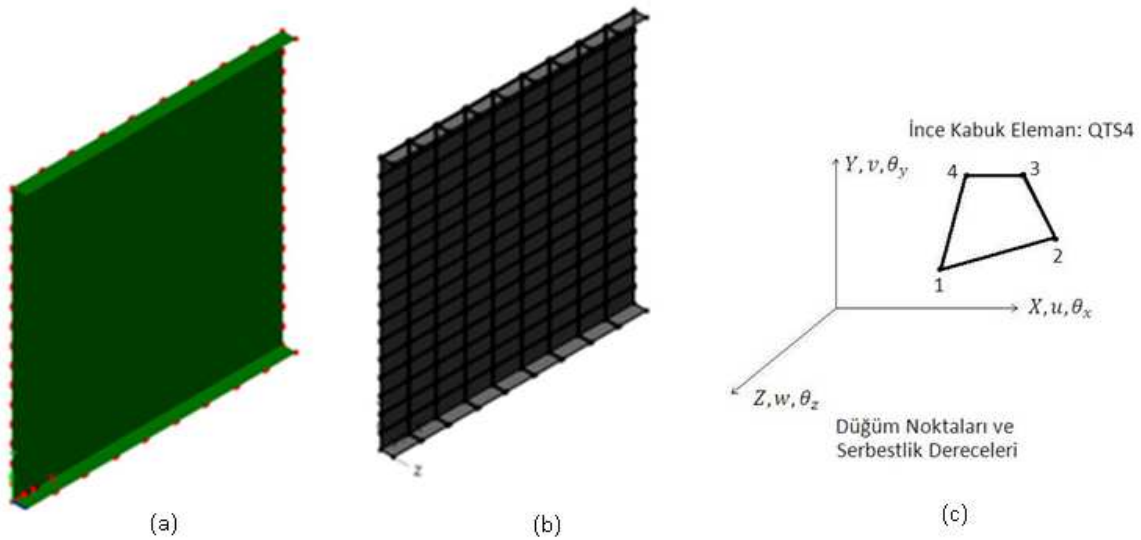
Deneysel çalışmalar irdelenirken kullanılan LP eleman tek yönde ve çift yönde uygulanış şekline göre x ve y doğrultularında elastisite modülleri değerleri ve x-y doğrultularında kayma modülü değeri hesaplanarak programa tanıtılmıştır. LP elemanın x-y doğrultusundaki Poisson oranı değeri $\mu = 0,30$ olarak alınmıştır.

Clay 2 ve Clay 3 olarak adlandırılan deneysel duvarlar Clay 1 duvarı ile aynı geometrik ve mekanik özelliklere sahip duvarlardır ve geometrik, yük değerleri, mekanik özellikleri Çizelge 4.2 ve 4.3'te verilmiştir. LP eleman üzerindeki asal şekil değiştirme dağılımının 0,013 değerine ulaştığı zaman analiz sonlandırılmıştır ve deneysel yük- yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.23'de verilmiştir. Yük- yerdeğiştirme açısından bakıldığında deney ve model eğrisi sonuç itibari ile birbirine uyumludur.



Şekil 4.23 Clay 2-3 Duvarlarının Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi

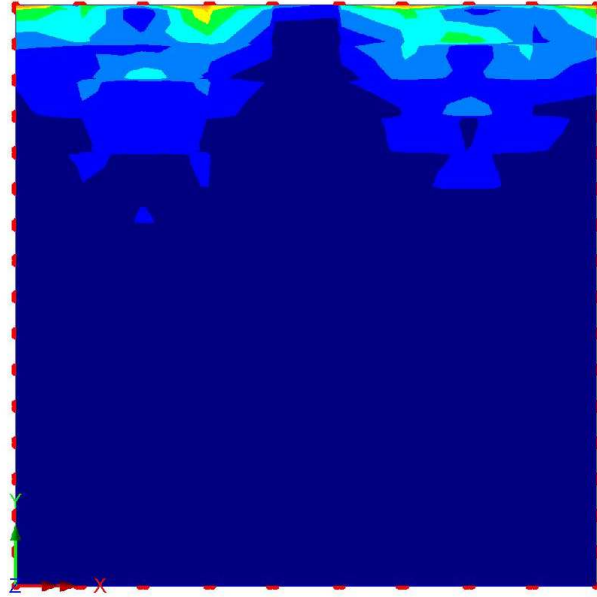
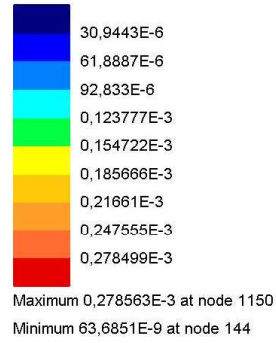
LP elemanın Clay 2-3 duvarına uygulanış biçimi, sonlu eleman ağı ve eleman tipi aşağıda Şekil 4.24 (a-b-c)'de verilmiştir.



Şekil 4.24 Clay 2-3 Duvarına Uygulanan (a) LP Nümerik Modeli (b) Sonlu Eleman Ağı (c) Sonlu Eleman Tipi [66]

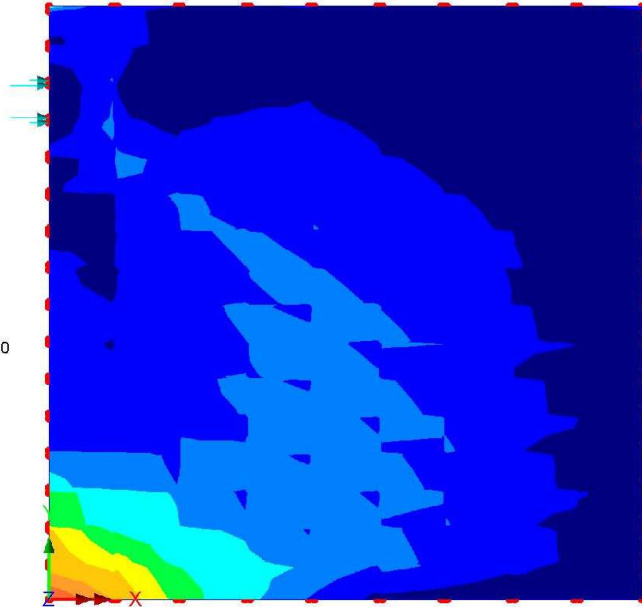
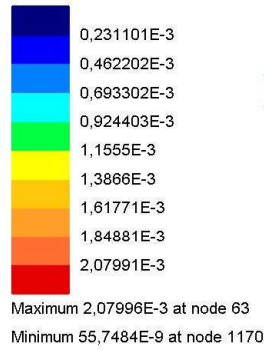
Sadece düşey yükün etkili olduğu durumda LP eleman üzerinde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.25'de gösterilmiştir.

Loadcase: 1:Increment 1
Results file: Clay 2.mys
Entity: Strain (middle) - Thick Shell
Component: E1



Şekil 4.25 Clay 2-3 Duvarında Sadece Düşey Yükün Etkidiği Durumda LP'de Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları

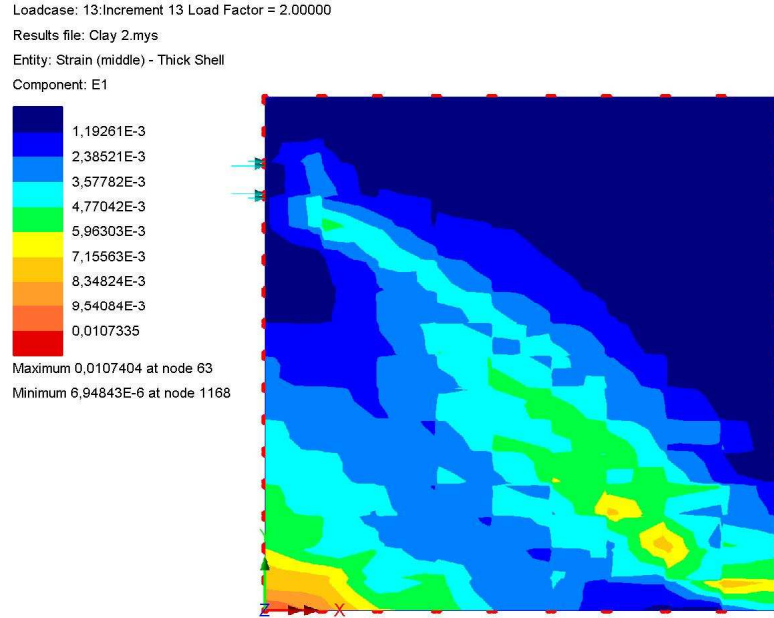
Loadcase: 6:Increment 6 Load Factor = 1.00000
Results file: Clay 2.mys
Entity: Strain (middle) - Thick Shell
Component: E1



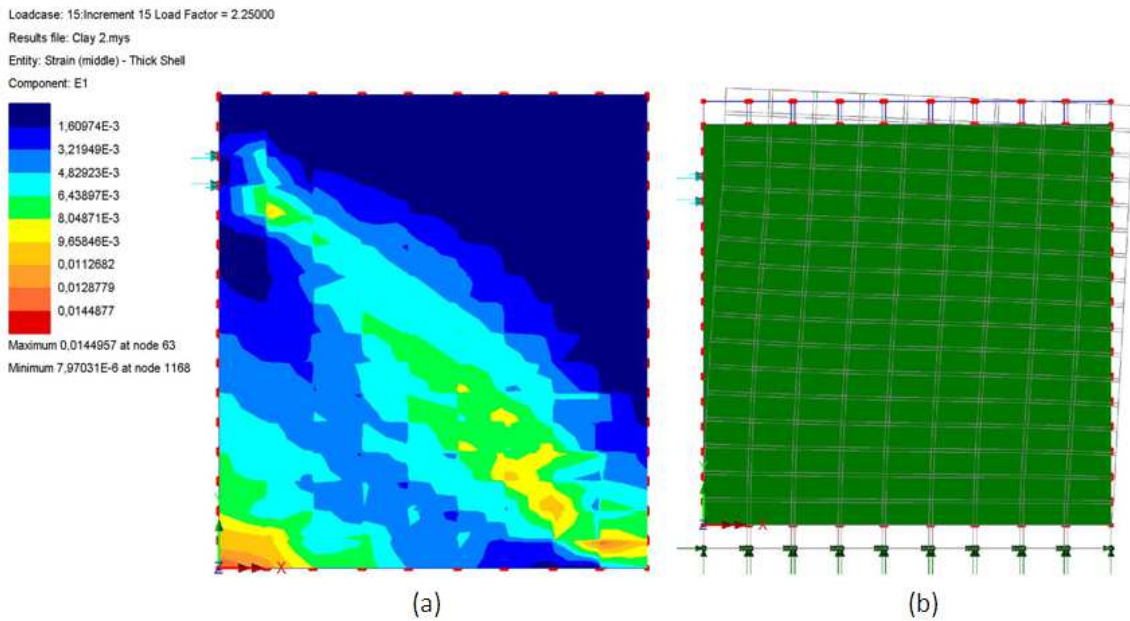
Şekil 4.26 Clay 2 Duvarında Yatay Yükün Göçme Yükünün % 5 Durumunda LP'de Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları

Şekil 4.26'da yatay yükün göçme yükünün %5 durumunda (10 kN/ 210 kN) LP elemanda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verimleştir. Şekil 4.27'de nümerik modelde yatay yükün % 85 (180 kN/210 kN) değerinde olduğunda bile deney duvarının göçme mekanizması

ile benzeştiğini söylemek mümkündür. LP elemanın kopma durumunda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları deforme olmuş durumu ile birlikte Şekil 4.28(a) ve Şekil 4.28(b)'de verimleştirdir.



Şekil 4.27 Clay 2 Duvarında Yatay Yük Göçme Yükünün % 85 Durumda LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımı

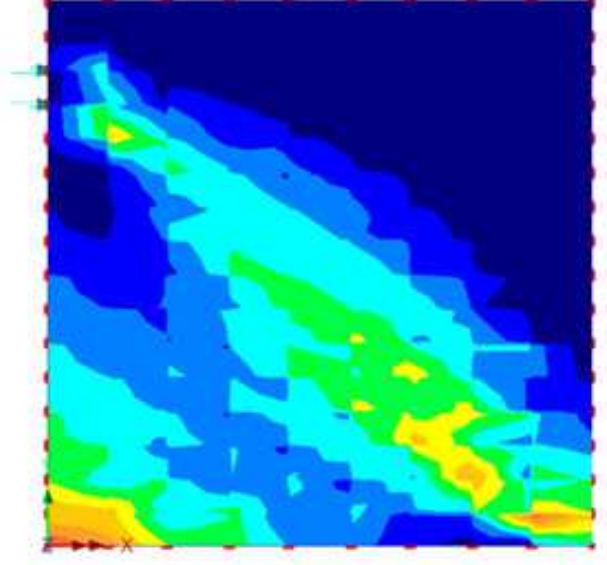


Şekil 4.28 LP Elemanda (a) Maksimum Asal Şekil Değiştirme Dağılımları (b) Deforme Olmuş Durum

Analizin sonlandırıldığı durumda fiziksel durum ile nümerik model karşılaştırılması Şekil 4.29 (a-b)'de verilmiştir. LP elemanda oluşan asal şekil dağılımlarının biçimi ile fiziksel duvardaki LP elemanda oluşan hasar durumu bir birine benzer olduğunu söylemek mümkündür.



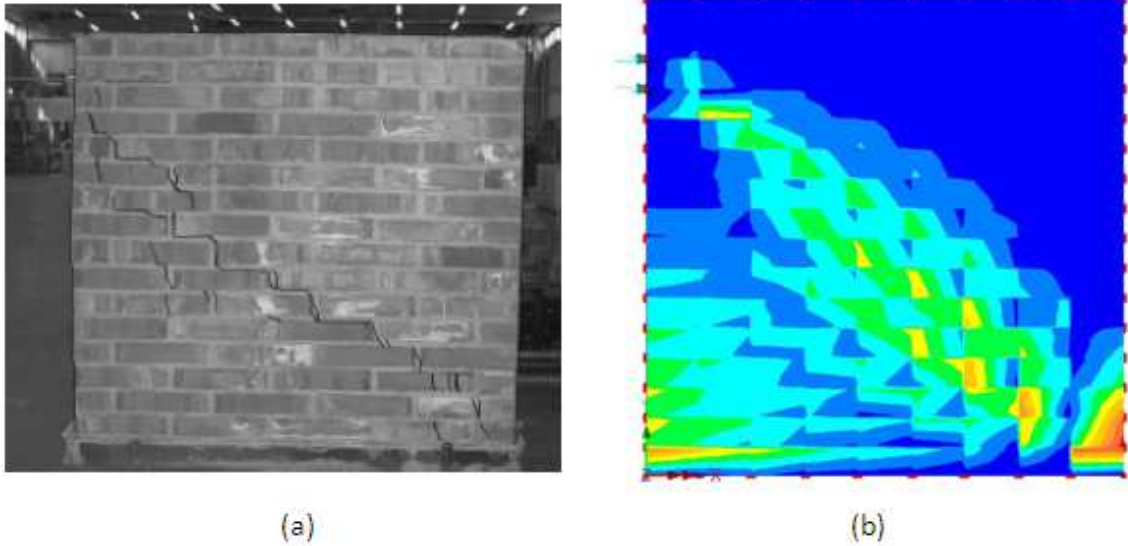
(a)



(b)

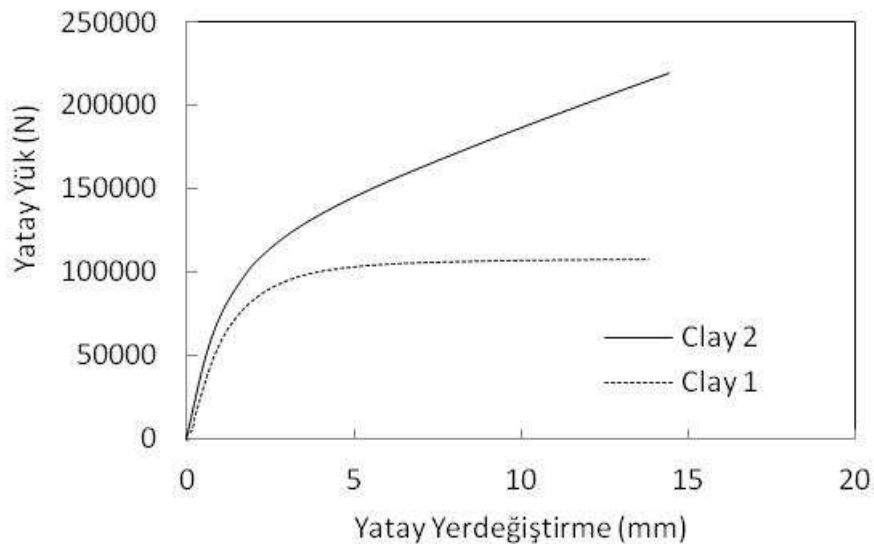
Şekil 4.29 Clay 2-3 Duvarı (a) Fiziksel Durumda LP Elelmanda Hasar Oluşumu [9], Nümerik Modelde LP Elemanda Asal Şekil Değişirme Dağılımı

LP duvarın tek yüzeyine uygulandığı için duvarın diğer yüzü LP elemanın uygulandığı yüzey gibi davranmayacağı açıktır. Oluşabilecek çatlakların yalın yüzde daha büyük olacağını söylemek mümkündür. LP elemanın kopma durumunda duvarın güçlendirilmemiş yüzeyinde oluşan şekil değiştirme dağılımı ile aynı yüzeyde oluşan hasar durumu Şekil 4.30 (a-b)'de karşılaştırılmıştır. Fiziksel modelde oluşan çatlaklar ile nümerik modelde oluşan asal şekil değiştirme dağılımlarına bakıldığında nümerik modelde oluşan şekil değiştirme dağılımlarının deney duvarındaki hasara benzer olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 4.30 Clay 2-3 Duvarı (a) Yalın Yüzeyde Hasar Oluşumu [9] (b) Nümerik Modelde Şekil Değiştirme Dağılımları

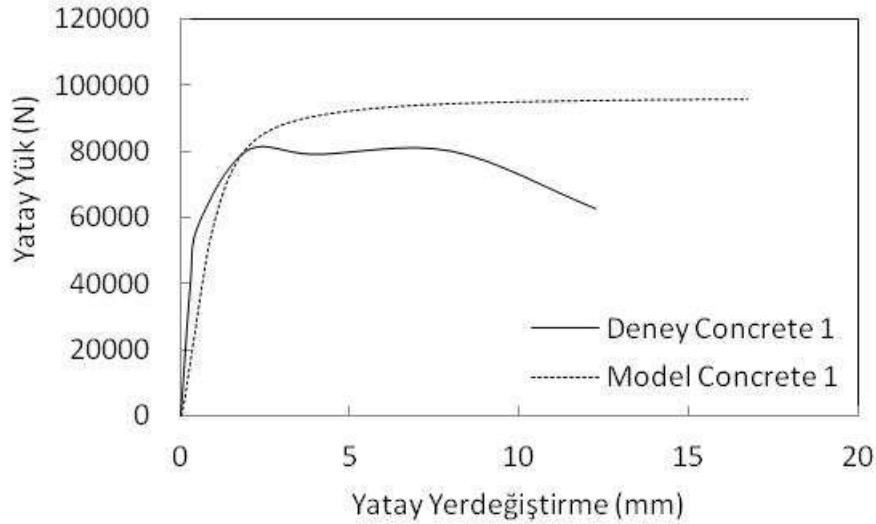
Stratford, vd [9] çalışmalarında yalın Clay 1 duvarı ile güçlendirilmiş Clay 2 duvarının deneysel yük- yerdeğiştirme eğrisini yorumlarken güçlendirilmiş duvarın yalın duvarın göçme durumuna kadar yalın duvara benzer davranış gösterdiğini savunmuşlardır. Nümerik modellerdeki yük- yer değiştirme eğrisi Şekil 4.31’de karşılaştırılmıştır. Deneysel duvarlardaki benzer durumun nümerik modellerde de olduğunu söylemek mümkündür. Clay 2 duvarının daha rijit davranmasının LP elemanın sağladığı katkıdan olması aşikârdır.



Şekil 4.31 Clay 1 ve Clay 2 Duvarları Nümerik Modellerinin Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi

Stratford, vd. 2004 yılında yaptıkları çalışmada beton briketlerden üretilen ve yalın (Concrete 1) ve güçlendirilmiş (Concrete 2 ve 3) duvarları da bu tez çalışması kapsamında nümerik

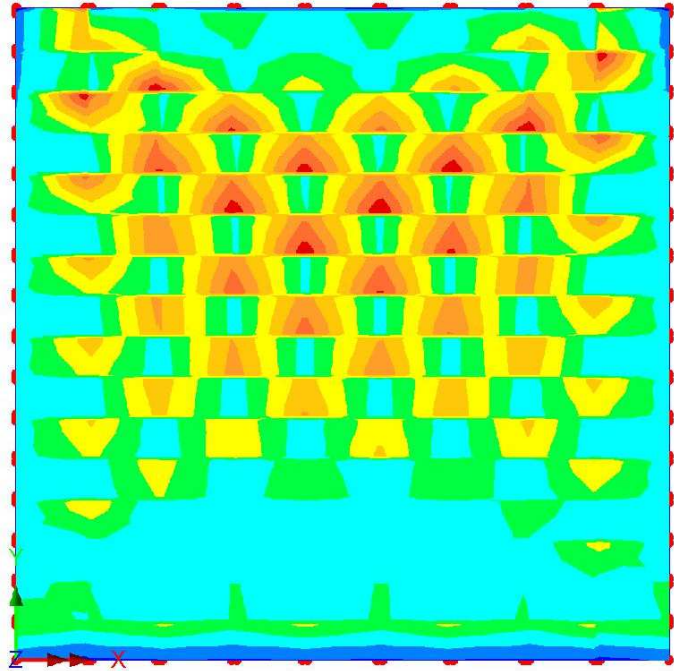
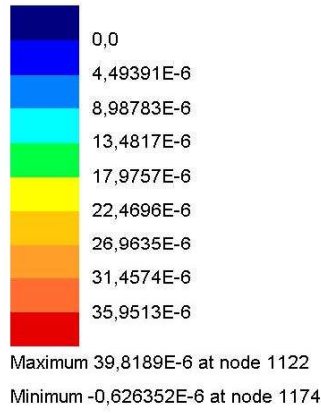
olarak irdelenmiştir. Bu duvarların da geometrik ölçü ve yükleme şekli kil/tuğla birimlerden üretilen duvarlarla aynıdır. Concrete 1-2-3 kodlu duvarların mekanik parametreleri ve göçme yükleri de Çizelge 4.2 ile 4.3'te verilmiştir. Şekil 4.32'te betondan üretilen yalın (Concrete1) duvarının yatay yük- yerdeğiştirme eğrisi verilmiştir.



Şekil. 4.32 Concrete 1 Duvarı Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi

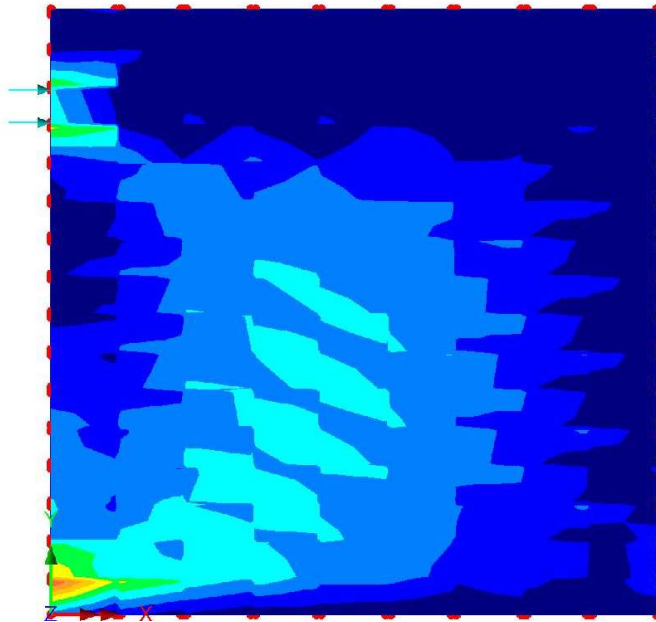
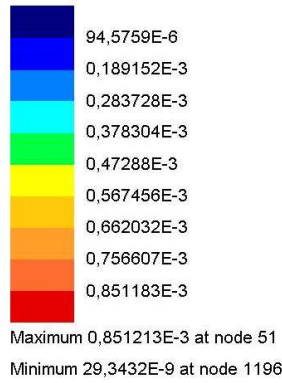
Sadece düşey yük etkisinde betondan üretilen Concrete 1 yalın duvarında oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.33'de verilmiştir. Şekil 4.34'de ise yatay yükün göçme yükünün % 56 (54,30 kN/ 96 kN) değerinde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir. Şekil 4.35'de yatay yükün göçme yükünün % 97 (93,44 kN/ 96 kN) değerinde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları, Şekil 4.36'da ise yatay yükün göçme yükünün % 99 (95,54 kN/96 kN) değerinde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir. Analizin sonlandırıldığı an için tuğla-harç etkileşimi dikkate alınarak Bölüm 4.3'te bağıntı (4.19) ile maksimum birim şekil değiştirme, $\varepsilon_{max} = 10/(2 * 65 + 10) = 0,071$ olarak belirlenmiştir. Bu değerdeki asal şekil değiştirme değerinde analiz sonlandırılarak yük- yerdeğiştirme eğrisi de Şekil 4.32'te karşılaştırılmıştır. Şekil 4.37'de ise maksimum asal şekil değiştirmenin olduğu durumda oluşan deformasyon şekli verilmiştir.

Loadcase: 1:Increment 1
Results file: CONCRETE 1.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



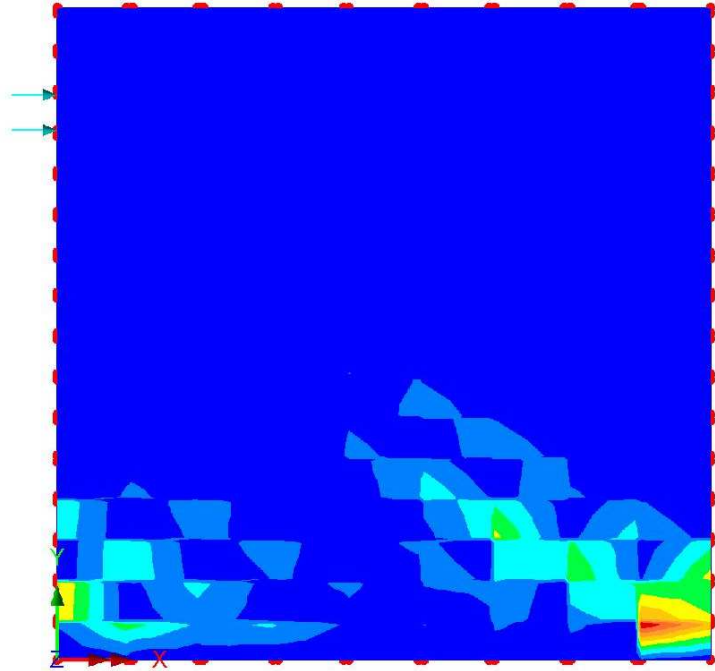
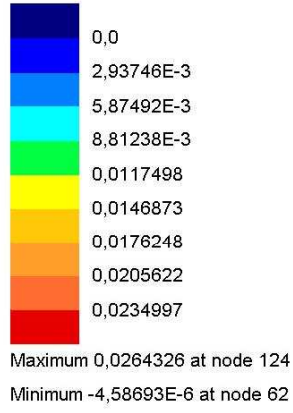
Şekil 4.33 Sadece Düşey Yük Etkisinde Concrete 1 Duvarında Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları

Loadcase: 9:Increment 9 Load Factor = 1.15829
Results file: CONCRETE 1.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



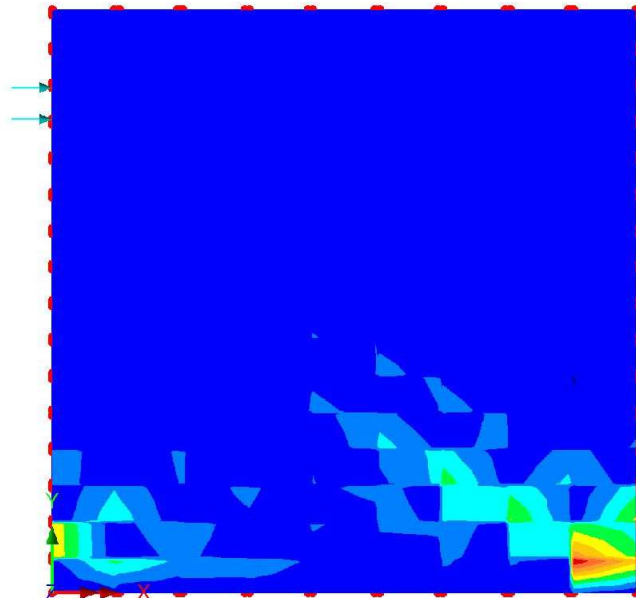
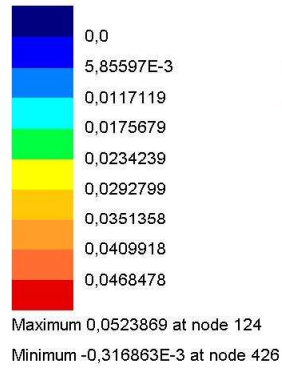
Şekil 4.34 Yatay Yükün Göçme Yükünün % 56 Değerinde Concrete 1 Duvarında Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları

Loadcase: 50:Increment 50 Load Factor = 2.24209
 Results file: CONCRETE 1.mys
 Entity: Strain - Solids
 Component: E1

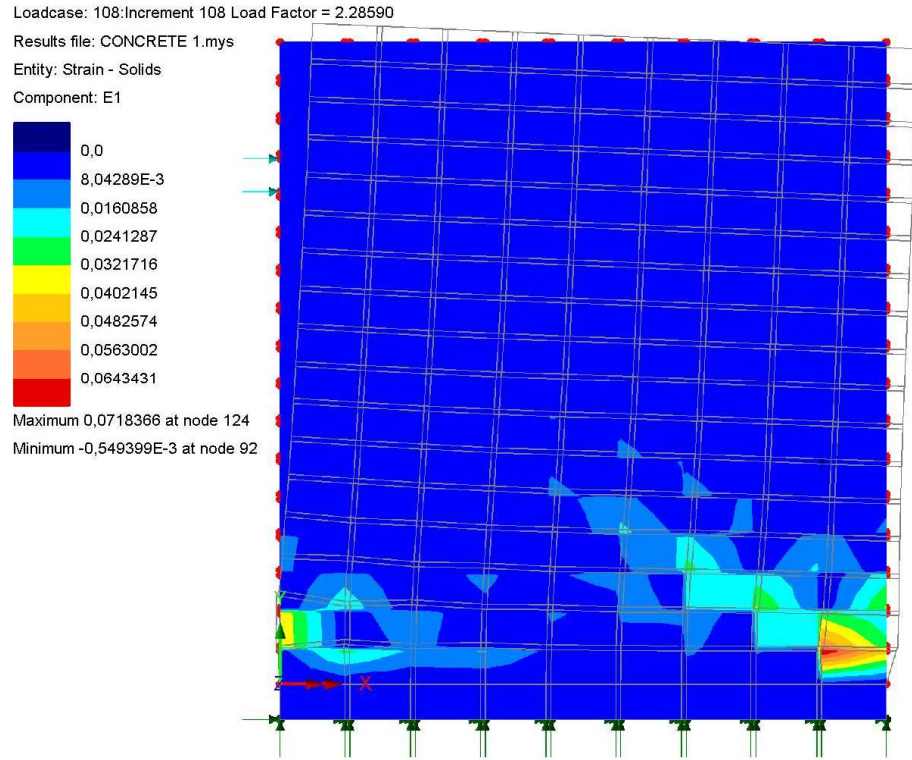


Şekil 4.35 Yatay Yükün Göçme Yükünün % 97 Değerinde Concrete 1 Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

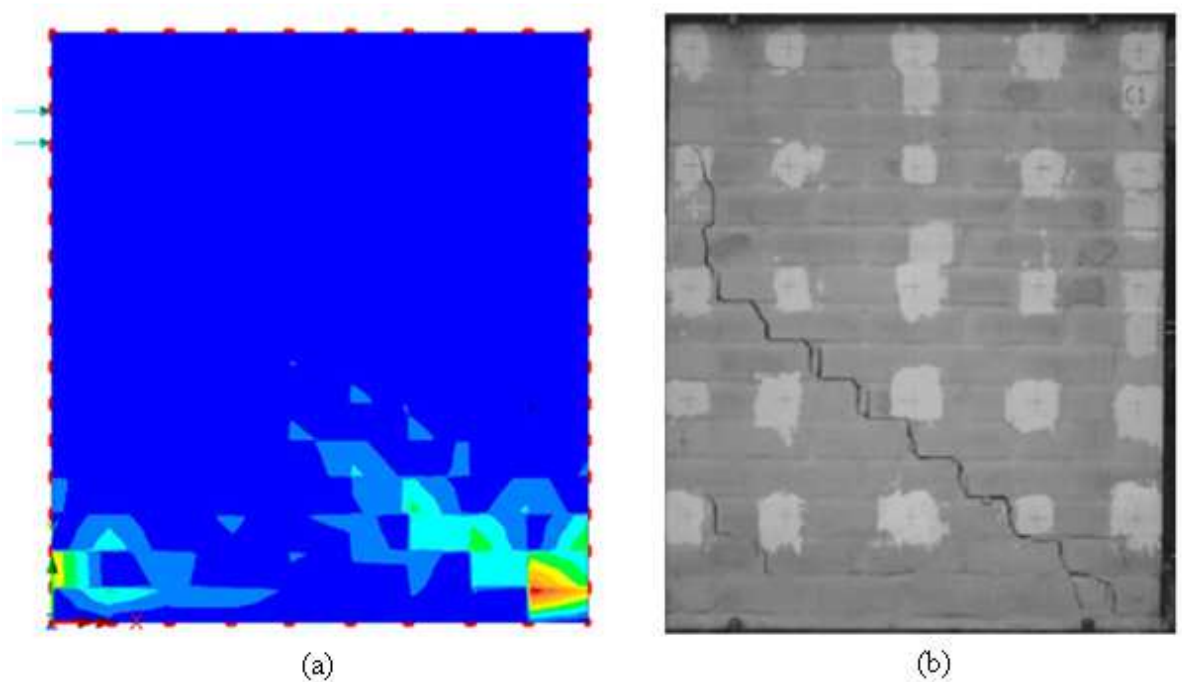
Loadcase: 75:Increment 75 Load Factor = 2.27594
 Results file: CONCRETE 1.mys
 Entity: Strain - Solids
 Component: E1



Şekil 4.36 Yatay Yükün Göçme Yükünün % 99 Değerinde Concrete 1 Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları



Şekil 4.37 Maksimum Şekil Değişirme Durumunda Concrete 1 Duvarında Asal Şekil Değişirme Dağılımları

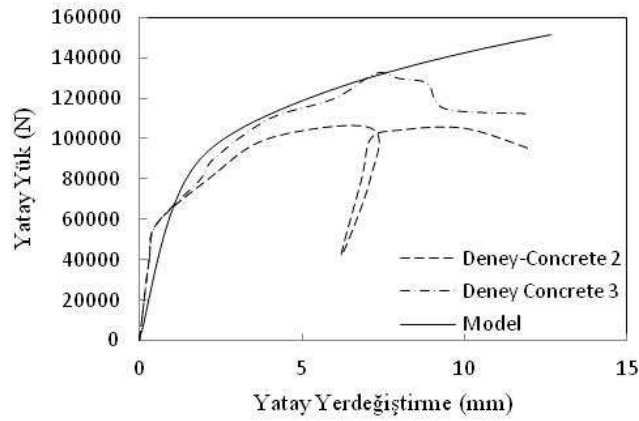


Şekil 4.38 (a) Nümerik Modelde Asal Şekil Değişirme Dağılımları (b) Fiziksel Durumda Çatlak Oluşumu [9]

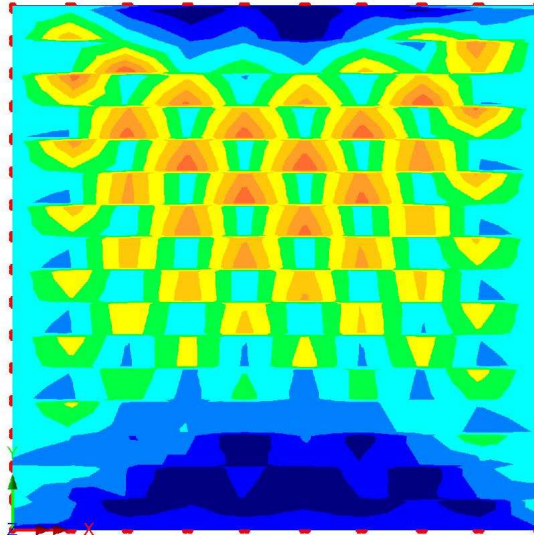
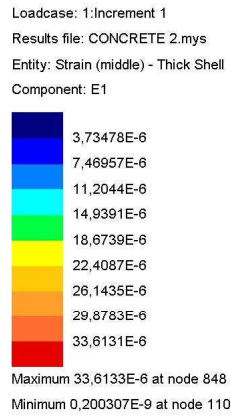
Bu çalışma kapsamında Concrete 2 kodlu duvarın, fiziksel deney koşulları da dikkate alınacak şekilde Bölüm 3'te verilen yaklaşım doğrultusunda nümerik simülasyonu 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik parametreler tuğla basınç

dayanımı $f_{bl} = 36$ MPa, harç basınç dayanımı $f_{mr} = 5,5$ MPa, Poisson oranı ise 0,20 olarak deneysel verilerden alınmıştır. Beton bloklardan üretilen birimlerin elastisite modülü $E_{bl} = 30000$ MPa, harç birimlerde ise bu değer $E_{mr} = 1500$ MPa olarak nümerik modelde çözümlemede kullanılmıştır. Önerilen nümerik modelde, çelik profil, tuğla/beton ve harç birimler 3 boyutlu 8 düğüm noktalı izoparametrik katı elemanlar ile modellenmiş ve 4301 düğüm noktasına sahip, toplamda 578 katı eleman kullanılmıştır. Bunların 208 adedi tuğla, 336 adedi harç, 34 adedi ise alt ve üste konulan çelik elemanlara ait malzeme özelliklerini içermektedir. Rijit çelik profil için malzeme doğrusal elastik kabul edilmiş, tuğla ve harç elemanlara ait malzeme özellikleri ise elasto-plastik malzeme modelleri yardımıyla tanımlanmıştır. Duvarların rijit çelik üzerine oturduğu taban kesitlerinde mesnetlenme şekli ankastre olarak kabul edilmiştir. Önerilen nümerik modelde tuğlanın basınç dayanımı ile düşey basınç gerilmelerine bağlı olarak tuğla birimler için içsel sürtünme açısı (4.17) bağıntısı ile $\phi_{bl} = 59,45^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Tuğla elemanlardaki kohezyon değeri 4.16 bağıntısı ile $c_{bl} = 2,29$ MPa olarak bulunmuştur. Tuğla birimler için elastisite modülü ise $E_{bl} = 30000$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak alınmıştır. Harç birimler için içsel sürtünme açısı 4.15 bağıntısı ile $\phi_{mr} = 8,354^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Harç elemanlardaki kohezyon değeri 4.14 bağıntısı ile $c_{mr} = 2,736$ MPa olarak bulunmuştur. Elde edilen bu değerler Çizelge 4.3' de verilmektedir. Tek yüzeye LP sargısı yapıldığı için kuşatma etkisi bu duvarlarda dikkate alınmamıştır dolayısı ile, tuğla birimlerin hohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri yalın ve güçlendirilmiş duvarlarda aynı değerler seçilmiştir. Sonlu eleman ağı Şekil 4.16 a'da, kullanılan katı elemana ait geometri ve düğüm noktası serbestlikleri şematik olarak Şekil 4.16 b'de verilmiştir [66]. Fiziksel duvar LP elemanın yzeyden kopması ile hasara uğramıştır. LP eleman çekme gerilmesi $f_t = 986$ MPa, ve elastisite modülü ise $E_{FRP} = 73300$ MPa, LP elemanın kalınlığı ise 0,15 mm olarak deneysel çalışmadan alınmıştır [9]. LP malzemesi ortotrop olarak tanımlanmıştır. LP elemanın kopma birim şekil değiştirme değeri çekme gerilmesinin elastisite modülüne bölünmesi ile 0,013 olarak hesapla bulunmuştur. Nümerik modellemede analiz LP elemanın asal şekil değiştirme değerinin 0,013 değerine ulaştığı durum yani LP elemanın koptuğu durumda sonlandırılmıştır ve yük- yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.39'da verilmiştir. Yük- yerdeğiştirme açısından bakıldığında nümerik model grafiğinin deneysel eğrilerle uyumluluğu söylemek mümkündür.

Sadece düşey yükün uygulandığı durumda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.40'da verilmiştir. Yatay yükün göçme yükünün % 23 (34 kN/143 kN) değerinde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.41'de verilmiştir. Şekil 4.42'de yatay yükün göçme yükünün % 58 (83 kN/ 143) değerinde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir. Şekil 4.43'de ise yatay yükün göçme yükünün % 73 (104 kN/ 143 kN) değerinde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir.

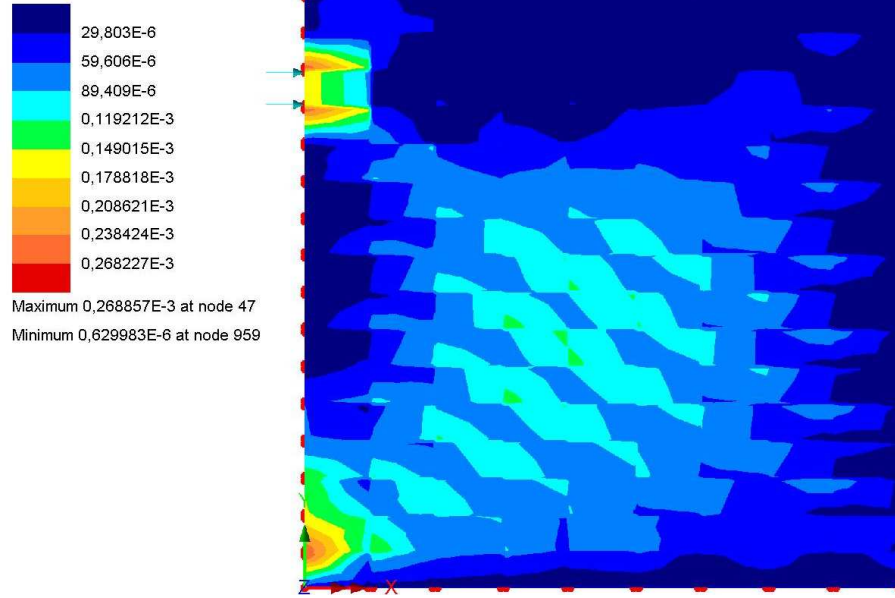


Şekil 4.39 Concrete 2-3 Duvarlarında Yük Yerdeğiştirme Eğrisi



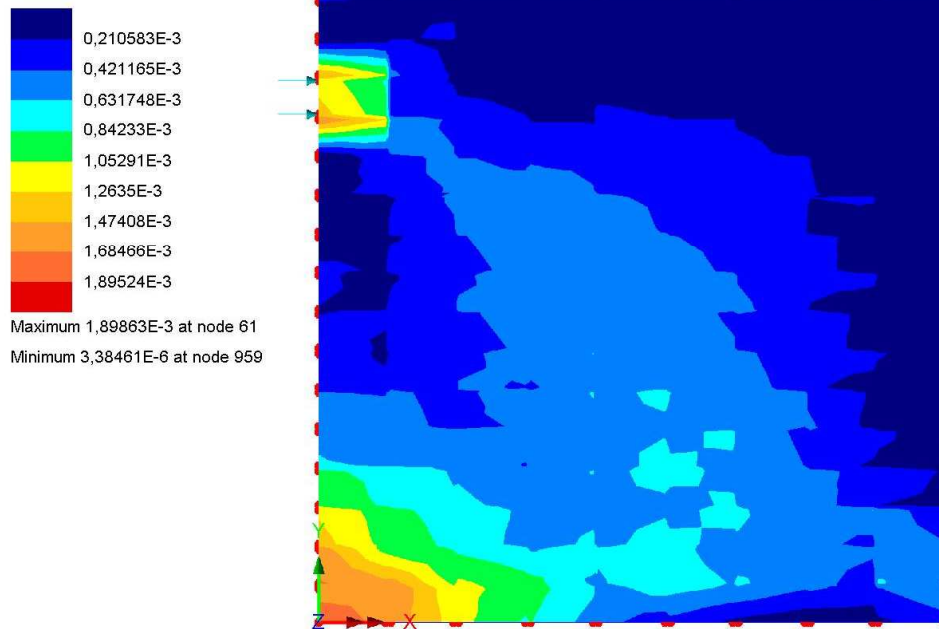
Şekil 4.40 Concrete 2-3 Duvarında Sadece Düşey Yük Etkisinde LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 6:Increment 6 Load Factor = 1.20000
Results file: CONCRETE 2.mys
Entity: Strain (middle) - Thick Shell
Component: E1



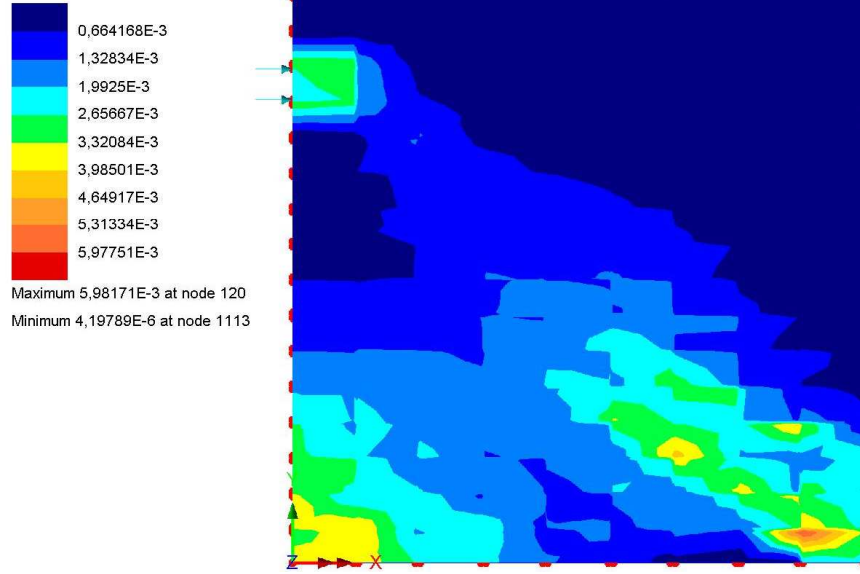
Şekil 4.41 Concrete 2 Duvarında Yatay Yükün Göçme Yükünün % 23 Değerinde LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 16:Increment 16 Load Factor = 4.05032
Results file: CONCRETE 2.mys
Entity: Strain (middle) - Thick Shell
Component: E1



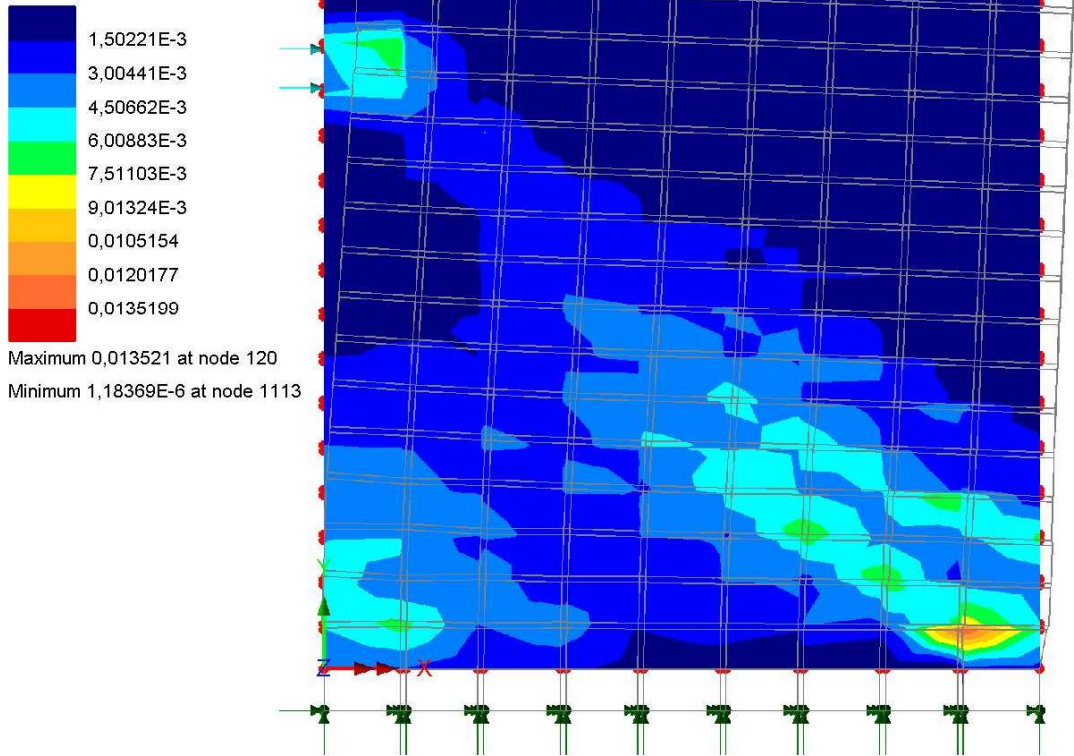
Şekil 4.42 Yatay Yükün Göçme Yükünün % 58 Değerinde LP Elemanda Oluşan Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 26:Increment 26 Load Factor = 5.10086
 Results file: CONCRETE 2.mys
 Entity: Strain (middle) - Thick Shell
 Component: E1



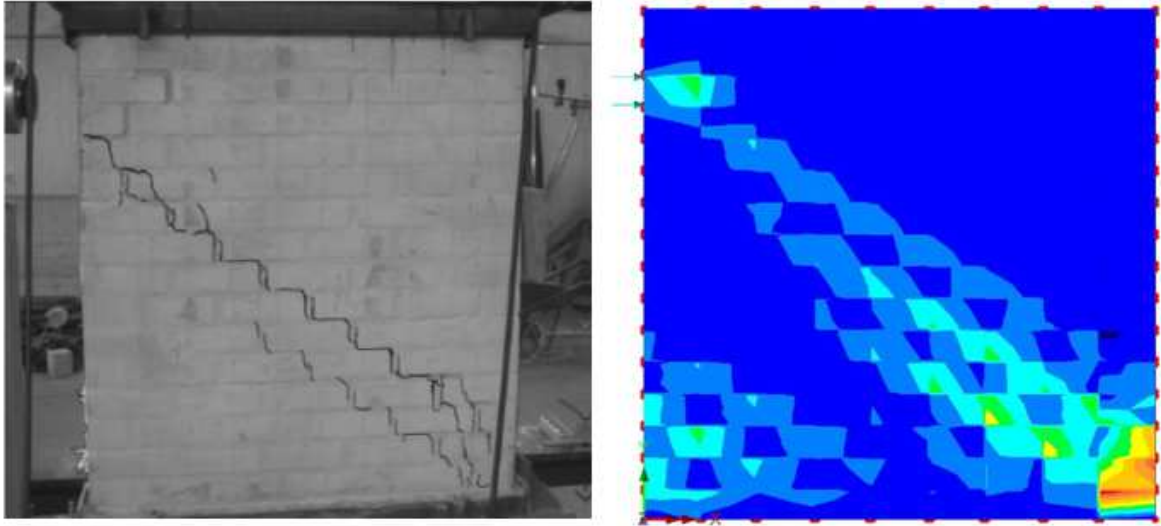
Şekil 4.43 Yatay Yükleme Yükünün % 73 Değerinde LP Elemanda Oluşan Şekil Değişirme Dağılımları

Loadcase: 33:Increment 33 Load Factor = 5.77478
 Results file: CONCRETE 2.mys
 Entity: Strain (middle) - Thick Shell
 Component: E1



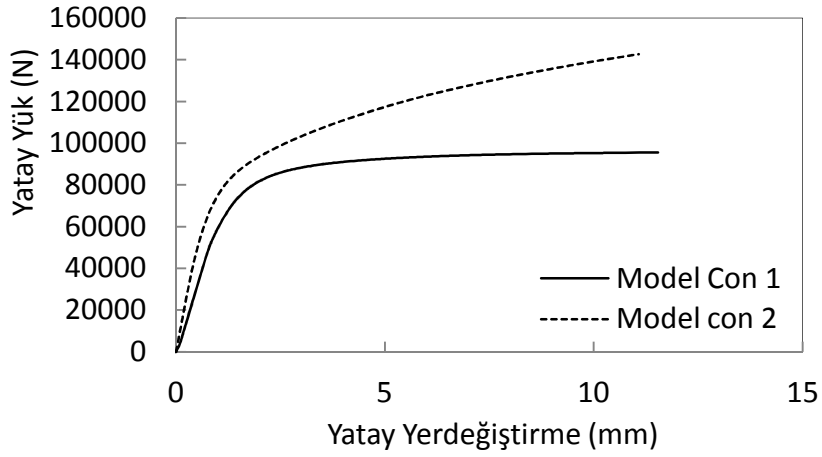
Şekil 4.44 Concrete 2 Duvarı LP Elemanda Kopma Durumunda Deforme Olmuş Şekil Değişirme Dağılımları

Concrete 2 kodlu duvarın yalın yüzeyinde çatlamların oluşu ile nümerik model yığma birimlerde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları aşağıda Şekil 4.45(a) ve Şekil 4.45(b)'de verilmiştir.

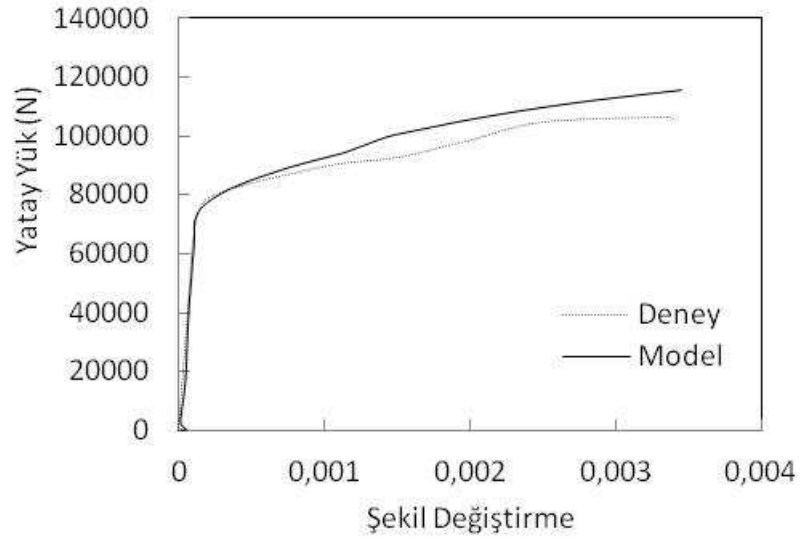


Şekil 4.45 Deney Panelinde (a) Hasar Oluşumu [9] ve (b) Nümerik Modelde Yığma Birimlerde Asal Şekil Değiştirme Dağılımı

Nümerik modelde LP etkisini yük- yerdeğiştirme bazında incelediğimizde kil/tuğla duvarlarda olduğu gibi yalın duvarın göçme durumuna kadar aynı davranış sergilemiştir ve LP duvara rijitlik kazandırdığı için fazla yerdeğiştirme gözlenmemiştir. LP eleman yük taşıma kapasitesinde yalın beton duvarın göçme modundan sonra etkili olmuştur. Fiziksel ve deneysel duvarlarda LP yerdeğiştirme bazında etkili olmamıştır. Bunun nedeni tek yüzeye uygulama ile açıklanabilir. Karşılaştırmalı eğri Şekil 4.46'da verilmiştir. Betondan üretilen güçlendirilmiş Concrete 2 kodlu duvarda yaklaşık duvar orta bölgesinde yük- şekil değiştirme ölçümü alınmıştır. Bu çalışmada önerilen nümerik modelde de yük- şekil değiştirme eğrisi deneysel eğri ile Şekil 4.47'de kıyaslanmıştır.



Şekil 4.46 Concrete1 ve Concrete 2 Kodlu Duvarların Nümerik Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi



Şekil 4.47 Concrete 2 Duvarı Yük- Şekil Değiştirme Eğrisi

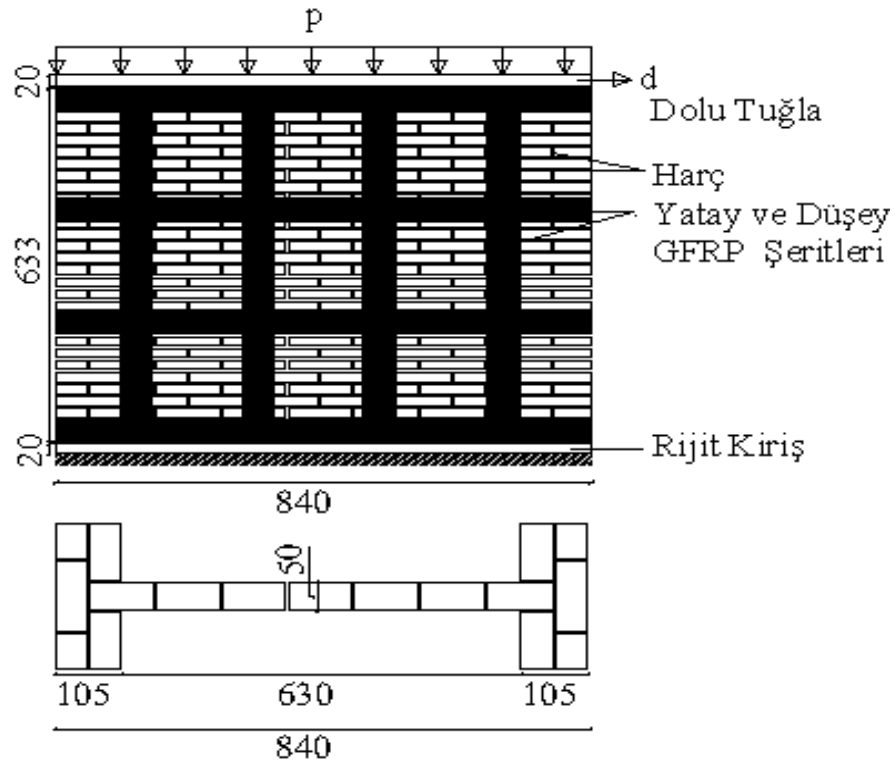
4.6 Deney Duvarı No.3

Capozucca, (2011) [10] yaptığı deneysel çalışmasında tarihi tuğlalardan yapılmış iki adet yığma duvarları düşey yük ve yatayda çevrimsel yükleme etkisinde test ederek göçme durumlarını incelemiştir. Hasar görmüş yalın tarihi duvarları (HURM), çapraz ve yatay-düşey doğrultuda karbon elyaf şeritlerle (CFRP/KLP) güçlendirmiştir. Sonra güçlendirilmiş tarihi duvarları (HRM) göçme anına kadar yük etkisinde test etmiştir. Lifli polimerin etkisi ve kırılma biçimleri ile ilgili bilgiler sunmuştur. Çevrimsel yük etkisinde duvarlardaki çatlak gelişimlerini ve birim şekil değiştirmelerin duvar üzerinde yayılımlarını kayıt altına almıştır. Çalışmasında duvarlara etkiyen farklı düşey yük etkilerini de dikkate almıştır. LP sargı duvarların tek bir yüzeyine uygulanmıştır. Sonuç olarak CFRP/KLP sargılamanın duvarların

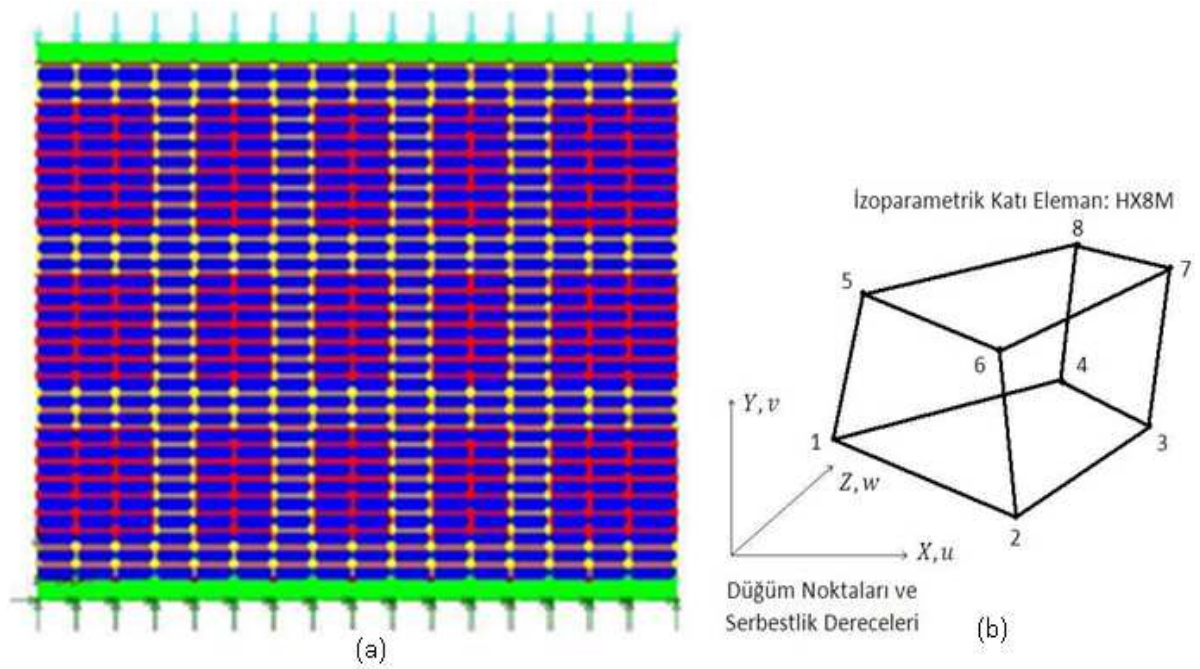
yük kapasitesini arttırırken daha büyük oranda yanal şekildeğiştirme yeteneğini geliştirdiğini belirtmiştir. Tarihi yapıların LP ile güçlendirilmesinde en önemli ve geliştirilmesi gerekli olan noktanın LP şeritlerle duvar arasındaki uygun ve yeterli ankrajın sağlanması olduğu sonucuna varmıştır.

Deneysel çalışmalarında 840x633x50 mm³ ölçüsünde duvar deneysel olarak test edilmiştir. Kullanılan tuğla boyutları ise 100x17x50 mm³ ölçülü, yatay ve düşeyde ise 4 mm kalınlığında harç kullanılmıştır. Bu değerler Çizelge 4.4'te ve Şekil 4.48'de verilmiştir. Mekanik özellikler ise Çizelge 4.5'te verilmiştir. Lifli polimer Şekil 4.51'de gösterildiği gibi duvarın tek yüzeyine yatay/düşey şeritler halinde uygulanmıştır. Tuğla birimlerin basınç dayanımı $f_{bl} = 34,3$ MPa, harç birimlerin basınç dayanımı ise $f_{mr} = 2,90$ MPa olarak deneysel çalışmadan alınmıştır. Önerilen nümerik modelde tuğlanın basınç dayanımı ile düşey basınç gerilmelerine bağlı olarak tuğla birimler için içsel sürtünme açısı (4.17) bağıntısı ile $\phi_{bl} = 59,37^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Tuğla elemanlardaki kohezyon değeri 4.16 bağıntısı ile $c_{bl} = 3,33$ MPa olarak bulunmuştur. Tuğla birimler için elastisite modülü ise $E_{bl} = 7000$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak alınmıştır. Harç birimler için içsel sürtünme açısı (4.15) bağıntısı ile $\phi_{mr} = 4,41^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Harç elemanlardaki kohezyon değeri 4.14 bağıntısı ile $c_{mr} = 2,21$ MPa olarak bulunmuştur. Harç birimlerin elastisite modülü değeri $E_{mr} = 150$ MPa olarak alınmıştır. Önerilen nümerik modelde, çelik profil, tuğla/beton ve harç birimler 3 boyutlu 8 düğüm noktalı izoparametrik katı elemanlar ile modellenmiş ve 4301 düğüm noktasına sahip, toplamda 1922 katı eleman kullanılmıştır. Bunların 705 adedi tuğla, 1155 adedi harç, 62 adedi ise alt ve üste konulan çelik elemanlara ait malzeme özelliklerini içermektedir. Rijit çelik profil için malzeme doğrusal elastik kabul edilmiş, tuğla ve harç elemanlara ait malzeme özellikleri ise elasto-plastik malzeme modelleri yardımıyla tanımlanmıştır. LP eleman 672 yüzeye tanıtılmıştır. Yığma birimlerde uygulanan sonlu eleman ağı ve sonlu eleman tipi Şekil 4.49'da verilmiştir. Şekil 4.50 (a-b-c)'de ise uygulanan LP eleman nümerik modeli, sonlu eleman ağı ve sonlu eleman tipi verilmiştir. Duvarların rijit çelik üzerine oturduğu taban kesitlerinde mesnetlenme şekli ankastre olarak kabul edilmiştir.

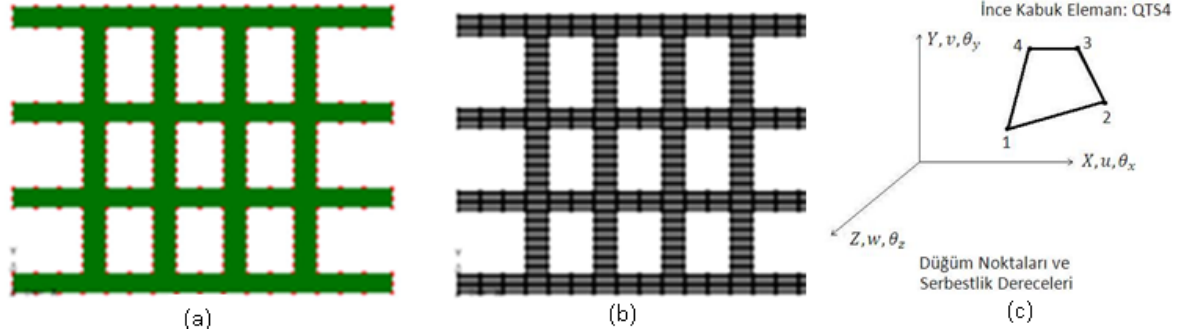
Karbon elyaf kullanılmıştır ve çekme gerilmesi $f_t = 4800$ MPa, elastisite modülü $E_{FRP} = 240000$ MPa ve LP kalınlığı ise $t = 0,177$ mm olarak deneysel çalışmadan alınmıştır [10]. LP elemanın kopma durumunda oluşan yatay yük yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.51'de verilmiştir.



Şekil 4.48 HURM-C2 Duvarı Fiziksel Durum ve Geometrik Ölçüler [10]



Şekil 4.49 HRM C2 Duvarı Yığma Birimlerde (a) Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66]



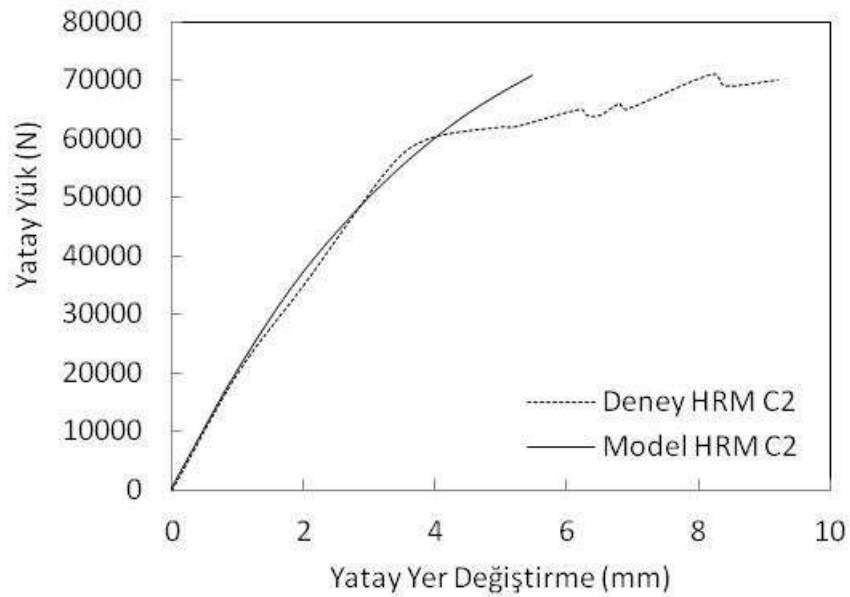
Şekil 4.50 HRM C2 Duvarına Uygulanan LP Nümerik Modeli (b) Sonlu Eleman Ağı (c) Sonlu Eleman Tipi [66]

Çizelge 4.4 Capozucca Duvarı (HRM C2) Geometrik Ölçüler ve Yük Değerleri

Duvar isimleri	Duvar boyutları (mm)	Eleman boyutu (mm)	Ugulanan düşey yük (kN)	Düşey yükte gerilme (MPa)	Max. yatay yükler Deneysel(kN)	Max. yatay yükler Nümerik(kN)
HRM C2	840x633x50	100x17x50	63	1,5	70	70

Çizelge 4.5 Capozucca Duvarı (HRM C2) Mekanik Özellikleri

Tuğla						Harç				
Duvar adı	E_{bl} (MPa)	f_{bl} (MPa)	Poisson Oranı	c_{bl} (MPa)	$\phi_{bl}(^{\circ})$	f_{mr} (MPa)	E_{mr} (MPa)	Poisson Oranı	c_{mr} (MPa)	$\phi_{mr}(^{\circ})$
HRM C2	7000	34,3	0,2	2,33	59,37	2,90	150	0,2	2,21	4,41

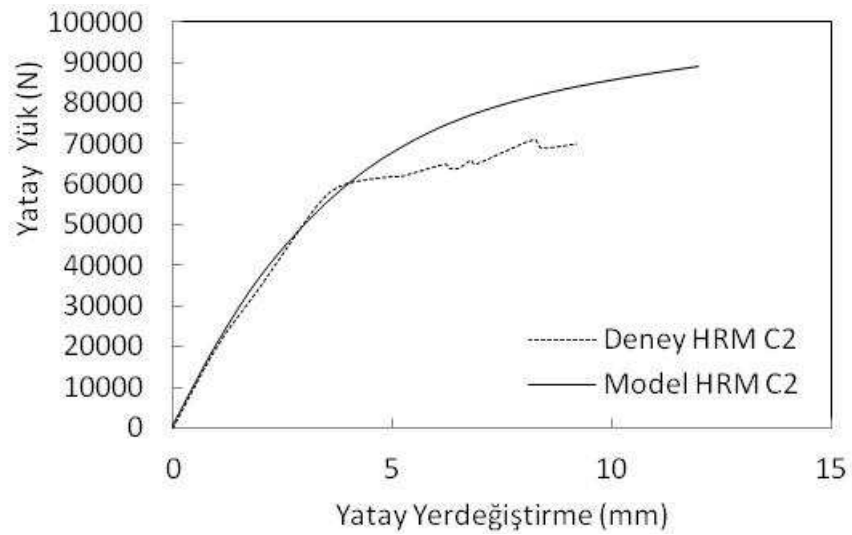


Şekil 4.51 HRM C2 Duvarı LP Elemanın Kopma Durumunda Yatay Yük-Yerdeğiştirme Eğrisi

Şekil 4.51’de LP elemanın kopma durumunda oluşan yük yer değiştirme eğrisi deney eğrisi ile karşılaştırıldığında yük açısından bakıldığında kırılma yüküne yakın değerde LP elemanda kopma gözlenmiştir.

Analizin sonlandırıldığı an için tuğla- harç etkileşimi dikkate alınarak Bölüm 4.3’te bağıntı (4.19) ile maksimum birim şekil değiştirme, $\varepsilon_{max} = 4/(2 * 17 + 4) = 0,105$ olarak belirlenebilir. Bu değere göre yük- yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.52’de verilmiştir.

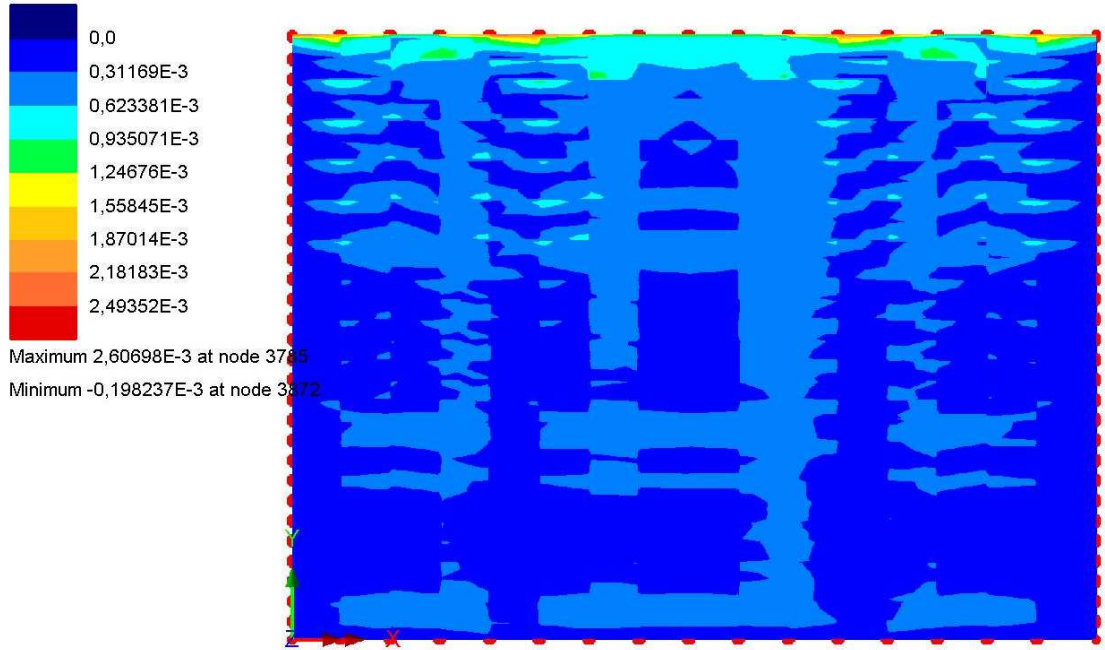
LP elemanda asal şekil değiştirmenin 0,020 olduğu durumda analiz sonlandırılmıştır ve deneysel eğri ile karşılaştırmalı durumuna bakıldığında deney eğrisine göçme yükü değeri bazında yakın olduğunu söyleyebiliriz. CFRP kopma durumundan sonra da analizin devam etmesini ise LP elemanda hasar oluştuktan sonra yığma birimlerin ayakta kalması ile açıklayabiliriz. Asal şekil değiştirmenin 0,105 olduğu durumda oluşan yük yerdeğiştirme eğrileri karşılaştırıldığında ise özellikle yerdeğiştirme açısından bakıldığında deneysel ve nümerik sonuçlar bir birine benzerdir. LP elemanın kopma durumundan sonra da duvar taşıyıcılığını belli bir süre sürdürerek yığma birimlerin göçmesi ile yıkılmıştır. Bu durum Şekil 4.52’de verilmiştir.



Şekil 4.52 HRM C2 Duvarı Yığma Birimlerde Oluşan Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi

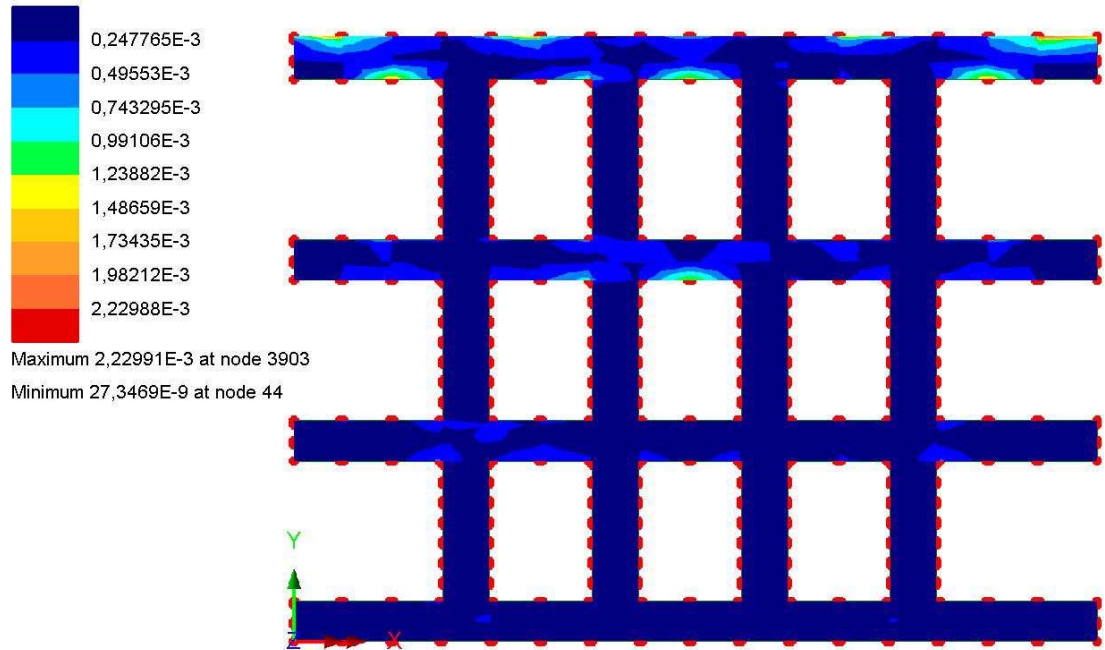
HRM C2 duvarına sadece düşey yük etkidiği durumda yığma birimlerde ve LP elemanda oluşan şekil değiştirme dağılımları sırası ile Şekil 4.53’de verilmiştir.

Loadcase: 1:Increment 1
Results file: HRM C2.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



Şekil 4.53 Sadece Düşey Yük Etkisinde HRM C2 Duvarında Yığma Birimlerde Asal Oluşan Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 1:Increment 1
Results file: HRM C2.mys
Entity: Strain (middle) - Thick Shell
Component: E1



Şekil 4.54 Sadece Düşey Yük Uygulandığı Durumda HRM C2 Duvarı LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

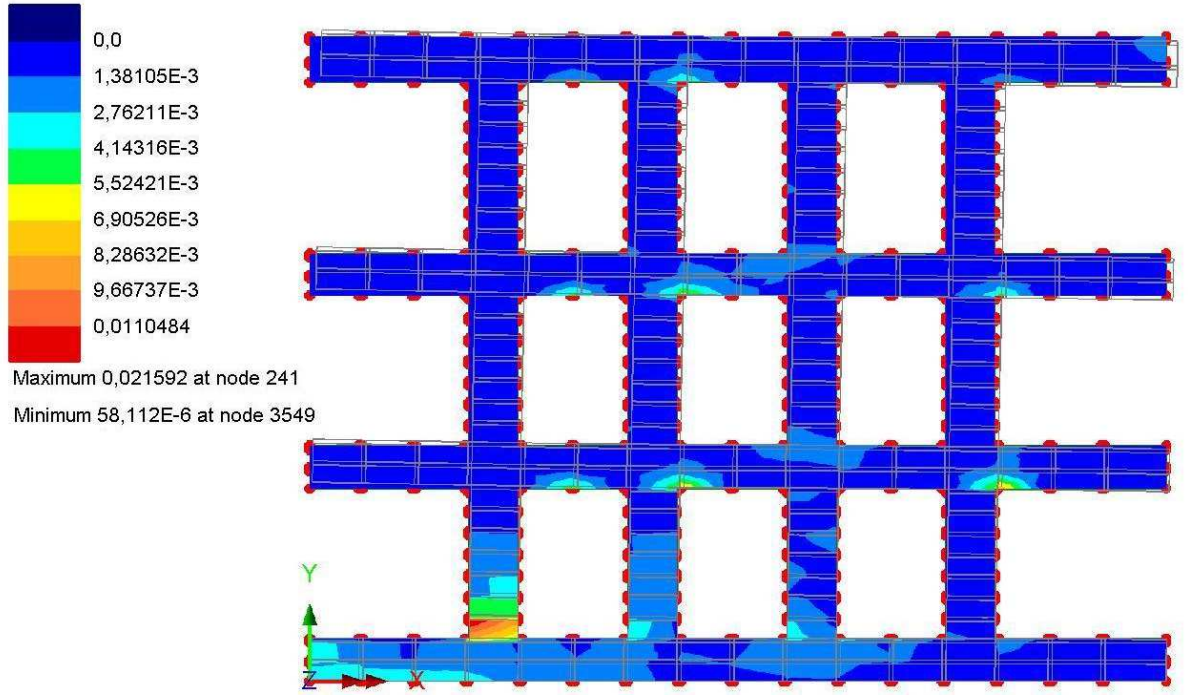
LP elemanın kopma durumunda oluşan şekil değiştirme dağılımları ise Şekil 4.55’de verilmiştir.

Loadcase: 31:Increment 31 Load Factor = 2.97889

Results file: HRM C2.mys

Entity: Strain (top) - Thick Shell

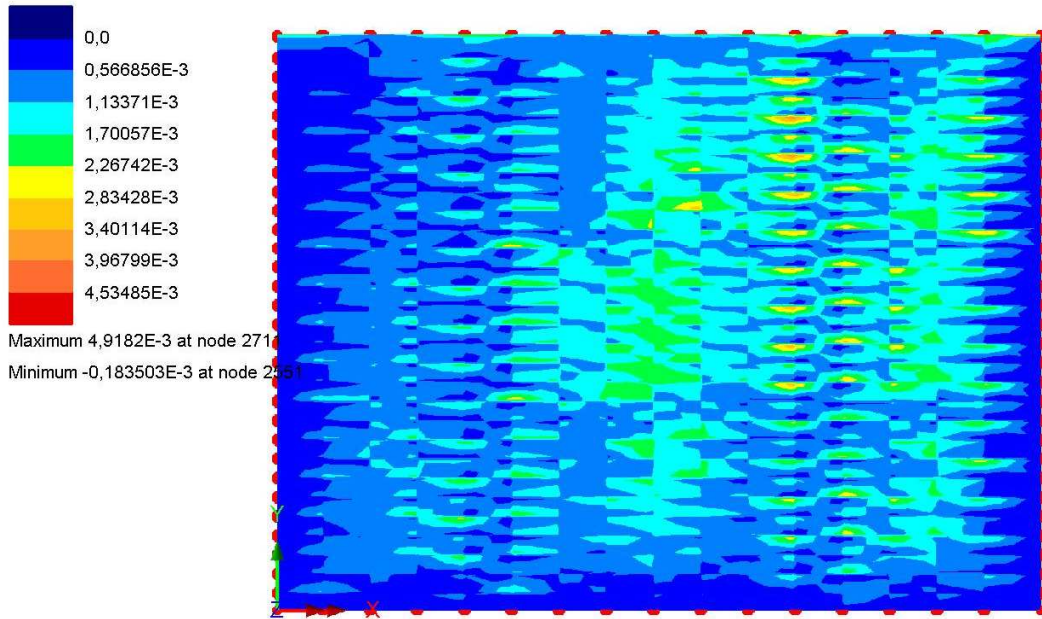
Component: E1



Şekil 4.55 HRM C2 Duvarı LP Elemanda Kopma Durumunda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

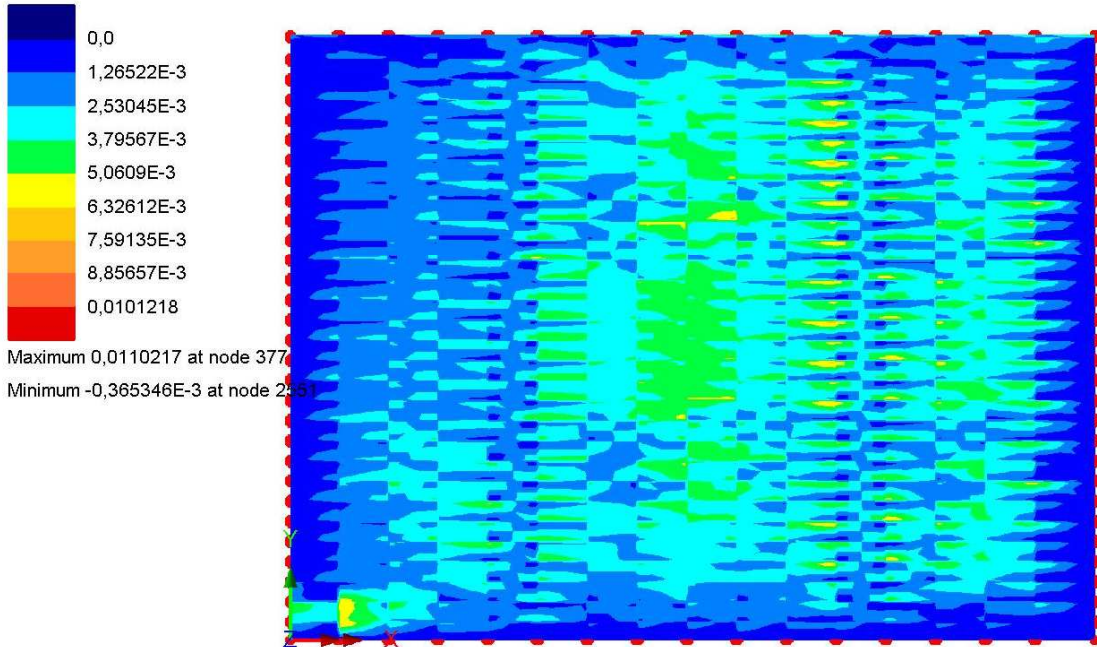
Yatay yükün göçme yükünün %25 (23,50 kN/89 kN) değerinde yığma birimlerde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları ise Şekil 4.56’da verilmiştir. Şekil 4.57’de yatay yükün göçme yükünün % 48 (43,50 kN/89 kN) değerinde yığma birimlerde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Nümerik modelde yatay yükün % 92 değerine ulaştığı anda (82.532 kN/89 kN), oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.58’de, analizin sonlandırıldığı durumda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları ise Şekil 4.59’da verilmiştir.

Loadcase: 12:Increment 12 Load Factor = 1.07889
Results file: HRM C2.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



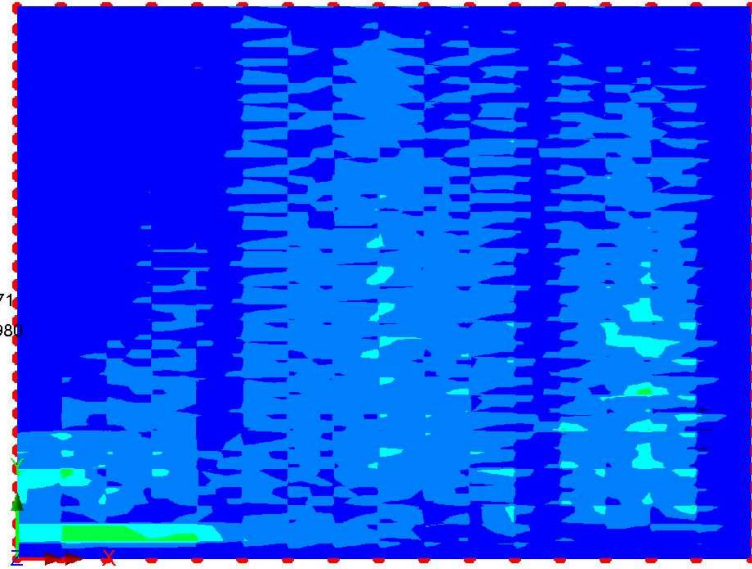
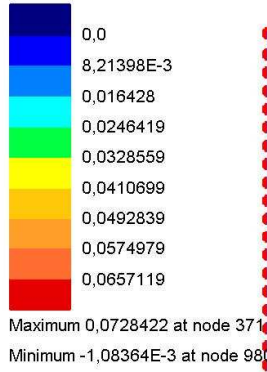
Şekil 4.56 HRM C2 Duvarında Yatay Yükün Göçme Yükünün % 25 Değerinde Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 22:Increment 22 Load Factor = 2.07889
Results file: HRM C2.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



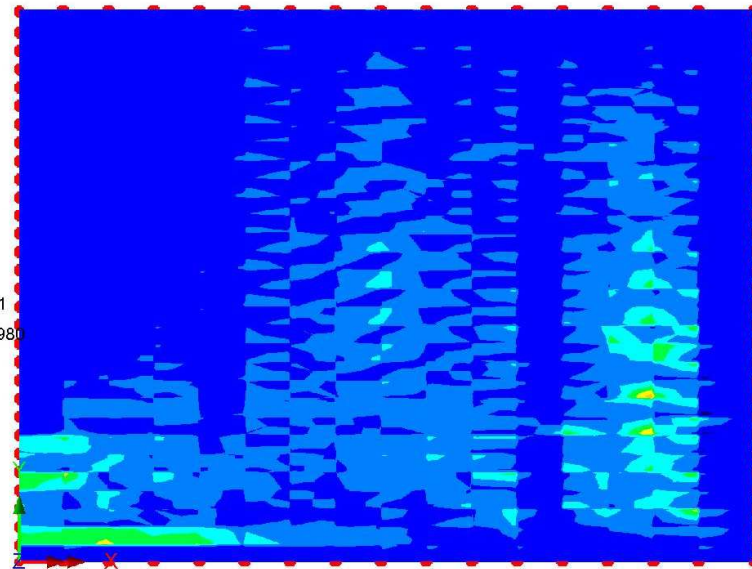
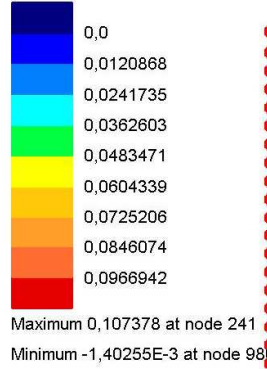
Şekil 4.57 HRM C2 Duvarında Yatay Yükün Göçme Yükünün % 48 Değerinde Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 43:Increment 43 Load Factor = 4.05034
Results file: HRM C2.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



Şekil 4.58 HRM C2 Duvarında Yatay Yükün Göçme Yükünün % 92 Değerinde Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 50:Increment 50 Load Factor = 4.40960
Results file: HRM C2.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



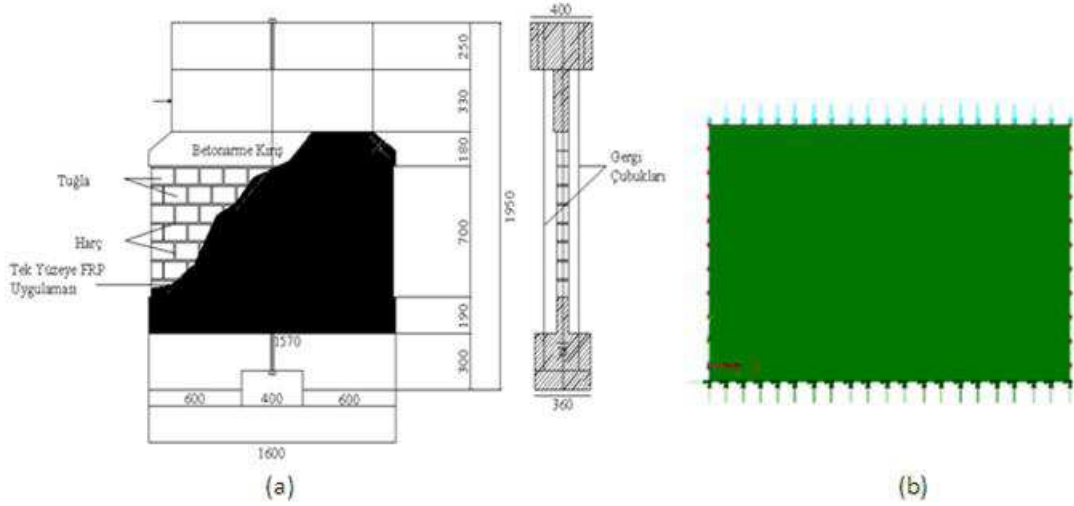
Şekil 4.59 HRM C2 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Maksimum Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

4.7 Deney Duvarı No.4

ElGawady, vd. (2007), (2005), ve (2004) yıllarında [18-20] yaptıkları çalışmada 7 (yedi) adet duvarı deneysel olarak test etmişlerdir. Bu duvarlardan 3 tanesi yalın olarak test edilmiştir ve hasar görmüş bu duvarlar lifli polimerler ile onararak güçlendirildikten sonra tekrar yüklemeye maruz bırakılmıştır. Diğer 4 (dört) duvar ise en baştan LP ile sarılarak düşey ve yatay yük uygulanmıştır. Lifli polimer malzemesi olarak cam elyaf (GFRP/CLP) kullanılmıştır. Tek kat GFRP/CLP kullanılarak duvarların sadece bir yüzeyi güçlendirilmiştir. Bütün deneysel duvarlar sabit düşey yük ile yüklenmiştir ve yatayda çevrimsel yük etkisinde incelenmiştir. Deneysel çalışmada önceden test edilen bir yalın duvar (S2-REFE-ST) referans olarak alınmıştır. Bu duvar çevrimsel yükleme ile hasar görmüştür. Hasar seviyesi duvarın mesnete yakın bölgesinde alt sıralarda 2-3 adet tuğlanın ezilmesiyle sınırlıdır. Ezilmiş 2-3 adet tuğla değiştirilerek aynı özellikli harç malzemesi ile o bölge onarılmış ve tek yüz lifli polimerle güçlendirilerek tekrar yük etkisinde incelenmiştir. Yalın duvar 36 kN gibi bir değerde hasar görürken, güçlendirilen duvar (S2-WRAP-G-F-ST) yaklaşık olarak 50 kN gibi bir yükte hasar görmüştür. Hasar, değiştirilen tuğlaların bulunduğu bölgede gözlemlenmiştir. ElGawady, vd. (2007) [18] bu durumu eski ve yeni tuğlaların birleşim probleminden- bir bütünlük olmamasından kaynaklandığını ifade etmiştir. Çalışmalarında lifli polimerlerle güçlendirmenin önemi vurgulanmıştır. GFRP malzemesinin yanal rijitliği artırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca, ElGawady, vd. (2005) yaptıkları çalışmada, depreme karşı hasar görmüş duvarlar içinsadece diyagonal yönde yapılan güçlendirmenin yeterli olmayacağından yola çıkarak böyle bir güçlendirme önermemektedirler [18]. Bu tez çalışmasında S2-WRAP-G-F-ST kodlu tek yüzü LP sargı ile güçlendirilmiş duvar nümerik olarak incelenmiştir. Tuğla ölçüleri $150 \times 90 \times 75 \text{ mm}^3$ olan, bağlayıcı malzeme olarak 5 mm harç kullanılan ve toplam duvar boyutu $1570 \times 1050 \times 75 \text{ mm}^3$ olan duvar paneller üzerinde bir dizi deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Tuğlalar düşeyde 10 tam sıra olarak alta ve üste konulan betonarme plak üzerine inşa edilmiştir. Üste konulan betonarme plağın amacı düşey yükün düzgün şekilde aktarımını sağlamaktır.

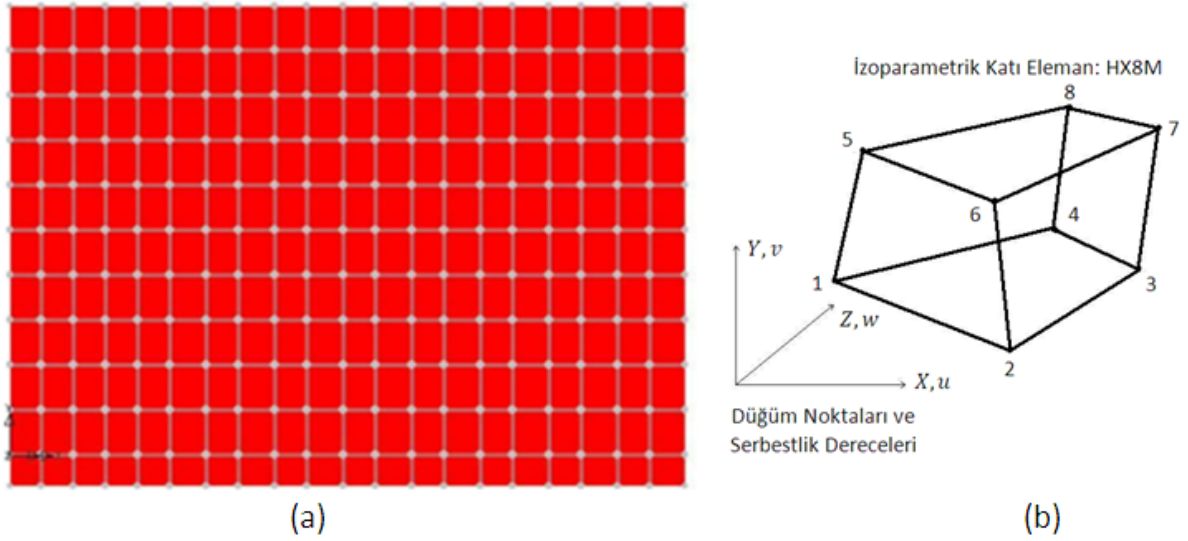
Duvarın geometrik ölçüleri ve şematik şekli aşağıda Çizelge 4.7’de, fiziksel durumu Şekil 4.60 (a)’da ve nümerik model ise Şekil 4.60(b)’de verilmiştir. Harç kalınlığı yatay ve düşeyde 5 mm kadardır. LP eleman duvarın tek yüzüne alt ve üste konulan betonarme kirişin tek yüzeyini de kapsayacak şekilde uygulanmıştır. Yalın olarak test edilen referans duvarı (S2-REFE-ST)

yaklaşık 36 kN kadar yükleme etkisinde hasar görmüştür. Tamir edilen bu duvar tek yüzeyi LP elemanla güçlendirilerek tekrar teste tabi tutulmuştur ve yaklaşık olarak 50 kN kadar yatay yük etkisinde hasar oluşmuştur [18].



Şekil 4.60 S2-WRAP-G-F-ST Duvarı (a) Fiziksel Durumu [18] (b) S2-WRAP-G-F-ST Duvarı Nümerik Model

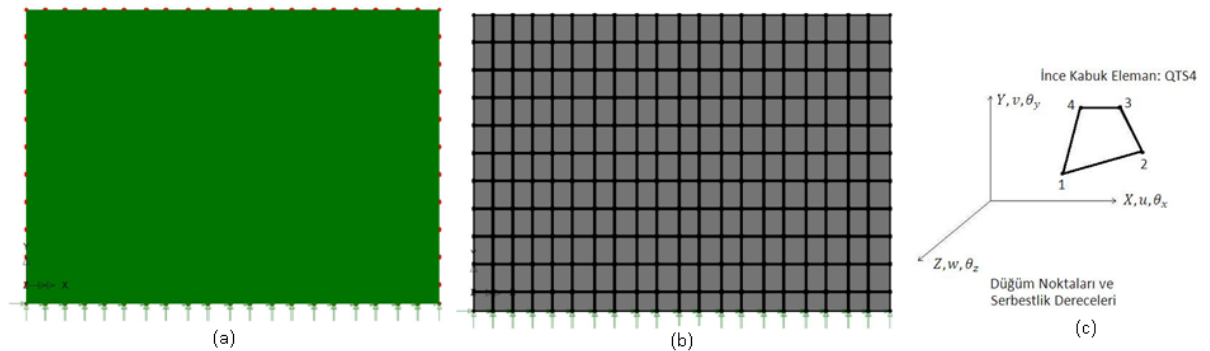
Bu çalışma kapsamında, S2-WRAP-G-F-ST kodlu duvarın, fiziksel deney koşulları da dikkate alınarak şekilde Bölüm 3’de verilen yaklaşım doğrultusunda nümerik simülasyonu 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik parametreler tuğla basınç dayanımı $f_{bt} = 6$ MPa, harç basınç dayanımı $f_{mr} = 3,3$ MPa, Poisson oranı tuğla birimlerde $\mu = 0,20$, harç birimlerde $\mu = 0,15$ olarak deneysel verilerden alınmıştır [18-20]. Duvar önce 30 kN (0,25 MPa) kadar düzgün yayılı yükle yüklendikten sonra düşey yük sabit tutularak, yatayda çevrimsel yüklemeye maruz bırakılmıştır. Önerilen nümerik modelde çelik profil, tuğla ve harç birimler, 3 boyutlu 8 düğüm noktalı izoparametrik katı elemanlar ile modellenmiş ve 5976 düğüm noktasına sahip toplamda 819 katı eleman kullanılmıştır. Bunların 207 adedi tuğla, 378 adedi harç, 234 adedi üste ve alta konulan betonarme plak elemana ait malzeme özelliklerini içermektedir. LP eleman 819 yüzey elemana sahiptir. Rijit plak elemanlar için malzeme doğrusal elastik kabul edilmiş, tuğla ve harç elemanlara ait malzeme özellikleri ise elasto-plastik malzeme modelleri yardımıyla tanımlanmıştır. Duvarın rijit plaja oturduğu taban kesitinde mesnetlenme şekli ankastre olarak kabul edilmiştir. Nümerik model sonlu eleman ağı ve tipi şematik olarak Şekil 4.61 (a) ve (b)’de verilmiştir.



Şekil 4.61 S2-WRAP-G-F-ST Duvarı (a) Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66]

Bölüm 3'te verilmiş olan bünyesel bağıntılar kullanılarak tuğla ve harç için DP kriterinin ihtiyaç duyduğu kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri elde edilmiştir. Elastisite modülleri, Poisson oranları ve plastisite özellikli olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri doğrusal olmayan sonlu elemanlar LUSAS [66] ile çalışan programının plastik analiz modülünde tanımlanmıştır. Cam elyaf kullanılmıştır ve çekme gerilmesi $f_t=2400$ MPa, elastisite modülü $E_{FRP} = 70000$ MPa ve LP kalınlığı ise $t = 0,055$ mm olarak deneysel çalışmadan alınmıştır [18-20].

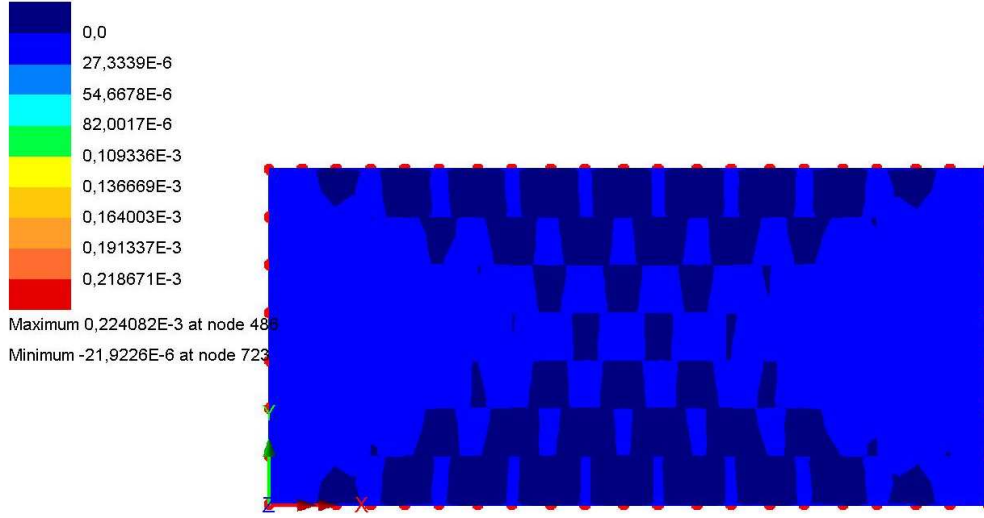
Duvarın tek yüzeyine LP uygulama biçimi, uygulanan sonlu eleman ağı ve sonlu eleman tipi Şekil 4.62(a-b-c)'de verilmektedir.



Şekil 4.62 S2-WRAP-G-F-ST Duvarı (a) LP Eleman Nümerik Model (b) Sonlu Eleman Ağı (c) Sonlu Eleman Tipi [66]

Bu çalışmada da önce düşey yük uygulanması yapılmıştır ve sonra yatayda çevrimsel yükleme yapılmıştır. Sadece düşey yük etkisinde yığma birimlerde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.63'de verilmiştir.

Loadcase: 1:Increment 1
Results file: S2-WRAP-G-F-ST-V14.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



Şekil 4.63 Düşey Yük Etkisinde S2-WRAP-G-F-ST Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Önerilen nümerik modelde tuğla birimlerin basınç dayanımı ile düşey basınç gerilmelerine bağlı olarak tuğla birimler için içsel sürtünme açısı (4.17) bağıntısı ile $\phi_{bl} = 58,98^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Tuğla elemanlardaki kohezyon değeri (4.16) bağıntısı ile $c_{bl} = 0,40$ MPa olarak bulunmuştur. Tuğla birimler için elastisite modülü $E_{bl} = 8100$ MPa, harç birimler için $E_{mr} = 150$ MPa alınmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4. 6'da verilmiştir. Harç birimler için içsel sürtünme açısı 4.15 bağıntısı ile $\phi_{blmr} = 5^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Harç elemanlardaki kohezyon değeri 4.14 bağıntısı ile $c_{mr} = 2,30$ MPa olarak bulunmuştur.

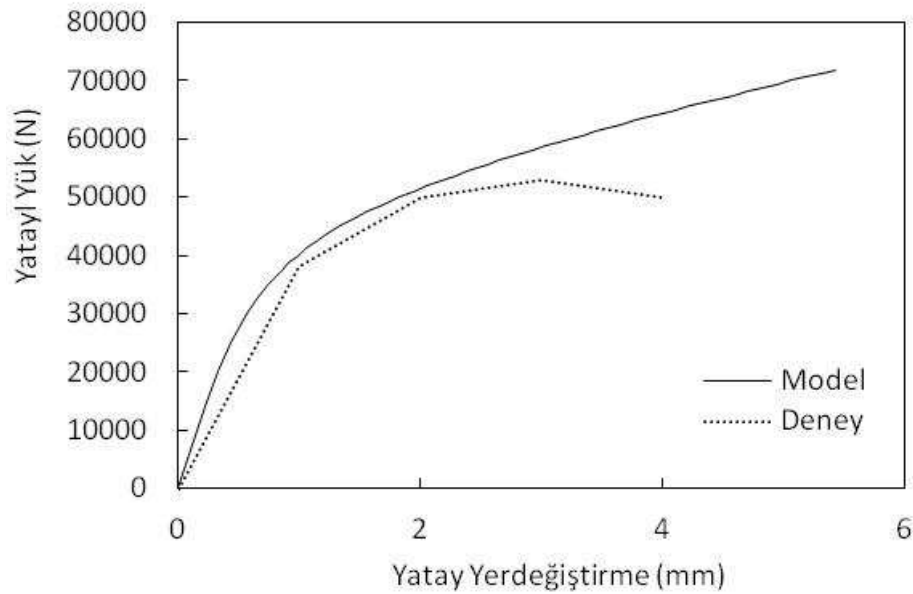
Çizelge 4.6 (S2-WRAP-G-F-ST) Duvarı Mekanik Özellikleri

Tuğla						Harç				
Duvar adı	E_{bl} (MPa)	f_{bl} (MPa)	Poisson Oranı	c_{bl} (MPa)	$\phi_{bl}(^\circ)$	f_{mr} (MPa)	E_{mr} (MPa)	Poisson Oranı	c_{mr} (MPa)	$\phi_{mr}(^\circ)$
S2-WRAP-G-F-ST	8100	6	0,2	0,40	58,98	3,30	150	0,15	2,30	5,00

Çizelge 4.7 (S2-WRAP-G-F-ST) Duvarı Geometrik Ölçüleri ve Yük Değerleri

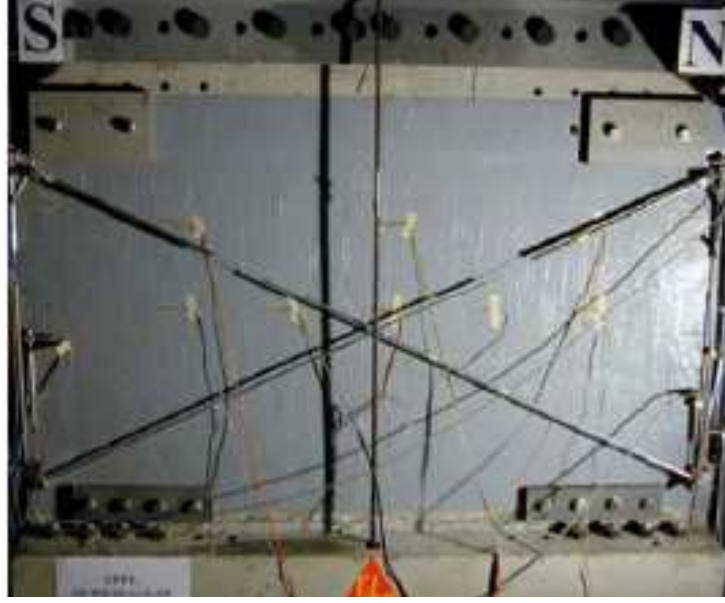
Duvar Adı	Duvar boyutları (mm)	Eleman boyutu (mm)	Ugulanan düşey yük (kN)	Düşey yükte gerilme (MPa)	Max. yatay yükler Deneysel(kN)	Max. yatay yükler Nümerik(kN)
S2-WRAP-G-F-ST	1570x1050x75	150x75x90	30	0,25	50	68

Analizin sonlandırıldığı an için tuğla- harç etkileşimi dikkate alınarak Bölüm 4.3'te bağıntı (4.19) ile maksimum birim şekil değiştirme $\varepsilon_{max} = 5/(2 * 90 + 5) = 0,027$ olarak belirlenebilir. S2-WRAP-G-F-ST duvarında analizin sonlandırıldığı durum (4.19) bağıntısına göre, asal şekil değiştirmenin 0,027 değeri, LP elemanın kopma durumuna göre baktığımızda ise bağıntı (4.18)' göre $\varepsilon_{FRP} = \frac{f_t}{E_{FRP}} = \frac{2400}{70000} = 0,034$ olduğu değerdir. Bu değerlerin birbirine yakın olduğunu söyleyebiliriz. Dolayısı ile her iki kritere göre analizi sonlandırdığımız nokta yeterli olabilecektir. Burada açıklamamak istediğimiz durum yığmanın hasar gördükten sonra LP elemanda kopma gözlenmesidir. LP elemanda kopma olduğu duruma göre yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.64'de verilmiştir.



Şekil 4.64 S2-WRAP-G-F-ST Duvarı Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi

LP eleman yığma birimlerle birlikte alt ve üste konulan betonarme kirişin de yüzeyine sargılanmıştır ve ankraj çubukları yardımı ile yığma duvara monte edilmiştir. Deneysel çalışmada bu durum aşağıda Şekil 4.65'de verilmiştir.



Şekil 4.65 S2-WRAP-G-F-ST Duvarı LP Uygulanması [19]

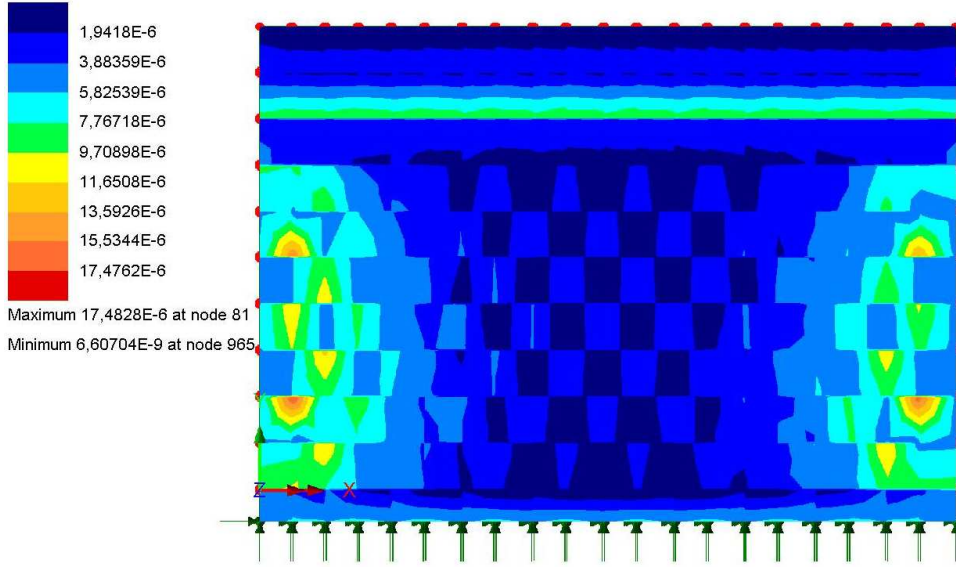
Sadece düşey yük etkisinde LP elemanda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.66’da verilmiştir.

Loadcase: 1:Increment 1

Results file: S2-WRAP-G-F-ST-V14.mys

Entity: Strain (middle) - Thick Shell

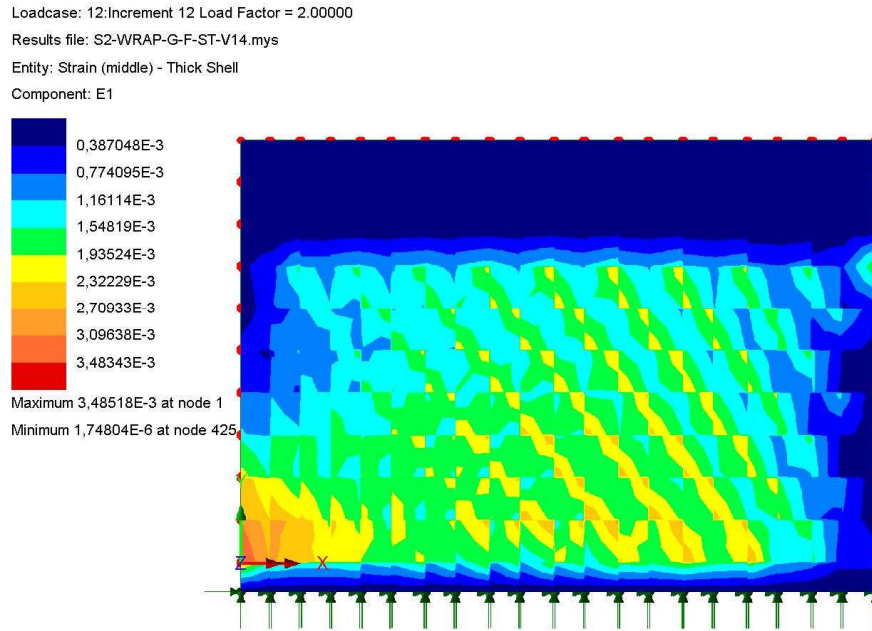
Component: E1



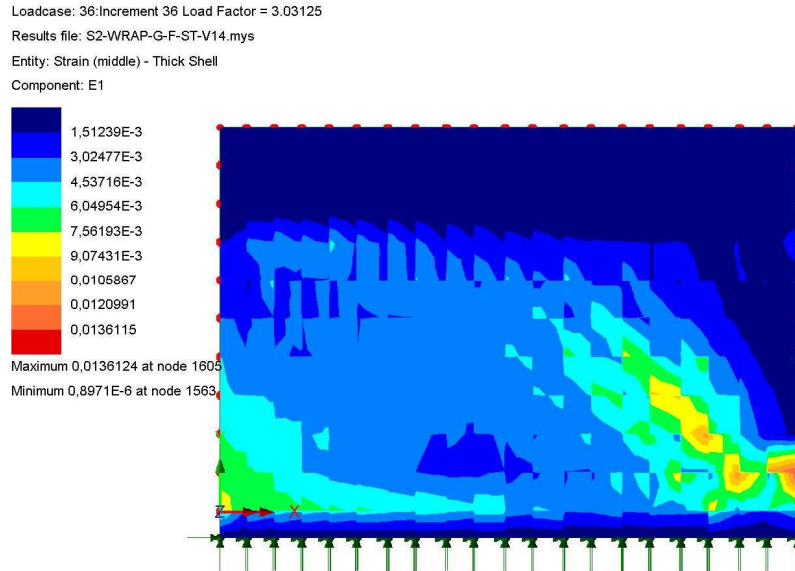
Şekil 4.66 Sadece Düşey Yük Etkisinde S2-WRAP-G-F-ST Duvarı LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Yatay yükün göçme yükünün % 57 (41,25 kN/ 71,87 kN) değerine ulaştığı durumda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları aşağıda Şekil 4.67’de verilmektedir. Şekil 4.68’de yatay yükün göçme yükünün % 85 (61,25 kN/ 71,87 kN) değerine ulaştığı durumda oluşan asal şekil

değiştirme dağılımları verilmiştir. LP elemanın kopma durumuna göre oluşan asal şekil değiştirme dağılımları deforme olmuş durumu ile Şekil 4.69'da verilmiştir.

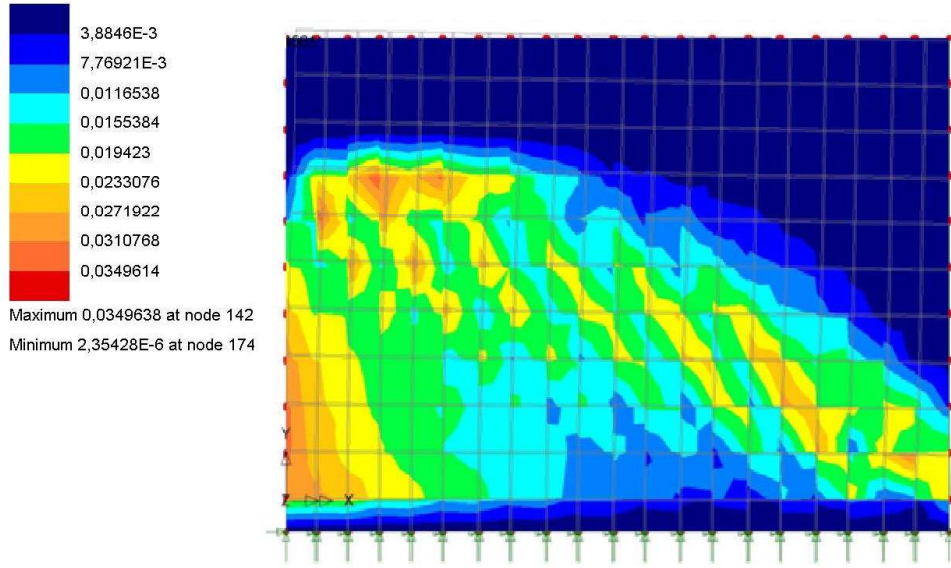


Şekil 4.67 Yatay Yükün Göçme Yükünün % 57 Değerinde S2-WRAP-G-F-ST Duvarında LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları



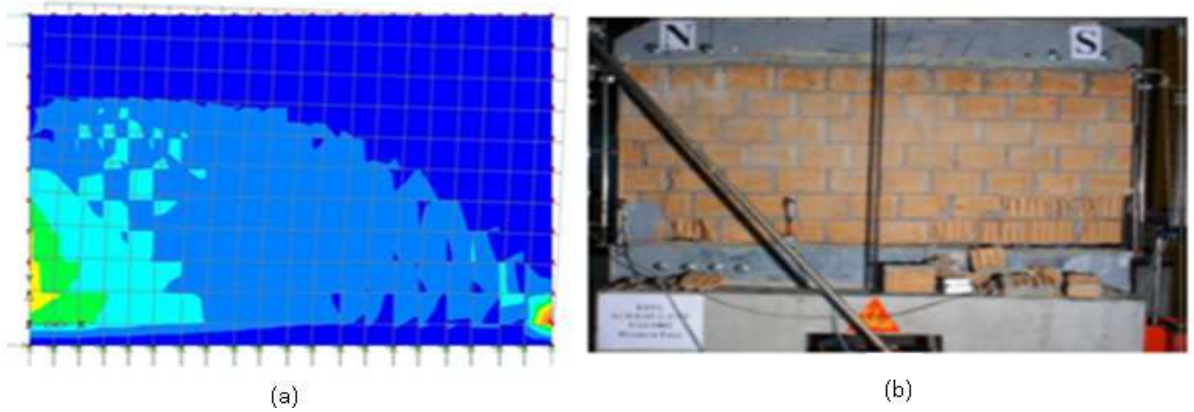
Şekil 4.68 Yatay Yükün Göçme Yükünün % 85 Değerinde S2-WRAP-G-F-ST Duvarında LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 70:Increment 70 Load Factor = 4.09375
Results file: S2-WRAP-G-F-ST-V14.mys
Entity: Strain (middle) - Thick Shell
Component: E1



Şekil 4.69 LP Elemanda Kopma Durumunda S2-WRAP-G-F-ST Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları.

Şekil 4.70(a ve b)'de ise nümerik modelin yığma birimlerinde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları ile fiziksel duvarın yalın yüzeyinde hasar durumu karşılaştırılmıştır. Yığma birimlerde oluşan asal şekil değiştirme değerlerine bakıldığında oluşan şekil değiştirmelerin duvar taban bölgesine yakın kısımlarda oluştuğunu söylemek mümkündür.

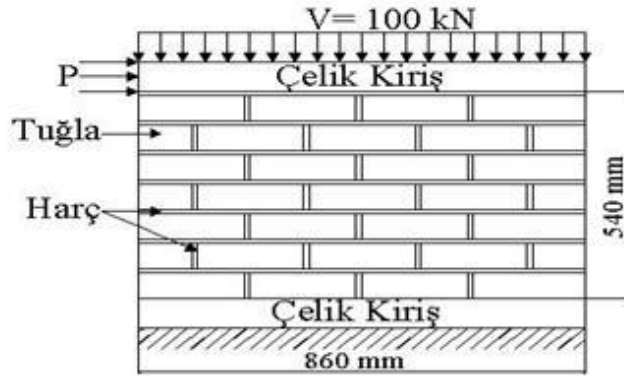


Şekil 4.70 S2-WRAP-G-F-ST Duvarı (a) Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları (b) S2-WRAP-G-F-ST Duvarında Yığma Birimlerde Hasar Oluşumu [19]

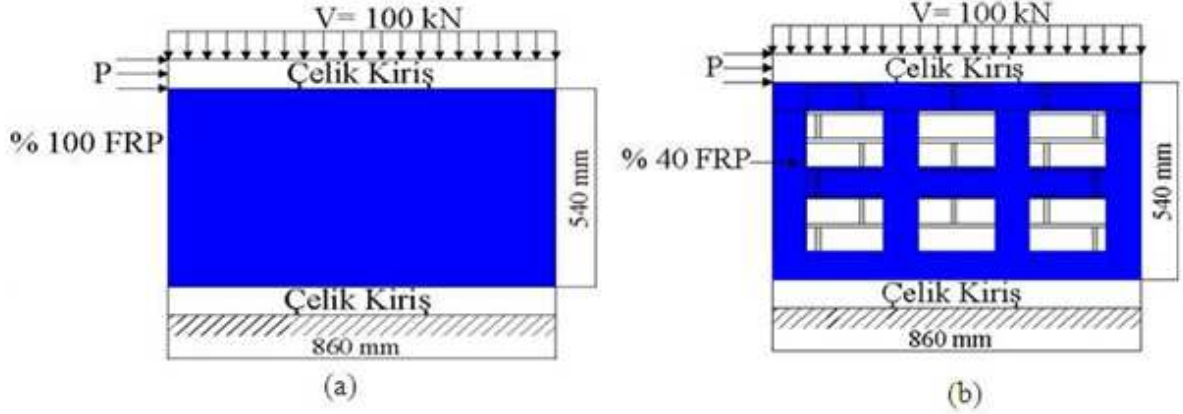
4.8 Deney Duvarı No.5

(Rahman ve Ueda [47]) çalışmalarında WALL 1-WALL 4 kodlu duvarları deneysel olarak test ettikten sonra nümerik olarak da irdilemişlerdir. WALL 1 ve WALL 2 kodlu duvarlar yalın,

WALL 3 ve WALL 4 kodlu duvarlar ise WALL 2 kodlu duvarın iki farklı biçimde LP elemanla sargılanması sonucunda oluşturulan duvarlardır. WALL 1 kodlu duvar 205x60x100 mm³ tuğla ölçüsü olan, bağlayıcı malzeme olarak 10 mm harç kullanılan ve toplam duvar boyutu 860x800x100 mm³ olan duvardır. WALL 2 ve WALL 4 kodlu duvarlar ise 205x60x100 mm³ tuğla ölçüsü olan, bağlayıcı malzeme olarak 10 mm harç kullanılan ve toplam duvar boyutu 860x540x100 mm³ olan deneysel duvarlardır. WALL 3 duvarının tüm yüzeyine LP elemanla sargılanma yapılmıştır, WALL 4 duvarında ise duvar tüm yüzey alanının %40 kadar kısımlar sargılanmıştır. Polyethylene Terephthalate (PET) isimli LP malzemesi kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında yalın duvarların LP elemanlarla güçlendirilmesi incelendiğinden WALL 1 ve WALL 2 kodlu duvarlar bu çalışmanın kapsamı dışında kalmışlardır. Duvarların fiziksel modellerinin altına ve üstüne çelik plaklar konularak deneysel olarak test edilmişlerdir. Üst kısma konulan çelik profilin amacı, düşey yükün düzgün şekilde aktarımını sağlamaktır. Deneysel duvarların şematik Şekli 4.71’de ve 4.72 (a-b)’de verilmiştir. Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9’da ise duvar geometrik ölçüleri ile mekanik özellikleri verilmiştir. Kullanılan PET malzemesi ile ilgili mekanik değerler ise, elastisite modülü değeri 10000 MPa, çekme gerilmesi değeri 740 MPa, LP eleman kalınlığı ise 0,841 mm’dir. Bu çalışma kapsamında LP elemanla güçlendirilmiş WALL 3 ve WALL 4 duvarları incelenmiştir.



Şekil 4.71 WALL 2 Duvarı Fiziksel Durumu [47]



Şekil 4.72 (a) Wall 3 ve (b) Wall 4 Duvarlarının Fiziksel Durumu [47]

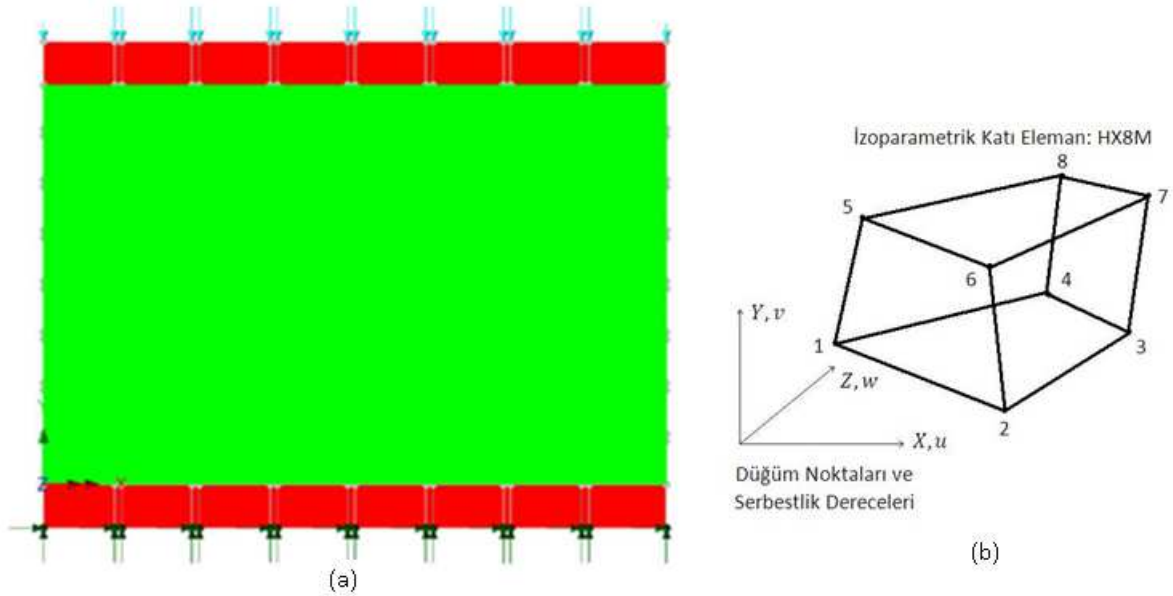
Bu çalışma kapsamında, WALL 3 ve WALL 4 kodlu güçlendirilmiş duvarların fiziksel deney koşulları da dikkate alınacak şekilde Bölüm 3’de verilen yaklaşım doğrultusunda nümerik simülasyonu 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik parametreler tuğla basınç dayanımı $f_{bt} = 26,5$ MPa, harç basınç dayanımı $f_{mr} = 12,5$ MPa, Poisson oranı ise $\mu = 0,20$ olarak deneysel verilerden alınmıştır [47]. Bu duvarlar 100 kN (1,16 MPa) kadar düzgün yayılı yükle yüklendikten sonra düşey yük sabit tutularak, yatay yükler kademeli olarak artırılmıştır. Önerilen nümerik modelde, çelik profil, tuğla ve harç birimler 3 boyutlu, 8 düğüm noktalı izoparametrik katı elemanlar ile modellenmiş ve 1738 düğüm noktasına sahip toplamda 255 katı eleman kullanılmıştır. Bunların 92 adedi tuğla, 133 adedi harç, 30 adedi ise duvarın alt ve üst kısmına konulan çelik plak elemana ait malzeme özelliklerini içermektedir. LP eleman 488 yüzeye tanıtılmıştır. Rijit plak elemanlar için malzeme doğrusal elastik kabul edilmiş, tuğla- harç elemanlara ait malzeme özellikleri ise elasto-plastik malzeme modelleri yardımı ile tanımlanmıştır. Duvarın rijit plağa oturduğu taban kesitlerinde mesnetlenme şekli ankastre olarak kabul edilmiştir. WALL 3 duvarı için nümerik model ve kullanılan katı elemana ait geometri ve düğüm noktası serbestlikleri şematik olarak Şekil 4.73 (a ve b)’de verilmiştir.

Çizelge 4.8 WALL 3 ve WALL 4 Duvarları Geometrik Ölçüleri ve Yük Değerleri

Duvar Adı	Duvar boyutları (mm)	Eleman boyutu (mm)	Ugulanan düşey yük (kN)	Düşey yükte gerilme (MPa)	Max. yatay yükler Deneysel(kN)	Max. yatay yükler Nümerik(kN)
WALL 3	860x540x100	205x60x100	100	1,25	165	200
WALL 4	860x540x100	205x60x100	100	1,25	130	192

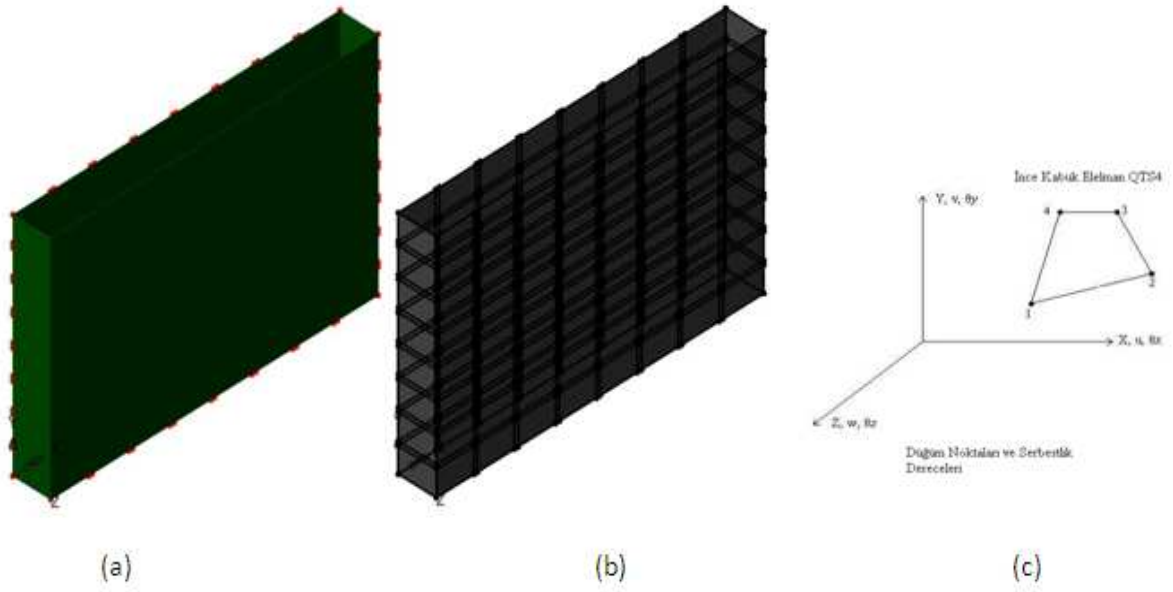
Çizelge 4.9 WALL 3 ve WALL 4 Duvarları Mekanik Özellikleri

Tuğla						Harç				
Duvar adı	E_{bl} (MPa)	f_{bl} (MPa)	Poisson Oranı	c_{bl} (MPa)	$\phi_{bl}(^{\circ})$	f_{mr} (MPa)	E_{mr} (MPa)	Poisson Oranı	c_{mr} (MPa)	$\phi_{mr}(^{\circ})$
WALL 3	8000	26,5	0,2	2,27	58,94	12,5	125	0,2	3,50	18,90
WALL 4	8000	26,5	0,2	2,16	59,06	12,5	125	0,2	3,50	18,90



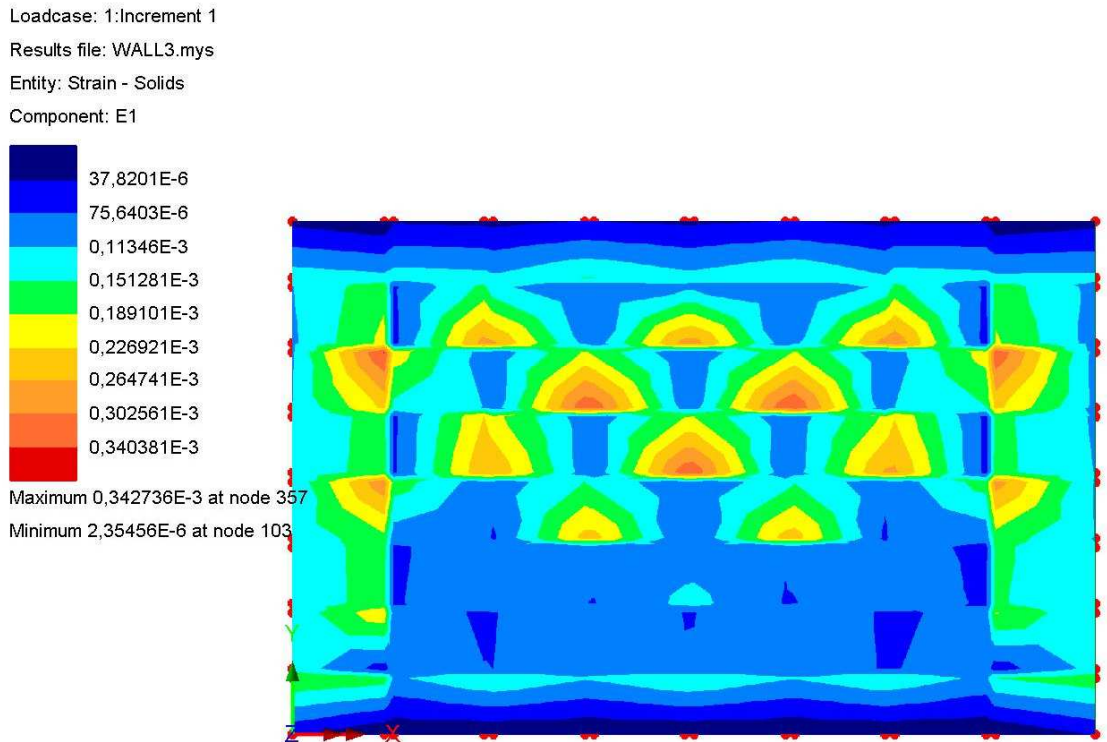
Şekil 4.73 (a) WALL 3 Duvarı Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66]

Bölüm 3’de verilmiş olan bünyesel bağıntılar kullanılarak harç ve tuğla için Drucker- Prager kriterinin ihtiyaç duyduğu kohezyon ve içsel sürtünme açıları elde edilmiştir. Elastisite modülleri, Poisson oranları ve plastisite özellikli olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri doğrusal olmayan sonlu elemanlar LUSAS [66] ile çalışan programının plastik analiz modülünde tanımlanmıştır. Tabanda ankastre mesnetlenmeyi, üst tarafta ise düşey yükün düzgün dağılmasını sağlayan çelik malzeme elastik kabul edilmiştir. LP elemanın nümerik modeli, sonlu eleman ağı ve sonlu eleman tipi aşağıda Şekil 4.74(a,b,c)’de verilmiştir.



Şekil 4.74 (a) LP Eleman Nümerik Modeli (b) Sonlu Eleman Ağı (c) Sonlu Eleman Tipi [66]

Şekil 4.75’de sadece düşey yükün etkimesi sonucu yığma birimlerde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir.



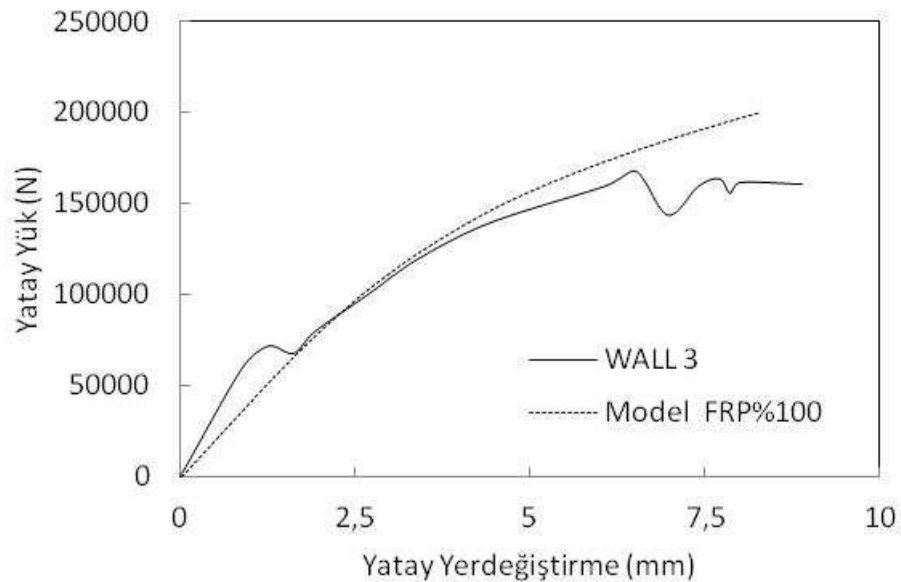
Şekil 4.75 Sadece Düşey Yük Etkisinde WALL 3 Duvarı Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Önerilen nümerik modelde tuğla birimlerin basınç dayanımı ile düşey basınç gerilmelerine bağlı olarak tuğla birimler için içsel sürtünme açısı (4.17) bağıntısı ile $\phi_{bl} = 58,94^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Tuğla elemanlardaki kohezyon değeri (4.16) bağıntısı ile $c_{bl} = 2,27$ MPa olarak bulunmuştur. Tuğla birimler için elastisite modülü $E_{bl} = 8000$ MPa, harç birimler için $E_{mr} = 125$ MPa alınmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.9’da verilmiştir. Harç birimler için içsel sürtünme açısı (4.15) bağıntısı ile $\phi_{mr} = 18,90^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Harç birimlerdeki kohezyon değeri (4.16) bağıntısı ile $c_{mr} = 3,50$ MPa olarak bulunmuştur.

Analizin sonlandırıldığı an için tuğla- harç etkileşimi dikkate alınarak Bölüm 4.3’te bağıntı 4.19 ile maksimum birim şekil değiştirme $\varepsilon_{max} = 10/(2 * 60 + 10) = 0,076$ olarak belirlenebilir. LP elemanın kopma durumuna göre baktığımızda ise $\varepsilon_{FRP} = \frac{f_t}{E_{FRP}} = \frac{740}{1000} = 0,74$ olduğu değerdir. Bu değerlerin bir birine yakın olduğunu söyleyebiliriz.

WALL 3 kodlu duvarın fiziksel durumda göçme nedeni duvar alt kısmına konulan çelik plaka ile yığma duvar birleşim bölgesinde oluşan ayrışmadan kaynaklanmıştır. Yığma birimlerde ve LP elemanda hasar oluşmadığı belirtilmiştir [47]. Nümerik modelde analiz stabiliteden dolayı sonlanmıştır.

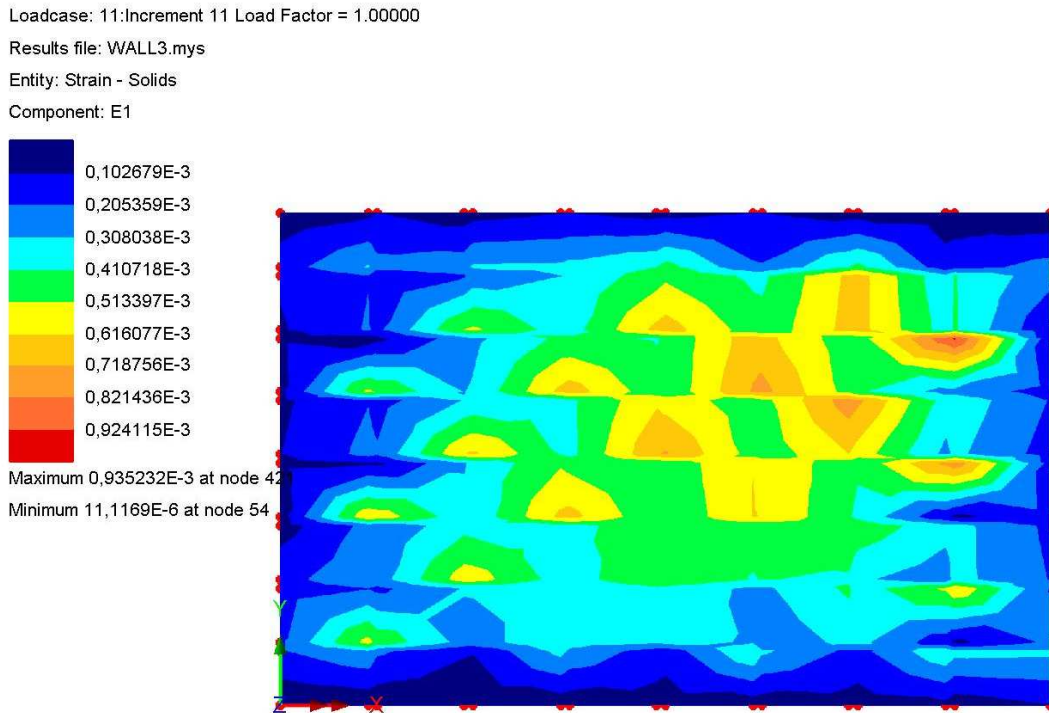
LP elemanın kopma değerine ve yığma birimlerde harç-tuğla etkileşiminden elde edilen değerlere varmadan analiz sonlanmıştır. Yük- yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.76’da verilmiştir.



Şekil 4.76 WALL 3 Duvarı Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi

Plastik şekil değiştirmeler, gerilmeler açısından kritik kesimler olan duvar taban bölgesine yakın kesimlerinde yoğunlaşmaktadır. Fiziksel modelde hasarlar taban bölgesinde yığma

birimlerle tabana konulan çelik palaka arasındaki kesimlerde yoğunlaşmıştır. Nümerik modelde yatay yükün % 81 (162 kN/ 200 kN), plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı bölgelerin duvar taban kesitinde olduğu söylenebilir. Yatay yükün göçme yükünün % 11 (22 kN/200 kN) durumunda WALL 3 kodlu duvarda yığma birimlerde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları aşağıda Şekil 4.77’de verilmiştir. Şekil 4.78’de yatay yükün göçme yükünün % 51 (102 kN/ 200 kN) durumunda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir. Şekil 4.79’da yatay yükün göçme yükünün % 81 (162 kN/ 200 kN) durumunda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir. Analizin sonlandırıldığı durumda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.80’de verilmiştir.



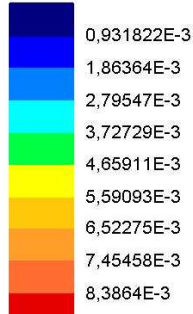
Şekil 4.77 Yatay Yükün Göçme Yükünün % 11 Değerinde WALL 3 Duvarı Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 51:Increment 51 Load Factor = 5.00000

Results file: WALL3.mys

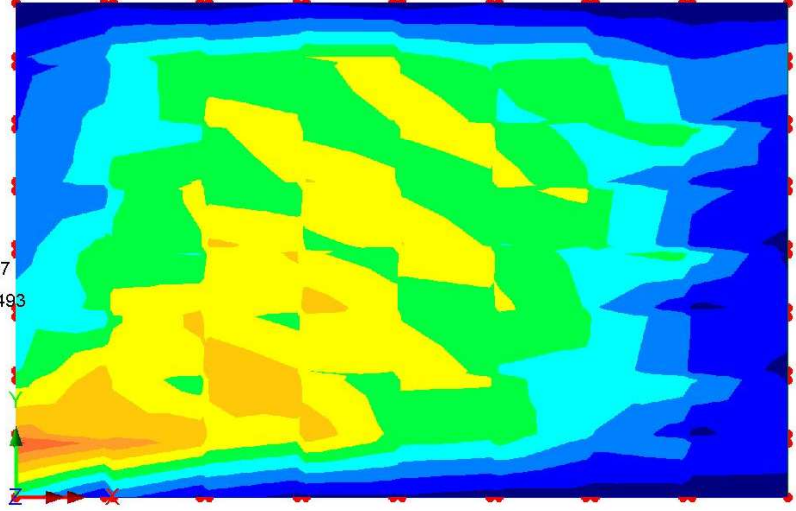
Entity: Strain - Solids

Component: E1



Maximum 8,53914E-3 at node 47

Minimum 0,152746E-3 at node 493



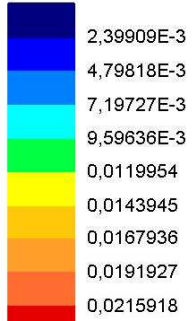
Şekil 4.78 Yatay Yükün Göçme Yükünün % 51 Değerinde WALL 3 Duvarı Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 81:Increment 81 Load Factor = 8.00000

Results file: WALL3.mys

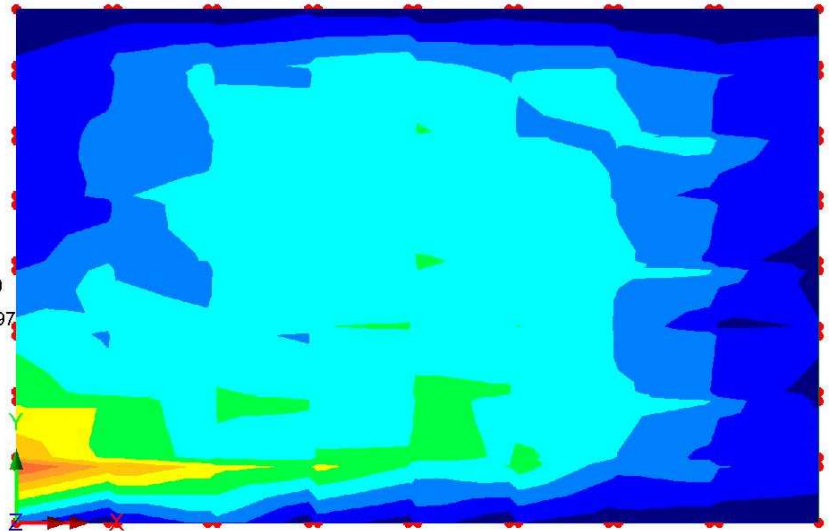
Entity: Strain - Solids

Component: E1



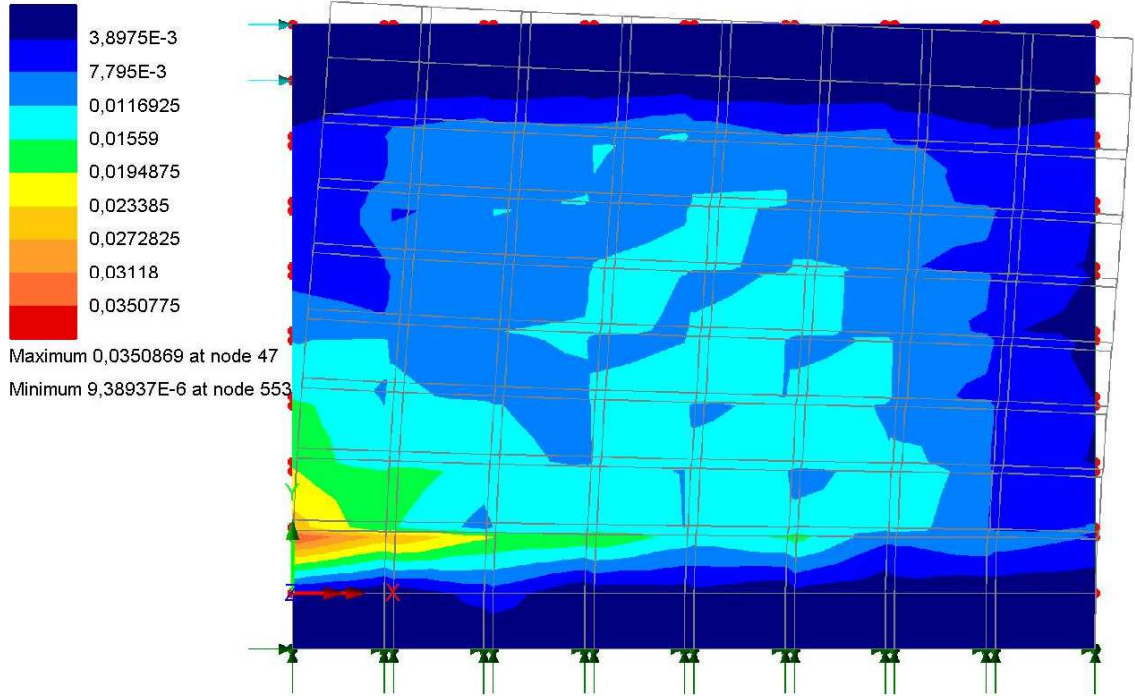
Maximum 0,0218247 at node 50

Minimum 0,23285E-3 at node 497



Şekil 4.79 Yatay Yükün Göçme Yükünün % 81 Değerinde WALL 3 Duvarı Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

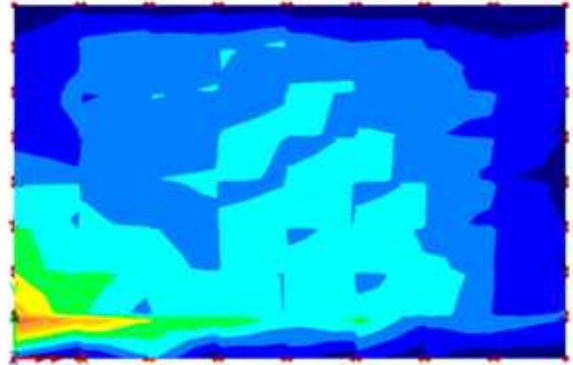
Loadcase: 102:Increment 102 Load Factor = 10.0000
Results file: WALL3.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



Şekil 4.80 Analizin Sonlandırıldığı Durumda WALL 3 Duvarı Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları



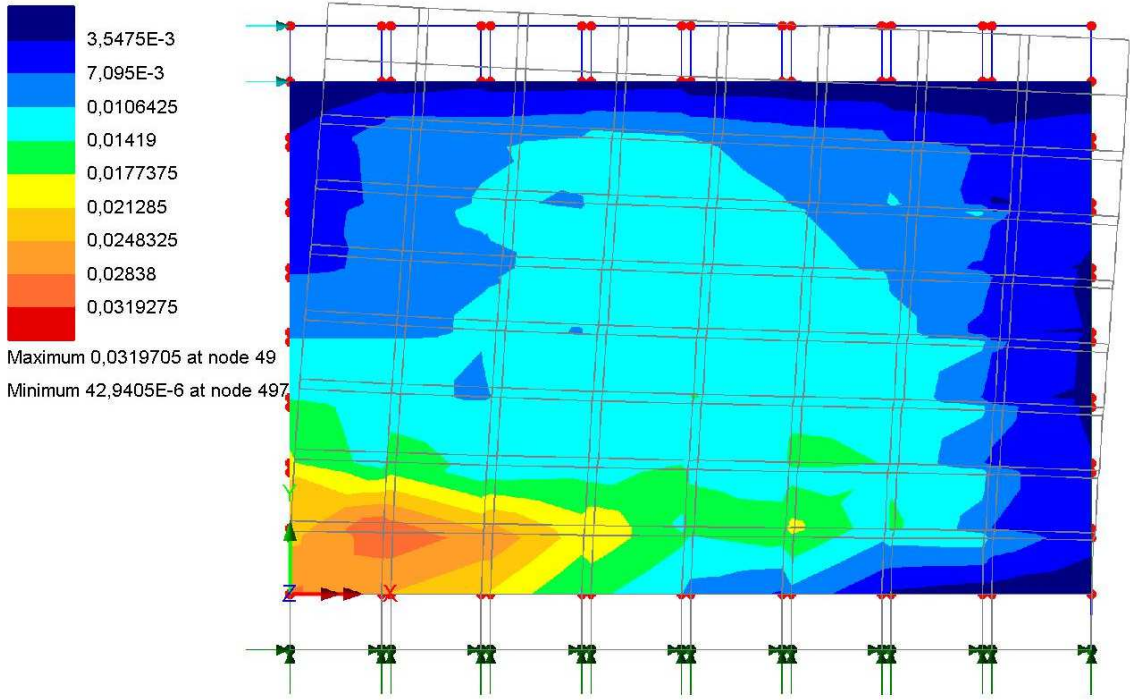
(a)



(b)

Şekil 4.81 (a) Fiziksel Durumda Hasar Oluşumu [47] (b) Nümerik Modelde Asal Şekil Değiştirme Dağılımı

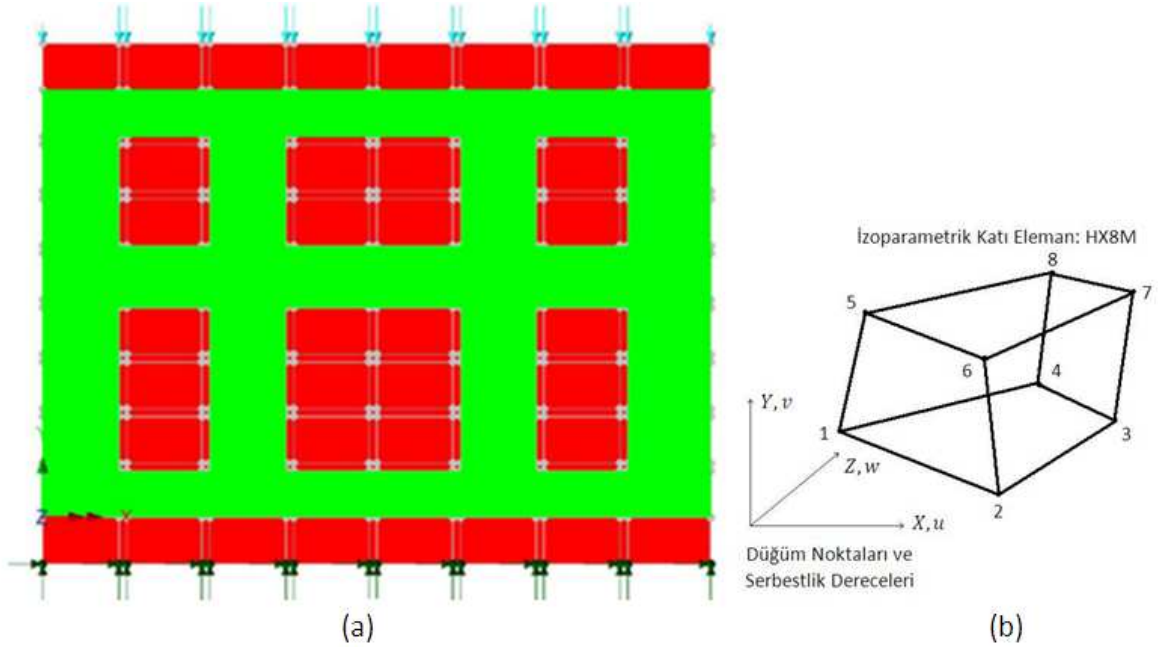
Loadcase: 102:Increment 102 Load Factor = 10.0000
Results file: WALL3.mys
Entity: Strain (middle) - Thick Shell
Component: E1



Şekil 4.82 Analizin Sonlandırıldığı Durumda WALL 3 Duvarı LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları

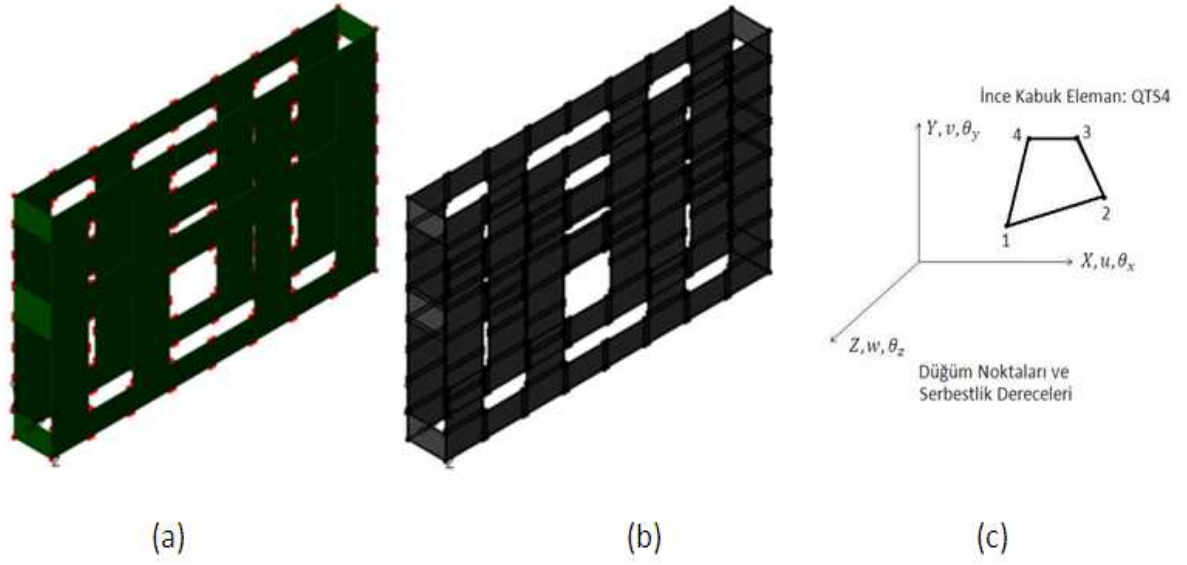
WALL 4 kodlu duvar, yüzey alanının %40 kadar LP elemanla güçlendirilmiş duvardır. Fiziksel durumu Şekil 4.72 (b)'de verilmiştir. Bu duvarın mekanik özellikleri ve geometrik ölçüleri ise Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9'da verilmiştir. WALL 4 kodlu güçlendirilmiş duvarların fiziksel deney koşulları da dikkate alınacak şekilde Bölüm 3'de verilen yaklaşım doğrultusunda nümerik simülasyonu 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik parametreler tuğla basınç dayanımı $f_{bt} = 26,5$ MPa, harç basınç dayanımı $f_{mr} = 12,5$ MPa, Poisson oranı ise $\mu = 0,20$ olarak deneysel verilerden alınmıştır [47]. Bu duvarlar 100 kN (1,16 MPa) kadar düzgün yayılı yükü yüklendikten sonra düşey yük sabit tutularak, yatay yükler kademeli olarak artırılmıştır. Önerilen nümerik modelde, çelik profil, tuğla ve harç birimler 3 boyutlu, 8 düğüm noktalı izoparametrik katı elemanlar ile modellenmiş ve 1738 düğüm noktasına sahip toplamda 255 katı eleman kullanılmıştır. Bunların 92 adedi tuğla, 133 adedi harç, 30 adedi ise duvarın alt ve üst kısmına konulan çelik plak elemana ait malzeme özelliklerini içermektedir. LP eleman 240 yüzeye tanıtılmıştır. Rijit plak elemanlar için malzeme doğrusal elastik kabul edilmiş, tuğla- harç elemanlara ait malzeme özellikleri ise elasto-plastik malzeme modelleri yardımı ile tanımlanmıştır. Duvarın

rijit plağa oturduğu taban kesitlerinde mesnetlenme şekli ankastre olarak kabul edilmiştir. WALL 4 duvarı için nümerik model ve kullanılan katı elemana ait geometri ve düğüm noktası serbestlikleri şematik olarak Şekil 4.83 (a ve b)’de verilmiştir.



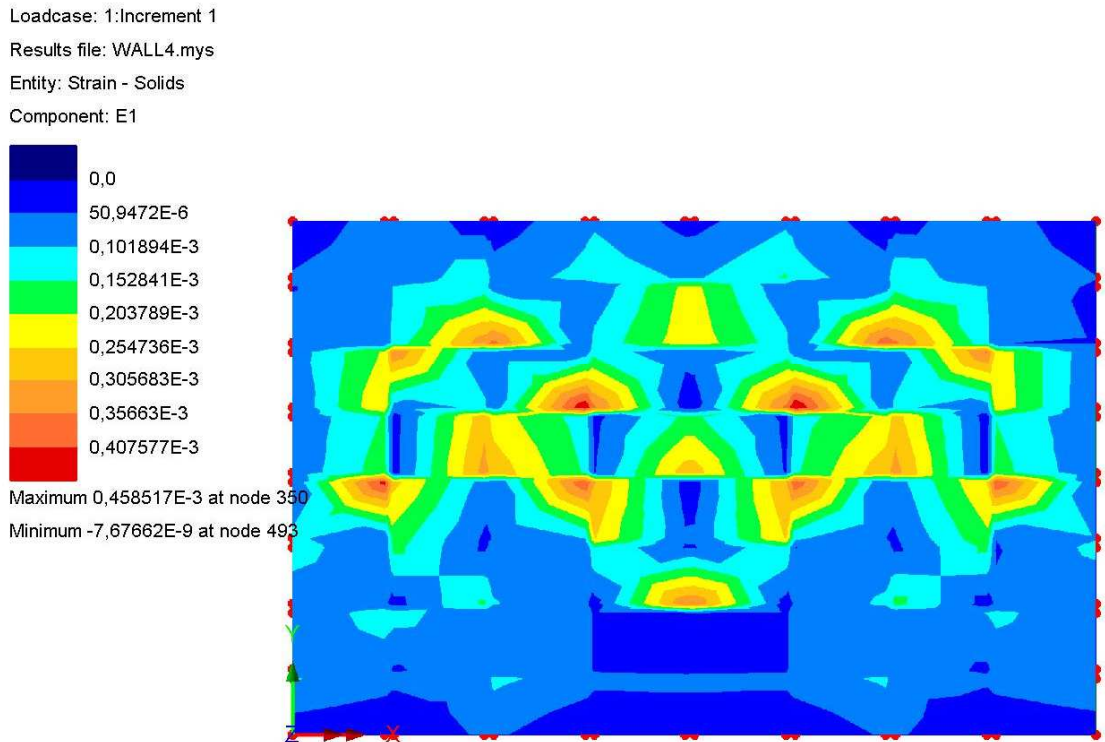
Şekil 4.83 (a) WALL 4 Duvarı Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66]

Bölüm 3’de verilmiş olan bünyesel bağıntılar kullanılarak harç ve tuğla için DP kriterinin ihtiyaç duyduğu kohezyon ve içsel sürtünme açıları elde edilmiştir. Elastisite modülleri, Poisson oranları ve plastisite özellikli olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri doğrusal olmayan sonlu elemanlar LUSAS [66] ile çalışan programının plastik analiz modülünde tanımlanmıştır. Tabanda ankastre mesnetlenmeyi, üst tarafta ise düşey yükün düzgün dağılmasını sağlayan çelik malzeme elastik kabul edilmiştir. WALL 4 duvarı LP elemanın nümerik modeli, sonlu eleman ağı ve sonlu eleman tipi aşağıda Şekil 4.84 (a,b,c)’de verilmiştir.



Şekil 4.84 (a) LP Eleman Nümerik Modeli (b) Sonlu Eleman Ağı (c) Sonlu Eleman Tipi [66]

Şekil 4.85’de sadece düşey yükün etkimesi sonucu yığma birimlerde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir.



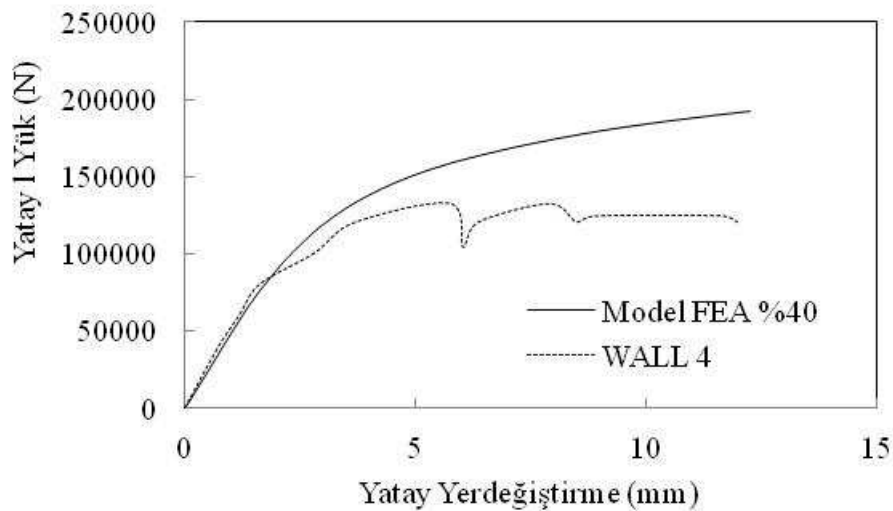
Şekil 4.85 Sadece Düşey Yük Etkisinde WALL 4 Duvarı Yığma Birimlerinde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Önerilen nümerik modelde tuğla birimlerin basınç dayanımı ile düşey basınç gerilmelerine bağlı olarak tuğla birimler için içsel sürtünme açısı 4.17 bağıntısı ile $\phi_{bl} = 59,06^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Tuğla elemanlardaki kohezyon değeri 4.16 bağıntısı ile $c_{bl} = 2,16$ MPa olarak bulunmuştur. Tuğla birimler için elastisite modülü $E_{bl} = 8000$ MPa, harç birimler için $E_{mr} = 125$ MPa alınmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.9’da verilmiştir. Harç birimler için içsel sürtünme açısı 4.15 bağıntısı ile $\phi_{blmr} = 18,90^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Harç birimlerdeki kohezyon değeri 4.14 bağıntısı ile $c_{mr} = 3,50$ MPa olarak bulunmuştur.

Analizin sonlandırıldığı an için tuğla- harç etkileşimi dikkate alınarak Bölüm 4.3’te bağıntı (4.19) ile maksimum birim şekil değiştirme $\varepsilon_{max} = 10/(2 * 60 + 10) = 0,076$ olarak belirlenebilir. LP elemanın kopma durumuna göre baktığımızda ise $\varepsilon_{FRP} = \frac{f_t}{E_{FRP}} = \frac{740}{1000} = 0,074$ olduğu değerdir. Bu değerlerin birbirine yakın olduğunu söyleyebiliriz. WALL 4 fiziksel durumunda yığma birimlerde hasar oluşması ile duvarda göçme oluşmuştur. LP elemanda hasar oluşmadan duvarda göçme meydana gelmiştir [47].

Nümerik modelde de yığma birimlerde (4.19) bağıntısı ile maksimum birim şekil değiştirme değeri elde edilmiştir, LP elemanın kopma durum değerine varmadan analiz sonlandırılmıştır.

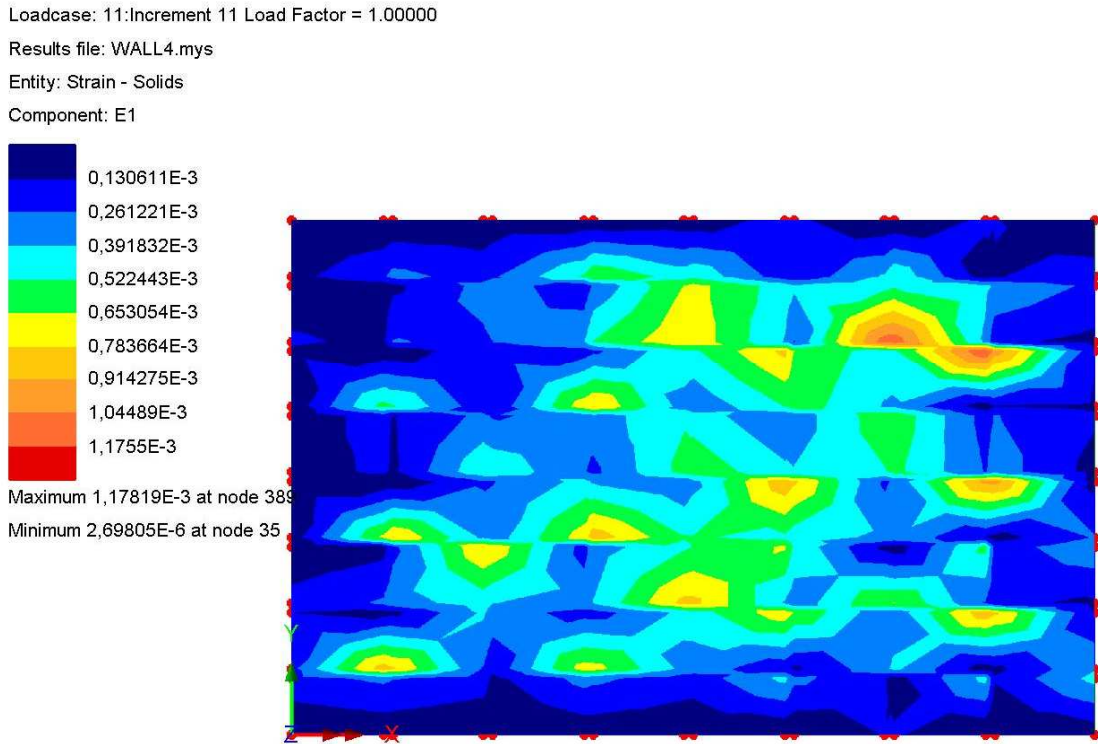
Bu durum nümerik analizde sağlanmıştır. Analizin sonlandırılması durumunda oluşan yük-yerdeğiştirme eğrisi aşağıda Şekil 4.86’da verilmiştir.



Şekil 4.86 WALL 4 Duvarı Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi

Plastik şekil değiştirmeler, gerilmeler açısından kritik kesimler olan duvar taban bölgesine yakın kesimlerinde yoğunlaşmaktadır. Fiziksel modelde hasarlar taban bölgesinde yığma

birimlerle tabana konulan çelik palaka arasındaki kesimlerde yoğunlaşmıştır. Yatay yükün göçme yükünün % 11 (22 kN/ 192 kN) değerinde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.87’de verilmiştir. Yatay yükün göçme yükünün % 63 (122 kN/ 192 kN) değerinde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.88’de verilmiştir. Nümerik modelde yatay yükün % 95 (183 kN/ 192 kN), plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı bölgelerin duvar taban kesitinde olduğu söylenebilir. Bu durum Şekil 4.89’da verilmiştir. Şekil 4.90’da ise analizin sonlandırıldığı durumda yığma birimlerde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir. Analizin sonlandırıldığı durumda nümerik modelde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları ile fiziksel modelde oluşan hasar durumu Şekil 4.91 (a ve b)’de karşılaştırılmıştır.



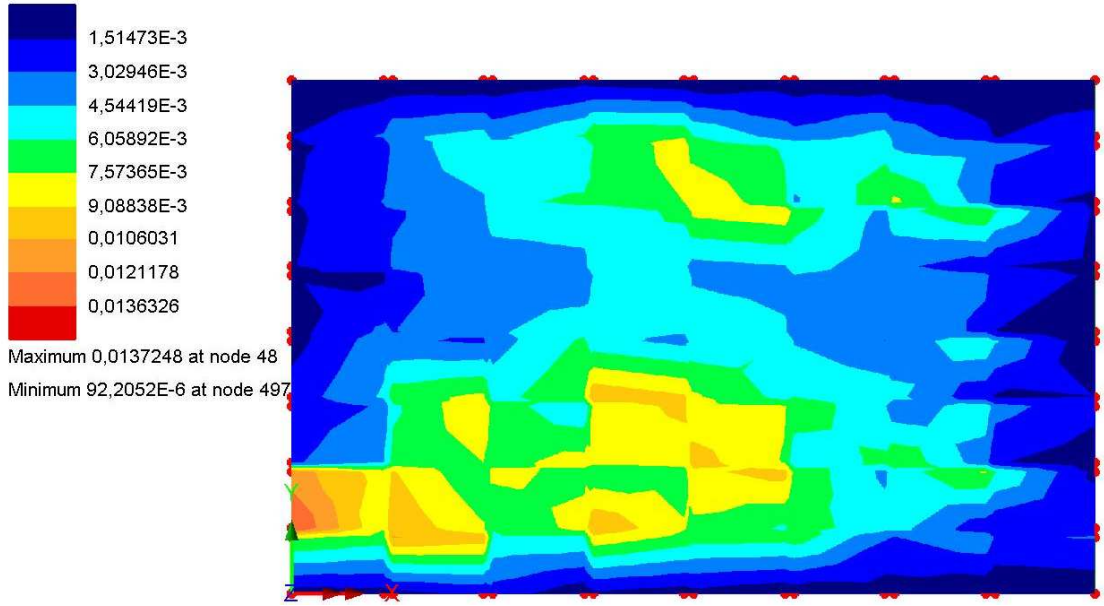
Şekil 4.87 WALL 4 Duvarında Yatay Yükün Göçme Yükünün % 11 Durumunda Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 61:Increment 61 Load Factor = 6.00000

Results file: WALL4.mys

Entity: Strain - Solids

Component: E1



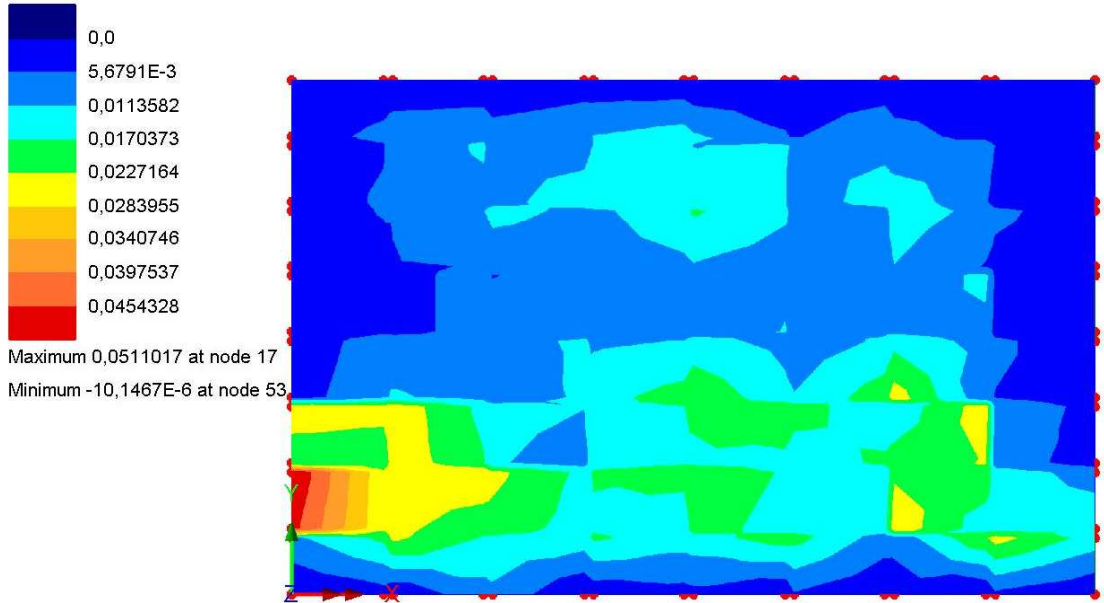
Şekil 4.88 WALL 4 Duvarında Yatay Yükün Göçme Yükünün % 63 Durumunda Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları

Loadcase: 93:Increment 93 Load Factor = 9.06724

Results file: WALL4.mys

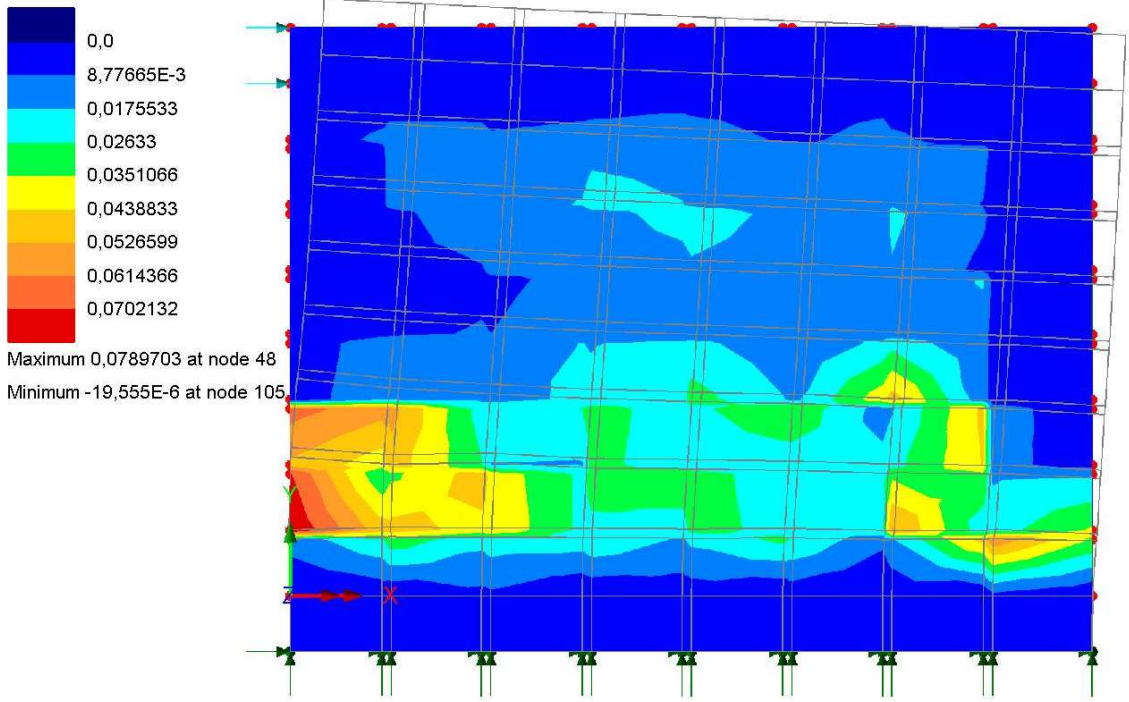
Entity: Strain - Solids

Component: E1

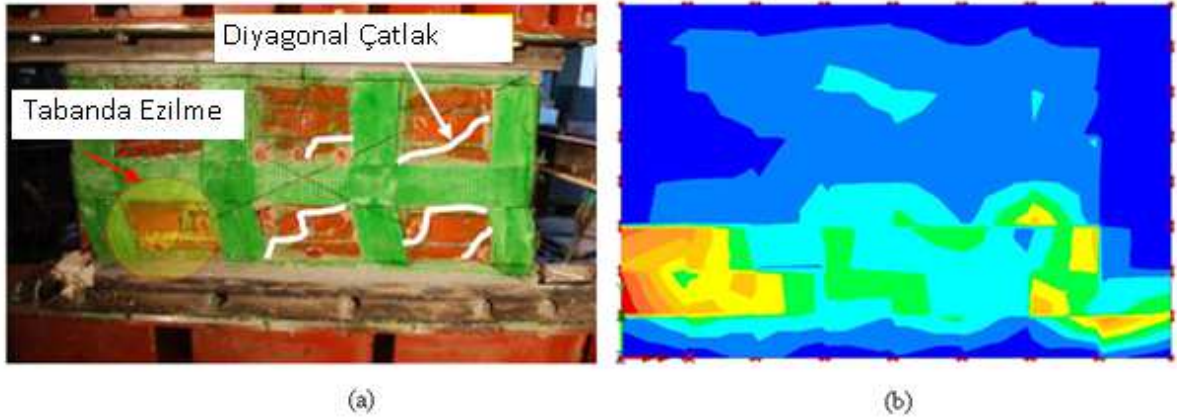


Şekil 4.89 WALL 4 Duvarında Yatay Yükün Göçme Yükünün % 95 Durumunda Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları

Loadcase: 104:Increment 104 Load Factor = 10.0670
Results file: WALL4.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



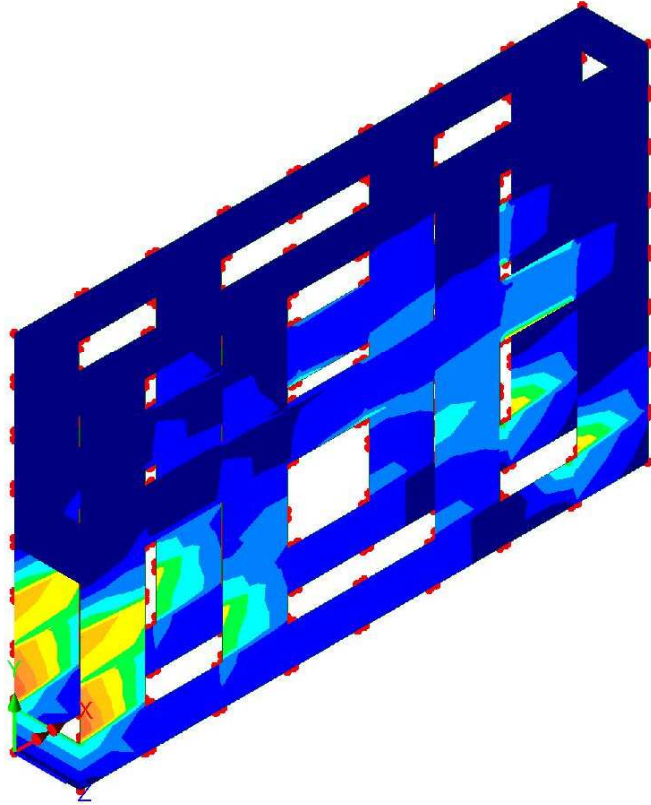
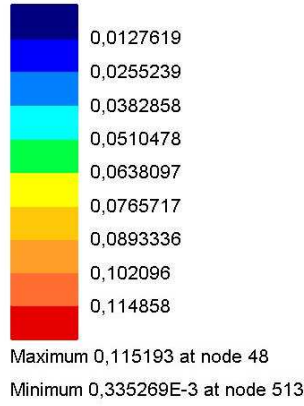
Şekil 4.90 WALL 4 Duvarında Analizin Sonlandırıldığı Durumda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları



Şekil 4.91 (a) WALL 4 Duvarı Fiziksel Modelde Hasar Oluşumu [47] (b) Wall 4 Duvarı Yığma Birimlerde Asal Şekil Değiştirme dağılımları

Yığma birimlerde asal şekil değiştirmelerin maksimum olduğu durumda LP elemanda oluşan şekil değiştirme dağılımı ise Şekil 4.92’de verilmiştir. Şekil 4.91 ve 4.92’ten görüleceği üzere LP şeritlerde oluşan hasar biçimi ile analiz sonucunda elde edilen en büyük çekmenin oluştuğu bölgeler son derece uyumludur:

Loadcase: 104:Increment 104 Load Factor = 10.0670
Results file: WALL4.mys
Entity: Strain (middle) - Thick Shell
Component: E1



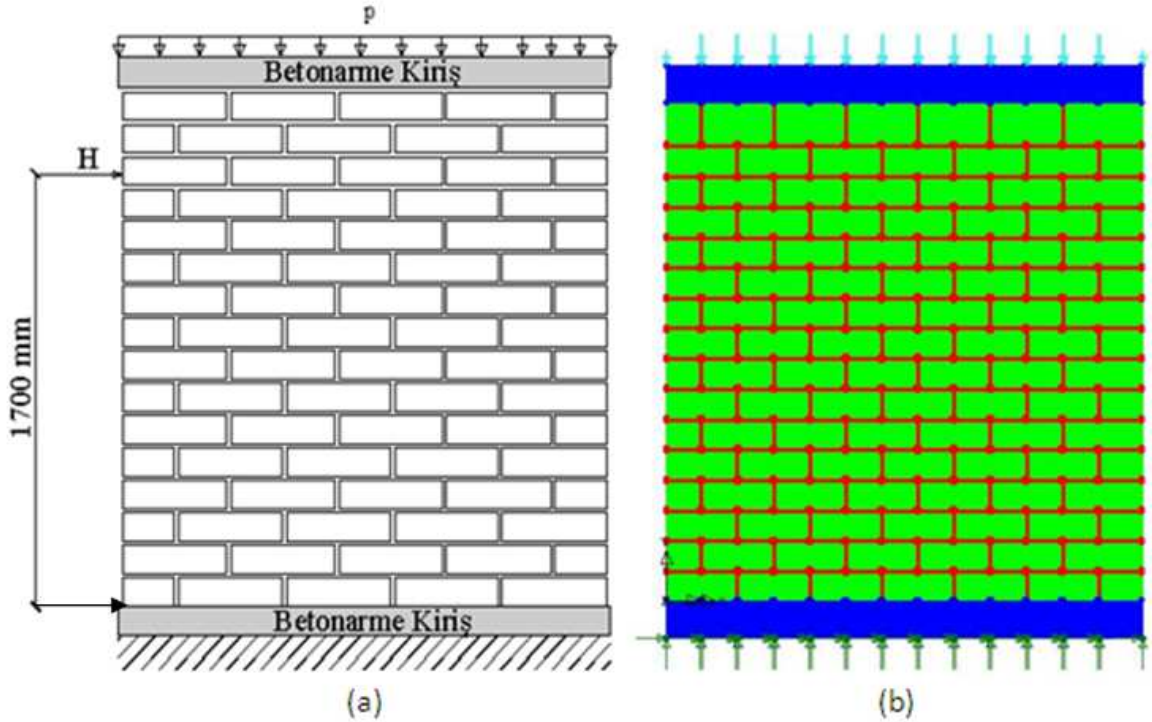
Şekil 4.92 WALL 4 Duvarında Analizin Sonlandırıldığı Durumda LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

4.9 Deney Duvarı No.6

(Alcaino, vd.[23], (Santa- Maria, vd. [24-26]), gerçekleştirdikleri çalışmalarında tuğla ölçüleri $290 \times 112 \times 140 \text{ mm}^3$ olan bağlayıcı malzeme olarak 10 mm harç kullanılan ve toplam duvar boyutu $1975 \times 2000 \times 140 \text{ mm}^3$ olan 12 (on iki) adet yığma duvar üzerine bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bunlardan iki tanesi yalın (URM1 ve URM 2), beş tanesi yatay (HURM), diğer beş tanesi ise diyagonal yönlerde LP ile güçlendirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında diyagonal yönde güçlendirilen duvarlar incelenmemiştir. Duvar tabanına ve üstüne betonarme kiriş oturtulmuştur. Duvarın üstüne oturtulan betonarme kirişin amacı düşey yükün düzgün şekilde yayılmasını sağlamaktır. Deney duvarının fiziksel durumu Şekil 4.93’de verilmiştir [23-26].

Çizelge 4.10 URM ve HURM Duvarları Geometrik Ölçüleri ve Yük Değerleri

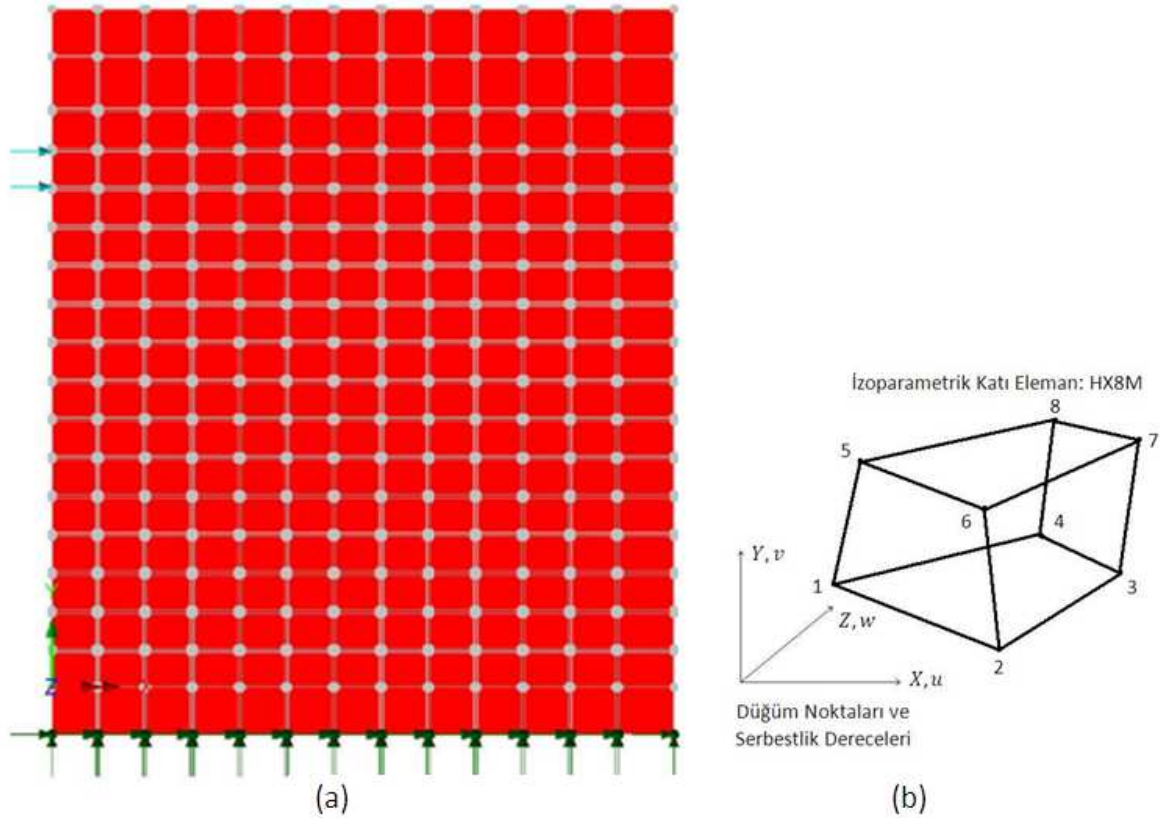
Duvar Adı	Duvar boyutları (mm ³)	Eleman boyutu (mm ³)	Ugulanan düşey yük (kN)	Düşey yükte gerilme (MPa)	Max. yatay yükler Deneysel(kN)	Max. yatay yükler Nümerik (kN)
URM	1975x2000x140	290x112x140	98	0,350	135	165
HURM	1975x2000x140	290x112x140	98	0,350	235	276



Şekil 4.93 (a) URM 1-2 Duvarı Fiziksel Durum [23] ve (b) Nümerik Model

Bu çalışma kapsamında, URM 1-2 kodlu yalın duvarın fiziksel deney koşulları da dikkate alınacak şekilde Bölüm 3'te verilen yaklaşım doğrultusunda nümerik simülasyonu 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik parametreler tuğla basınç dayanımı $f_{bl} = 12,4$ MPa, harç basınç dayanımı $f_{mr} = 28,7$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak deneysel verilerden alınmıştır [23-26]. URM 1-2 kodlu yalın duvar düşeyde 98 kN (0,35 MPa) kadar yüklendikten sonra düşey yük sabit tutularak yatay yükler kademeli olarak artırılmıştır. Önerilen nümerik modelde beton/betonarme levha, tuğla, harç birimler 3 boyutlu, 8 düğüm noktalı izoparametrik katı elemanlar ile modellenmiş ve 6065 düğüm noktasına sahip toplamda 825 katı eleman kullanılmıştır. Bunların 304 adedi tuğla, 471 adedi harç, ve 50 adedi ise duvar alt ve üstüne konulan beton elemana ait malzeme özelliklerini içermektedir. Rijit beton elemanlar için malzeme elastik kabul edilmiş, tuğla ve harç

elemanlara ait malzeme özellikleri ise elasto-plastik malzeme modelleri ile tanımlanmıştır. Duvarın beton/betonarme plağa oturduğu taban kesitlerinde mesnetlenme şekli ankastre olarak kabul edilmiştir. Nümerik model sonlu eleman ağı ve sonlu eleman tipi Şekil 4.94 (a ve b)'de verilmiştir.



Şekil 4.94 (a) URM 1 Duvarı Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66]

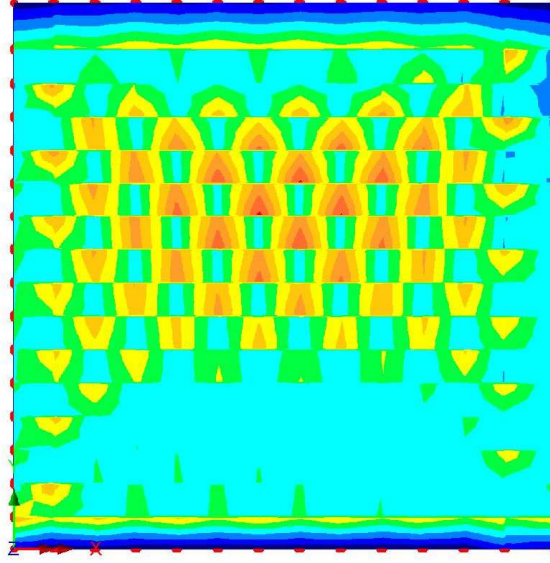
Bölüm 3'te verilmiş olan bünyesel bağıntılar kullanılarak harç ve tuğla için DP kriterinin ihtiyaç duyduğu kohezyon ve içsel sürtünme açıları elde edilmiştir. Elastisite modülleri, Poisson oranları ve plastisite özellikli olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri doğrusal olmayan sonlu elemanlar LUSAS [66] ile çalışan programının plastik analiz modülünde tanımlanmıştır. Şekil 4.95'de sadece düşey yükün etkidiği durumda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir.

Önerilen nümerik modelde tuğlanın basınç dayanımı ile düşey basınç gerilmelerine bağlı olarak tuğla birimler için içsel sürtünme açısı 4.17 bağıntısı ile $\phi_{bl} = 59,59^\circ$ derece şeklinde elde edilmiştir. Tuğla elemanlardaki kohezyon değeri 4.16 bağıntısı ile $c_{bl} = 0,68$ MPa olarak bulunmuştur.

Loadcase: 1:Increment 1
Results file: URM-1.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1

4,006E-6
8,012E-6
12,018E-6
16,024E-6
20,03E-6
24,036E-6
28,042E-6
32,048E-6
36,054E-6

Maximum 37,0379E-6 at node 1060
Minimum 0,983946E-6 at node 155



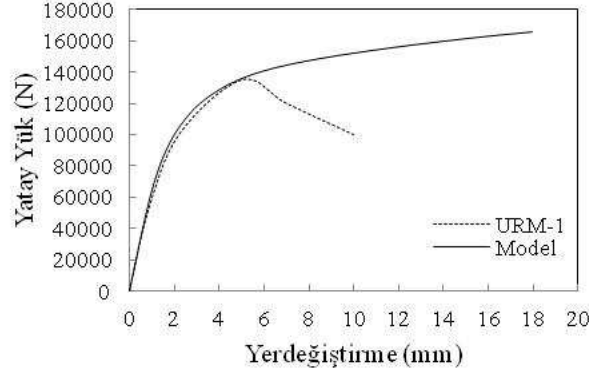
Şekil 4.95 Sadece Düşey Yük Etkisinde URM 1-2 Duvarında Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları

Tuğla birimler için elastite modülü $E_{bl} = 5800$ MPa, Poisson oranı ise $\mu = 0,20$ alınmıştır. Harç birimler için içsel sürtünme açısı 4.15 bağıntısı ile $\phi_{mr} = 43,59^\circ$ derece şeklinde elde edilmiştir. Harç elemanlardaki kohezyon değeri 4.14 bağıntısı ile $c_{mr} = 4,74$ MPa olarak bulunmuştur. Harç birimler için elastite modülü $E_{mr} = 300$ MPa, Poisson oranı ise $\mu = 0,20$ alınmıştır. Elde edilen bu değerler Çizelge 4.11’de verilmektedir.

Çizelge 4.11 URM ve H-URM Duvarları Mekanik Özellikleri

Duvar adı	Tuğla					Harç				
	E_{bl} (MPa)	f_{bl} (MPa)	Poisson Oranı	c_{bl} (MPa)	$\phi_{bl}(^\circ)$	f_{mr} (MPa)	E_{mr} (MPa)	Poisson Oranı	c_{mr} (MPa)	$\phi_{mr}(^\circ)$
URM 1-2	5800	12,4	0,2	0,68	59,59	28,7	300	0,2	4,74	43,59
HURM	5800	12,4	0,2	1,56	57,47	28,7	300	0,2	4,74	43,59

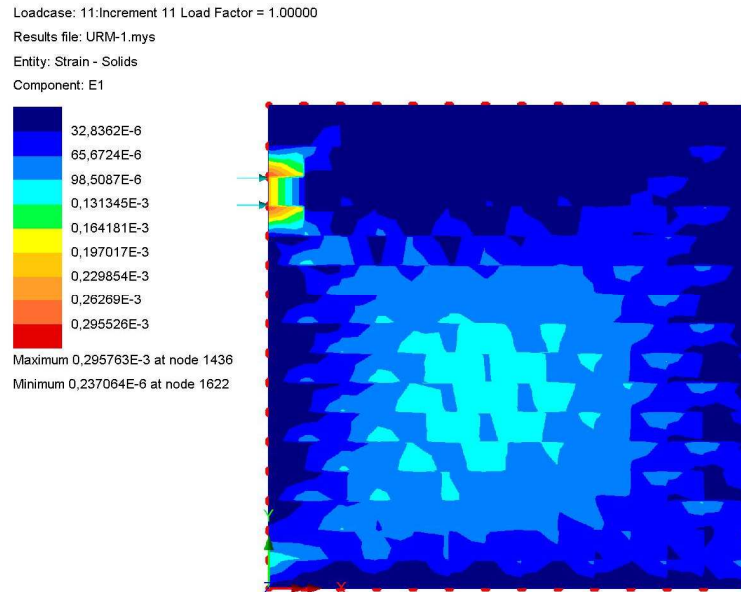
Analizin sonlandırıldığı an için tuğla- harç etkileşimi dikkate alınarak Bölüm 4.3’te bağıntı (4.19) ile maksimum birim şekil değiştirme, $\varepsilon_{\max} = 10/(2 * 112 + 10) = 0,042$ olarak belirlenebilir. Bu değere göre yatay yük- yerdeğiştirme grafiği Şekil 4.96’da verilmiştir.



Şekil 4.96 URM-1 Duvarı Yük-Yerdeğiştirme Eğrisi

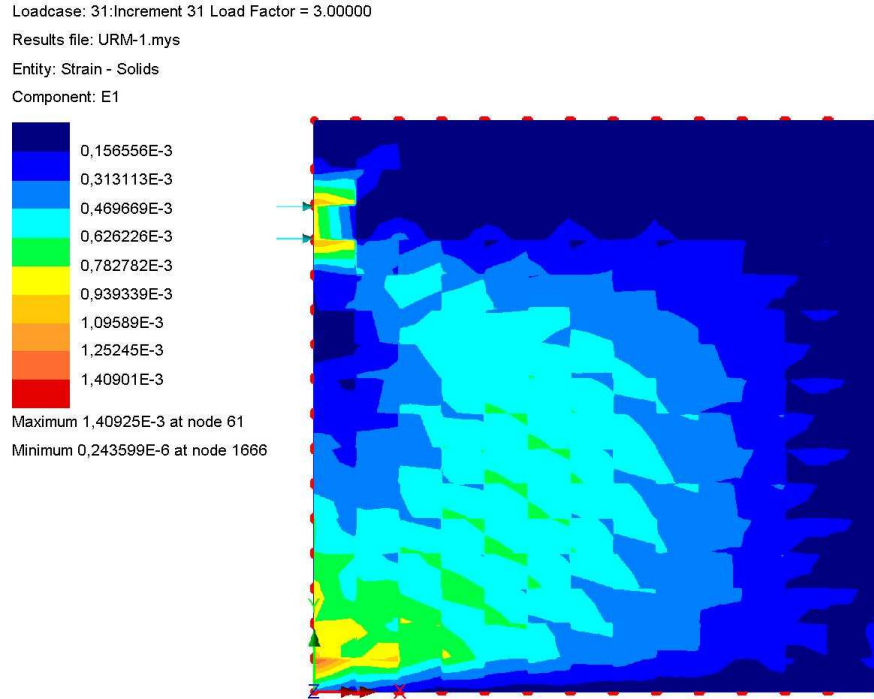
Plastik şekil değiştirmeler, gerilmeler açısından kritik kesimler olan duvarın taban kesimlerinde yoğunlaşmaktadır. Fiziksel modelde çevrimsel yükleme etkisinde duvarlar test edildikleri için çatlaklar yükün uygulandığı bölgelerden itibaren diyagonal doğrultuda mesnet kesimine doğru yayılmaktadır. Nümerik modelde yatay yükün % 94 değerine ulaştığı anda (162 kN/172 kN), plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı bölgelerin duvar taban bölgelerine yakın yerlerde olduğunu söylemek mümkündür.

Şekil 4.97’de ise başlangıç seviyede yatay yük uygulandığı durumlarda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmektedir. Başlangıç seviyede uygulanan yük göçme yükünün % 11 (20 kN/172 kN) kadardır.

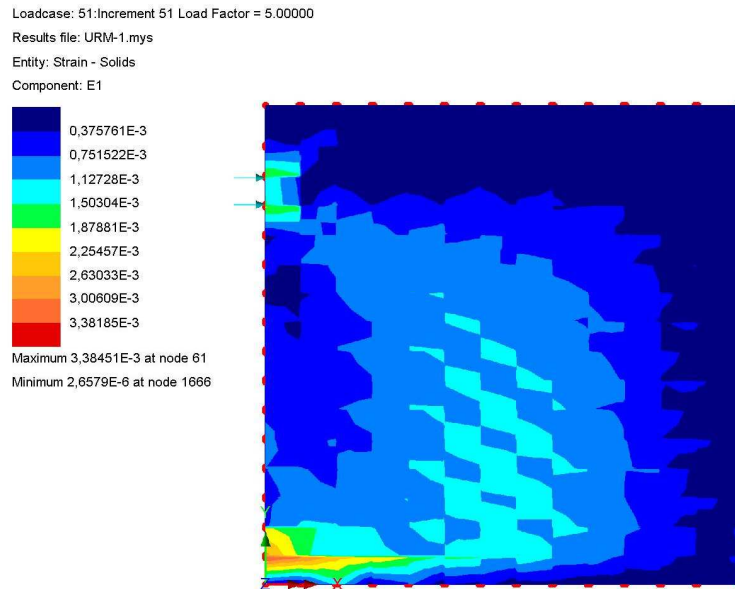


Şekil 4.97 Yatay Yükün Göçme Yükünün %11’e Ulaştığı Durumda URM 1-2 Duvarında Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Şekil 4.98’de yatay yükün göçme yükünün % 36’na ulaştığı durumda (62 kN/172 kN) oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir. Şekil 4.99’da ise yatay yükün göçme yükünün % 59’na ulaştığı durumda (102 kN/172 kN) oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir.



Şekil 4.98 Yatay Yükün Göçme Yükünün %36’ na Ulaştığı Durumda URM 1-2 Duvarında Asal Şekil Değiştirme Dağılımları



Şekil 4.99 Yatay Yükün Göçme Yükünün %59’ na Ulaştığı Durumda URM 1-2 Duvarında Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

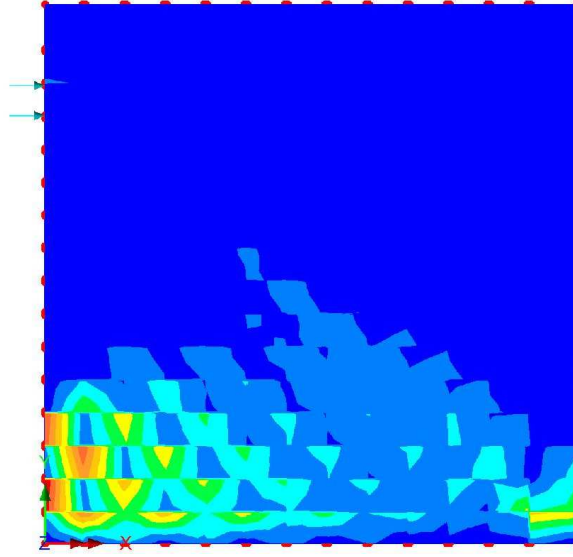
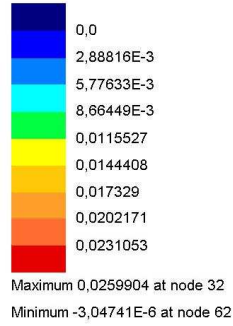
Şekil 4.100’de ise yatay yükün göçme yükünün % 94’ne ulaştığı durumda (162 kN/172 kN) oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir.

Loadcase: 96:Increment 96 Load Factor = 8.06279

Results file: URM-1.mys

Entity: Strain - Solids

Component: E1



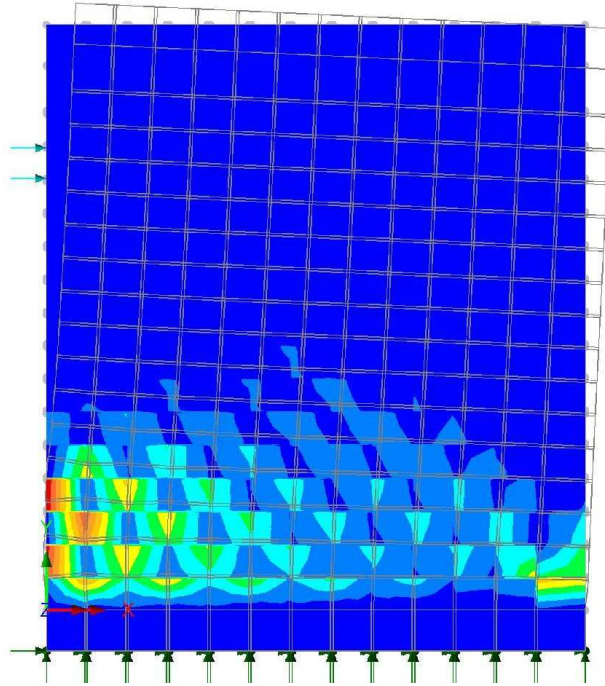
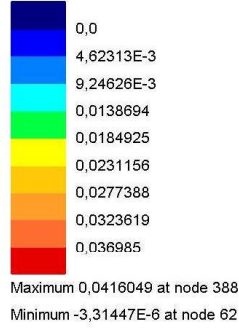
Şekil 4.100 Yatay Yükün Göçme Yükünün %94'ne Ulaştığı Durumda URM 1-2 Duvarında Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 115:Increment 115 Load Factor = 8.61695

Results file: URM-1.mys

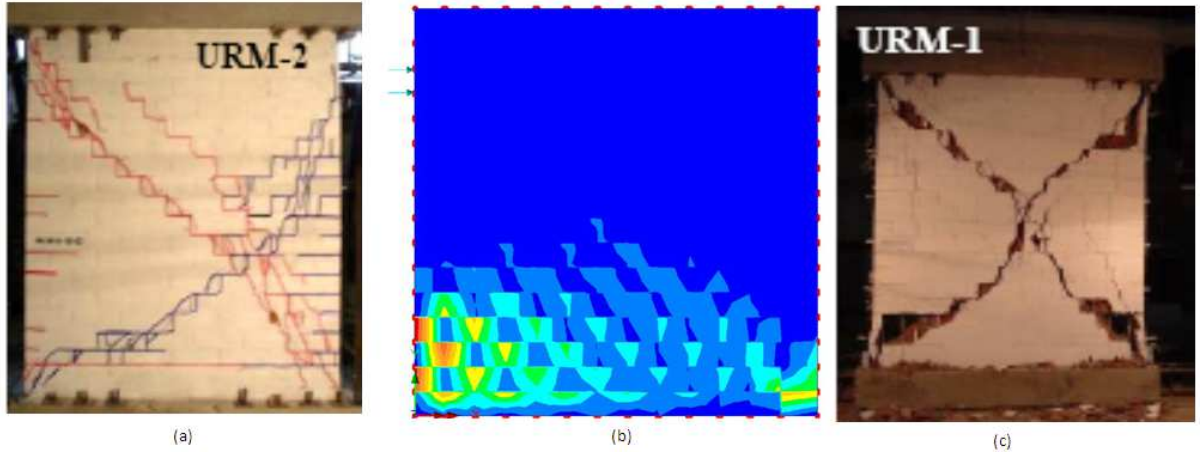
Entity: Strain - Solids

Component: E1

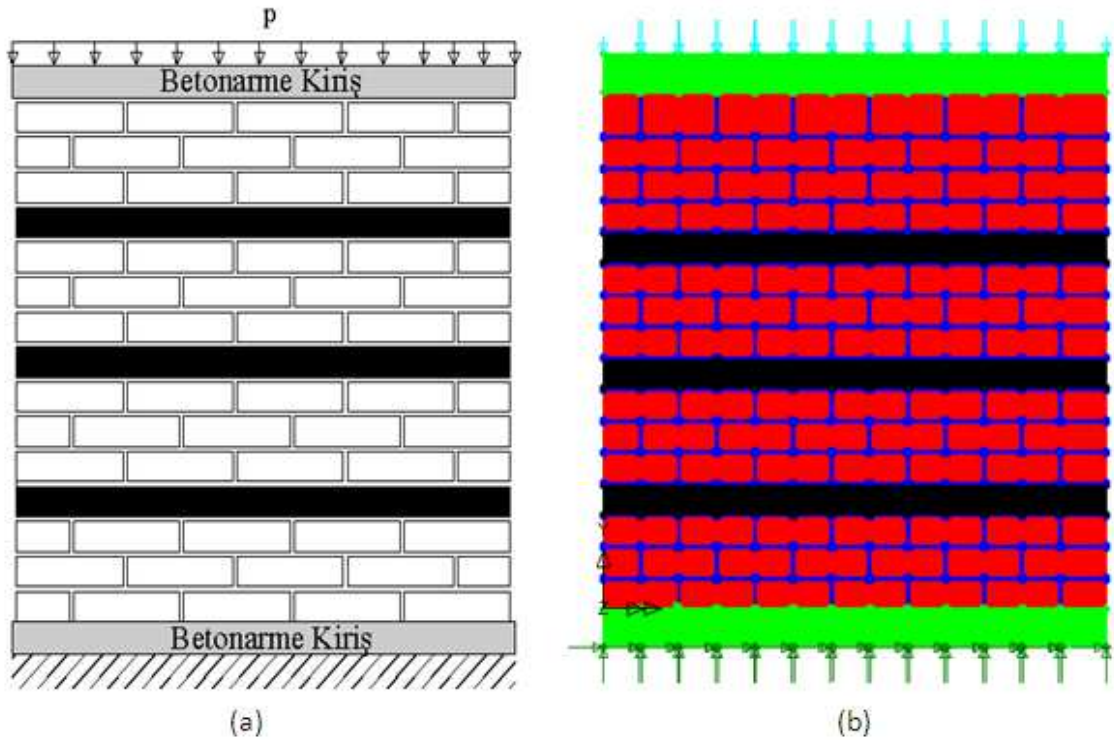


Şekil 4.101 Analizin Sonlandırıldığı Durumda URM 1-2 Duvarında Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Şekil 4.102 (a ve c)'de fiziksel modellerde oluşan hasar durumları ve Şekil 4.102 (b)'de ise nümerik modelde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir.



Şekil 4.102 Analizin Sonlandırıldığı Durumda (a,c)URM 1-2 Duvarında Hasar Oluşumu [23-26]
(b) Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

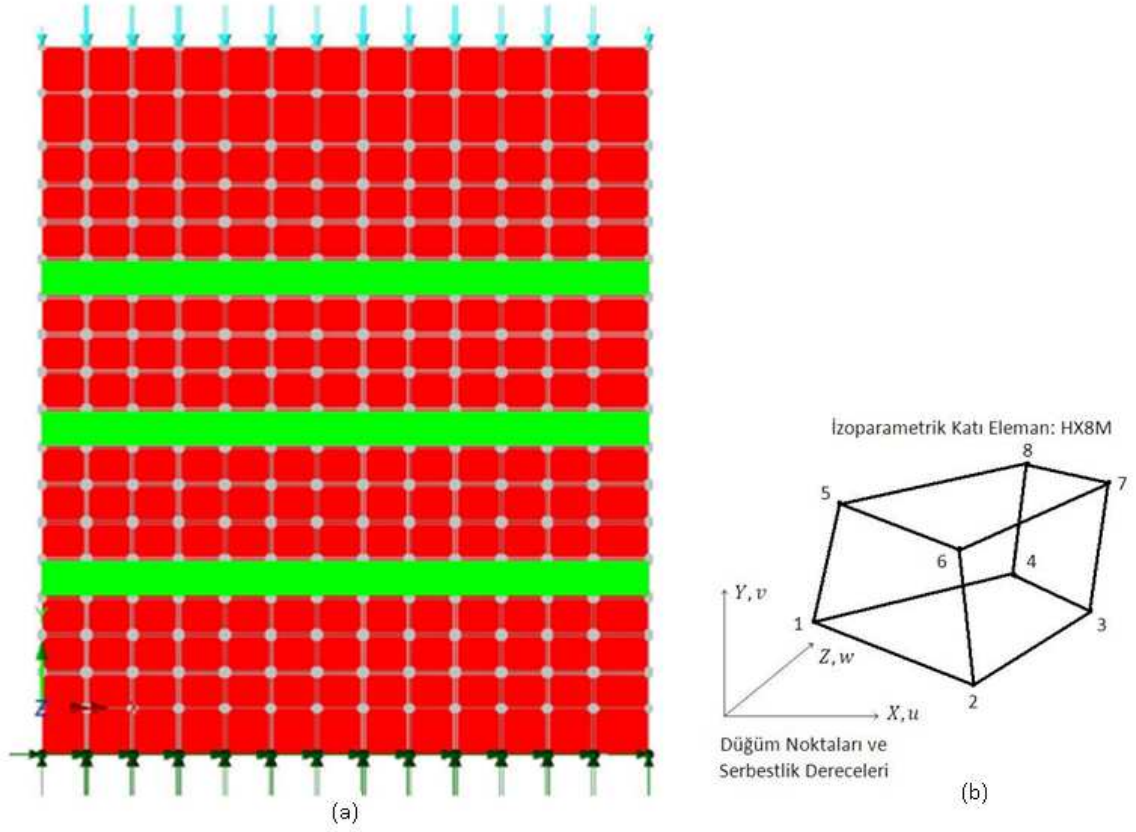


Şekil 4.103 H- URM- 3x100 Duvarı Fiziksel Durum [23-26] ve H- URM- 3x100 Duvarı Nümerik Model

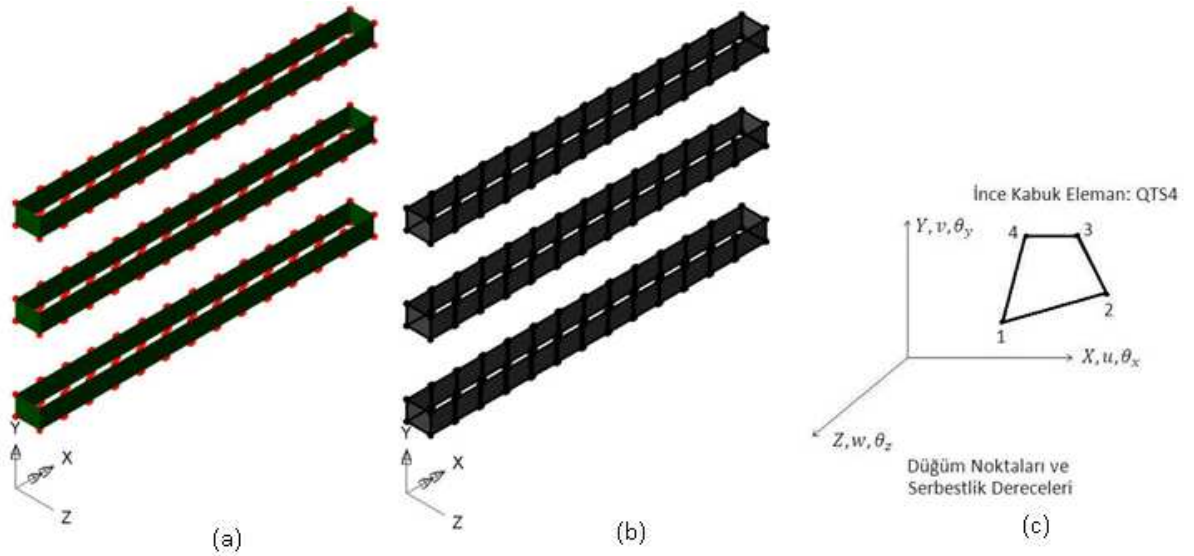
Tuğla ölçüleri $290 \times 112 \times 140 \text{ mm}^3$ olan bağlayıcı malzeme olarak 10-13 mm harç kullanılan ve toplam duvar boyutu $1975 \times 2000 \times 140 \text{ mm}^3$ olan H- URM- 3x100 kodlu güçlendirilmiş yığma duvar bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Deneyisel duvar 3 adet 100 mm genişliğinde CFRP (KLP) şeritlerle aşağıda Şekil 4.103(a ve b)'de fiziksel ve nümerik modelde gösterildiği gibi güçlendirilmiştir.

LP, malzemeleri duvarların her iki yüzüne de tek yönde uygulanmıştır. Yatay yönde aralıklarla üç şerit olmak üzere LP düzenlenmesi denenmiştir. Lifli polimer malzemesi olarak ise karbon elyaf (CFRP) şeritleri kullanılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, H- URM- 3x100 kodlu güçlendirilmiş duvarın fiziksel deney koşulları da dikkate alınacak şekilde Bölüm 3’de verilen yaklaşım doğrultusunda nümerik simülasyonu 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik parametreler tuğla basınç dayanımı $f_{bl} = 12,4$ MPa, harç basınç dayanımı $f_{mr} = 28,7$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak deneysel verilerden alınmıştır [23-26]. H- URM- 3x100 kodlu güçlendirilmiş duvar düşeyde 98 kN (0,35 MPa) kadar yüklendikten sonra düşey yük sabit tutularak, yatay yükler kademeli olarak artırılmıştır. Önerilen nümerik modelde beton/betonarme levha, tuğla, harç birimler 3 boyutlu, 8 düğüm noktalı izoparametrik katı elemanlar ile modellenmiş ve 6065 düğüm noktasına sahip toplamda 825 katı eleman kullanılmıştır. Bunların 304 adedi tuğla, 471 adedi harç, ve 50 adedi ise duvar alt ve üstüne konulan beton/betonarme elemana ait malzeme özelliklerini içermektedir. LP eleman ise 156 yüzeye atanmıştır. Rijit beton elemanlar için malzeme elastik kabul edilmiş, tuğla ve harç elemanlara ait malzeme özellikleri ise elasto-plastik malzeme modelleri ile tanımlanmıştır. Duvarın beton/betonarme plağa oturduğu taban kesitlerinde mesnetlenme şekli ankastre olarak kabul edilmiştir. Nümerik model sonlu eleman ağı ve sonlu eleman tipi Şekil 4.104 (a ve b)’de verilmiştir. Kullanılan LP elemana ait mekanik özellikler çekme gerilmesi $f_t = 3500$ MPa, ve elastisite modülü ise $E_{FRP} = 230000$ MPa, LP elemanın kalınlığı ise 0,13 mm olarak deneysel çalışmadan alınmıştır [23-26]. LP elemanın nümerik modeli, sonlu eleman ağı ve sonlu eleman tipi ise Şekil 4.105 (a-b-c)’de verilmektedir.



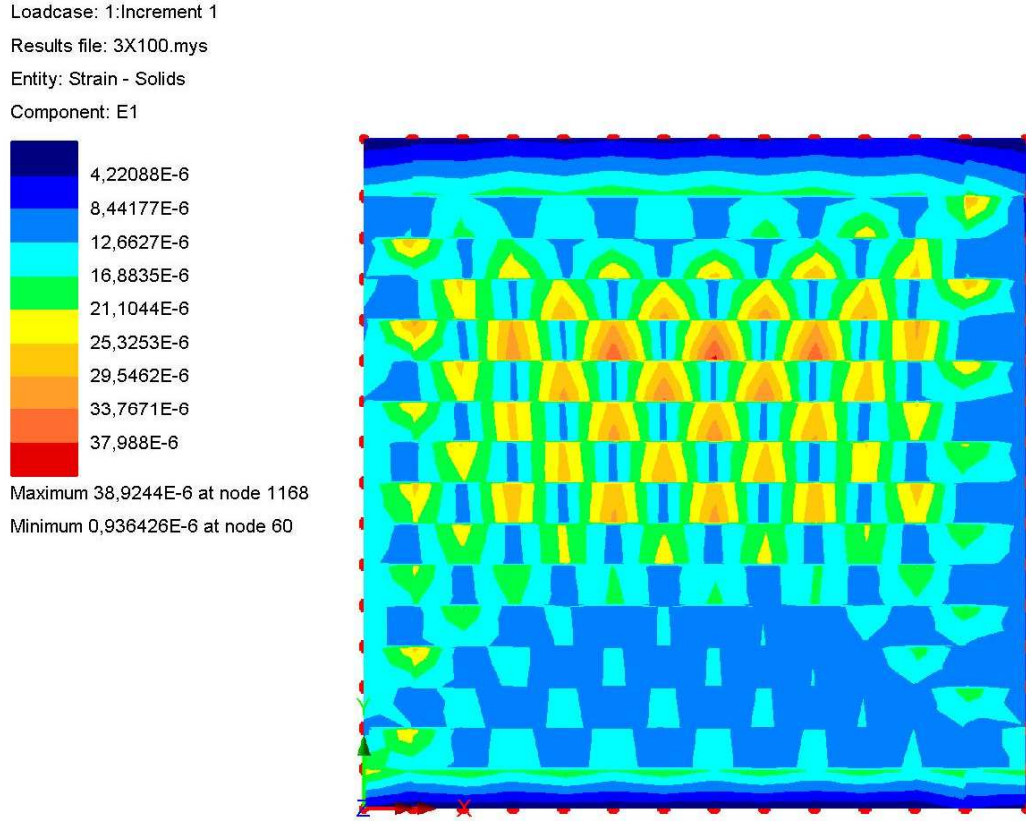
Şekil 4.104 (a) H- URM- 3x100 Duvarı Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66]



Şekil 4.105 (a) H- URM- 3x100 Duvarı LP Nümerik Modeli (b) Sonlu Eleman Ağı (c) Sonlu Eleman Tipi [66]

Bölüm 3’de verilmiş olan bünyesel bağıntılar kullanılarak harç ve tuğla için DP kriterinin ihtiyaç duyduğu kohezyon ve içsel sürtünme açıları elde edilmiştir. Elastisite modülleri, Poisson oranları ve plastisite özellikli olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri doğrusal olmayan sonlu elemanlar LUSAS [66] ile çalışan programının plastik analiz

modülünde tanımlanmıştır. Tabanda ankastre mesnetlenmeyi, üst tarafta ise düşey yükün düzgün dağılmasını sağlayan beton/betonarme malzeme elastik kabul edilmiştir. Sadece düşey yük etkimesinde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.106’da verilmektedir.



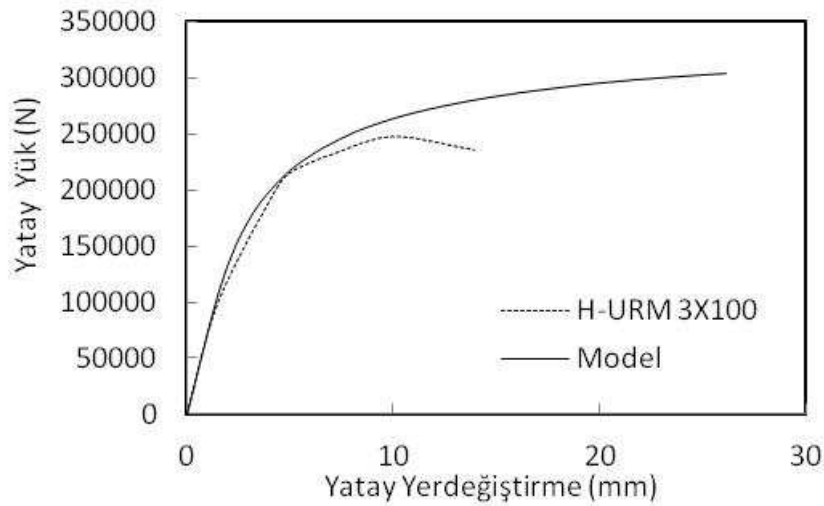
Şekil 4.106 Sadece Düşey Yük Etkimesi Durumunda H-URM 3X100 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Önerilen nümerik modelde tuğlanın basınç dayanımı ile düşey basınç gerilmelerine bağlı olarak tuğla birimler için içsel sürtünme açısı 4.17 bağıntısı ile $\phi_{bl} = 57,47^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Tuğla elemanlardaki kohezyon değeri 4.16 bağıntısı ile $c_{bl} = 1,56$ MPa olarak bulunmuştur. Tuğla birimler için elastisite modülü ise $E_{bl} = 5800$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak alınmıştır. Harç birimler için içsel sürtünme açısı 4.15 bağıntısı ile $\phi_{mr} = 43,59^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Harç elemanlardaki kohezyon değeri 4.14 bağıntısı ile $c_{mr} = 4,74$ MPa olarak bulunmuştur. Harç birimler için elastisite modülü ise $E_{mr} = 300$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak alınmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.12’de verilmektedir.

Çizelge 4.12 H-URM 3X100 Duvarı Mekanik Özellikleri

Tuğla						Harç				
Duvar adı	E_{bl} (MPa)	f_{bl} (MPa)	Poisson Oranı	c_{bl} (MPa)	ϕ_{bl} (°)	f_{mr} (MPa)	E_{mr} (MPa)	Poisson Oranı	c_{mr} (MPa)	ϕ_{mr} (°)
H-URM 3X100	5800	12,4	0,2	1,56	57,47	28,7	300	0,2	4,74	43,59

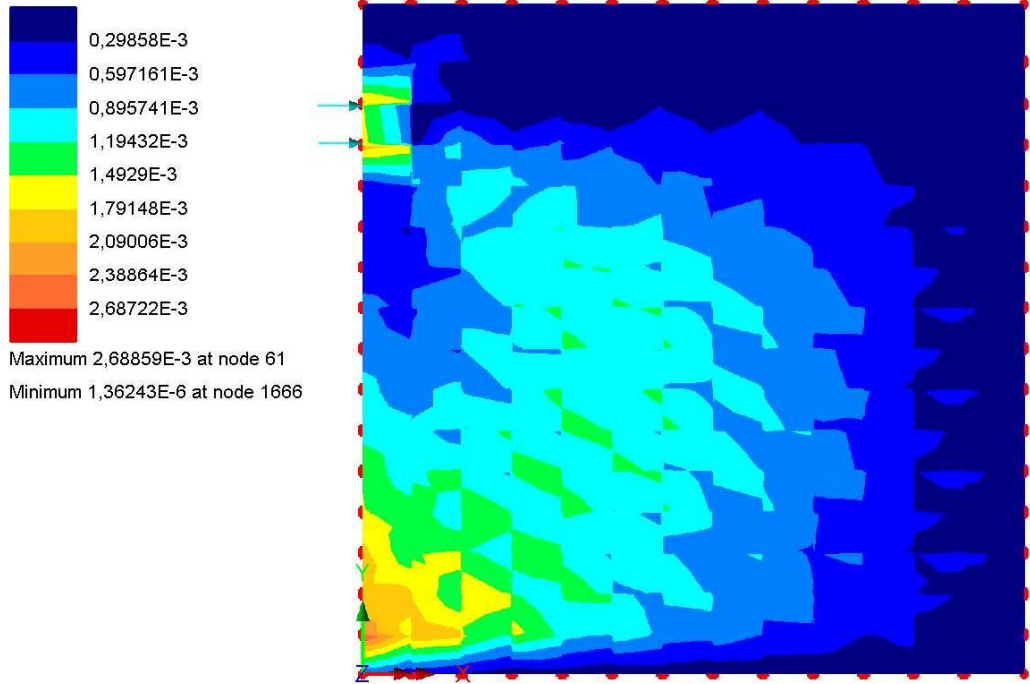
Analizin sonlandırıldığı an için tuğla- harç etkileşimi dikkate alınarak Bölüm 4.3'te bağıntı 4.19 ile maksimum birim şekil değiştirme, $\varepsilon_{max} = 13/(2 * 112 + 13) = 0,054$ olarak belirlenebilir. Bu değere göre yük- yerdeğiştirme grafiği Şekil 4.107'de verilmiştir.



Şekil 4.107 H-URM 3X100 Duvarı Yük-Yerdeğiştirme Eğrisi

Plastik şekil değiştirmeler, gerilmeler açısından kritik kesimler olan duvarın taban kesimlerinde yoğunlaşmaktadır. Fiziksel modelde çevrimsel yükleme etkisinde duvarlar test edildikleri için çatlaklar yükün uygulandığı bölgelerden itibaren diyagonal doğrultuda mesnet kesimine doğru yayılmaktadır. Nümerik modelde ise tek yönlü yatay yük kademeli olarak artırılarak bu deneysel duvarlar modellenmiştir. Nümerik modelde yatay yükün % 93 değerine ulaştığı anda (274 kN/294 kN), plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı bölgelerin duvar taban bölgelerine yakın yerlerde olduğunu söylemek mümkündür. Nümerik modelde yatay yükün % 37 değerine ulaştığı anda (110 kN/294 kN) oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.108'de verilmiştir.

Loadcase: 11: Increment 11 Load Factor = 1.00000
Results file: 3X100.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



Şekil 4.108 Yatay Yükün Göçme Yükünün %37'e Ulaştığı Durumda H-URM 3X100 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

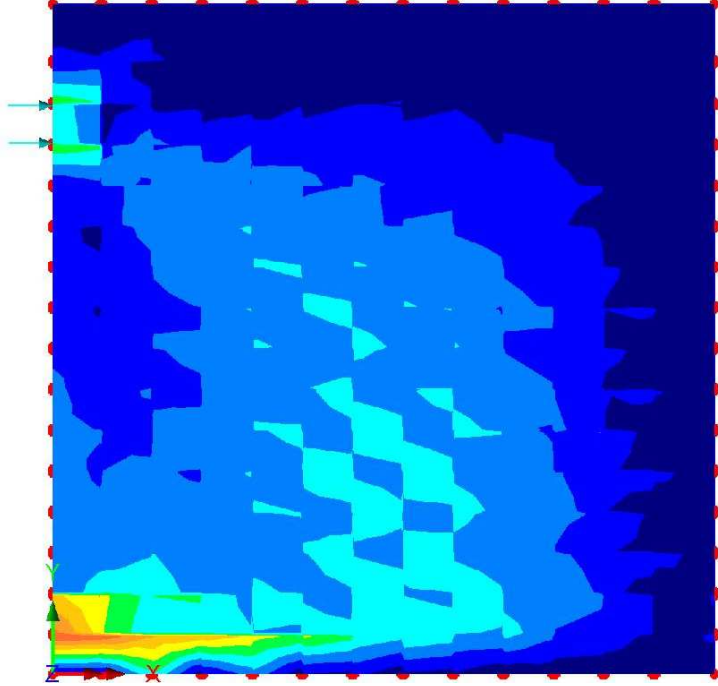
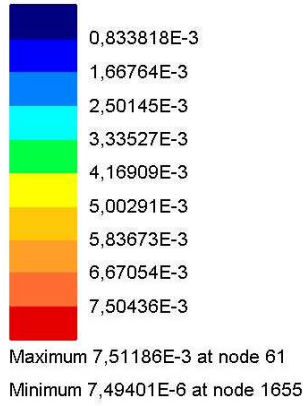
Nümerik modelde yatay yükün % 71 değerine ulaştığı anda (210 kN/294 kN) oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.109'da verilmiştir. Şekil 4.110'da nümerik modelde yatay yükün % 93 (273 kN/294 kN) değerine ulaştığı anda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir. Maksimum birim şekil değiştirme kriterine göre analizin sonlandırıldığı durum Şekil 4.111'de verilmiştir. Yığma birimlerde hasar oluşması durumunda LP elemanlarda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.112'de, fiziksel durumla nümerik modelin karşılaştırılması ise Şekil 4.113 (a-b-c)'de verilmiştir.

Loadcase: 21:Increment 21 Load Factor = 2.00000

Results file: 3X100.mys

Entity: Strain - Solids

Component: E1



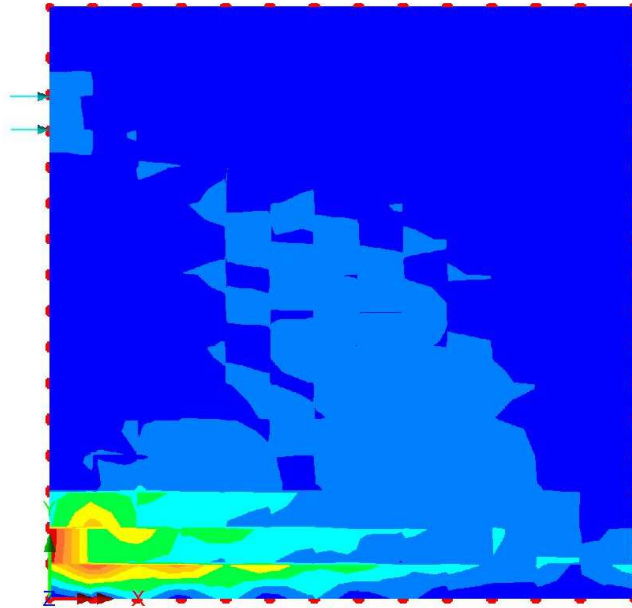
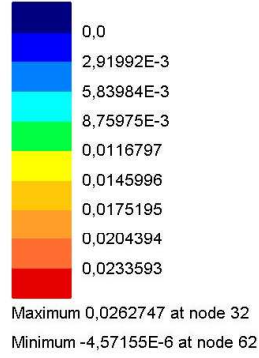
Şekil 4.109 Yatay Yükün Göçme Yükünün %71'e Ulaştığı Durumda H-URM 3X100 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 34:Increment 34 Load Factor = 2.71705

Results file: 3X100.mys

Entity: Strain - Solids

Component: E1



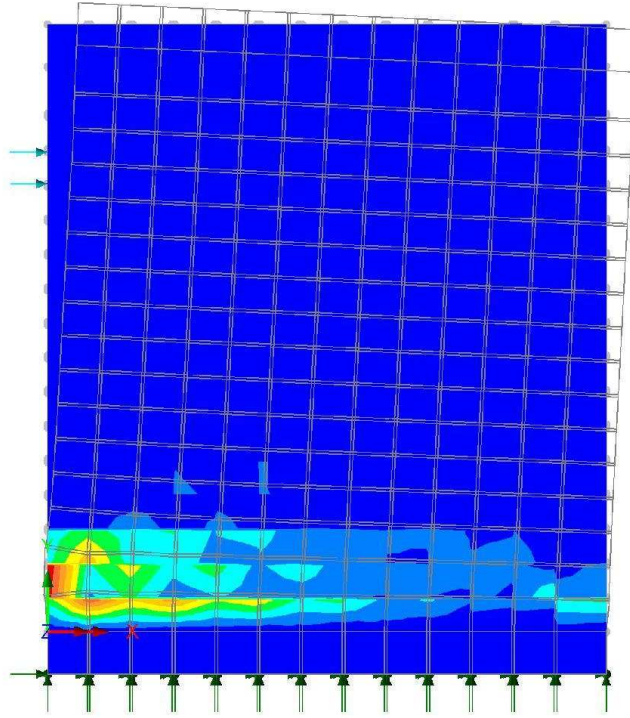
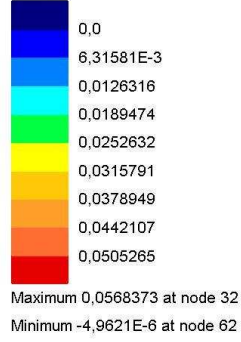
Şekil 4.110 Yatay Yükün Göçme Yükünün % 93'e Ulaştığı Durumda H-URM 3X100 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 48:Increment 48 Load Factor = 2.97768

Results file: 3X100.mys

Entity: Strain - Solids

Component: E1



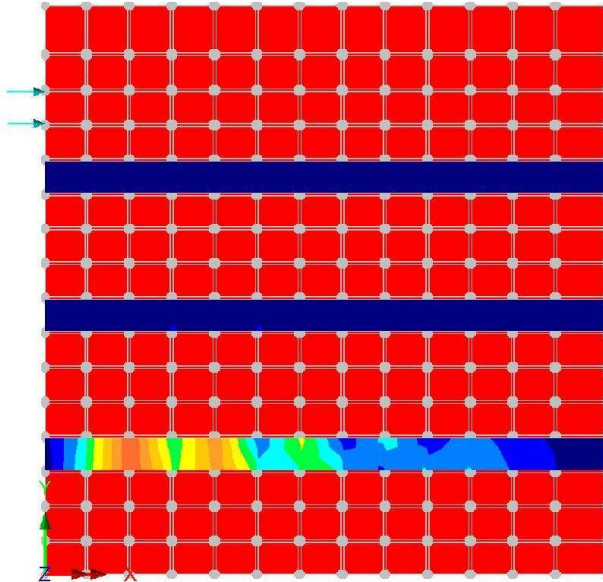
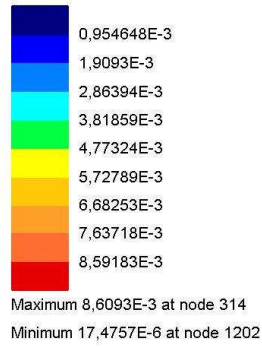
Şekil 4.111 Analizin Sonlandırıldığı Durumda H-URM 3X100 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 48:Increment 48 Load Factor = 2.97768

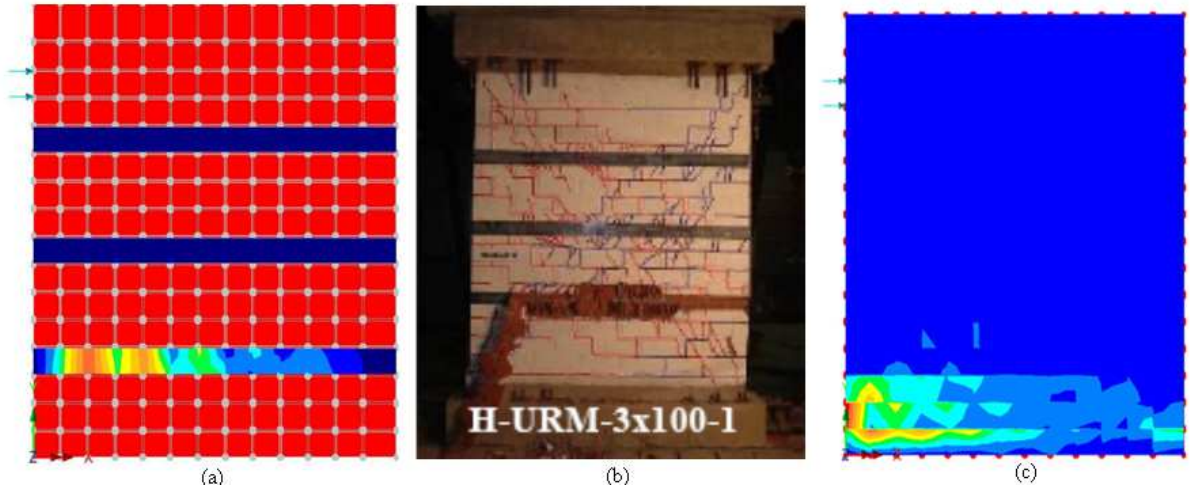
Results file: 3X100.mys

Entity: Strain (middle) - Thick Shell

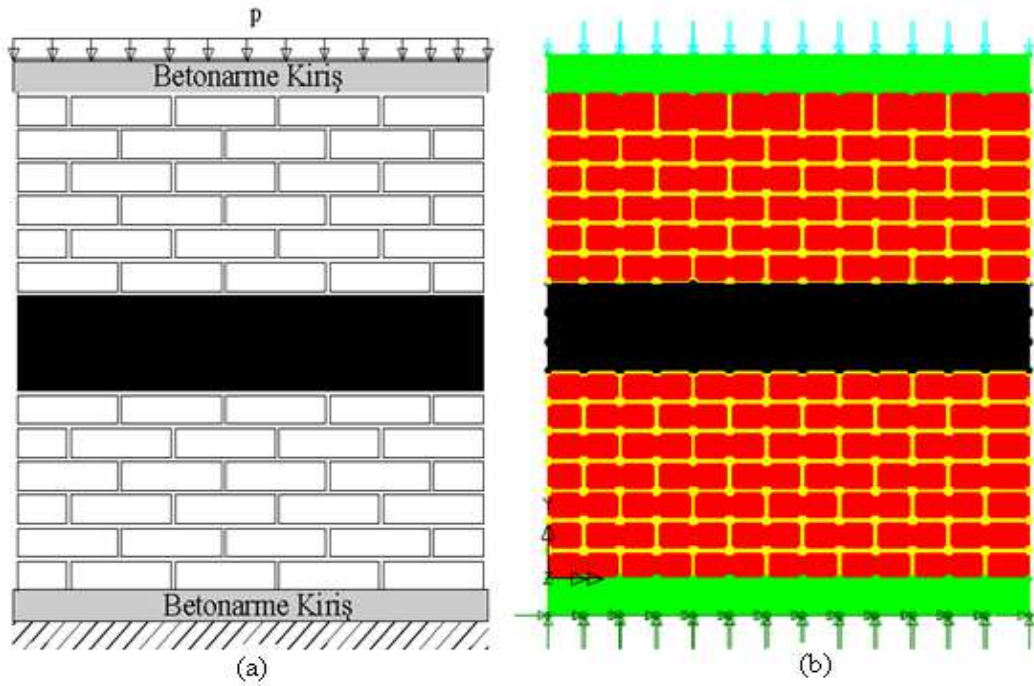
Component: E1



Şekil 4.112 Analizin Sonlandırıldığı Durumda H-URM 3X100 Duvarında LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları



Şekil 4.113 (a) H-URM 3X100 Duvarında LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları (b) Deney Duvarında LP’de Hasar Oluşumu (c) Yığma Birimlerde Asal Şekil Değişirme Dağılımları

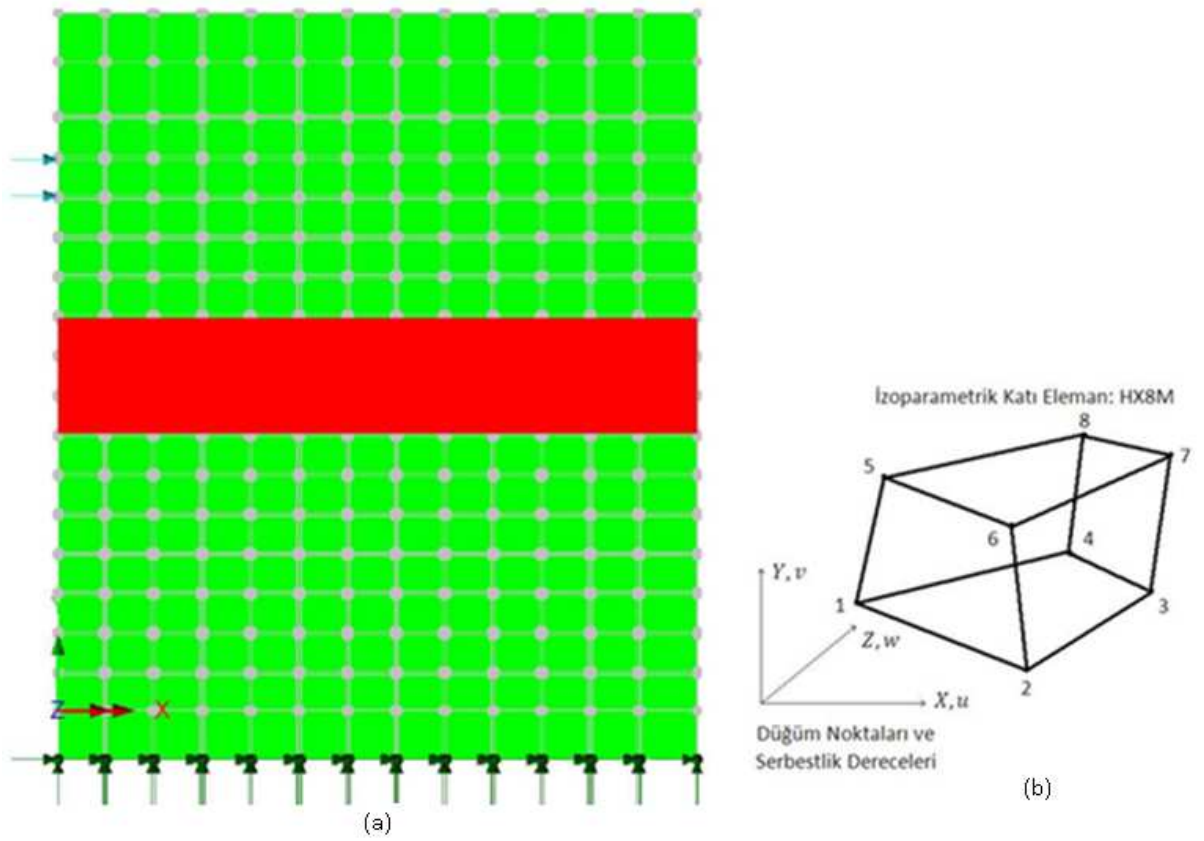


Şekil 4.114 (a) H- URM- 1x300 Duvarı Fiziksel Durum [23-26] (b) H- URM- 1x300 Duvarı Nümerik Model

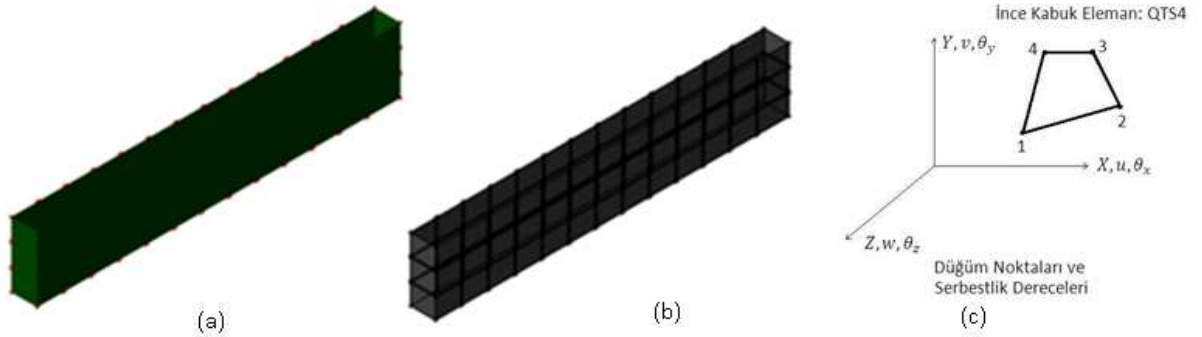
Tuğla ölçüleri $290 \times 112 \times 140 \text{ mm}^3$ olan bağlayıcı malzeme olarak 10-13 mm harç kullanılan ve toplam duvar boyutu $1975 \times 2000 \times 140 \text{ mm}^3$ olan H-URM-1x300 kodlu güçlendirilmiş yığma duvarın nümerik analizi bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Deneysel duvar 1 adet 300 mm genişliğinde CFRP (KLP) şerit ile aşağıda Şekil 4.114 (a ve b)’de fiziksel ve nümerik modelde gösterildiği gibi güçlendirilmiştir.

Lifli polimer malzemeleri duvarların her iki yüzüne de tek yönde uygulanmıştır. Yatay yönde tek şerit 300 mm olmak üzere LP düzenlenmesi denenmiştir. Lifli polimer malzemesi olarak ise karbon elyaf (CFRP/KLF) şeritleri kullanılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, H- URM- 1x300 kodlu güçlendirilmiş duvarın fiziksel deney koşulları da dikkate alınacak şekilde Bölüm 3’de verilen yaklaşım doğrultusunda nümerik simülasyonu 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik parametreler tuğla basınç dayanımı $f_{bl} = 12,4$ MPa, harç basınç dayanımı $f_{mr} = 28,7$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak deneysel verilerden alınmıştır [23-26]. H- URM- 1x300 kodlu güçlendirilmiş duvar düşeyde 98 kN (0,35 MPa) kadar yüklendikten sonra düşey yük sabit tutularak, yatay yükler kademeli olarak artırılmıştır. Önerilen nümerik modelde betonarme levha, tuğla, harç birimler 3 boyutlu, 8 düğüm noktalı izoparametrik katı elemanlar ile modellenmiş ve 6065 düğüm noktasına sahip toplamda 825 katı eleman kullanılmıştır. Bunların 304 adedi tuğla, 471 adedi harç ve 50 adedi ise duvar alt ve üstüne konulan beton/betonarme elemana ait malzeme özelliklerini içermektedir. LP eleman ise 260 yüzeye atanmıştır. Rijit beton elemanlar için malzeme elastik kabul edilmiş, tuğla ve harç elemanlara ait malzeme özellikleri ise elasto-plastik malzeme modelleri ile tanımlanmıştır. Duvarın beton/betonarme plağa oturduğu taban kesitlerinde mesnetlenme şekli ankastre olarak kabul edilmiştir. Yığma birimler için nümerik model sonlu eleman ağı ve sonlu eleman tipi Şekil 4.115 (a ve b)’de verilmiştir. Kullanılan LP elemana ait mekanik özellikler çekme gerilmesi $f_t = 3500$ MPa ve elastisite modülü ise $E_{FRP} = 230000$ MPa, LP elemanın kalınlığı ise 0,13 mm olarak deneysel çalışmadan alınmıştır [23-26]. LP eleman sonlu eleman modeli, ağı ve sonlu eleman tipi ise Şekil 4.116 (a-b-c)’de verilmiştir.



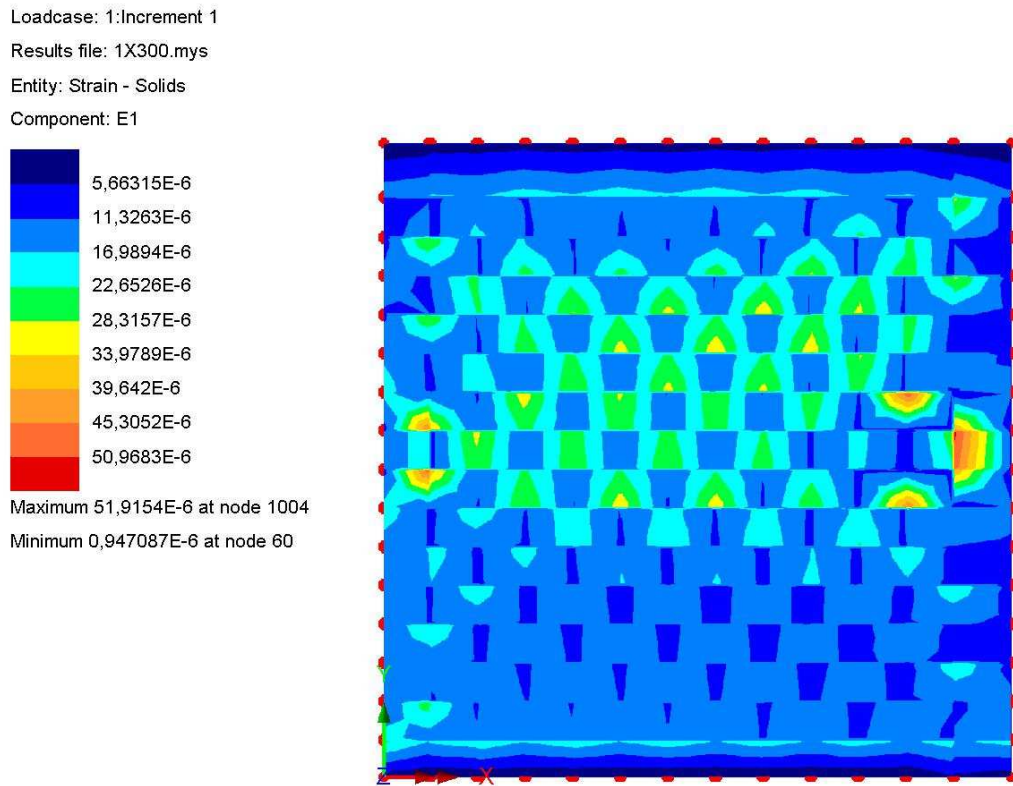
Şekil 4.115 (a) H-URM 1X300 Duvarı Sonlu Eleman Ağı ve (b) Sonlu Eleman Tipi [66]



Şekil 4.116 H-URM 1X300 Duvarı (a) LP Nümerik Modeli (b) Sonlu Eleman Ağı (c) Sonlu Eleman Tipi [66]

Bölüm 3’de verilmiş olan bünyesel bağıntılar kullanılarak harç ve tuğla için DP kriterinin ihtiyaç duyduğu kohezyon ve içsel sürtünme açıları elde edilmiştir. Elastisite modülleri, Poisson oranları ve plastisite özellikli olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri doğrusal olmayan sonlu elemanlar LUSAS [66] ile çalışan programının plastik analiz modülünde tanımlanmıştır. Tabanda ankastre mesnetlenmeyi, üst tarafta ise düşey yükün

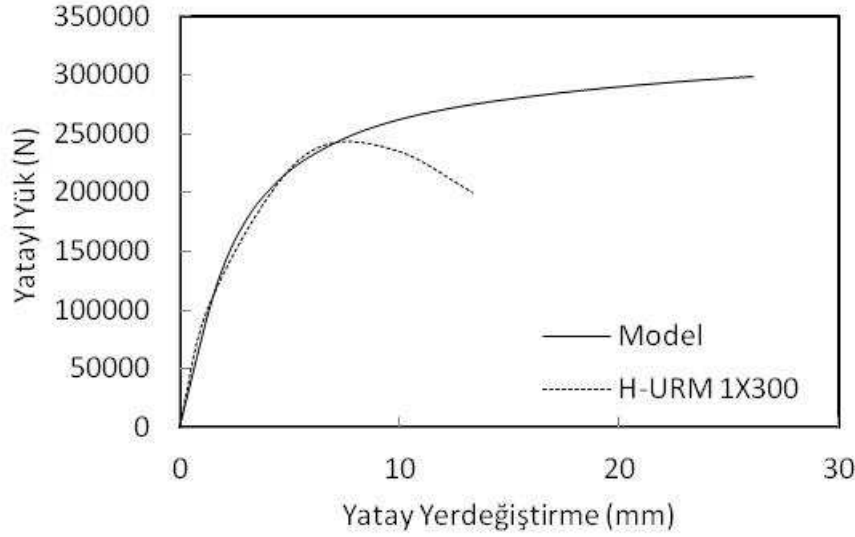
düzgün dağılmasını sağlayan çelik malzeme elastik kabul edilmiştir. Sadece düşey yük etkimesinde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.117’de verilmiştir.



Şekil 4.117 Sadece Düşey Yük Etkisinde H-URM 1X300 Duvarı Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Önerilen nümerik modelde tuğlanın basınç dayanımı ile düşey basınç gerilmelerine bağlı olarak tuğla birimler için içsel sürtünme açısı 4.17 bağıntısı ile $\phi_{bl} = 57,47^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Tuğla elemanlardaki kohezyon değeri 4.16 bağıntısı ile $c_{bl} = 1,56$ MPa olarak bulunmuştur. Tuğla birimler için elastisite modülü ise $E_{bl} = 5800$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak alınmıştır. Harç birimler için içsel sürtünme açısı 4.15 bağıntısı ile $\phi_{mr} = 43,59^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Harç elemanlardaki kohezyon değeri 4.14 bağıntısı ile $c_{mr} = 4,74$ MPa olarak bulunmuştur. Harç birimler için elastisite modülü ise $E_{mr} = 300$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak alınmıştır. H-URM 1X300 duvarına uygulanan LP genişliği H-URM 3X100 duvarına uygulanan LP genişliği ile yanıdır ve hesaplamda bulunan tuğla birimler için içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri aynı değerler bulunmuştur.

Analizin sonlandırıldığı an için tuğla- harç etkileşimi dikkate alınarak Bölüm 4.3'te bağıntı (4.19) ile maksimum birim şekil değiştirme, $\varepsilon_{max} = 13/(2 * 112 + 13) = 0,054$ olarak belirlenebilir. Bu değere göre yük- yerdeğiştirme grafiği Şekil 4.118'de verilmiştir.



Şekil 4.118 H-URM 1X300 Duvarı Yük Yerdeğiştirme Eğrisi

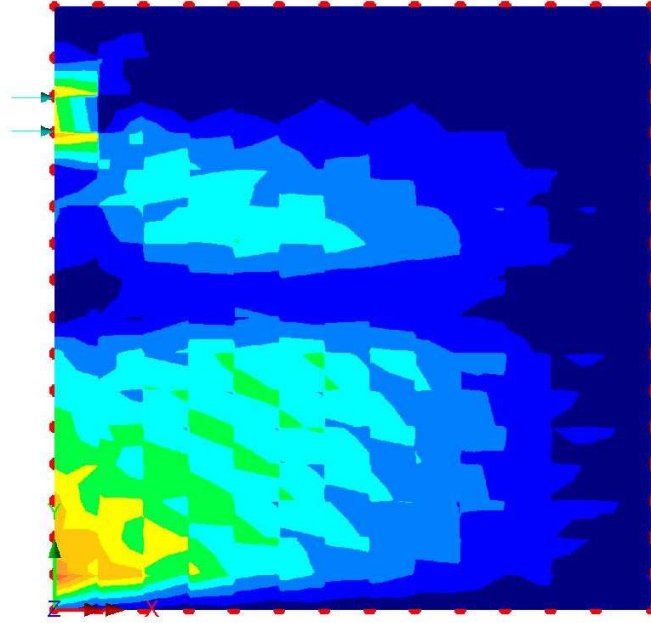
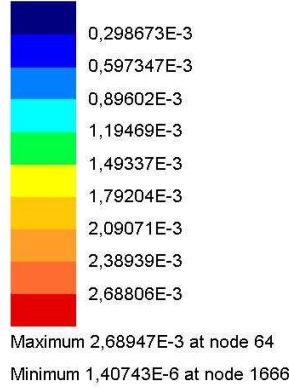
Plastik şekil değiştirmeler, gerilmeler açısından kritik kesimler olan duvarın taban kesimlerinde yoğunlaşmaktadır. Fiziksel modelde çevrimsel yükleme etkisinde duvarlar test edildikleri için çatlaklar yükün uygulandığı bölgelerden itibaren diyagonal doğrultuda mesnet kesimine doğru yayılmaktadır. Nümerik modelde ise tek yönlü yatay yük kademeli olarak artırılarak bu deneysel duvarlar modellenmiştir. Nümerik modelde yatay yükün % 94 değerine ulaştığı anda (280 kN/298 kN), plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı bölgelerin duvar taban bölgelerine yakın yerlerde olduğunu söylemek mümkündür. Nümerik modelde yatay yükün % 36 değerine ulaştığı anda (110 kN/298 kN) oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.119'da verilmiştir. Yatay yükün % 94 (280 kN/ 298 kN) değerinde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.120'de verilmiştir. Analizin sonlandırıldığı durumda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları ise Şekil 4.121'de verilmiştir. Fiziksel durumla nümerik modelin kıyaslanması Şekil 4.123 (a ve b)'de, analizin sonlandırıldığı durumda LP elemanda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları ise Şekil 4.122'de verilmiştir.

Loadcase: 11:Increment 11 Load Factor = 1.00000

Results file: 1X300.mys

Entity: Strain - Solids

Component: E1



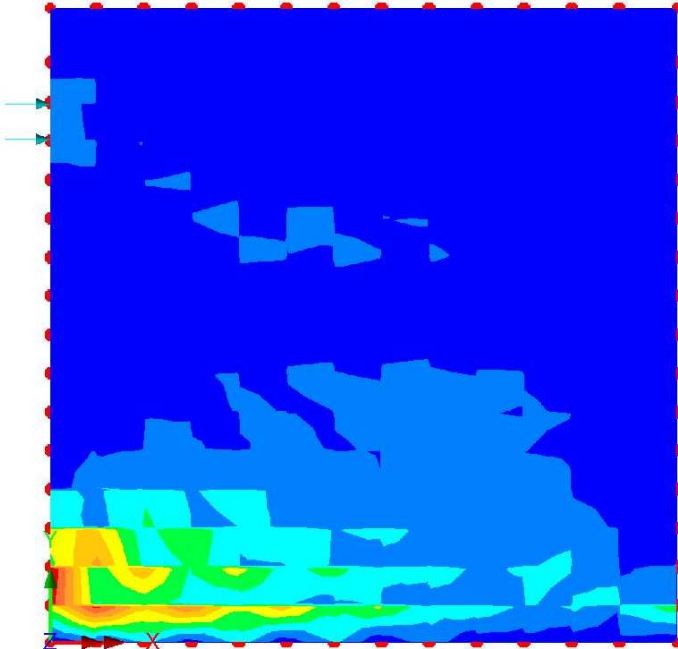
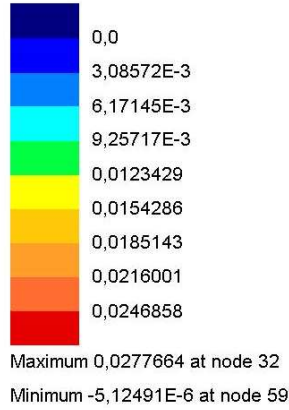
Şekil 4.119 Yatay Yükün Göçme Yükünün %36'na Ulaştığı Durumda H-URM 1X300 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 40:Increment 40 Load Factor = 2.78606

Results file: 1X300.mys

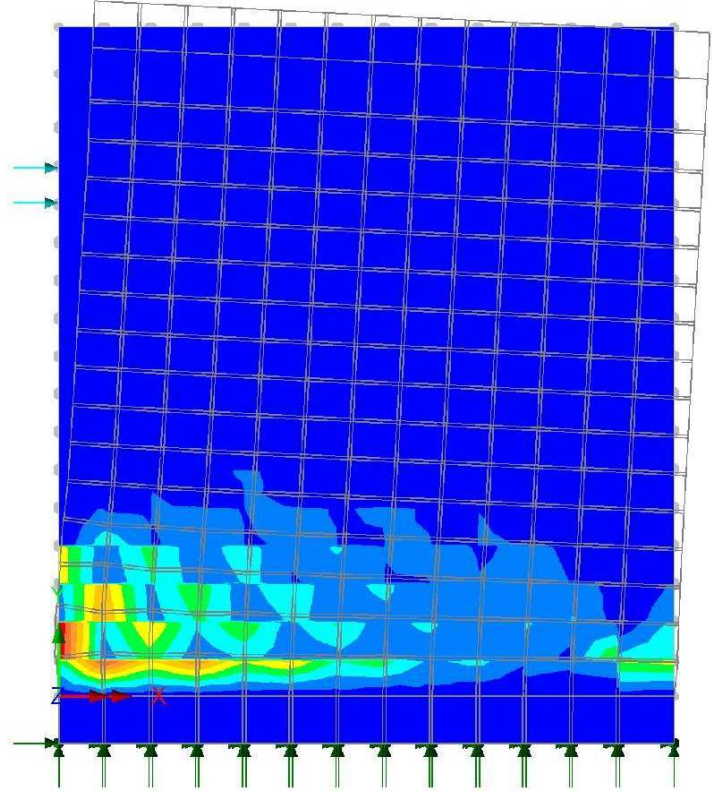
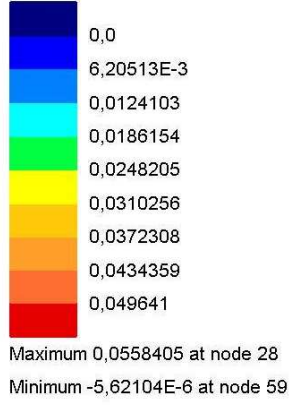
Entity: Strain - Solids

Component: E1



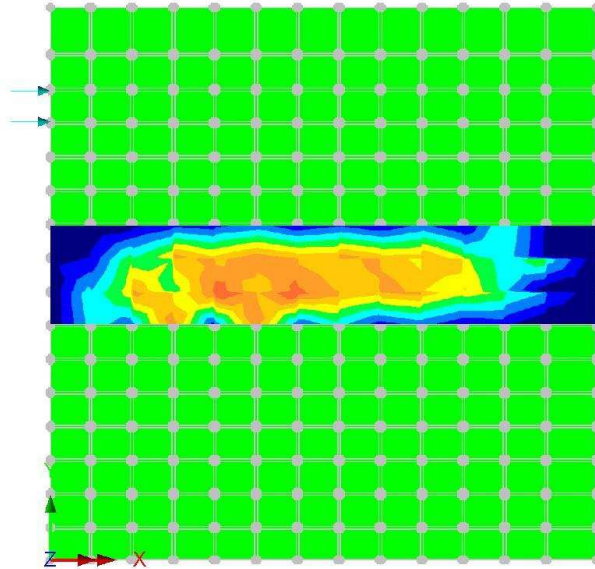
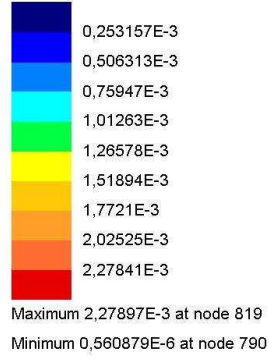
Şekil 4.120 Yatay Yükün Göçme Yükünün %94'ne Ulaştığı Durumda H-URM 1X300 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 65:Increment 65 Load Factor = 2.98765
 Results file: 1X300.mys
 Entity: Strain - Solids
 Component: E1

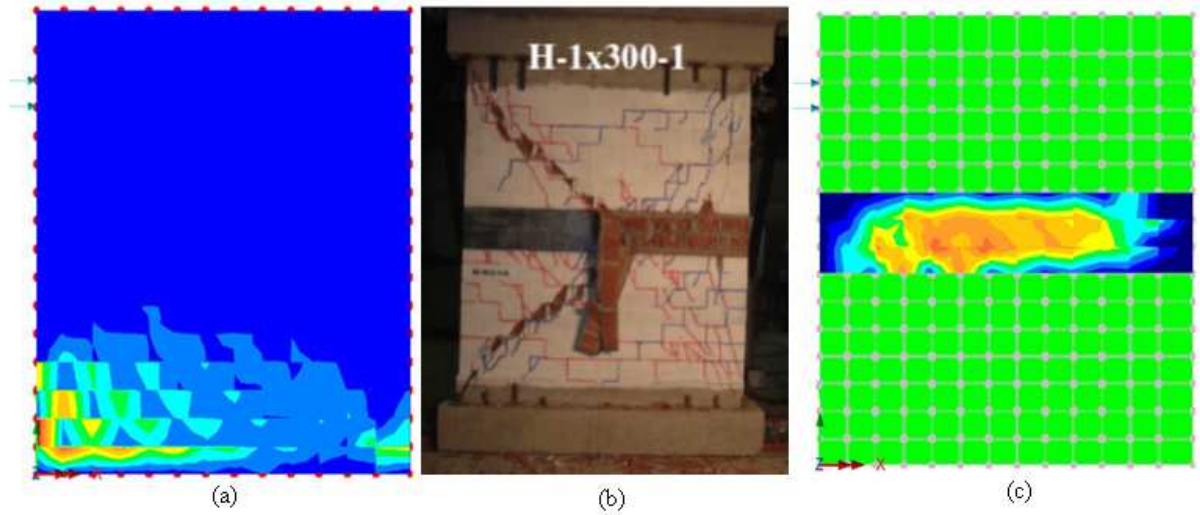


Şekil 4.121 H-URM 1X300 Duvarında Analizin Sonlandırıldığı Durumda Yığma Birimlerde Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 65:Increment 65 Load Factor = 2.98765
 Results file: 1X300.mys
 Entity: Strain (middle) - Thick Shell
 Component: E1

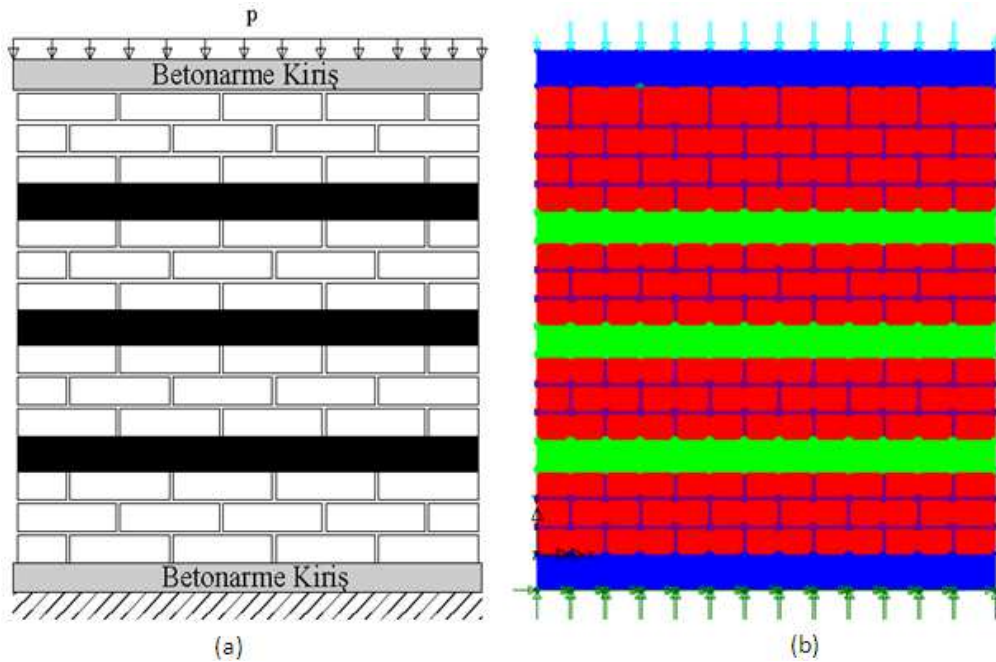


Şekil 4.122 H-URM 1X300 Duvarında Analizin Sonlandırıldığı Durumda LP Elemanlarda Asal Şekil Değiştirme Dağılımları



Şekil 4.123 H-URM 1X300 Duvarında Analizin Sonlandırıldığı Durumda (a) Yığma Birimlerde Asal Şekil Değiştirme Dağılımları (b) Fiziksel Modelde Hasar Oluşumu (c) LP Elemanlarda Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

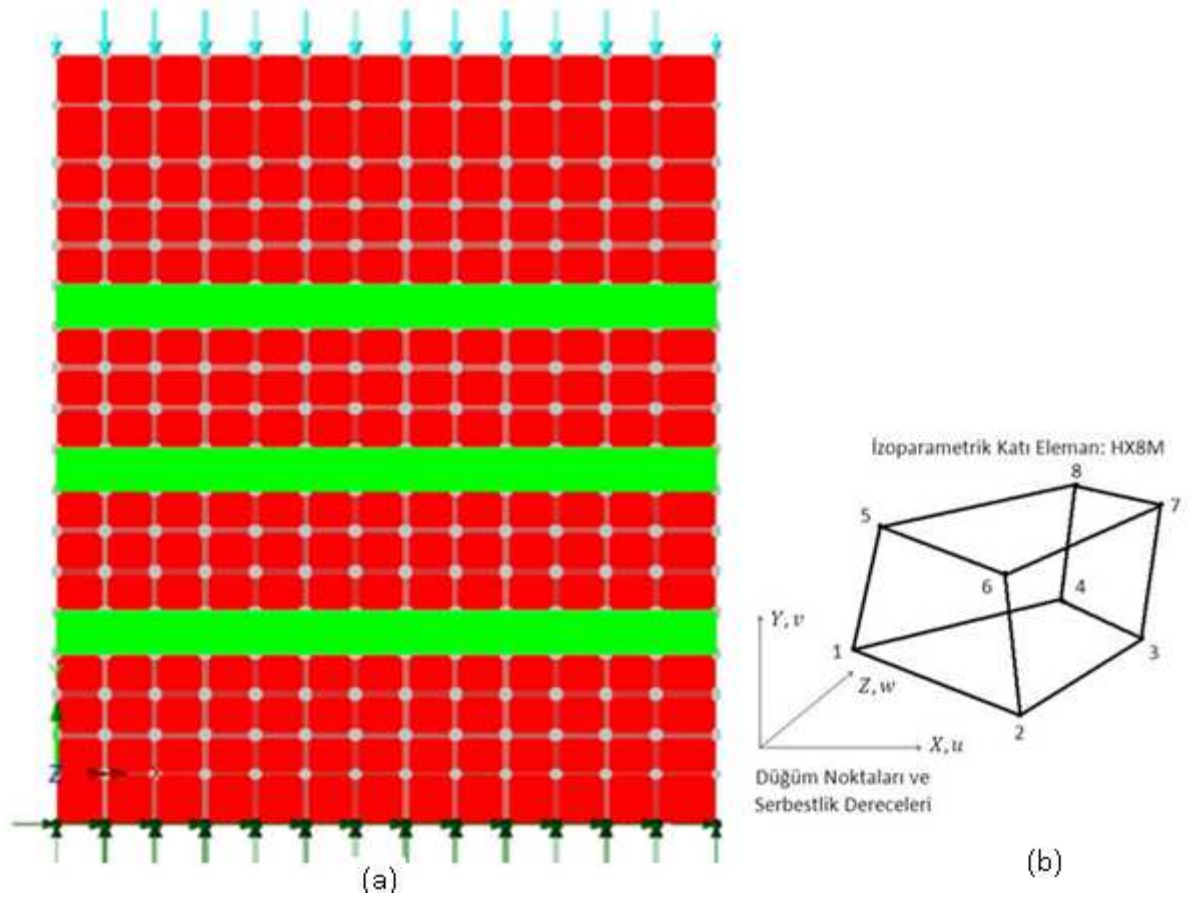
Tuğla ölçüleri $290 \times 112 \times 140 \text{ mm}^3$ olan bağlayıcı malzeme olarak 10-13 mm harç kullanılan ve toplam duvar boyutu $1975 \times 2000 \times 140 \text{ mm}^3$ olan H- URM- 3x150 kodlu güçlendirilmiş yığma duvar bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Deneysel duvar 3 adet 150 mm genişliğinde CFRP (KLP) şeritle aşağıda Şekil 4.124 (a ve b)'de fiziksel ve nümerik modelde gösterildiği gibi güçlendirilmiştir.



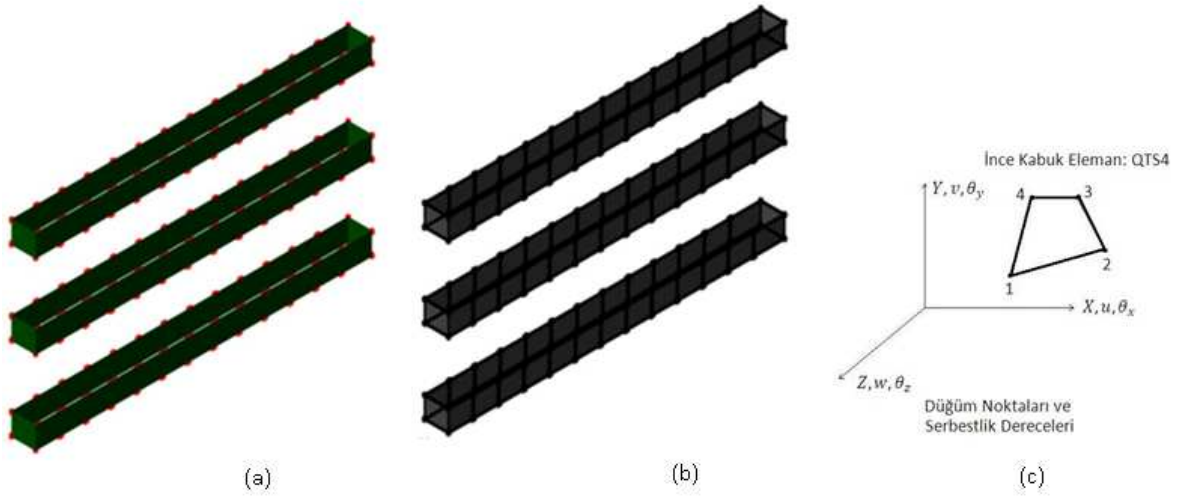
Şekil 4.124 (a) H- URM- 3x150 Kodlu Duvarın Fiziksel Modeli [23-26] (b) H- URM- 3x150 Kodlu Duvarın Nümerik Model

Lifli polimer malzemeleri duvarların her iki yüzüne de tek yönde uygulanmıştır. Yatay yönde üç şerit 150 mm olmak üzere LP düzenlenmesi denenmiştir. Lifli polimer malzemesi olarak ise karbon elyaf (CFRP) şeritleri kullanılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, H- URM- 3x150 kodlu güçlendirilmiş duvarın fiziksel deney koşulları da dikkate alınacak şekilde Bölüm 3’de verilen yaklaşım doğrultusunda nümerik simülasyonu 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik parametreler tuğla basınç dayanımı $f_{bl} = 12,4$ MPa, harç basınç dayanımı $f_{mr} = 28,7$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak deneysel verilerden alınmıştır [23-26]. H- URM- 3x150 kodlu güçlendirilmiş duvar düşeyde 98 kN (0,35 MPa) kadar yüklendikten sonra düşey yük sabit tutularak, yatay yükler kademeli olarak artırılmıştır. Önerilen nümerik modelde beton/betonarme levha, tuğla, harç birimler 3 boyutlu, 8 düğüm noktalı izoparametrik katı elemanlar ile modellenmiş ve 6065 düğüm noktasına sahip toplamda 825 katı eleman kullanılmıştır. Bunların 304 adedi tuğla, 471 adedi harç ve 50 adedi ise duvar alt ve üstüne konulan beton/betonarme elemana ait malzeme özelliklerini içermektedir. LP eleman ise 468 yüzeye atanmıştır. Rijit beton elemanlar için malzeme elastik kabul edilmiş, tuğla ve harç elemanlara ait malzeme özellikleri ise elasto-plastik malzeme modelleri ile tanımlanmıştır. Duvarın beton/betonarme plağa oturduğu taban kesitlerinde mesnetlenme şekli ankastre olarak kabul edilmiştir. Yığma birimler için nümerik model sonlu eleman ağı ve sonlu eleman tipi Şekil 4.125 (a ve b)’de verilmiştir. Kullanılan LP elemana ait mekanik özellikler çekme gerilmesi $f_t = 3500$ MPa ve elastisite modülü ise $E_{FRP} = 230000$ MPa, LP elemanın kalınlığı ise 0,13 mm olarak deneysel çalışmadan alınmıştır [23-26]. Şekil 4.126 (a-b-c)’de ise LP eleman nümerik modeli, sonlu eleman ağı ve sonlu eleman tipi verilmiştir.



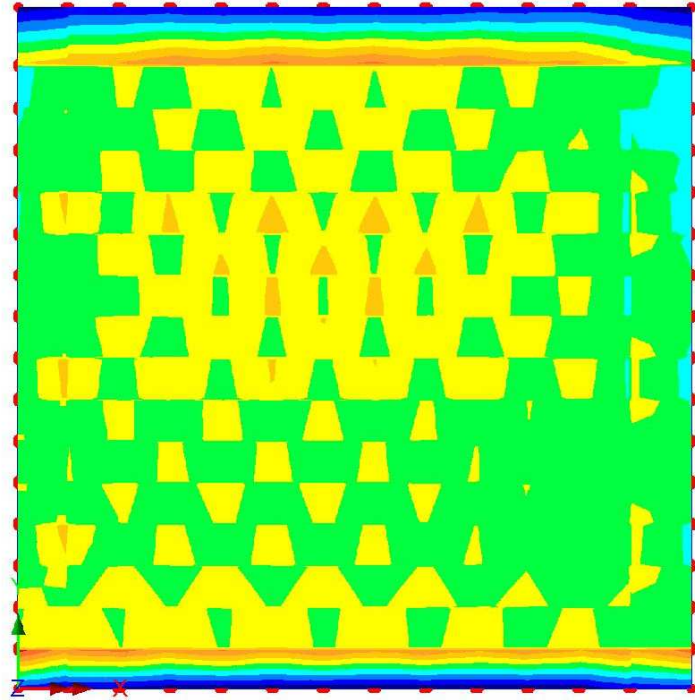
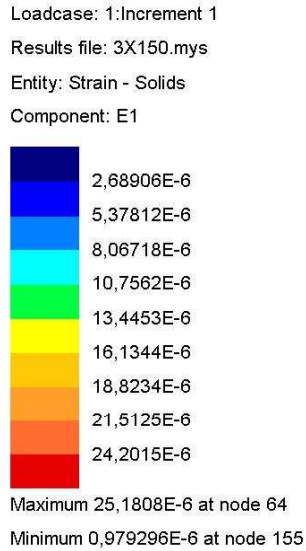
Şekil 4.125 (a) H- URM- 3x150 Kodlu Duvarın Yığma Birimlerinin Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66]



Şekil 4.126 (a) H- URM- 3x150 Kodlu Duvarın LP Eleman Nümerik Modeli (b) LP Eleman Sonlu Eleman Ağı (c) Sonlu Eleman Tipi [66]

Bölüm 3’de verilmiş olan bünyesel bağıntılar kullanılarak harç ve tuğla için DP kriterinin ihtiyaç duyduğu kohezyon ve içsel sürtünme açıları elde edilmiştir. Elastisite modülleri, Poisson oranları ve plastisite özellikli olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri

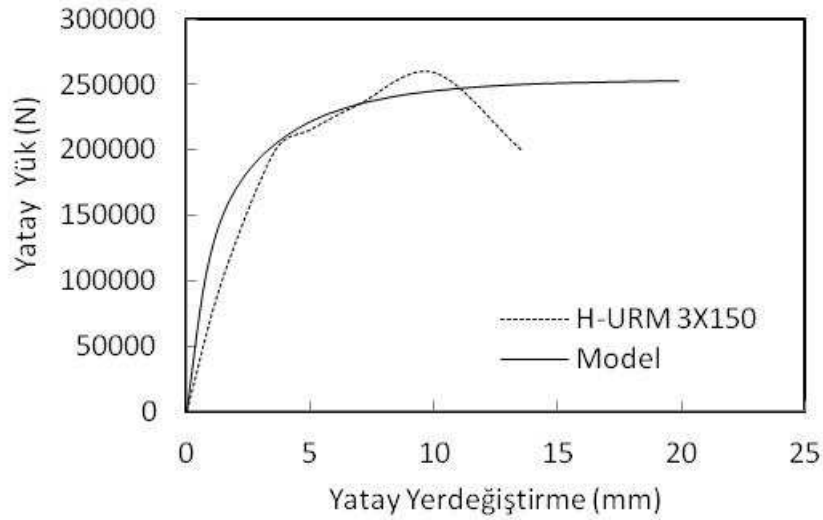
doğrusal olmayan sonlu elemanlar LUSAS [66] ile çalışan programının plastik analiz modülünde tanımlanmıştır. Tabanda ankastre mesnetlenmeyi, üst tarafta ise düşey yükün düzgün dağılmasını sağlayan çelik malzeme elastik kabul edilmiştir. Sadece düşey yük etkisinde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.127’de verilmiştir.



Şekil 4.127 H- URM- 3x150 Kodlu Duvarın Yığma Birimlerinde Sadece Düşey Yük Etkisinde Oluşan Asal Şekil Değişiklikleri

Önerilen nümerik modelde tuğlanın basınç dayanımı ile düşey basınç gerilmelerine bağlı olarak tuğla birimler için içsel sürtünme açısı 4.17 bağıntısı ile $\phi_{bl} = 58,84^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Tuğla elemanlardaki kohezyon değeri 4.16 bağıntısı ile $c_{bl} = 1,12$ MPa olarak bulunmuştur. Tuğla birimler için elastisite modülü ise $E_{bl} = 5800$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak alınmıştır. Harç birimler için içsel sürtünme açısı 4.15 bağıntısı ile $\phi_{mr} = 43,59^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Harç elemanlardaki kohezyon değeri 4.14 bağıntısı ile $c_{mr} = 4,74$ MPa olarak bulunmuştur. Harç birimler için elastisite modülü ise $E_{mr} = 300$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak alınmıştır.

Analizin sonlandırıldığı an için tuğla- harç etkileşimi dikkate alınarak Bölüm 4.3'te bağıntı 4.19 ile maksimum birim şekil değiştirme, $\varepsilon_{max} = 13/(2 * 112 + 13) = 0,054$ olarak belirlenebilir. Bu değere göre yük- yerdeğiştirme grafiği Şekil 4.128'de verilmiştir.



Şekil 4.128 H- URM 3X150 Duvarı Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi

Plastik şekil değiştirmeler, gerilmeler açısından kritik kesimler olan duvarın taban kesimlerinde yoğunlaşmaktadır. Fiziksel modelde çevrimsel yükleme etkisinde duvarlar test edildikleri için çatlaklar yükün uygulandığı bölgelerden itibaren diyagonal doğrultuda mesnet kesimine doğru yayılmaktadır. Nümerik modelde ise tek yönlü yatay yük kademeli olarak artırılarak bu deneysel duvarlar modellenmiştir. Şekil 4.131'de verilmiş olan nümerik modelde yatay yükün % 97 değerine ulaştığı anda (246 kN/252 kN), plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı bölgelerin duvar taban bölgelerine yakın yerlerde olduğunu söylemek mümkündür. Nümerik modelde yatay yükün % 47 değerine ulaştığı anda (119 kN/252 kN) oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.129'da verilmiştir.

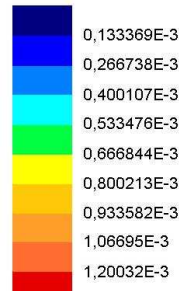
Nümerik modelde yatay yükün % 84 değerine ulaştığı anda (212 kN/252 kN) oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.130'da verilmiştir. Analiz maksimum birim şekil değiştirme kriterine göre sonlandırılmıştır ve Şekil 4.132'de verilmiştir.

Loadcase: 12:Increment 12 Load Factor = 1.08944

Results file: 3X150.mys

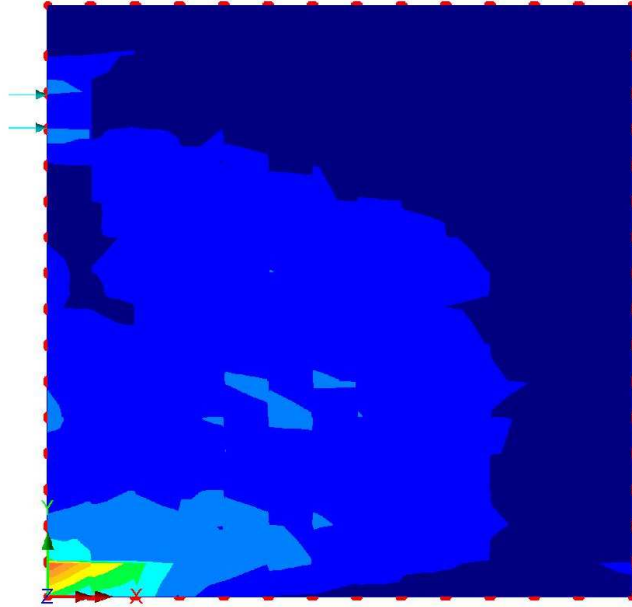
Entity: Strain - Solids

Component: E1



Maximum 1,20195E-3 at node 61

Minimum 1,62799E-6 at node 1668



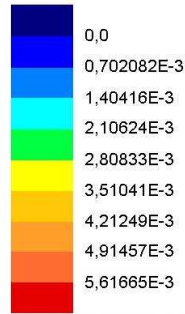
Şekil 4.129 Uygulanan Yükün Göçme Yükünün % 47 Değerine Ulaştığı Anda H- URM 3X150 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 22:Increment 22 Load Factor = 2.04943

Results file: 3X150.mys

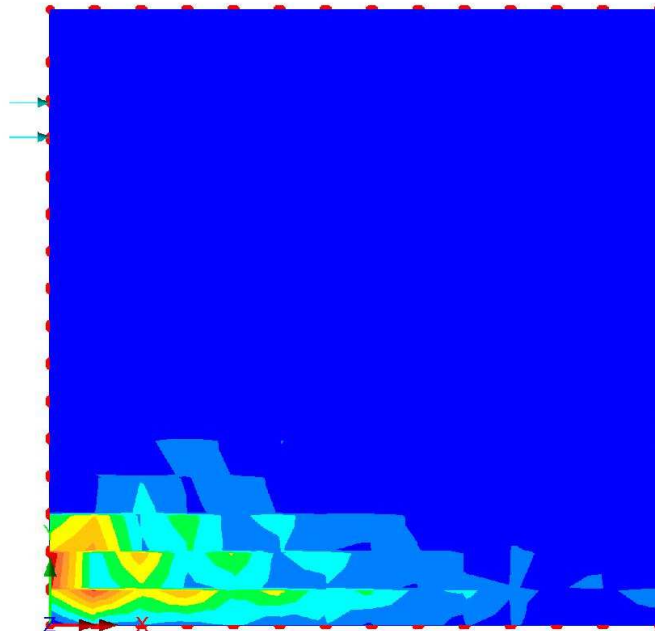
Entity: Strain - Solids

Component: E1



Maximum 6,31571E-3 at node 28

Minimum -3,0267E-6 at node 62



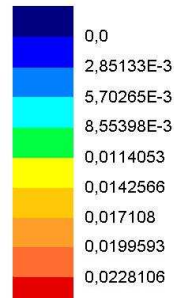
Şekil 4.130 Uygulanan Yükün Göçme Yükünün % 84 Değerine Ulaştığı Anda H- URM 3X150 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 32:Increment 32 Load Factor = 2.44149

Results file: 3X150.mys

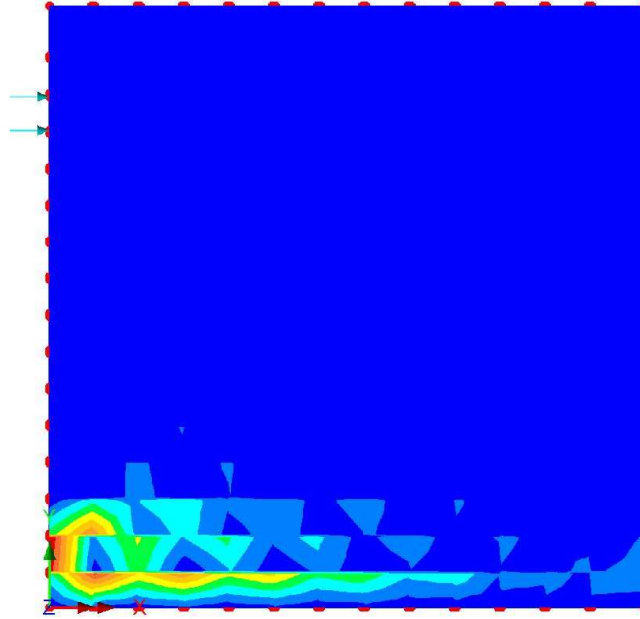
Entity: Strain - Solids

Component: E1



Maximum 0,0256587 at node 28

Minimum -3,24245E-6 at node 62



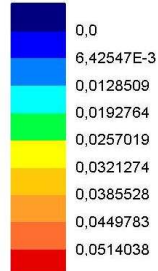
Şekil 4.131 Uygulanan Yükün Göçme Yükünün % 97 Değerine Ulaştığı Anda H- URM 3X150 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 42:Increment 42 Load Factor = 2.51855

Results file: 3X150.mys

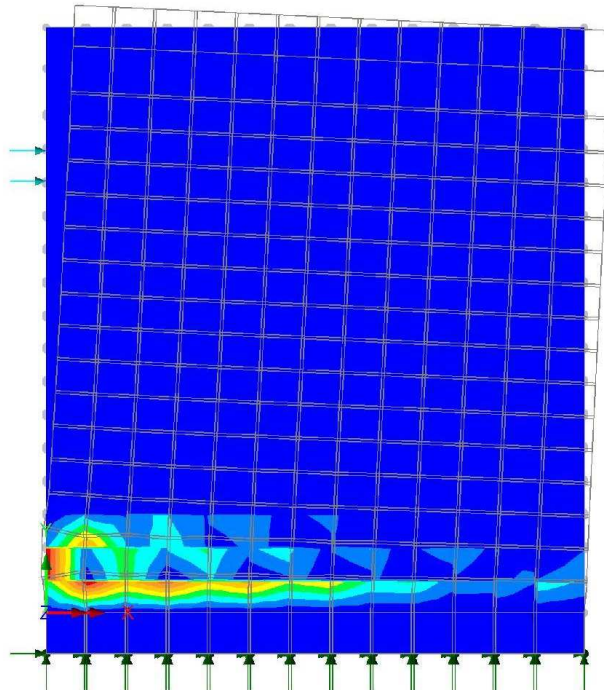
Entity: Strain - Solids

Component: E1



Maximum 0,0572329 at node 49

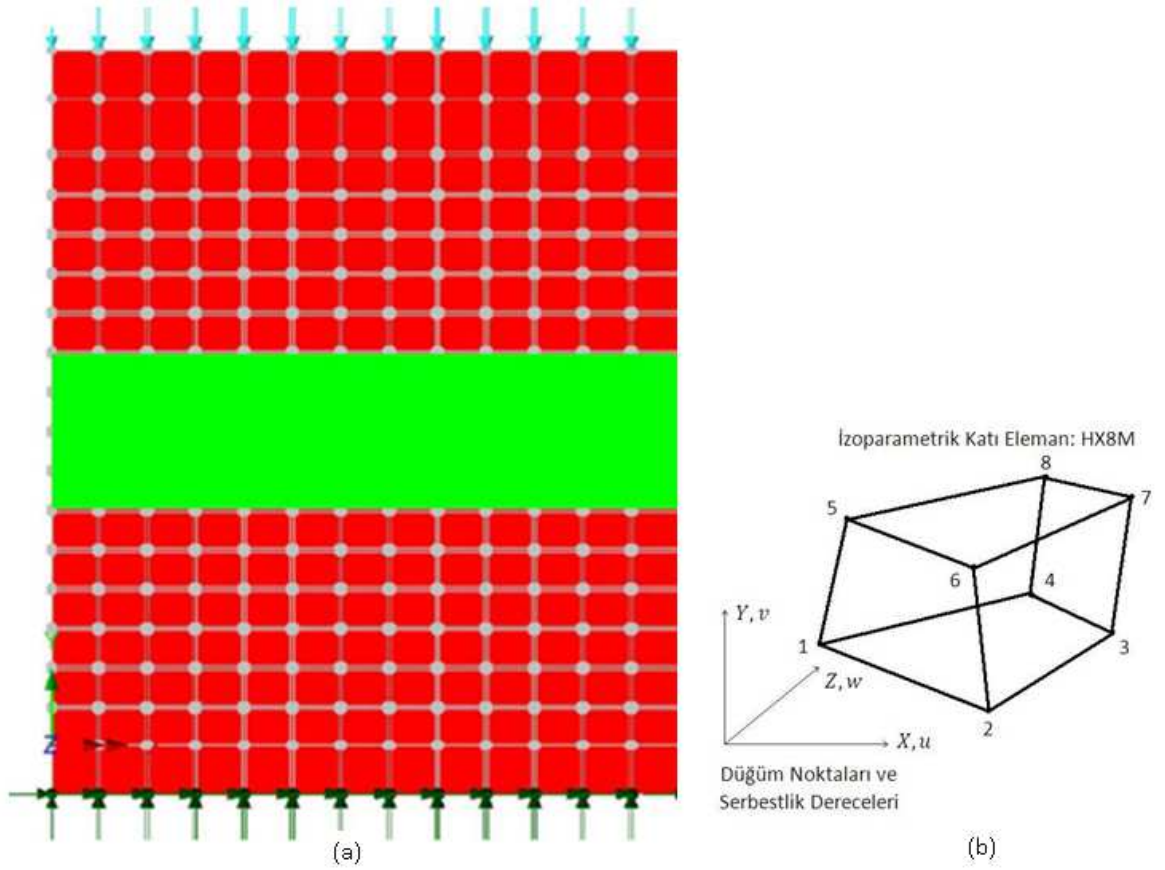
Minimum -0,59639E-3 at node 277



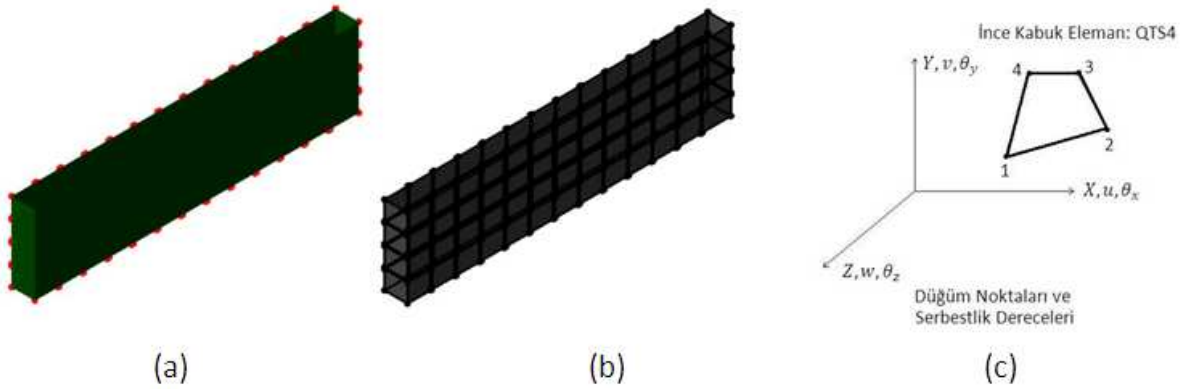
Şekil 4.132 Analizin Sonlandırıldığı Durumlarda H-URM 3X150 Duvarında Yığma Birimlerde Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Lifli polimer malzemeleri duvarların her iki yüzüne de tek yönde uygulanmıştır. Yatay yönde tek şerit 450 mm olmak üzere LP düzenlenmesi denenmiştir. Lifli polimer malzemesi olarak ise KLP şeritleri kullanılmıştır. Bu çalışmada, H- URM- 1x450 kodlu duvar H-URM-3x150 kodlu duvarla karşılaştırma amacı ile nümerik olarak çözülmüştür.

Bu çalışma kapsamında, H- URM- 1x450 kodlu güçlendirilmiş duvarın fiziksel deney koşulları da dikkate alınacak şekilde Bölüm 3’de verilen yaklaşım doğrultusunda nümerik simülasyonu 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik parametreler tuğla basınç dayanımı $f_{bt} = 12,4$ MPa, harç basınç dayanımı $f_{mr} = 28,7$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak deneysel verilerden alınmıştır [23-26]. H- URM- 3x150 kodlu güçlendirilmiş duvar düşeyde 98 kN (0,35 MPa) kadar yüklendikten sonra düşey yük sabit tutularak, yatay yükler kademeli olarak artırılmıştır. Önerilen nümerik modelde beton/betonarme levha, tuğla, harç birimler 3 boyutlu, 8 düğüm noktalı izoparametrik katı elemanlar ile modellenmiş ve 6065 düğüm noktasına sahip toplamda 825 katı eleman kullanılmıştır. Bunların 304 adedi tuğla, 471 adedi harç ve 50 adedi ise duvar alt ve üstüne konulan beton/betonarme elemana ait malzeme özelliklerini içermektedir. LP eleman ise 468 yüzeye atanmıştır. Rijit beton elemanlar için malzeme elastik kabul edilmiş, tuğla ve harç elemanlara ait malzeme özellikleri ise elasto-plastik malzeme modelleri ile tanımlanmıştır. Duvarın beton/betonarme plağa oturduğu taban kesitlerinde mesnetlenme şekli ankastre olarak kabul edilmiştir. Yığma birimler için nümerik model sonlu eleman ağı ve sonlu eleman tipi Şekil 4.133 (a ve b)’de verilmiştir. Kullanılan LP elemana ait mekanik özellikler çekme gerilmesi $f_t = 3500$ MPa ve elastisite modülü ise $E_{FRP} = 230000$ MPa, LP elemanın kalınlığı ise 0,13 mm olarak deneysel çalışmadan alınmıştır [23-26]. Şekil 4.134 (a ve b)’de ise LP eleman nümerik modeli, sonlu eleman ağı ve sonlu eleman tipi verilmiştir.

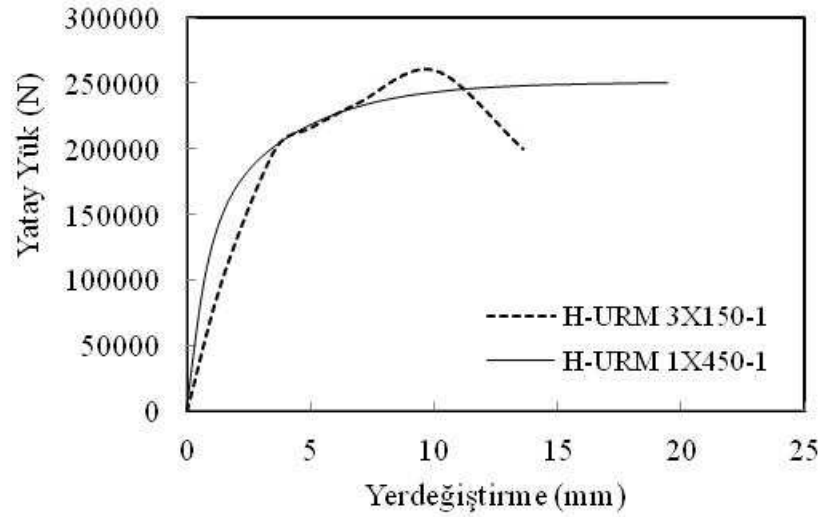


Şekil 4.133 (a) H-URM 1X450 Duvarı Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66]



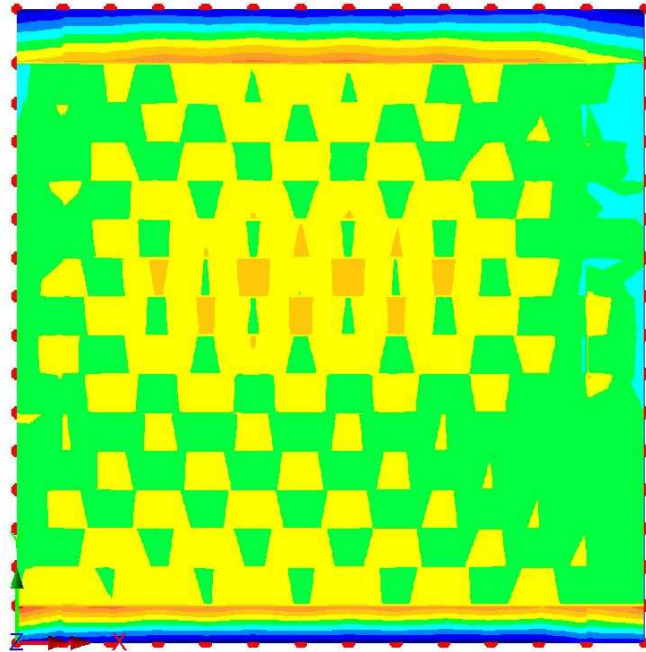
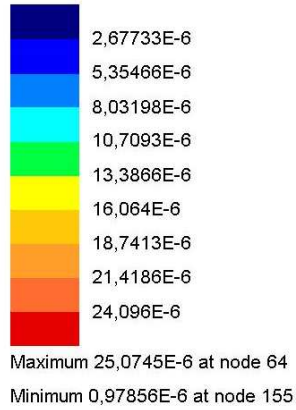
Şekil 4.134 (a) H-URM 1X450 Duvarı LP Eleman Nümerik Modeli (b) Sonlu Eleman Ağı (c) Sonlu Eleman Tipi [66]

Analizin sonlandırıldığı an için tuğla- harç etkileşimi dikkate alınarak Bölüm 4.3'te bağıntı (4.19) ile maksimum birim şekil değiştirme, $\varepsilon_{max} = 13/(2 * 112 + 13) = 0,054$ olarak belirlenebilir. Bu değere göre yük- yerdeğiştirme grafiği Şekil 4.136'de verilmiştir. Sadece düşey yükün etkidiği durumda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.137'de verilmiştir.



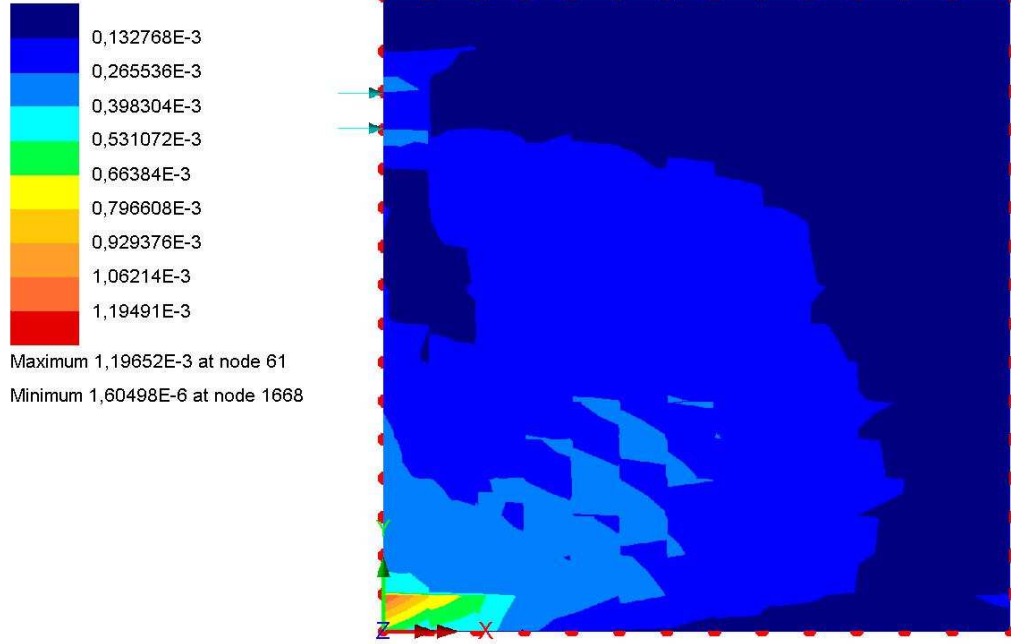
Şekil 4.135 H-URM 1X450 Duvarı Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi

Loadcase: 1:Increment 1
Results file: 1X450.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



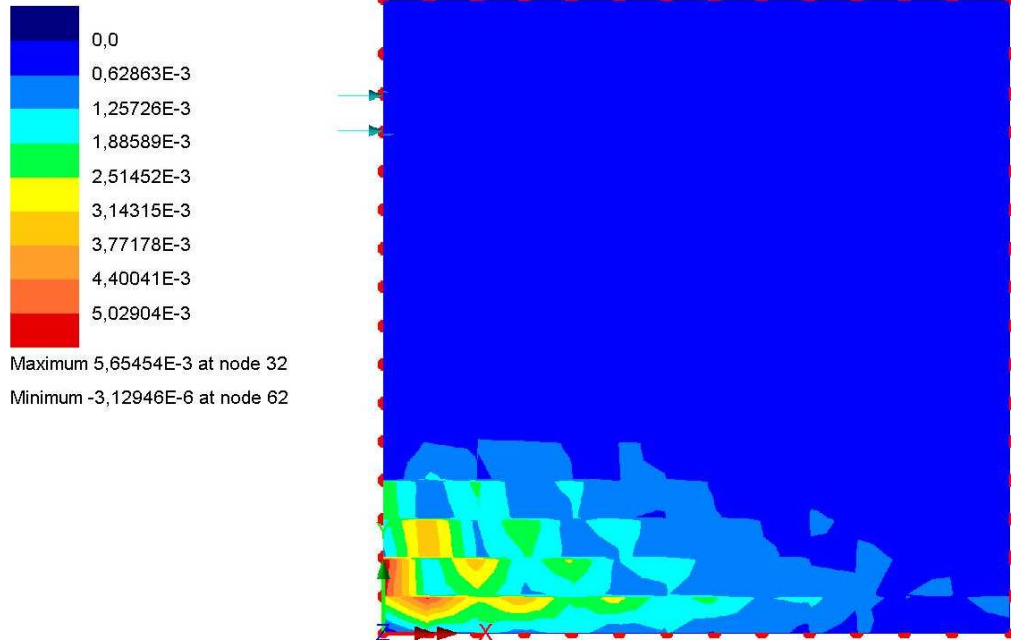
Şekil 4.136 Sadece Düşey Yük Etkisinde H-URM 1X450 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 12:Increment 12 Load Factor = 1.08165
Results file: 1X450.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



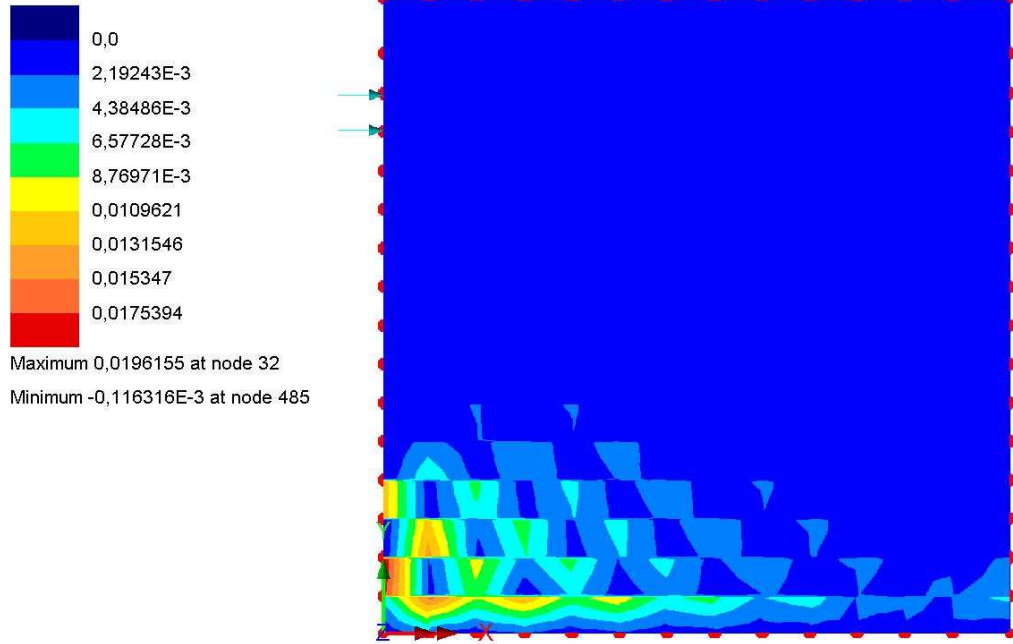
Şekil 4.137 Yatay Yükün Göçme Yükünün % 47 Değerlerinde H-URM 1X450 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 23:Increment 23 Load Factor = 2.00501
Results file: 1X450.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



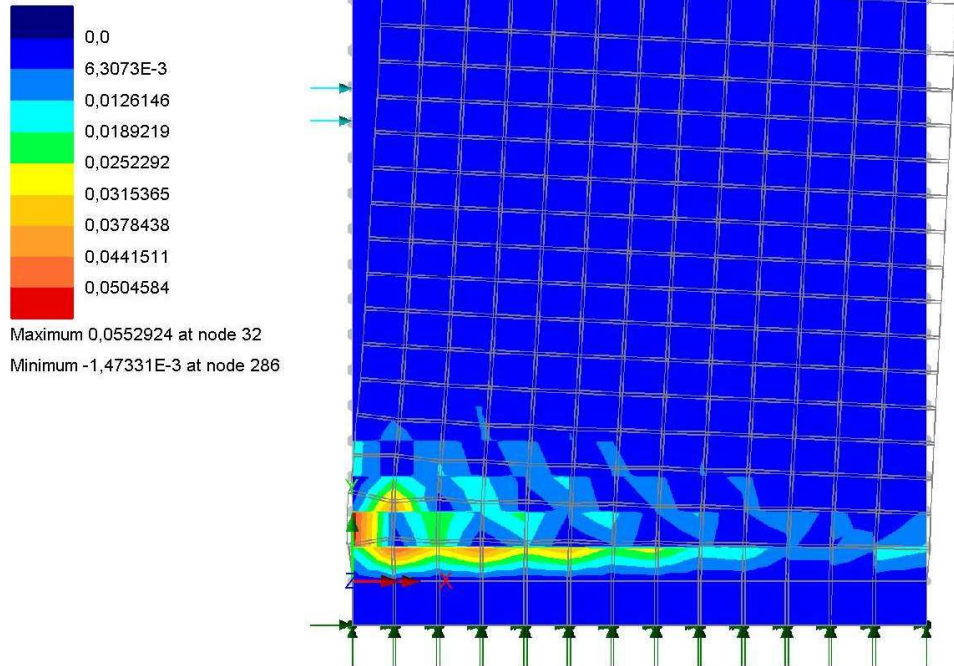
Şekil 4.138 Yatay Yükün Göçme Yükünün % 82 Değerlerinde H-URM 1X450 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 33:Increment 33 Load Factor = 2.39753
 Results file: 1X450.mys
 Entity: Strain - Solids
 Component: E1



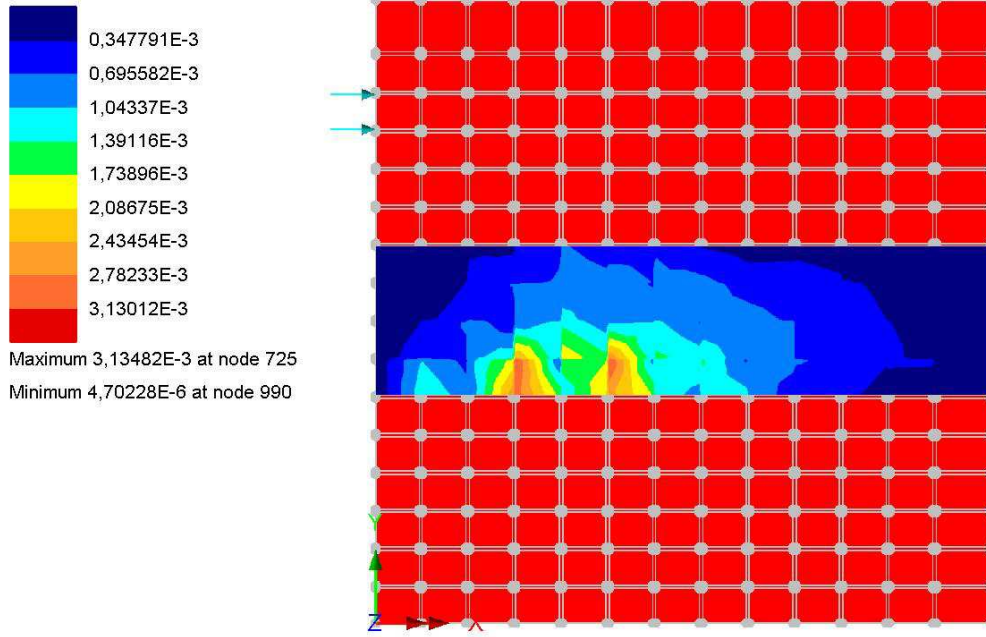
Şekil 4.139 Yatay Yükün Göçme Yükünün % 96 Değerlerinde H-URM 1X450 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 46:Increment 46 Load Factor = 2.50104
 Results file: 1X450.mys
 Entity: Strain - Solids
 Component: E1



Şekil 4.140 Analizin Sonlandırıldığı Durumda H-URM 1X450 Duvarında Yığma Birimlerde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 46:Increment 46 Load Factor = 2.50104
Results file: 1X450.mys
Entity: Strain (middle) - Thick Shell
Component: E1



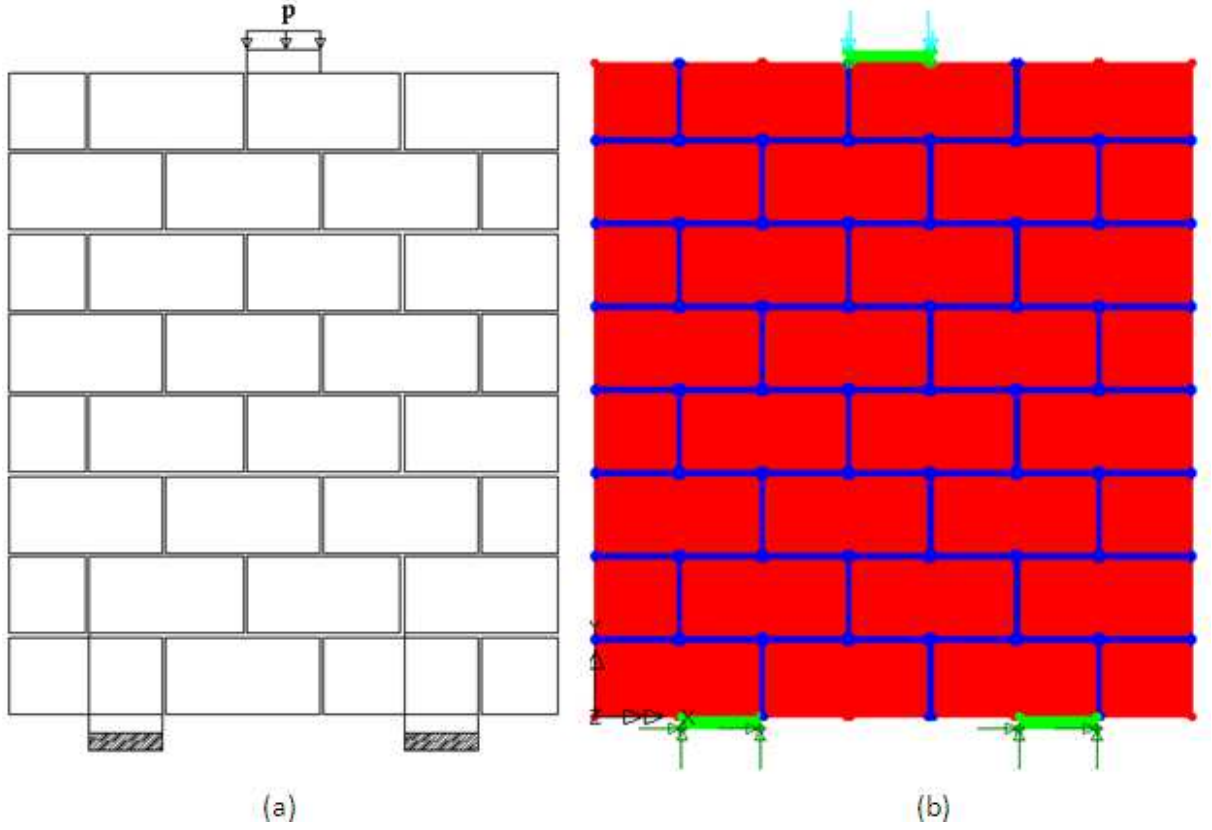
Şekil 4.141 Analizin Sonlandırıldığı Durumda H-URM 1X450 Duvarında LP Elemanlarda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Alcaino, vd. (2008), (2008), Santa- Maria, vd. (2004), (2006) yıllarında gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarda üç (3) şerit sargı ile yanal olarak kuşatılan duvarların (H-URM 3X100, H-URM 3X150) kendi aralarında tek şerit olan duvarlarla (H-URM 1X300, H-URM 1X450) kıyaslamışlar ve 3'lü sargı ile yerdeğiştirme değerlerinin arttığını ve daha sünek bir davranış sergilendiğini gözlemlemişlerdir. Bu duvarların analizi maksimum asal şekil değiştirme kriterine göre sonlandırıldığında, deney duvarlarında ölçülen yerdeğiştirme değerleri, H-URM 3X100 duvarı için 26,1171 mm, H-URM 1X300 duvarı için 25,9377 mm, H-URM 3X150 duvarı için 19,9273 mm, H-URM 4X150 duvarı için ise 19,4858 mm dir. Üç (3) şerit sargının tekli sargıya oranla etkisi nümerik analizlerle de elde edilmiştir.

4.10 Deney Duvarı No.7

Al-Salloum, vd. (2005) [35], çalışmasında betondan yapılmış ve birim ölçüleri 400x200x200 mm³ olan bağlayıcı malzeme olarak 10 mm harç kullanılan ve toplam duvar boyutu 1450x1650x200 mm³ olan yığma blok duvarları yalın olarak ve LP elemanlarla güçlendirerek

sadece düşey yük ve eğilme etkisinde çözümlemelerini yapmışlardır. Deney duvarının fiziksel durumu ve nümerik modeli Şekil 4.142 (a ve b)'de verilmiştir.



Şekil 4.142 (a) IPV Duvarı Fiziksel Durum (b) IPV Duvarı Nümerik Modeli

Bu çalışma kapsamında, IPV kodlu beton bloktan üretilmiş duvarın, fiziksel deney koşulları da dikkate alınacak şekilde Bölüm 3’de verilen yaklaşım doğrultusunda nümerik simülasyonu 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik parametreler tuğla basınç dayanımı $f_{bt} = 5$ MPa, harç basınç dayanımı $f_{mr} = 2$ MPa, poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak deneysel verilerden alınmıştır [35-36]. Deney duvarı sadece düşeyde olmak üzere 320 kN(1,1 MPa) yük değerine kadar kademeli olarak artırılmıştır. Önerilen nümerik modelde, çelik profil, tuğla ve harç birimler, 3 boyutlu, 8 düğüm noktalı izoparametrik katı elemanlar ile modellenmiş ve 1543 düğüm noktasına sahip toplamda 200 katı eleman kullanılmıştır. Bunların 80 adedi tuğla, 115 adedi harç, 5 adedi ise duvarın alt ve üst kısmına konulan plak elemana ait malzeme özelliklerini içermektedir. Rijit plak elemanlar için malzeme doğrusal elastik kabul edilmiş, tuğla ve harç elemanlara ait malzeme özellikleri ise elasto- plastik malzeme modelleri yardımıyla tanımlanmıştır. Duvarların rijit plağa oturduğu taban kesitlerinde mesnetlenme şekli ankastre olarak kabul edilmiştir. Nümerik



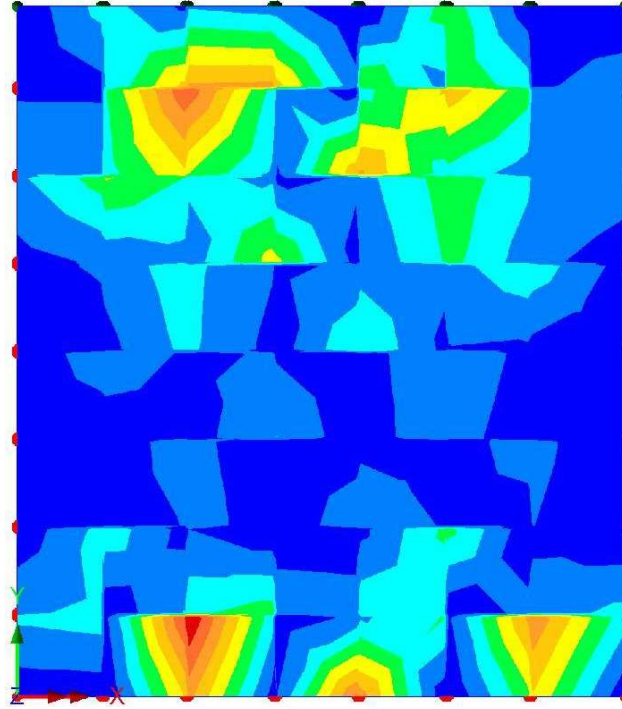
(b)

174

Loadcase: 1:Increment 1 Load Factor = 0.100000
Results file: IPV .mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



Maximum 0,122385E-3 at node 60
Minimum -2,21794E-15 at node 437



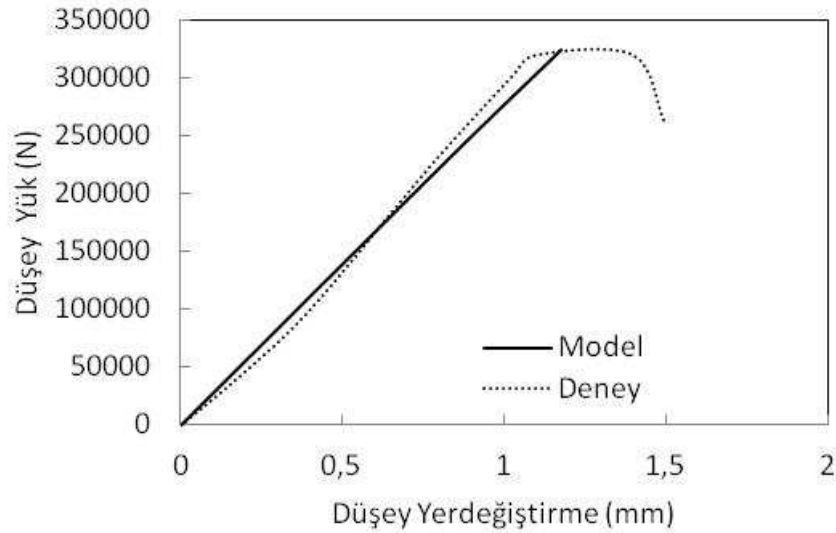
Şekil 4.144 Düşey Yüken İlk Kademesinde IPV Duvarında Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları

Önerilen nümerik modelde tuğlanın basınç dayanımı ile düşey basınç gerilmelerine bağlı olarak tuğla birimler için içsel sürtünme açısı 4.17 bağıntısı ile $\phi_{bl} = 56,84^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Tuğla elemanlardaki kohezyon değeri 4.16 bağıntısı ile $c_{bl} = 0,69$ MPa olarak bulunmuştur. Tuğla birimler için elastisite modülü ise $E_{bl} = 1500$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak alınmıştır. Harç birimler için içsel sürtünme açısı 4.15 bağıntısı ile $\phi_{mr} = 3^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Harç elemanlardaki kohezyon değeri 4.14 bağıntısı ile $c_{mr} = 1,95$ MPa olarak bulunmuştur. Harç birimler için elastisite modülü ise $E_{mr} = 1500$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0.20$ olarak alınmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.13' de verilmektedir.

Çizelge 4.13 IPV Duvar Modelinin Mekanik Özellikleri

Duvar adı	Tuğla					Harç				
	E_{bl} (MPa)	f_{bl} (MPa)	Poisson Oranı	c_{bl} (MPa)	$\phi_{bl}(^\circ)$	f_{mr} (MPa)	E_{mr} (MPa)	Poisson Oranı	c_{mr} (MPa)	$\phi_{mr}(^\circ)$
IPV	1500	5	0,2	0,69	56,84	2	100	0,2	1,95	3

Analizin sonlandırıldığı an için tuğla- harç etkileşimi dikkate alınarak Bölüm 4.3'te bağıntı 4.21 ile maksimum birim şekil değiştirme, $\varepsilon_{max} = 10/(2 * 200 + 10) = 0,024$ olarak belirlenebilir. Bu değere göre yük- yerdeğiştirme grafiği Şekil 4.145'de verilmiştir.

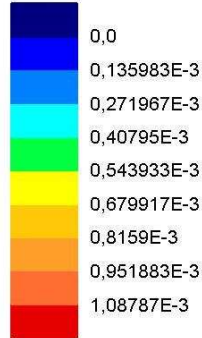


Şekil 4.145 IPV Duvarı Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi

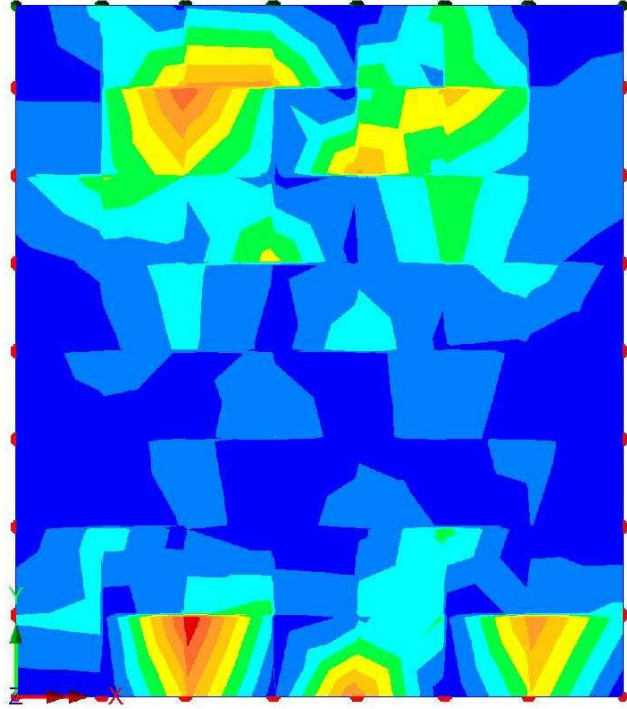
Bu duvarda plastik şekil değiştirmeler, gerilmeler açısından kritik kesimler olan duvarın orta kesimlerinde yoğunlaşmaktadır. Fiziksel modelde düşey yük etkisinde duvar test edildiği için çatlaklar yükün uygulandığı bölgelerden itibaren düşey doğrultuda duvar orta kesimine doğru yayılmaktadır. Nümerik modelde yatay yükün % 76 değerine ulaştığı anda (246 kN/324 kN), plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı bölgelerin duvar orta bölgelerinde olduğunu söylemek mümkündür. Nümerik modelde yatay yükün % 20 değerine ulaştığı anda (66 kN/324 kN) oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.146'da verilmiştir.

Nümerik modelde yatay yükün % 57 değerine ulaştığı anda (186 kN/324 kN) oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.147'de verilmiştir.

Loadcase: 10:Increment 10 Load Factor = 1.00000
 Results file: IPV .mys
 Entity: Strain - Solids
 Component: E1

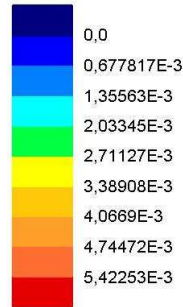


Maximum 1,22385E-3 at node 60
 Minimum -22,1794E-15 at node 437

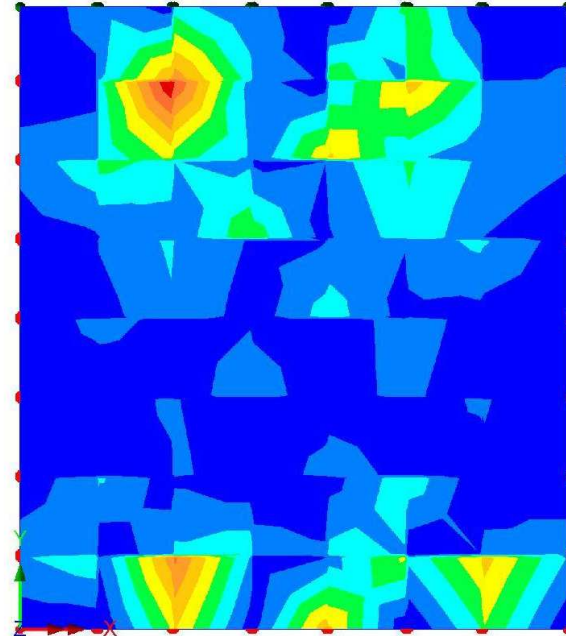


Şekil 4.146 Düşey Yükün Göçme Yükünün % 20 Değerinde IPV Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 40:Increment 40 Load Factor = 4.00000
 Results file: IPV .mys
 Entity: Strain - Solids
 Component: E1

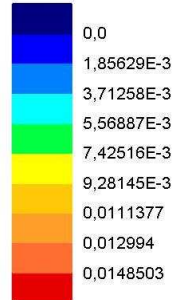


Maximum 6,10035E-3 at node 395
 Minimum -0,205063E-12 at node 437

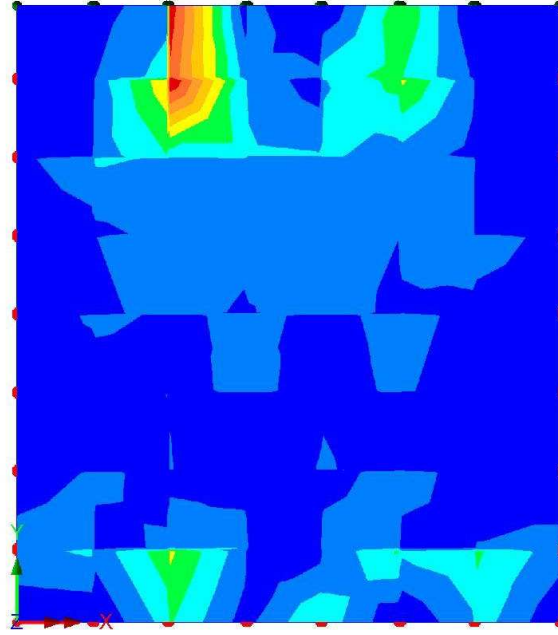


Şekil 4.147 Düşey Yükün Göçme Yükünün % 57 Değerinde IPV Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 71:Increment 71 Load Factor = 7.05774
Results file: IPV .mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1

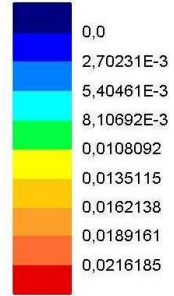


Maximum 0,0167066 at node 387
Minimum -0,417728E-12 at node 437

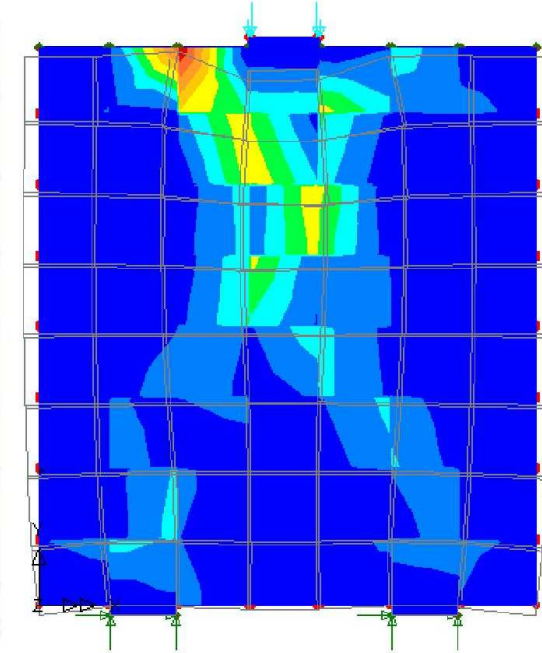


Şekil 4.148 Düşey Yükleme Yükleme Yükleme % 76 Değerinde IPV Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

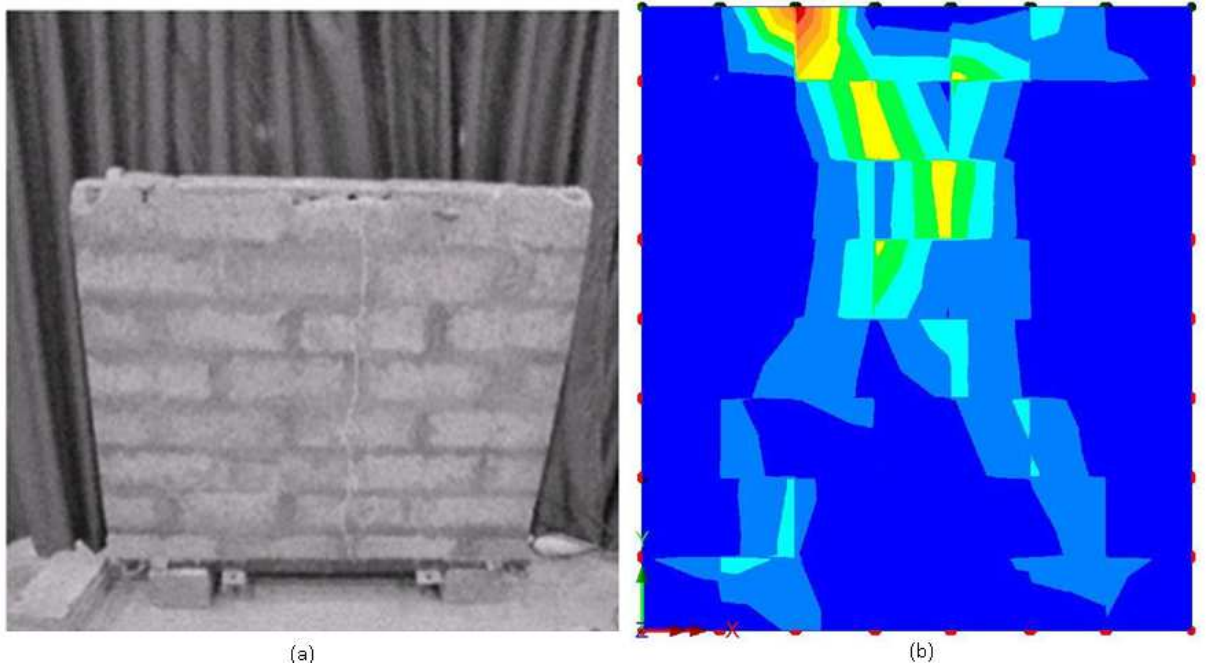
Loadcase: 102:Increment 102 Load Factor = 10.0838
Results file: IPV .mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



Maximum 0,0243208 at node 429
Minimum -0,45236E-12 at node 438



Şekil 4.149 Analizin Sonlandırıldığı Durumda IPV Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

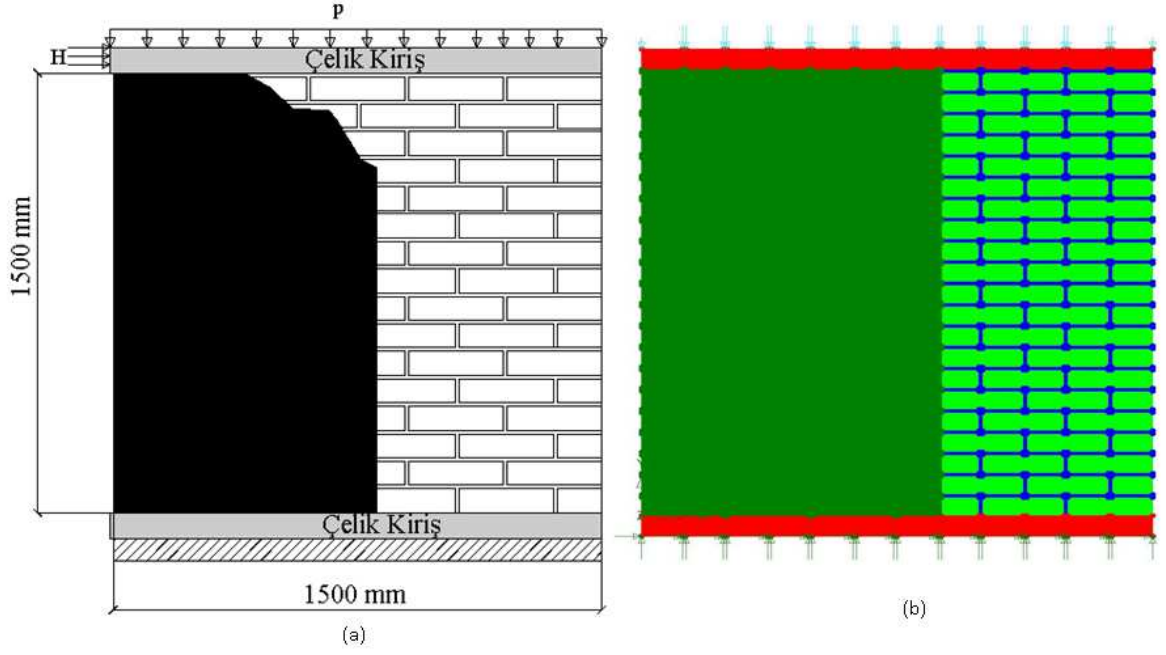


Şekil 4.150 (a) Fiziksel Durum Hasar Oluşumu [35] (b) Nümerik Modelde Asal Şekil Değişirme Dağılımları

4.11 Deney Duvarı No.8

(Stoian, vd. [12]) çalışmalarında tuğla ölçüleri $240 \times 63 \times 115 \text{ mm}^3$ olan, bağlayıcı malzeme olarak 10 mm harç kullanılan ve toplam duvar boyutu $1500 \times 1500 \times 115 \text{ mm}^3$ olan kil/tuğla birimlerden üretilen RM1 kodlu yığma panelin düşey ve yatay yük etkisindeki davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. RM1 kodlu panelin bir yüzey alanının yaklaşık % 60 kadar kısmına LP uygulaması yapılarak taşıma gücü değerlerine kadar yüklenmiştir. Deneysel duvar modeli tabanda çelik kiriş üzerine mesnetleşmiştir. Uygulanan düşey yükün, duvarın üstüne yerleştirilen rijit levha yardımıyla üniform olarak dağılması sağlanmıştır. Yatay yük ise duvarın üstüne yerleştirilen rijit levha yardımıyla uygulanmıştır.

Bu tez kapsamında yürütülen çalışmada, LP tek yüze uygulandığı için kuşatma etkisi dikkate alınmamıştır. Deney duvarının fiziksel durumu ile nümerik model Şekil 4.151 (a-b)'de görülmektedir. Çizelge 4.14'de ise geometrik ölçüler ve göçme yükleri verilmiştir.



Şekil 4.151 (a) RM1 Duvarı Fiziksel Durum (b) Nümerik Model

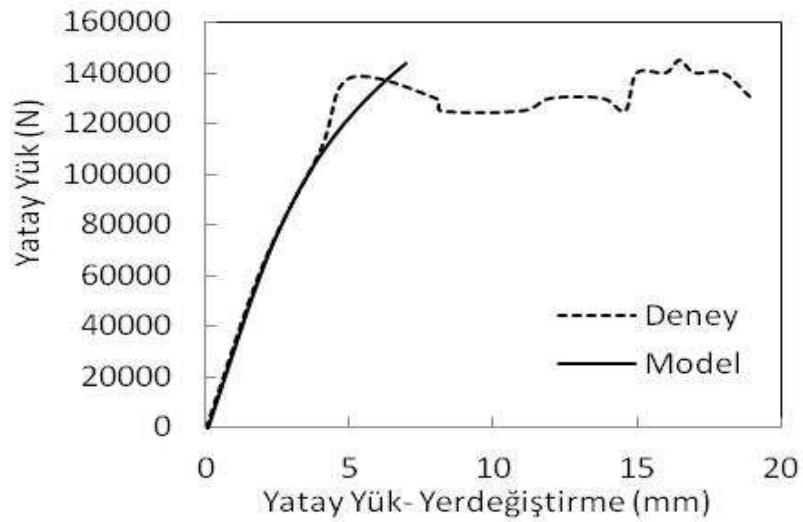
Çizelge 4.14 RM1 Duvarı Geometrik Büyüklükler ve Yatay Yük Değerleri

Duvar adı	Duvar boyutları (mm)	Eleman boyutu (mm)	Uygulanan yatay yükler(kN)	Göçme yükleri(kN)
RM1	1500x1500x115	240x63x115	145	144

RM1 kodlu duvarın üst kısmına konulan çelik kiriş üzerine düşey doğrultuda yük etki ettirilerek 200 kN değerine ulaştıktan sonra yatay yük kademeli artırılarak uygulanmıştır. Bu çalışma kapsamında, RM1 kodlu duvarın fiziksel deney koşulları da dikkate alınacak şekilde Bölüm 3'te verilen yaklaşım doğrultusunda nümerik simülasyonu 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik parametreler kil/tuğla duvarlarda tuğla basınç dayanımı $f_{bl} = 10,6$ MPa, harç basınç dayanımı $f_{mr} = 16,9$ MPa, olarak alınmıştır. Poisson oranı $\mu = 0,20$ kabul edilmiştir. Panelin üst kısmına ve tabanına yerleştirilen çelik kiriş ise doğrusal elastik davrandığı varsayılarak elastisite modülü $E = 210000$ MPa, Poisson oranı değeri $\mu = 0,30$ şeklinde tanımlanmıştır. Önerilen nümerik modelde, çelik profil, tuğla/beton ve harç birimler 3 boyutlu 8 düğüm noktalı izoparametrik katı elemanlar ile modellenmiş ve 7419 düğüm noktasına sahip, toplamda 1012 katı eleman kullanılmıştır. Bunların 368 adedi tuğla, 598 adedi harç, 46 adedi ise alt ve üste konulan çelik

elemanlara ait malzeme özelliklerini içermektedir. LP eleman ise tuğla ve harç birimlerin düğüm noktaları ile karşılaştırılarak 588 yüzeye tanıtılmıştır. Çelik profil için malzeme doğrusal elastik kabul edilmiş, tuğla ve harç elemanlar ise elasto-plastik malzeme modelleri yardımıyla tanımlanmıştır. Duvarların çelik profil üzerine oturduğu taban kesitlerinde mesnetlenme şekli ankastre olarak kabul edilmiştir.

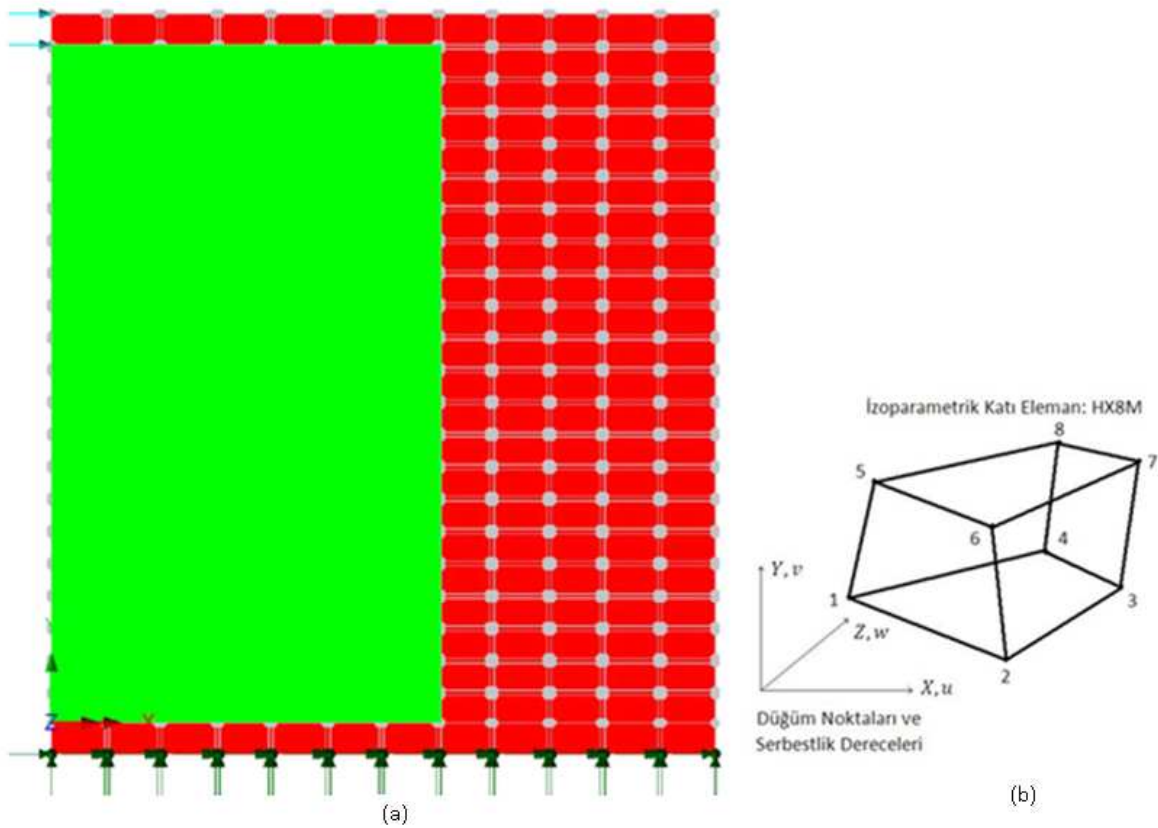
Önce yalın olarak test edilen duvar hasara uğradıktan sonra LP ile bir yüzünün % 60 kadarı güçlendirilerek tekrar test edilmiştir. RM1 olarak isimlendirilen kil/tuğla malzemeden üretilmiş duvar bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Bu duvar LP ile güçlendirildikten sonra önce düşey sonra yatayda kademeli olarak artımsal yük etkisi ile deneysel olarak test etmişlerdir. Fiziksel duvar LP elemanın duvar yüzeyinden kopmasıyla hasara uğramıştır. Bu tez çalışması kapsamında oluşturulan nümerik modelde, LP elemana ait mekanik büyüklükler, çekme gerilmesi $f_t = 820$ MPa ve elastisite modülü ise $E_{FRP} = 70600$ MPa, LP elemanın kalınlığı ise 0,33 mm olarak deneysel çalışmadan alınmıştır [12]. LP için ortotrop malzeme özellikleri tanımlanmıştır. LP elemanın kopma birim şekil değiştirme değeri çekme gerilmesinin elastisite modülüne bölünmesi ile 0,011 olarak hesapla bulunmuştur. Nümerik modellemede analiz LP elemanın asal şekil değiştirme değerinin 0,011 değerine ulaştığı durum yani LP elemanın koptuğu durumda sonlandırılmıştır. Bu durumda oluşan yatay yük - yerdeğiştirme eğrisi aşağıda Şekil 4.152’de verilmiştir.



Şekil 4.152 RM1 Duvarı Yatay Yük- Yerdeğiştirme Eğrileri

Önerilen nümerik modelde tuğlanın basınç dayanımı ile düşey basınç gerilmelerine bağlı olarak tuğla birimler için içsel sürtünme açısı (4.17) bağıntısı ile $\phi_{bl} = 58,43^\circ$ şeklinde elde

edilmiştir. Tuğla elemanlardaki kohezyon değeri (4.16) bağıntısı ile $c_{bl} = 1,09$ MPa olarak bulunmuştur. Tuğla birimler için elastisite modülü ise $E_{bl} = 5500$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak alınmıştır. Harç birimler için içsel sürtünme açısı (4.15) bağıntısı ile $\phi_{mr} = 25,67^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Harç elemanlardaki kohezyon değeri (4.14) bağıntısı ile $c_{mr} = 3,97$ MPa olarak bulunmuştur. Elde edilen bu değerler Çizelge 4.15’ de verilmiştir. Tek yüzeye LP sargısı yapıldığı için kuşatma etkisi bu duvarda da dikkate alınmamıştır. Dolayısıyla, tuğla birimlerin kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri tek yüzeyi güçlendirilen RM1 kodlu bu duvar için de kullanılmıştır. Sonlu eleman ağı Şekil 4.153 a’da, kullanılan katı elemana ait geometri ve düğüm noktası serbestlikleri şematik olarak Şekil 4.153 b’de verilmiştir.

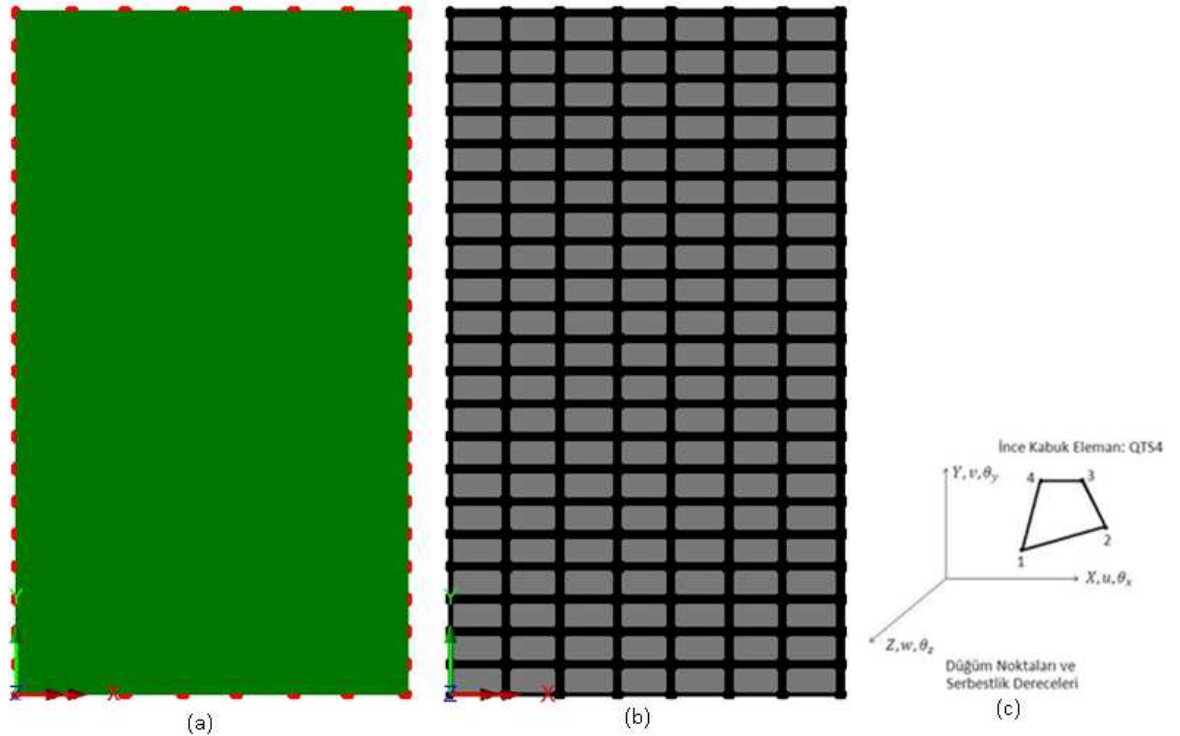


Şekil 153 (a) RM1 Kodlu Duvarın Sonlu Eleman Ağı (b) Sonlu Eleman Tipi [66]

Çizelge 4.15 RM1 Deney Duvarı Nümerik Model Mekanik Parametreleri

Tuğla						Harç				
Duvar adı	E_{bl} (MPa)	f_{bl} (MPa)	Poisson Oranı	c_{bl} (MPa)	$\phi_{bl}(^\circ)$	f_{mr} (MPa)	E_{mr} (MPa)	Poisson Oranı	c_{mr} (MPa)	$\phi_{mr}(^\circ)$
RM1	5500	10,6	0,20	1,09	58.43	16,9	400	0,20	3,97	25,67

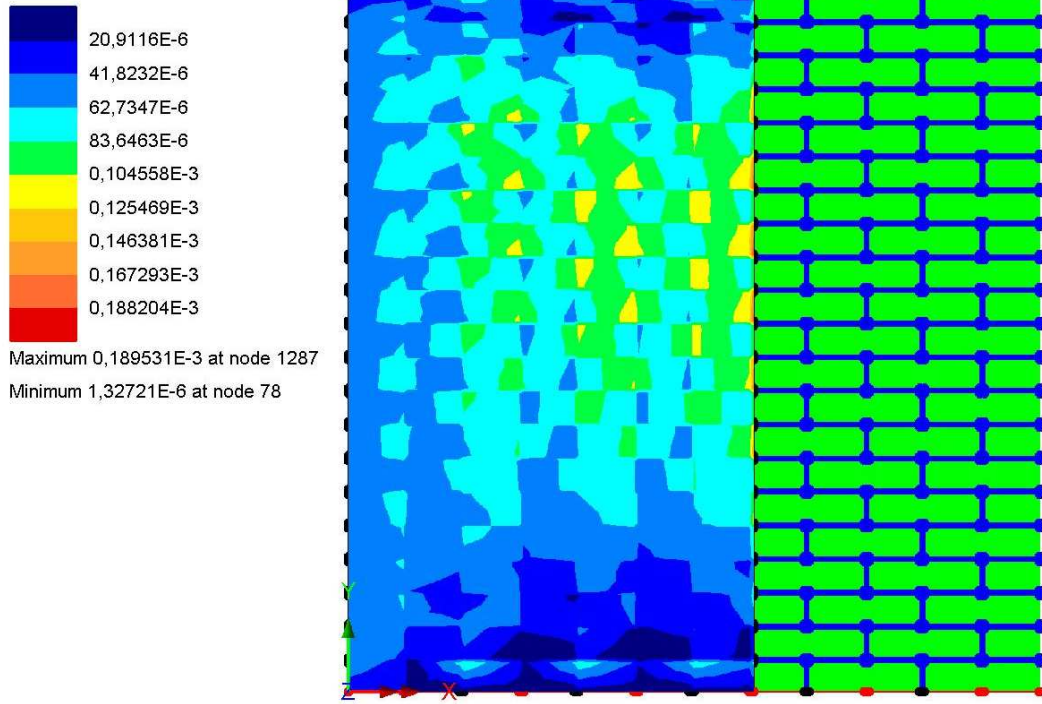
Şekil 4.154 (a-b-c)'de ise LP eleman nümerik model, sonlu eleman ağı ve sonlu eleman tipi verilmiştir.



Sadece düşey yükün etki ettiği durumda LP elemanda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları

Şekil 4.155'de verilmiştir.

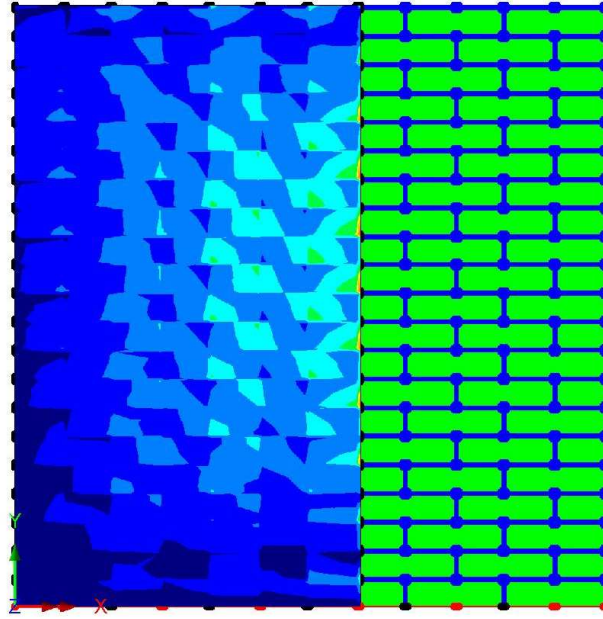
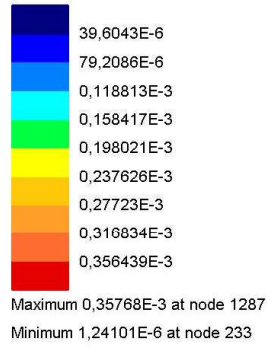
Loadcase: 1:Increment 1
Results file: RM1.mys
Entity: Strain (middle) - Thick Shell
Component: E1



Şekil 4.155 Sadece Düşey Yük Etkisinde RM1 Duvarı LP Elemanda Oluşan Asal Şekil Değişirme Dağılımları

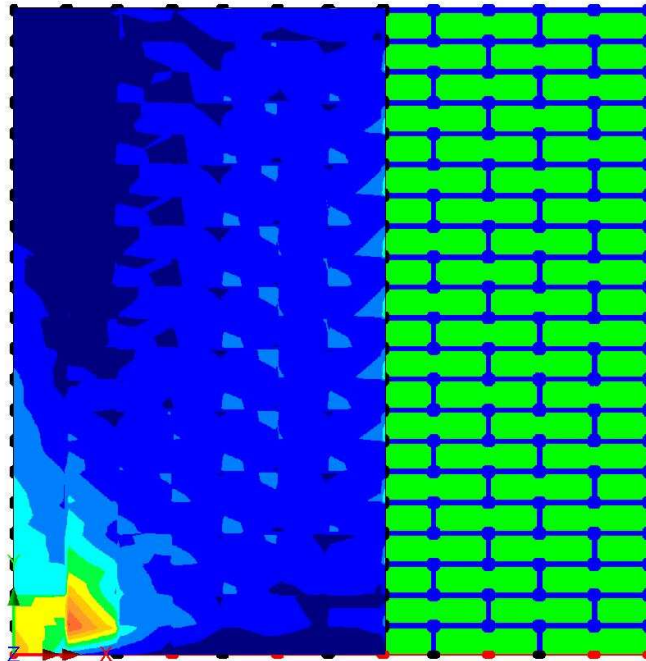
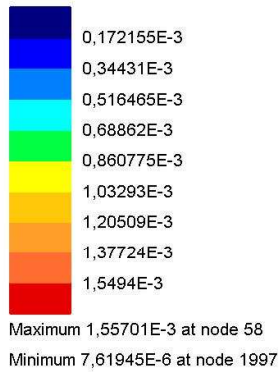
Şekil 4.156'da ise yatay yükün % 15 değerine ulaştığı anda (22 kN/144 kN) şekil değiştirme dağılımları verilmektedir. Şekil 4.157'de ise % 44 değerine ulaştığı anda (64 kN/144 kN) şekil değiştirme dağılımları verilmiştir [66]. Nümerik modelde yatay yükün % 86 değerine ulaştığı anda (124 kN/144 kN), plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı bölgelerin duvar panelinin taban bölgesinde olduğu Şekil 4.158'den kolaylıkla görülebilir. RM1 duvarının fiziksel durum göçme mekanizması ilgili deneysel çalışmada gösterilmediği için Şekil 4.159'da sadece nümerik modelden elde edilen LP eleman kopma durumunda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir.

Loadcase: 11:Increment 11 Load Factor = 1.00000
Results file: RM1.mys
Entity: Strain (middle) - Thick Shell
Component: E1



Şekil 4.156 RM1 Duvarında Göçme Yükünün % 15 Değerine Ulaştığı Zaman Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 31:Increment 31 Load Factor = 3.00000
Results file: RM1.mys
Entity: Strain (middle) - Thick Shell
Component: E1



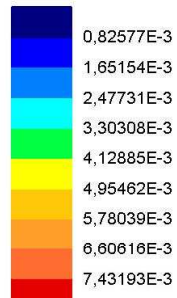
Şekil 4.157 RM1 Duvarında Göçme Yükünün % 44 Değerine Ulaştığı Zaman Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 61:Increment 61 Load Factor = 6.00000

Results file: RM1.mys

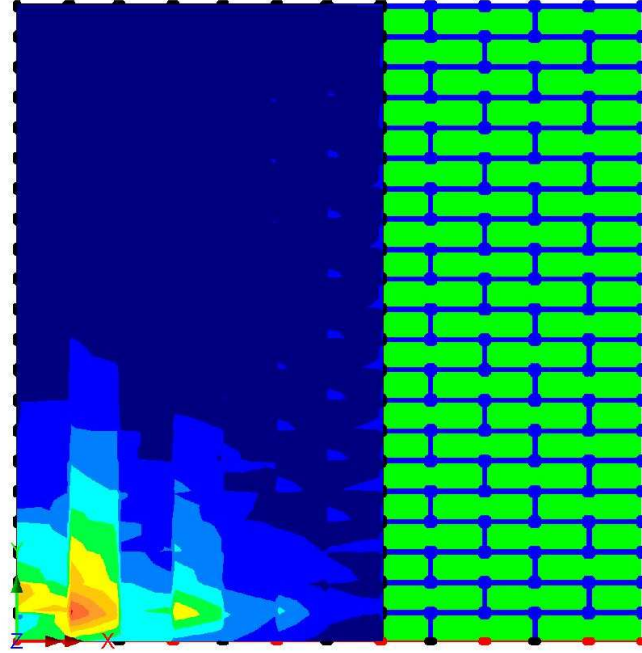
Entity: Strain (middle) - Thick Shell

Component: E1



Maximum 7.51935E-3 at node 58

Minimum 87.4213E-6 at node 1997



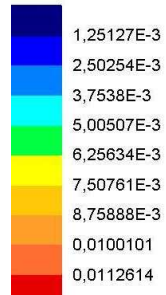
Şekil 4.158 RM1 Duvarında Göçme Yükünün % 86 Değerine Ulaştığı Zaman Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 71:Increment 71 Load Factor = 7.00000

Results file: RM1.mys

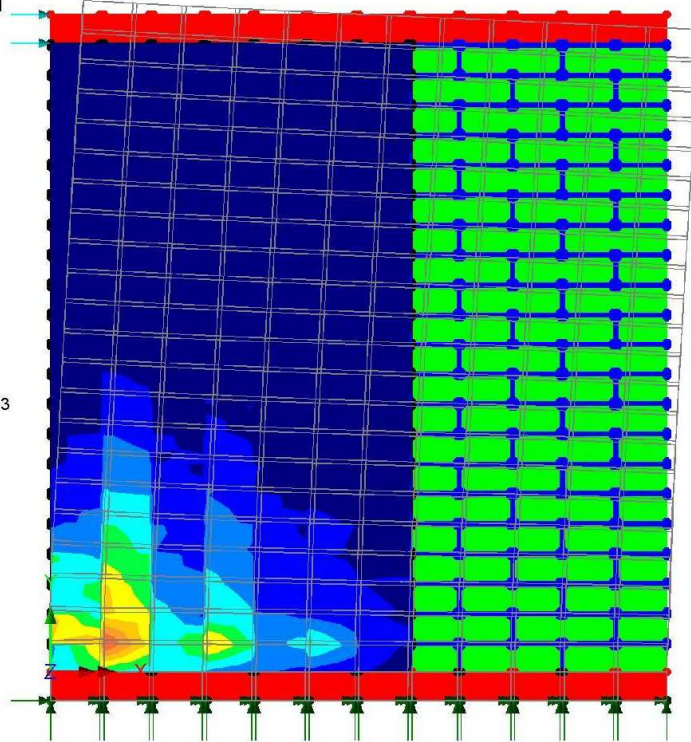
Entity: Strain (middle) - Thick Shell

Component: E1



Maximum 0.0113595 at node 58

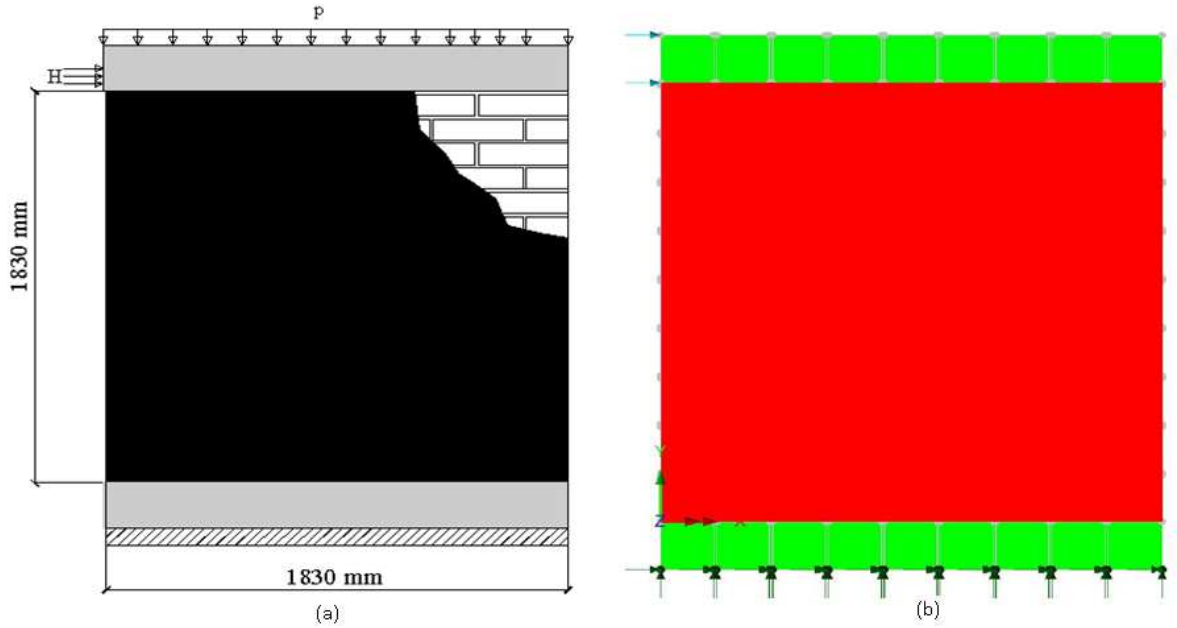
Minimum 98.0622E-6 at node 1883



Şekil 4.159 RM1 Duvarında LP Elemanın Kopma Durumunda Oluşan Asal şekil Değiştirme Dağılımları

4.12 Deney Duvarı No.9

(Mosallam, ve Banerjee,[109]) çalışmalarında tuğla ölçüleri $406 \times 203 \times 152 \text{ mm}^3$ olan, bağlayıcı malzeme olarak 10 mm harç kullanılan ve toplam duvar boyutu $1830 \times 1830 \times 203 \text{ mm}^3$ olan beton bloktan üretilen yığma panellerin düşey ve yatay yük etkisindeki davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu panellerden iki tanesi yalın olarak, dört tanesi ise farklı biçimlerde LP elemanlarla güçlendirilerek deneysel olarak test edilmiştir. Bu çalışma kapsamında duvarın her iki yüzeyine tek kat KLP uygulanan W4-C-RT kodlu duvarın nümerik modellenmesi yapılmıştır. Deneysel duvar modeli tabanda betonarme kiriş üzerine mesnetleşmiştir. Uygulanan düşey yükün, duvarın üstüne yerleştirilen rijit levha yardımıyla üniform olarak dağılması sağlanmıştır. Deney duvarı ile duvara ait nümerik model Şekil 4.160 (a-b)'de görülmektedir. Çizelge 4,16'da ise geometrik ölçüler ve göçme yükleri verilmiştir [109].



Şekil 4.160 W4-C-RT Duvarı (a) Fiziksel Durum [109] (b) Nümerik Model

Çizelge 4.16 W4- C-RT Duvarı Geometrik Büyüklükler ve Yatay Yük Değerleri

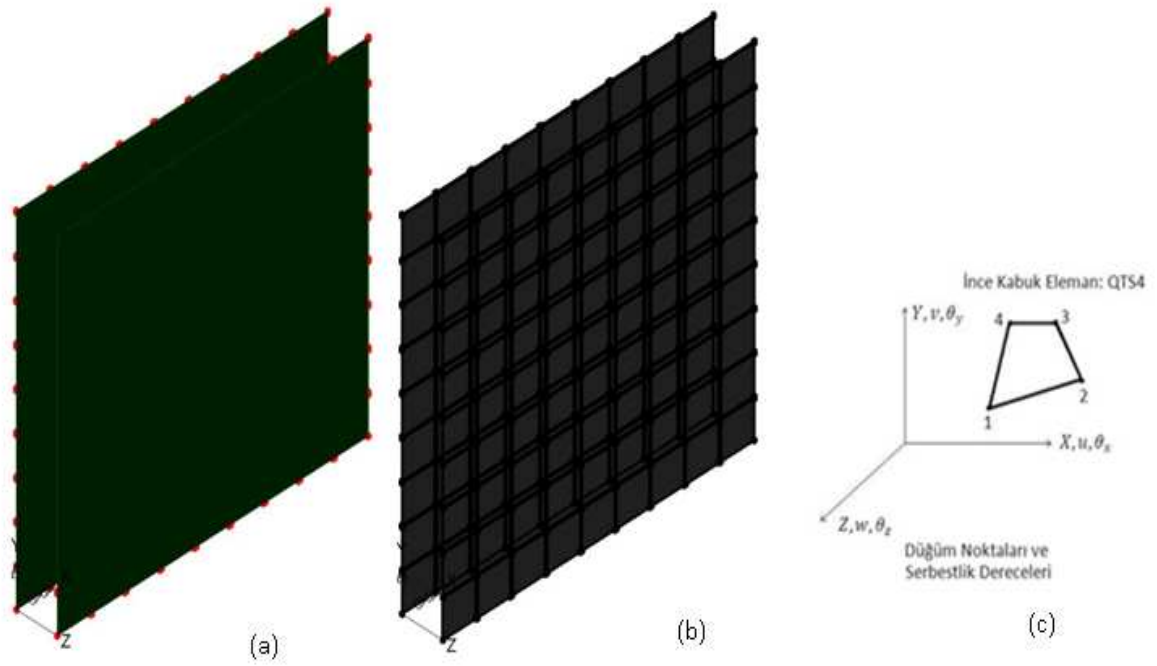
Duvar Adı	Duvar boyutları (mm)	Eleman boyutu (mm)	Ugulanan düşey yük (kN)	Düşey yükte gerilme (Mpa)	Max. yatay yükler Deneysel(kN)	Max. yatay yükler Nümerik(kN)
W4-C-RT	1830x1830x203	406x152x203	480	1,30	485	497

W4-C-RT kodlu duvarın üst kısmına konulan çelik kiriş üzerine düşey yük etki ettirilerek 480 kN değerine ulaşıldıktan sonra yatay yük kademeli artırılarak uygulanmıştır. Bu çalışma kapsamında, W4-C-RT kodlu duvarların fiziksel deney koşulları da dikkate alınacak şekilde Bölüm 3'te verilen yaklaşım doğrultusunda nümerik simülasyonu 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik parametreler bu duvarda beton briket basınç dayanımı $f_{bl} = 18,96$ MPa, harç basınç dayanımı $f_{mr} = 14,62$ MPa olarak alınmıştır. Poisson oranı $\mu = 0,20$ kabul edilmiştir. Panelin üst kısmına ve tabanına yerleştirilen betonarme kiriş ise doğrusal elastik davrandığı varsayılarak, elastisite modülü $E = 210000$ MPa, Poisson oranı değeri $\mu = 0,30$ şeklinde tanımlanmıştır. Önerilen nümerik modelde, betonarme kiriş, beton ve harç birimler 3 boyutlu 8 düğüm noktalı izoparametrik katı elemanlar ile modellenmiş ve 2565 düğüm noktasına sahip, toplamda 340 katı eleman kullanılmıştır. Bunların 117 adedi tuğla, 189 adedi harç, 34 adedi ise alt ve üste konulan betonarme elemanlara ait malzeme özelliklerini içermektedir. Betonarme için malzeme doğrusal elastik kabul edilmiş, tuğla ve harç elemanlar ise elasto-plastik malzeme modelleri yardımıyla tanımlanmıştır. Duvarların betonarme kiriş üzerine oturduğu taban kesitlerinde mesnetlenme şekli ankastre olarak kabul edilmiştir.

Önerilen nümerik modelde tuğlanın basınç dayanımı ile düşey basınç gerilmelerine bağlı olarak tuğla birimler için içsel sürtünme açısı (4.17) bağıntısı ile $\phi_{bl} = 57,66^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Tuğla elemanlardaki kohezyon değeri (4.16) bağıntısı ile $c_{bl} = 2,32$ MPa olarak bulunmuştur. Tuğla birimler için elastisite modülü ise $E_{bl} = 6000$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak alınmıştır. Harç birimler için içsel sürtünme açısı (4.15) bağıntısı ile $\phi_{mr} = 22,20^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Harç elemanlardaki kohezyon değeri (4.14) bağıntısı ile $c_{mr} = 3,79$ MPa olarak bulunmuştur. Elde edilen bu değerler Çizelge 4.17' de verilmiştir. Her iki yüzeye LP sargısı yapıldığı için kuşatma etkisi bu duvarda dikkate alınmıştır. LP eleman nümerik model, sonlu eleman ağı, ve sonlu eleman tipi Şekil 4.161 (a-b-c)'de verilmiştir.

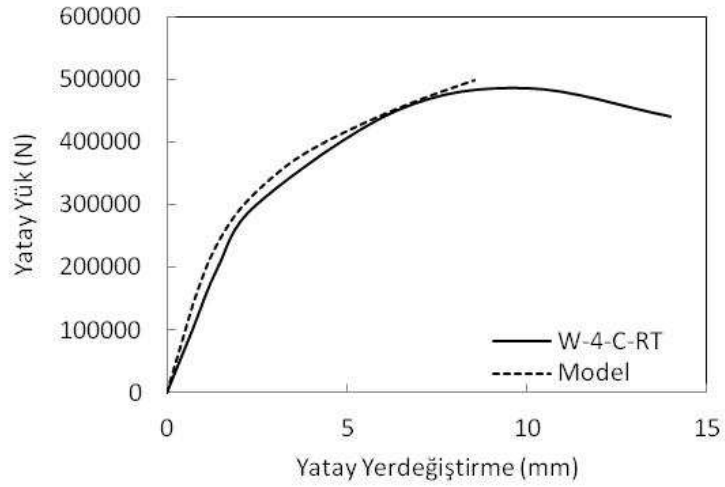
Çizelge 4.17 W4-C-RT Duvar Modelinin Mekanik Özellikleri

Tuğla						Harç				
Duvar adı	E_{bl} (MPa)	f_{bl} (MPa)	Poisson Oranı	c_{bl} (MPa)	$\phi_{bl}(^{\circ})$	f_{mr} (MPa)	E_{mr} (MPa)	Poisson Oranı	c_{mr} (MPa)	$\phi_{mr}(^{\circ})$
W4-C-RT	6000	18,96	0,20	2,32	57,66	14,62	800	0,20	3,79	22,20



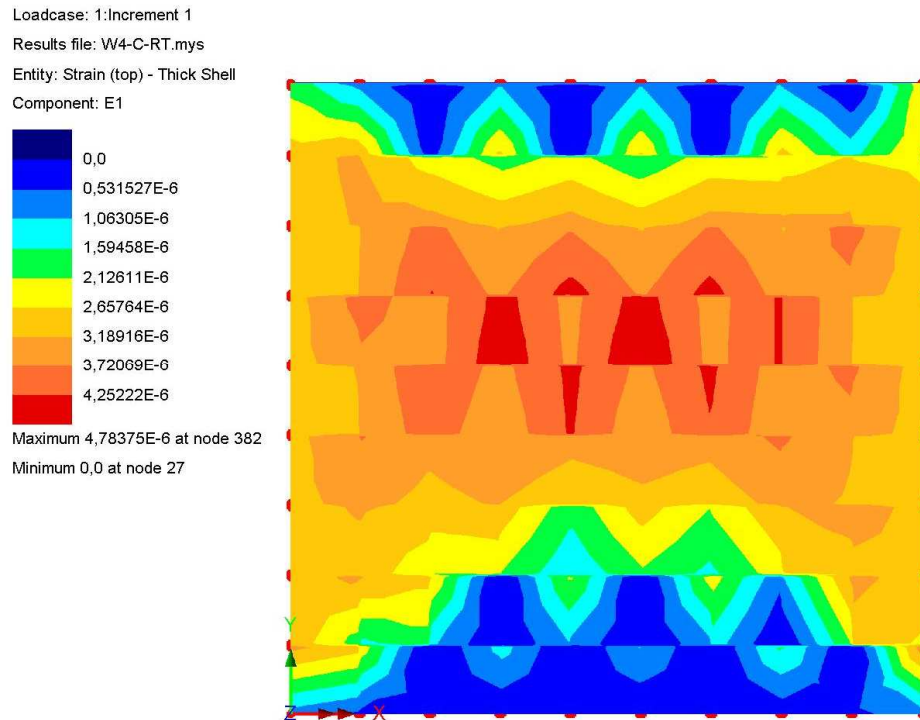
Bu tez çalışması kapsamında oluşturulan nümerik modelde, LP elemana ait mekanik büyüklükler, çekme gerilmesi $f_t = 1061$ MPa, ve elastisite modülü ise $E_{FRP} = 96500$ MPa, LP elemanın kalınlığı ise 1,60 mm olarak deneysel çalışmadan alınmıştır [109]. LP için ortotrop malzeme özellikleri 612 yüzeye tanımlanmıştır. LP elemanın kopma birim şekil değiştirme değeri çekme gerilmesinin elastisite modülüne bölünmesi ile 0,011 olarak hesapla bulunmuştur. Nümerik modellemede analiz LP elemanın asal şekil değiştirme değerinin 0,011 değerine ulaştığı durum yani LP elemanın koptuğu durumda sonlandırılmıştır. Asal şekil

değiştirmenin bu değere ulaştığı anda oluşan yatay yük- yerdeğiştirme eğrisi şekil 4.162’de verilmiştir.



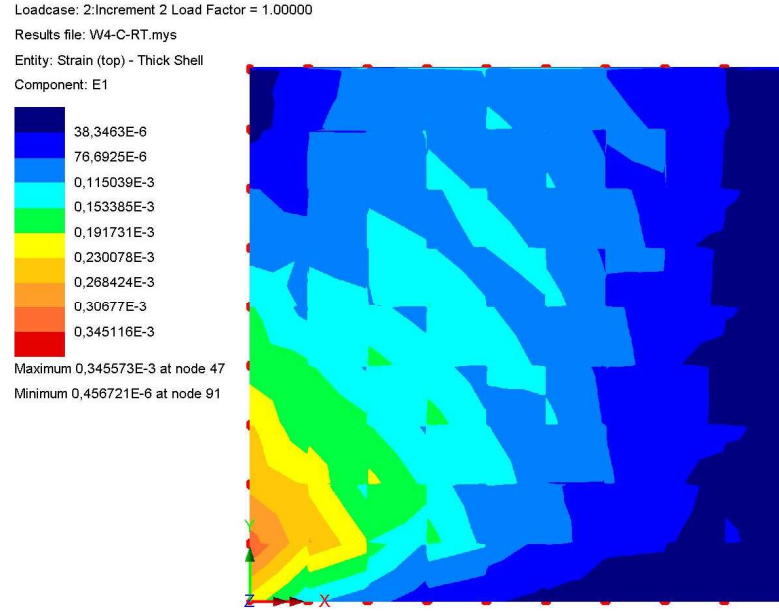
şekil 4.162 W4-C-RT Duvarı Yük- Yerdeğiştirme Eğrisi

Sadece düşey yükün etkili olduğu durumda LP eleman üzerinde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları aşağıda şekil 4.163’de verilmiştir.



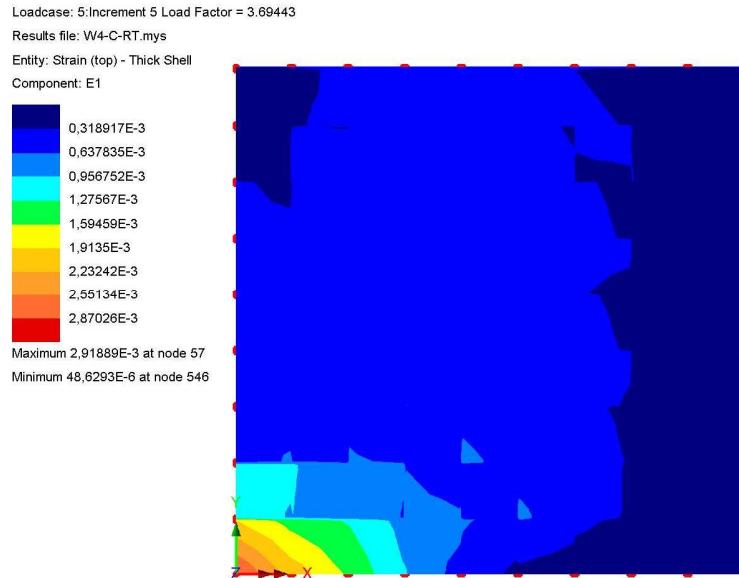
şekil 4.163 W4-C-RT Duvarında Düşey Yük Etkisinde LP Elemanda Oluşan Asal şekil Değiştirme Dağılımları

Yatay yükün göçme yükünün % 16 (8 kN/497 kN) değerinde LP elemanda oluşan şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.164’de verilmektedir.



Şekil 4.164 Yatay Yükün Göçme Yükünün %16 Değerinde Oluşan Asal şekil Değiştirme Dağılımları

Şekil 4.165’de ise yatay yükün göçme yükünün %71 (353 kN/497 kN) değerinde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir.



Şekil 4.165 Yatay Yükün Göçme Yükünün %71 Değerinde Oluşan Asal şekil Değiştirme Dağılımları

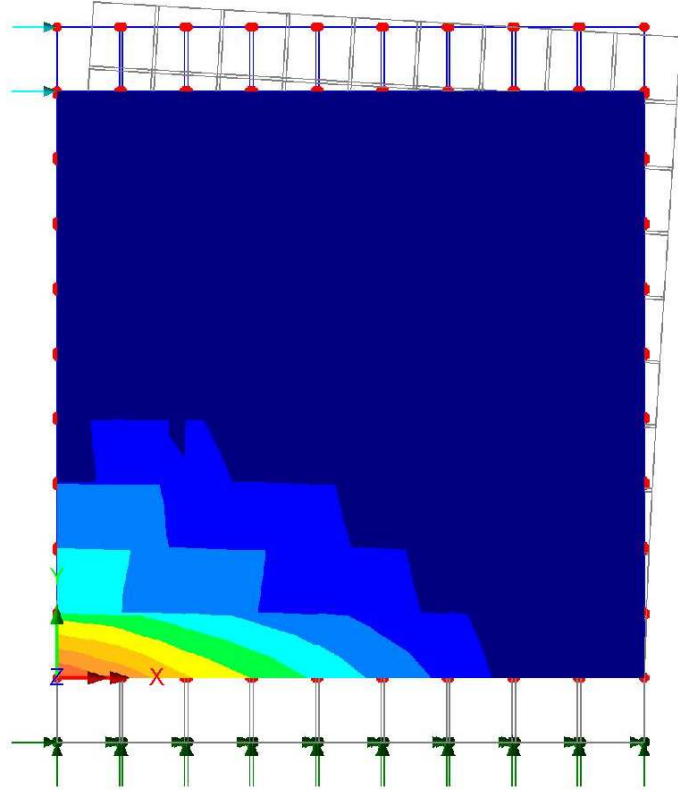
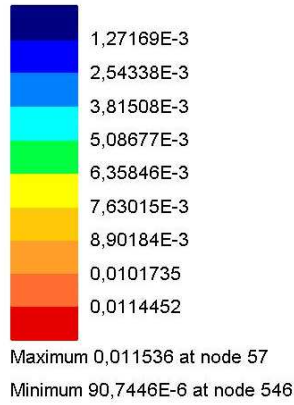
Analizin sonlandırıldığı durumda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.166’da verilmiştir. LP eleman W4-C-RT duvarının her iki yüzeyine uygulanmış ve nümerik modelde sargı etkisi dikkate alınmıştır. LP elemanın kopma durumunda analiz sonlandırılmıştır.

Loadcase: 10:Increment 10 Load Factor = 5.90972

Results file: W4-C-RT.mys

Entity: Strain (top) - Thick Shell

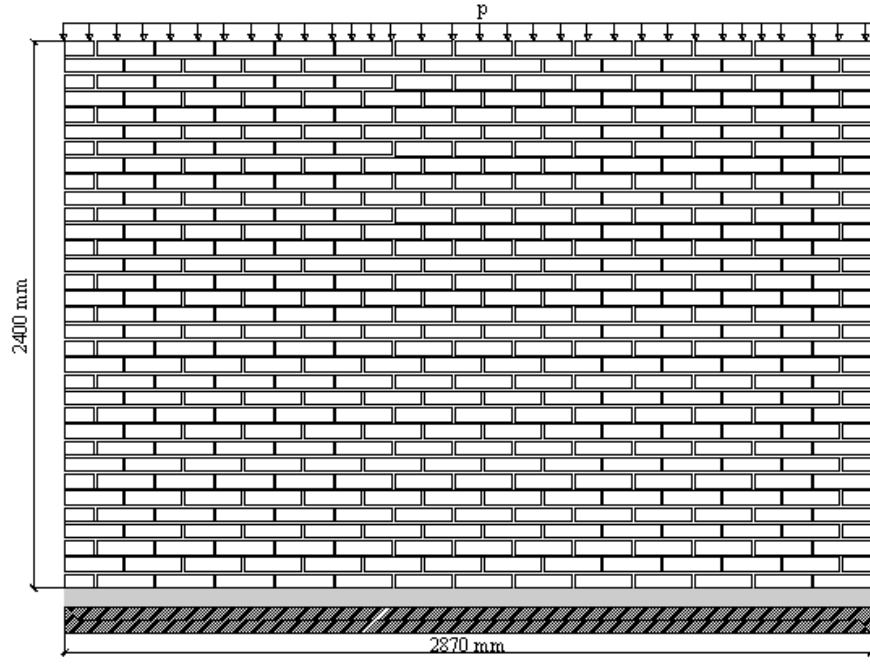
Component: E1



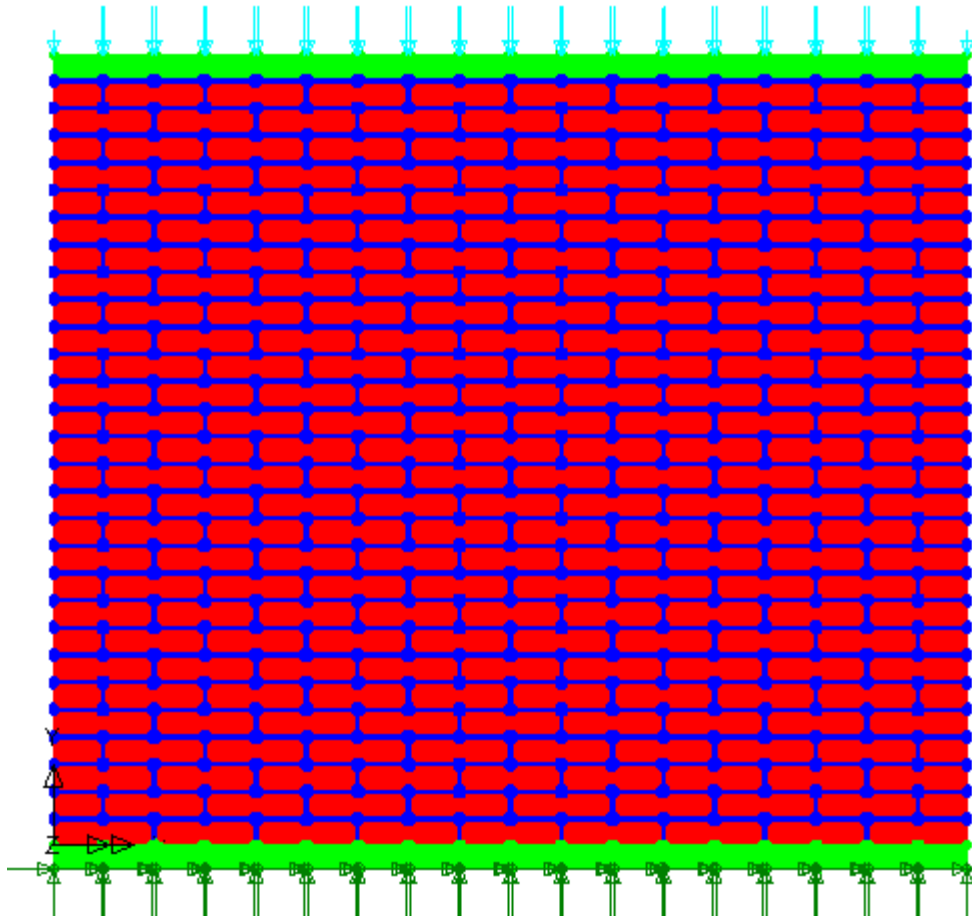
Şekil 4.166 LP Elemanın Kopma Durumunda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

4.13 Deney Duvarı No.10

(Haider, [96]) gerçekleştirdiği tez çalışmasında tuğla ölçüleri $310 \times 76 \times 150 \text{ mm}^3$ olan, bağlayıcı malzeme olarak 10 mm harç kullanılan ve toplam duvar boyutu $2870 \times 2408 \times 150 \text{ mm}^3$ olan dolu duvar paneller üzerinde bir dizi deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir[96]. Deney duvarında alta ve üste konulan çelik I profil kiriş içine oturtularak inşa edilmiştir Duvarın üst kısmına yerleştirilen çelik profilin asıl amacı düşey yüklerin düzgün yayılmasını sağlamaktır URM W6 kodlu deney duvarının fiziksel modeli Şekil 4.167’de, nümerik modeli ise Şekil 4.168’de verilmiştir.

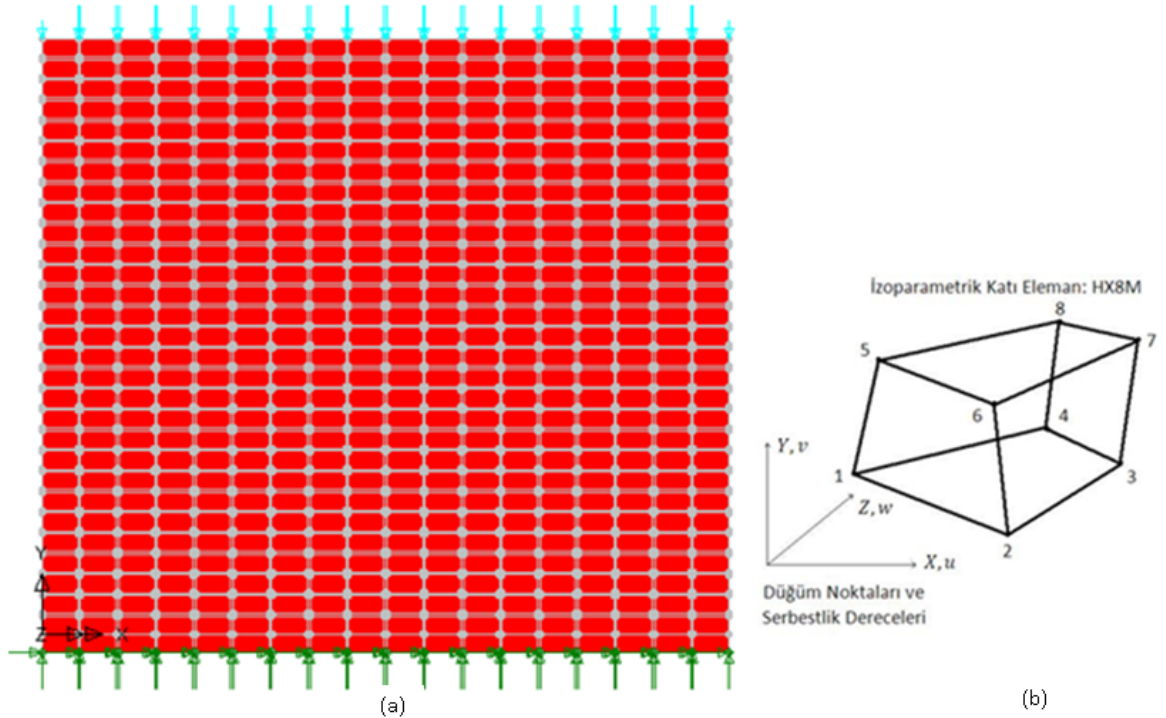


Şekil 4.167 URM W6 Duvarı Fiziksel Model [96]



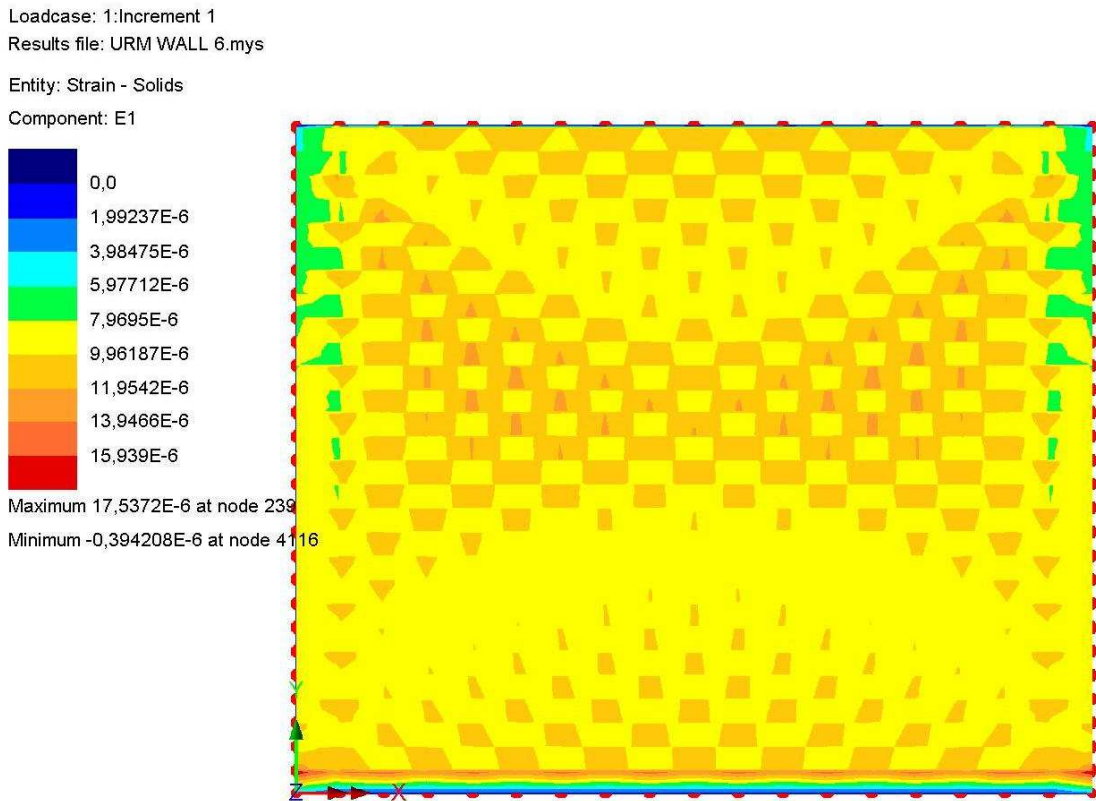
Şekil 4.168 URM W6 Duvarı Nümerik Model

Bu çalışma kapsamında, URM W6 kodlu dolu duvarın, fiziksel deney koşulları da dikkate alınacak şekilde Bölüm 3’de verilen yaklaşım doğrultusunda nümerik simülasyonu 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik parametreler tuğla basınç dayanımı $f_{bl} = 15,7$ MPa, harç basınç dayanımı $f_{mr} = 5$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak deneysel verilerden alınmıştır [96]. URM W6 kodlu deney duvarı önce düşeyde 0,50 MPa kadar düzgün yayılı yükle yüklendikten sonra düşey yük sabit tutularak, yatay yükler kademeli olarak artırılmıştır. Önerilen nümerik modelde, çelik profil, tuğla ve harç birimler, 3 boyutlu, 8 düğüm noktalı izoparametrik katı elemanlar ile modellenmiş ve 14675 düğüm noktasına sahip toplamda 2030 katı eleman kullanılmıştır. Bunların 742 adedi tuğla, 1218 adedi harç, 70 adedi ise duvarın alt ve üst kısmına konulan plak elemana ait malzeme özelliklerini içermektedir [66]. Rijit plak elemanlar için malzeme doğrusal elastik kabul edilmiş, tuğla ve harç elemanlara ait malzeme özellikleri ise elasto- plastik malzeme modelleri yardımıyla tanımlanmıştır. Duvarların rijit plağa oturduğu taban kesitlerinde mesnetlenme şekli ankastre olarak kabul edilmiştir. Nümerik modele ait sonlu eleman ağı Şekil 4.169a’da, kullanılan katı elemana ait geometri ve düğüm noktası serbestlikleri şematik olarak Şekil 4.169b’de verilmiştir.



Şekil 4.169 (a) URM W6 Duvarı Sonlu Eleman Ağı (b) URM W6 Duvarı Sonlu Eleman Tipi [66]

Bölüm 3’de verilmiş olan bünyesel bağıntılar kullanılarak harç ve tuğla için Drucker- Prager kriterinin ihtiyaç duyduğu kohezyon ve içsel sürtünme açıları elde edilmiştir. Elastisite modülleri, Poisson oranları ve plastisite özellikli olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri doğrusal olmayan sonlu elemanlar LUSAS [66] ile çalışan programının plastik analiz modülünde tanımlanmıştır. Tabanda ankastre mesnetlenmeyi, üst tarafta ise düşey yükün düzgün dağılmasını sağlayan çelik malzeme elastik kabul edilmiştir. Şekil 4.170’de sadece düşey yükün etkidiği durumda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir [66].



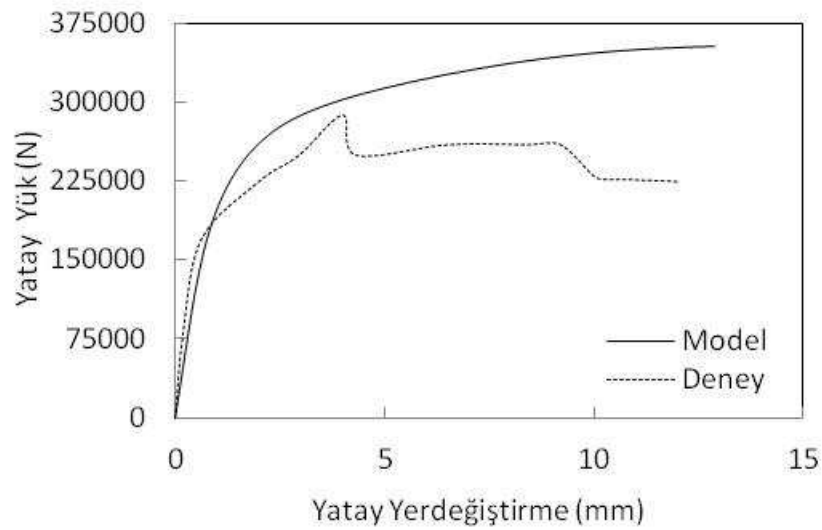
Şekil 4.170 URM W6 Duvarında Sadece Düşey Yük Etkimesi Durumunda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Önerilen nümerik modelde tuğlanın basınç dayanımı ile düşey basınç gerilmelerine bağlı olarak tuğla birimler için içsel sürtünme açısı 4.17 bağıntısı ile $\phi_{bl} = 59,54^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Tuğla elemanlardaki kohezyon değeri 4.16 bağıntısı ile $c_{bl} = 0,90$ MPa olarak bulunmuştur. Tuğla birimler için elastisite modülü ise $E_{bl} = 13000$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak alınmıştır. Harç birimler için içsel sürtünme açısı 4.15 bağıntısı ile $\phi_{mr} = 7,59^\circ$ şeklinde elde edilmiştir. Harç elemanlardaki kohezyon değeri 4.14 bağıntısı ile $c_{mr} = 2,65$ MPa olarak bulunmuştur. Harç birimler için elastisite modülü ise $E_{mr} = 2000$ MPa, Poisson oranı $\mu = 0,20$ olarak alınmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.18’de verilmektedir.

Çizelge 4.18 URM W6 Duvar Modelinin Mekanik Özellikleri

Tuğla						Harç				
Duvar adı	E_{bl} (MPa)	f_{bl} (MPa)	Poisson Oranı	c_{bl} (MPa)	$\phi_{bl}(^{\circ})$	f_{mr} (MPa)	E_{mr} (MPa)	Poisson Oranı	c_{mr} (MPa)	$\phi_{mr}(^{\circ})$
URM W6	13000	15,70	0,2	0,90	59,54	5	2000	0,2	2,65	7,59

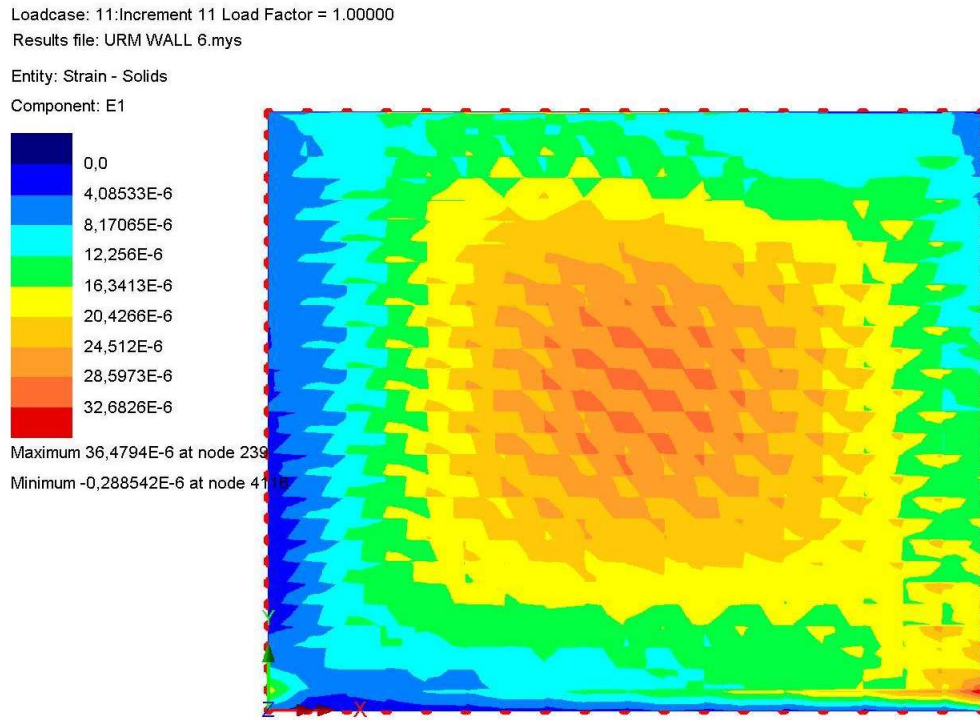
Analizin sonlandırıldığı an için tuğla- harç etkileşimi dikkate alınarak Bölüm 4.3'te bağıntı 4.19 ile maksimum birim şekil değiştirme, $\epsilon_{\max} = 10/(2 * 76 + 10) = 0,061$ olarak belirlenebilir. Bu değere göre yük- yerdeğiştirme grafiği Şekil 4.171'de verilmiştir.



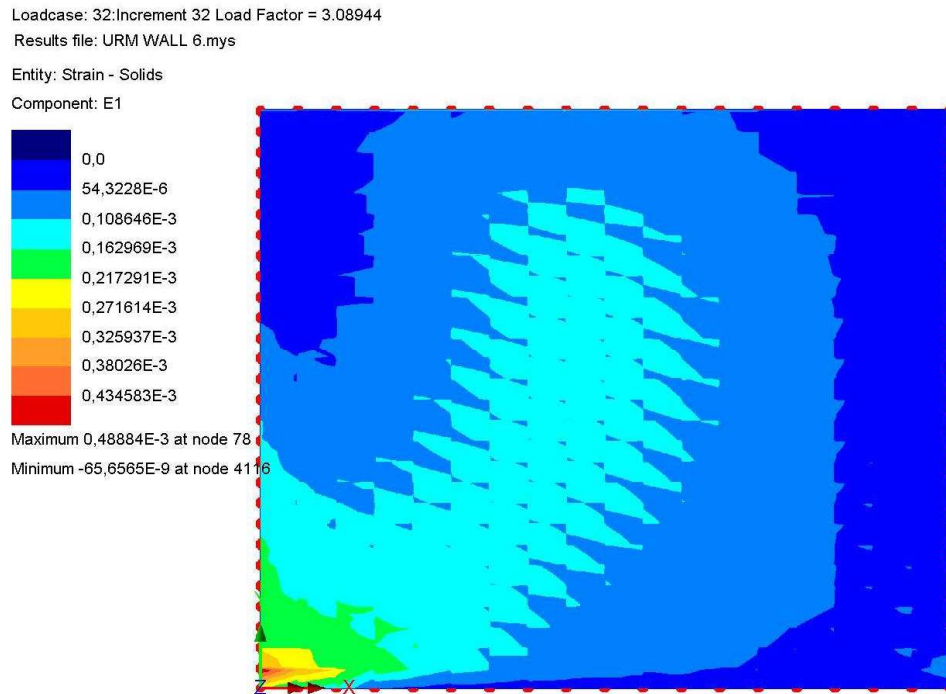
Şekil 4.171 URM W6 Duvarı Yük-Yerdeğiştirme Eğrisi

Plastik şekil değiştirmeler, gerilmeler açısından kritik kesimler olan duvar alt kesimlerinde yoğunlaşmaktadır. Fiziksel modelde yatay yük etkisinde çatlaklar yükün uygulandığı bölgeden itibaren diyagonal doğrultuda mesnet kesimine doğru yayılmaktadır. Nümerik modelde yatay yükün % 81 değerine ulaştığı anda (285 kN/353 kN), plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı bölgelerin diyagonal doğrultuda olduğu ve fiziksel model ile son derece uyumlu olduğu Şekil 4.175'den görülebilir. Şekil 4.174'de göçme yükünün % 12 değerine ulaştığı anda (44 kN/353 kN) oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmektedir. Şekil 4.173'de göçme yükünün % 36 değerine ulaştığı anda (127 kN/353 kN) oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir. Şekil 4.174'de göçme yükünün % 58 değerine ulaştığı anda (207 kN/353 kN) oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir. Asal şekil değiştirmelerin maksimum

olduğu durum Şekil 4.174’de verilmiştir. Fiziksel modelle nümerik modelin karşılaştırılması Şekil 4.175 (a ve b)’de verilmiştir.



Şekil 4.172 URM W6 Duvarında Göçme Yükünün % 12 Değerine Ulaştığı Zaman Oluşan Asal Şekil Değiştirme dağılımları



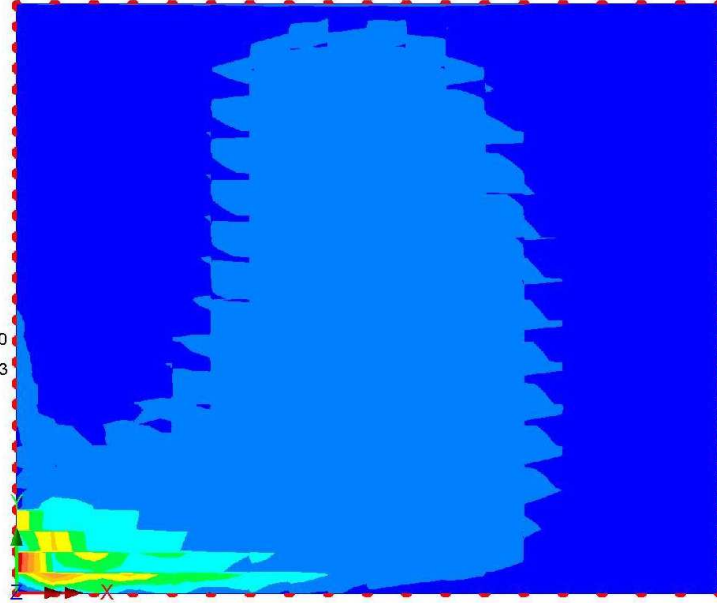
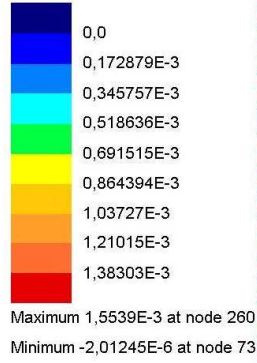
Şekil 4.173 URM W6 Duvarında Göçme Yükünün % 36 Değerine Ulaştığı Zaman Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 52:Increment 52 Load Factor = 5.08944

Results file: URM WALL 6.mys

Entity: Strain - Solids

Component: E1



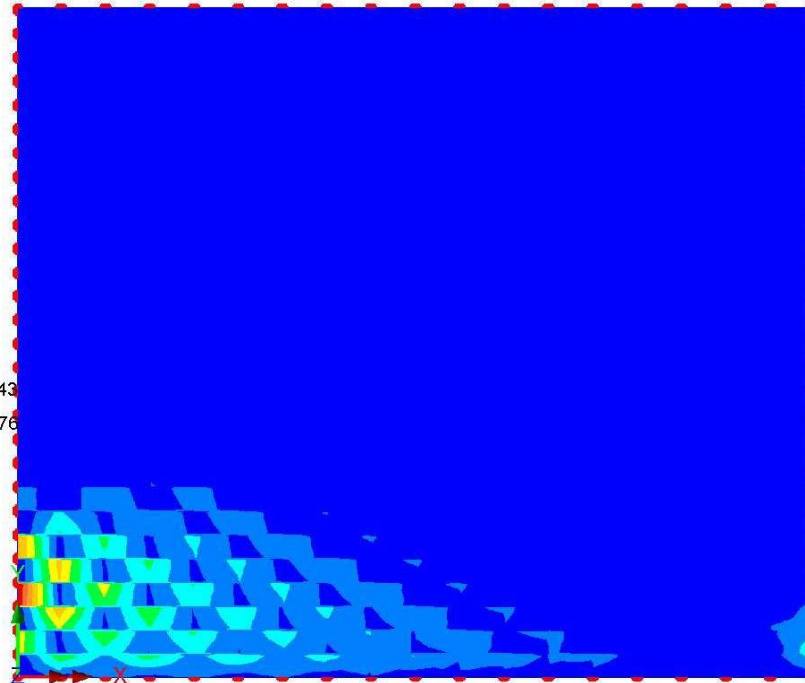
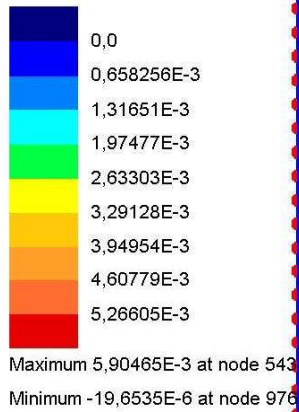
Şekil 4.174 URM W6 Duvarında Göçme Yükünün % 58 Değerine Ulaştığı Zaman Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 73:Increment 73 Load Factor = 7.03980

Results file: URM WALL 6.mys

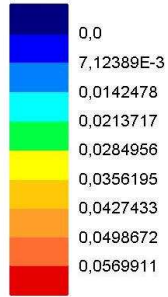
Entity: Strain - Solids

Component: E1

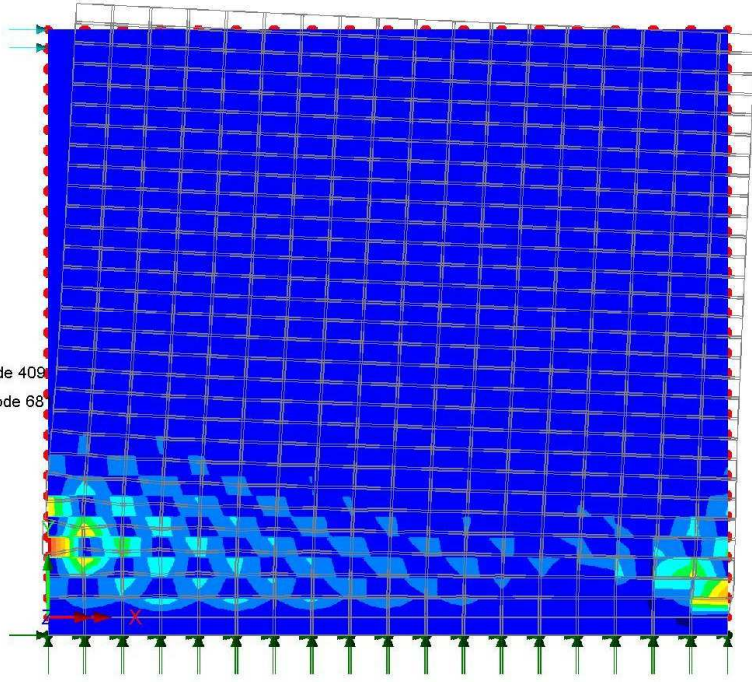


Şekil 4.175 URM W6 Duvarında Göçme Yükünün % 81 Değerine Ulaştığı Zaman Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Loadcase: 130:Increment 130 Load Factor = 8.91880
Results file: URM WALL 6.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1



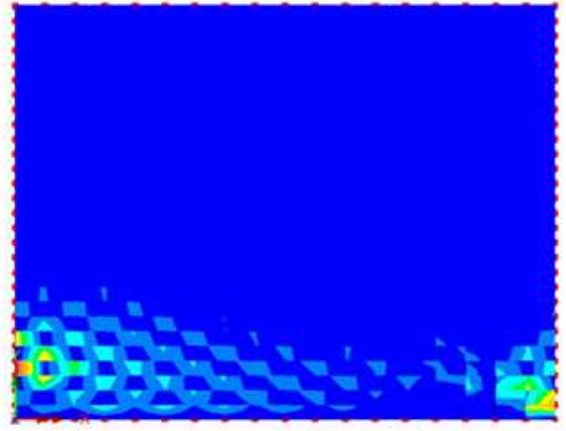
Maximum 0,0625789 at node 409
Minimum -1,53611E-3 at node 68



Şekil 4.176 URM W6 Duvarında Maksimum Asal Şekil Değiştirme Dağılımları



(a)

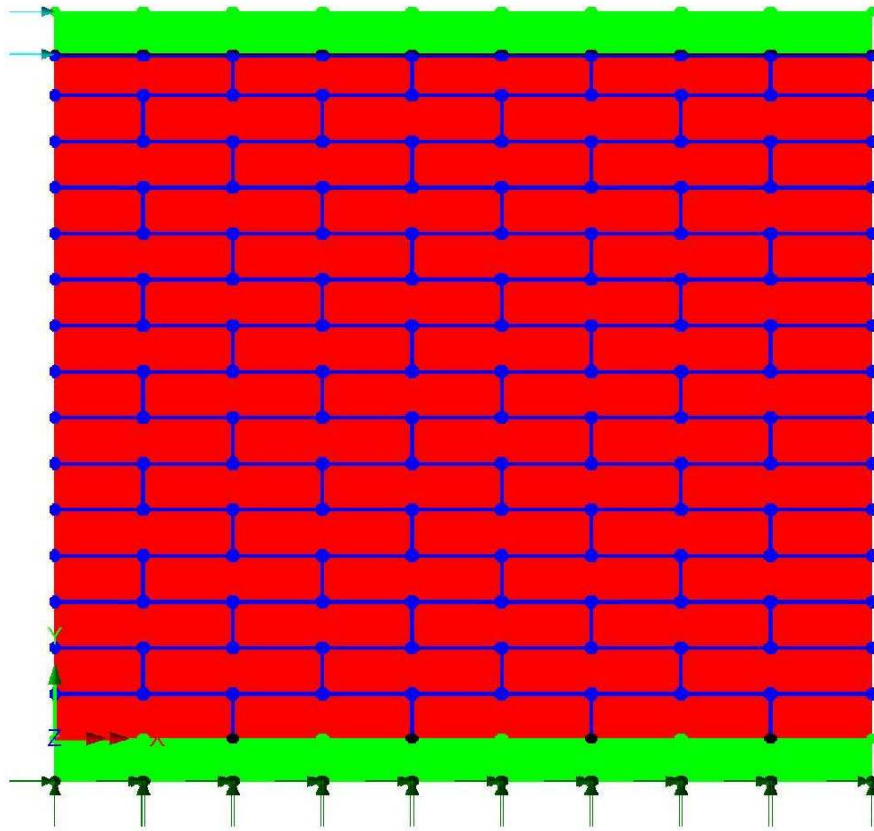


(b)

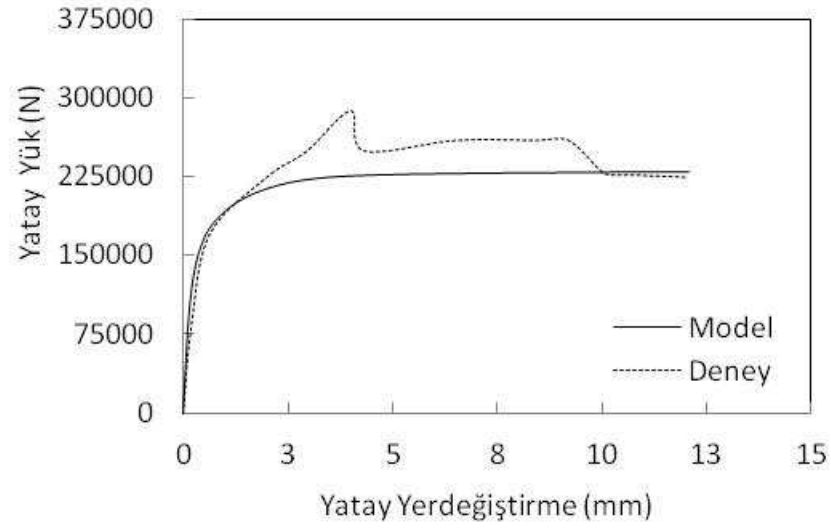
Şekil 4.177 (a) Fiziksel Modelde Hasar Oluşumu [96] (b) Nümerik Modelde Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

URM W6 kodlu duvarın tuğla ölçüleri $310 \times 76 \times 150 \text{ mm}^3$, toplam duvar boyutu $2870 \times 2408 \times 150 \text{ mm}^3$ olan dolu duvar paneli önceden incelenen duvarlara oranla farklılığı göze çarpmaktadır. Şekil 4.175(a)'da verilmiş olan fiziksel modele de bakıldığında yatay ve düşeyde tuğla adedi irdelenen diğer örneklerle kıyaslamada fazladır. Tuğla ve harç birimlerin içsel sürtünme açısı, kohezyon değerleri aynı alınarak nümerik çözümleme yapılmıştır. Tuğla birimlerin ölçüleri iki katına çıkarıldığı için tuğla birimlerin elastisite modülü değeri de yaklaşık iki katına çıkarılarak çözümleme yapılmıştır.

Bu çalışma için kullanılan birim boyutunun ölçüsünü yatay ve düşeyde iki katına çıkararak ve duvar geometrisi ve yükleme durumu değiştirilmeden tekrar nümerik modelleme yapılmıştır. Blok ölçüsünün iki katına çıkarılması basitleştirilmiş mikro modelden- makro modellemeye geçiş kriteri gibi düşünülerek bir yaklaşım ileri sürülmüştür ve çalışmanın beşinci bölümünde öneriler kısmında bahsedilmiştir. Şekil 4.178’de URM W6 kodlu duvarın tuğla birimlerinin iki kat büyütülmüş durumunda geometrik şekli verilmiştir. Analizin sonlandırıldığı durum ise (4.19) bağıntısına göre $\varepsilon_{max} = 10/(2 * 152 + 10) = 0,030$ olarak elde edilmiştir. Asal şekil değiştirmenin 0,030 olduğu değerde yatay yük- yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.179’da verilmiştir.



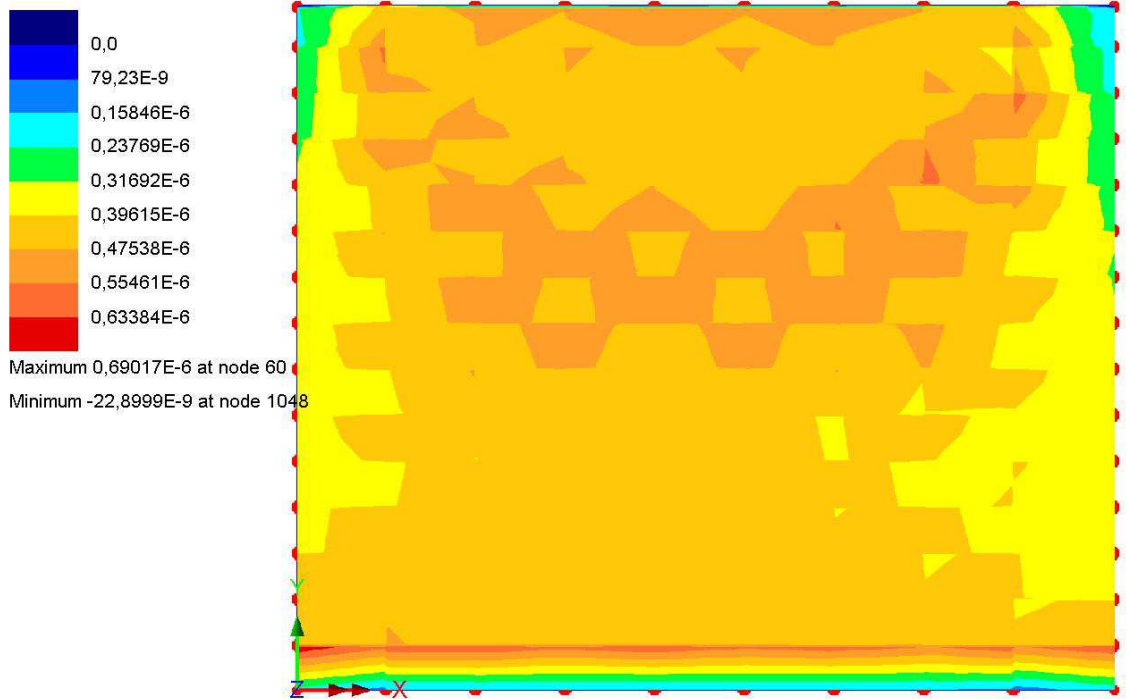
Şekil 4.178 URM W6 Duvarın Nümerik Modeli



Şekil 4.179 URM W6 Duvarı Yük Yerdeğiştirme Eğrisi

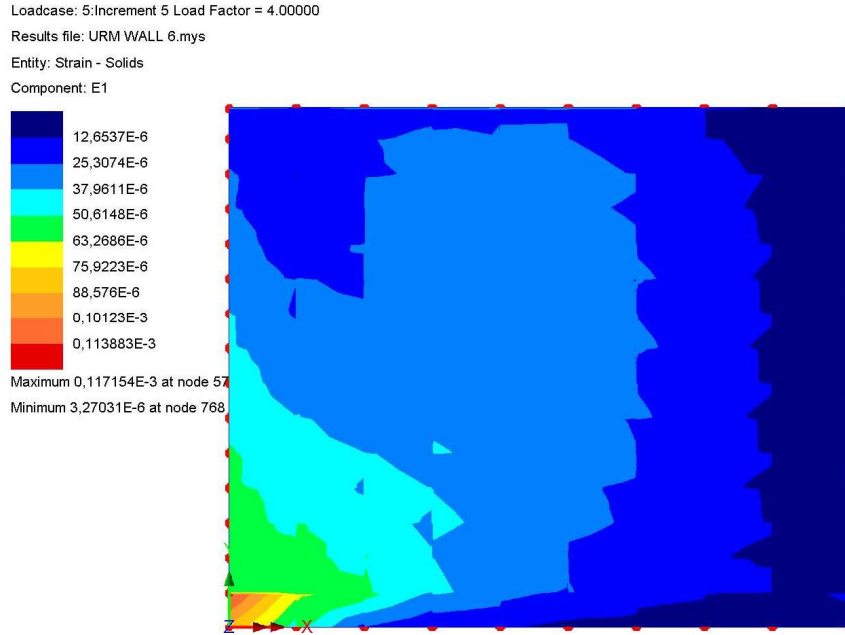
Sadece düşey yük etkisinde oluşan asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.180’de verilmiştir.

Loadcase: 1:Increment 1
Results file: URM WALL 6.mys
Entity: Strain - Solids
Component: E1

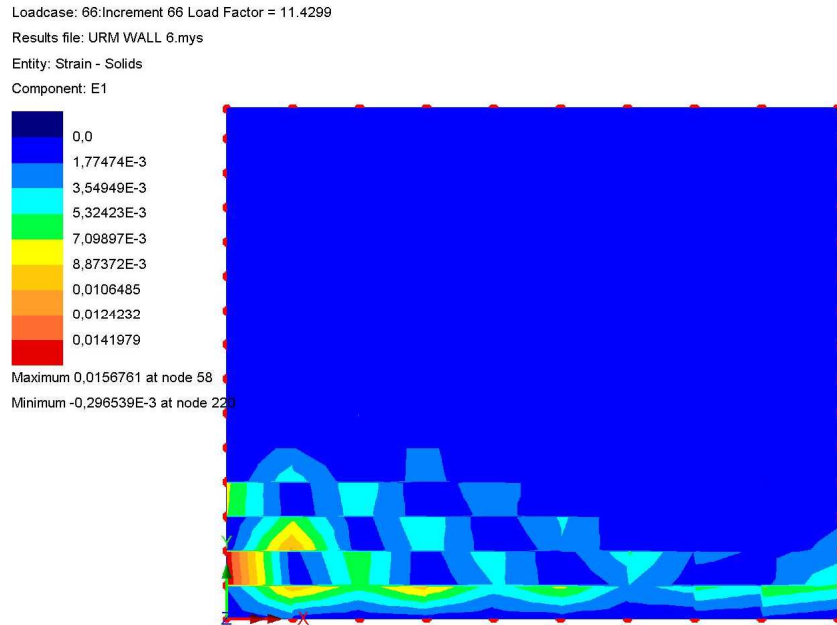


Şekil 4.180 Sadece Düşey Yük Etkisinde URM W6 Duvarında Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

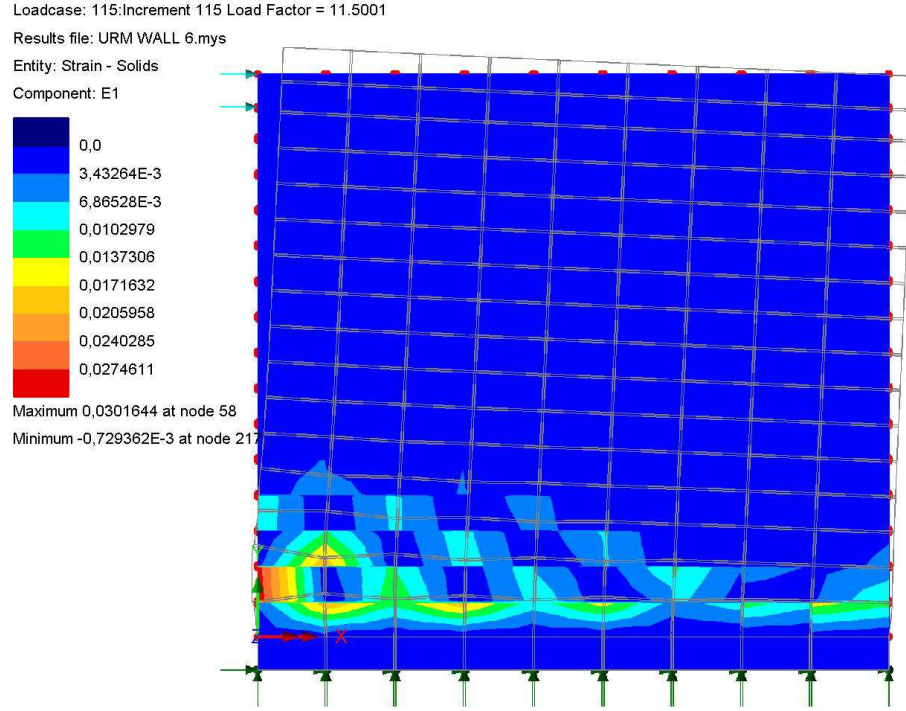
Şekil 4.181’de yatay yükün göçme yükünün % 42 (98 kN/ 230 kN) değerinde olduğu zaman oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir. Şekil 4.182’de ise %99 (228 kN/230 kN) olduğu zaman oluşan asal şekil değiştirme dağılımları verilmiştir. Analizin sonlandırıldığı durumda oluşan asal şekil değiştirme dağılımları ise Şekil 4.183’de verilmiştir.



Şekil 4.181 Yatay Yükün Göçme Yükünün %42 Değerinde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları



Şekil 4.182 Yatay Yükün Göçme Yükünün %99 Değerinde Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları



Şekil 4.183 Analizin Sonlandırıldığı Durumda Oluşan Asal Şekil Değiştirme Dağılımları

Bu tez çalışmasında literatürde yer alan deneysel yığma duvarlar nümerik olarak irdelenmiştir. Birçoğu tarihi değere sahip olan yığma duvarlar Türkiye'de, Akdeniz ülkelerinde, Kanada, Uzak doğu ülkelerinde kırsal kesimlerde ve şehirlerde yapılmıştır ve yapımına devam edilmektedir. Yığma duvarların deprem davranışlarının incelenmesine her zaman ihtiyaç vardır. Olası bir depreme karşı da güçlendirilmesi gerekmektedir. Şekil 4.184'te İtalyada meydana gelen 6 büyüklüğündeki bir depremde hasar görmüş yığma yapı örneği verilmiştir.



Şekil 4.184 Depremden Hasar Görmüş Bir Yığma Yapı

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yığma yapılar, dünya genelinde olduğu kadar, Türkiye’de de özellikle kırsal kesimlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Dünya nüfusunun önemli bir bölümünün halen yığma yapılarda yaşadığını söylemek mümkündür. Türkiye topraklarının büyük çoğunluğunun aktif fay hatları üzerinde ve etkisinde bulunduğu dikkate alınır, bu türden taşıyıcı yapı elemanlarının tasarım ve davranışlarının matematiksel olarak modelleme gerekliliğinin önemi daha iyi anlaşılır. Tarihi öneme sahip pek çok yığma binanın gelecek nesillere aktarılması amacı ile onarım ve güçlendirilmesinin yapılması gerekliliği de en son İtalya’da meydana gelen 5.9 büyüklüğündeki Bologna depreminde yıkılan ve hasar gören yığma yapılardan daha iyi anlaşılmıştır. Yığma yapıların başlıca taşıyıcı elemanı olan düşey ve yatay yük etkisindeki duvarların LP ile güçlendirilmesi durumundaki davranışlarının incelenmesi bu tez çalışmasının başlıca konusudur. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmalar ve ulaşılan sonuçlar aşağıda verilmiştir:

Yığma yapıların nümerik olarak modellenmesinde makro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve detaylı mikro modelleme olmak üzere 3 (üç) farklı modelleme tekniği mevcuttur. LP ile güçlendirilmiş yığma duvarların davranışları için bu çalışma kapsamında geliştirilen model basitleştirilmiş bir mikro modeldir. Önerilen model, bloklar ile harç arasındaki enterfaz davranışı ayrı olarak dikkate almamakta, ancak bu etkiyi harcın bünyesel bağıntıları aracılığıyla ortalama bir yaklaşıklıkla analizlere yansıtmaktadır.

Harç ve blok davranışı için elasto-plastik model seçilmesinin başlıca nedeni, sargı etkisindeki duvarların sünekliklerinin ve yük taşıma kapasitelerinin artış göstermesidir. 10 (on) farklı çalışmadan 17 (on yedi) duvarın 3 (üç) boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturularak elasto-

plastik analizleri gerçekleştirilerek yük-şekildeğiştirme davranışları başarı ile tahmin edilmiştir. Bu duvarların 6 (altı) tanesi yalın ve 11 (on bir) tanesi ise LP ile çeşitli biçimlerde güçlendirilmiştir.

Elasto-plastik analizlerde Drucker-Prager (DP) akma/kırılma kriteri ile kullanılmıştır. 3(üç) boyutlu izo-parametrik katı eleman olarak tanımlanan harç ve bloğa ait analizlerin ihtiyaç duyduğu malzeme özellikleri sırasıyla elastisite modülü, Poisson oranı, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleridir. Bu parametreler için gerekli bazı bağıntı ve değerler çalışma kapsamında geliştirilmiş ve öne sürülmüştür. LP ise ortotropik elastik malzeme özellikli yüzey eleman olarak tanımlanmıştır. LP ile duvar arasında tam aderans olduğu kabul edilmiştir. Bu çalışmada deney duvarlarına ait üç boyutlu nümerik modellerin doğrusal olmayan sonlu eleman analizi için LUSAS [66] paket programı kullanılmıştır.

Beton briketlerden üretilen yığma prizmaların basınç dayanımını belirleyen (2.1) bağıntısı tuğladan üretilmiş yığma prizmalara uygulanacak şekilde değiştirilerek (2.5) bağıntısı önerilmiştir. Literatürde yer alan deneysel ve amprik çalışmalara irdelenerek beton briket prizmalarda bloğun basınç dayanımına katkısı $0.75 f_{bt}$ iken tuğla örgülü olanlarda tuğla bloğun dayanıma olan katkısının yaklaşık $0.25 f_{bt}$ 'e düştüğü görülmüştür. Bu da daha önce beton prizmalar için geliştirilen bağıntının değiştirilmesiyle tuğladan yapılan yığma için olan tasarım bağıntılarına bu çalışma kapsamında yansıtılmıştır.

Benzer şekilde beton briket prizmalardan oluşan yığmaya ait elastisite modülünün de tuğladan oluşan birimler için değiştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, her iki malzeme türü için kırılma anının ait en büyük birim kılmanının aynı kalacağı varsayımından yola çıkılmış ve bu anlamda salt prizma katkısı dikkate alındığında beton biriketler için $0.75 E_{bt}$ iken tuğla durumunda $0.25 E_{bt}$ lik bir rijitliğin söz konusu olduğu görülmüştür. Burda harcın etkisi ihmal edilmektedir. Dolayısıyla düşük dayanımlı harçlar kullanıldığında bu kabul daha doğru sonuçlar verecektir. Tuğla elastisite modülünün (200-300) f_{bt} değeri ile sınırlandırılırken beton briketlerde bu değer (800-1000) f_{bt} değerleri sonlu eleman çözümlemelerinde temel alınarak kullanılmıştır.

Harcın bünyesel modellenmesinde gerekli olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri, (4.14) ve (4.15) bağıntıları yardımıyla belirlenmiştir. Bloklara ait kohezyon ve içsel sürtünme

açısı değerleri belirlenirken bağıntılar duvar üzerinde mevcut hidrostatik basınç etkisini yansıtacak biçimde bağıntı (4.16) ve (4.17) olarak geliştirilmiştir. Hidrostatik basınç hesaplanırken LP sargının kuşatma etkisi de dikkate alınmıştır. Bu etki tam olarak sarılmış duvarlar için bağıntı (4.19) ile belirlenirken, şerit sargı, duvarın bir yüzüne yapılan sargılama veya belirli oranlarda tek yüzeye yapılan kısmi sargılama durumunda kuşatma etkisinin sonuçları değiştirmedigi görülerek hidrostatik basınç hesaplanırken ihmal edilmiştir. Kaya mekaniğindeki çalışmalara benzer şekilde içsel sürtünme açısı için de başlangıç ve son değerler tanımlanmıştır. Analizlerde ise duvara etkiyen hidrostatik basınca bağımlı ara değerler hesaplanarak kullanılmıştır. Bu ara değerlerin kullanılması ile analizlerde daha gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, DP kriteri malzeme katsayıları ve içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinden faydalanarak basınç meridyeninde akma yüzeyi nümerik olarak irdelenmiştir ve bilgisayar ortamında yazılım olarak ekte verilmiştir. Hidrostatik basınca bağlı kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinin kullanılması durumunda oluşan yeni kırılma yüzeyi 3 (üç) boyutlu gerilme uzayda grafiksel olarak gösterilmiştir.

Daha önce çeşitli araştırmacılar tarafından önerilmiş olan kriterlerin en büyük eksikliği olarak değerlendirilebilecek analizlerin sonlandırılması ve kırılmanın tanımlanması noktasında, bu çalışma kapsamında bir kırılma kriteri geliştirilmiştir. Kırılma kriteri olarak düşey doğrultuda oluşacak en büyük çatlak genişliği tanımlanmış ve böyle bir çatlak sonucu oluşacak en büyük asal birim şekildeğiştirme değeri ileri sürülmüştür. Duvarların yükseklik/ genişlik oranı 0.45 ile 1 değerleri arasında değişmektedir. Tüm örnek yalın, boşluklu ve LP ile güçlendirilmiş deney duvarlar için önerilen kriter elasto-plastik analizlerinin sonlandırılmasında başarılı sonuçlar vermiştir. Ancak, bu kriter yığma üzerindeki kırılmayı tanımlamaktadır. LP kuşatmanın yırtılması durumu yığmadaki bu son durumdan önce gerçekleşir ise analiz bu noktada sonlandırılmıştır. Literatürde yer alan ve tez kapsamında da incelenen Lourenço ve diğerlerinin çalışmalarında enterfaz eleman kullanımı önerilmiştir. Enterfaz modeli, birleşim

bölgesine ait çekme dayanımı ile çekme altında oluşacak açılma için gerekli G_f^I kırılma enerjisine ihtiyaç duymaktadır. Bu değerlerin deneyler sırasında yaşanabilecek aksaklıklar nedeniyle düzgün bir şekilde ölçülerek enterfazın birebir mekanik özelliği olarak kabul edilmesinin neredeyse imkânsız olduğu düşünüldüğünde, teorik olarak sağlam bir kurguya sahip olan çalışmanın pratik olarak sağlam temelleri olmadığı rahatlıkla söylenebilir. Tez

çalışmasının amacı ve tezin önemi vurgulanırken kullanılacak yöntemin basitliğinden bahs edilmiştir. En büyük çatlak genişliği kriteri, açılma için gerekli kırılma enerjisi gibi ölçülmesi zor olan bir kriter değildir ve yığma duvarların analizinde kırılma yükünün tesbitinde güvenle kullanılabileceği bu çalışma kapsamındaki örnek duvarlar üzerindeki analizlerde görülmüştür.

Basitleştirilmiş mikro-modelleme ile J2G, URM W6, URM 1, IPV, Clay 1 ve Concrete 1 kodlu yalın duvarların davranışları başarı ile tahmin edilmiştir. Yatay yük- yer değiştirme eğrileri, deneysel verilerle karşılaştırılmış ve aynı zamanda deneysel duvarlardaki çatlak oluşumları nümerik asal şekil değiştirme dağılımları ile özellikle mekanizma durumları için elde edilen nümerik sonuçların deneysel sonuçları desteklediği görülmüştür. Çalışmada yalın ve LP ile güçlendirilmiş duvarların modellenmesi irdelenmiştir. LP ile güçlendirilmeyen ve yalın olarak incelenen J2G, URM W6, IPV, kodlu duvarların ele alınmasının sebebi J2G'nin boşluklu olması, IPV kodlu duvarın sadece artırılmış düşey yük etkisinde ele alınmış olması, URM W6 kodlu duvarın ise basitleştirilmiş mikro modelden makro modele geçiş kriterine sahip özellikte olmasıdır. Yalın duvarlar aynı zamanda LP ile güçlendirilmiş duvarlar için bir referans oluşturdukları için incelenmesine gerek duyulmuştur.

Tek yüzeyi LP elemanlarla güçlendirilen deney duvarlarından olan HRM C2 ve S2-WRAP-GF-S-T duvarlarında kuşatma etkisi dikkate alınmadığı için maksimum asal şekil değiştirme kriterine ve LP elemanın kopma durumuna göre irdelenerek bir birine yakın yük- yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Clay 2, Concrete 2, RM 1 kodlu duvarların tek yüzeyi de LP ile güçlendirildiği için bu duvarlarda LP kopma durumuna göre değerlendirilerek yük- yer değiştirme eğrileri deneysel eğrilerle karşılaştırılmıştır ve uygun sonuçlar elde edilmiştir. Deneysel duvarların göçme mekanizma durumları ile nümerik analiz ile belirtilen modeldeki asal şekil değiştirme dağılımlarının bir birine benzer olduğu söylenebilir.

Her iki yüzeyi LP elemanlarla güçlendirilen WALL 3, WALL 4, 1X300, 3X100, 3X150, 1X450, W-4-C-RT kodlu duvarlar için gerçekleştirilen çalışmalarda WALL3 ve WALL 4 kodlu duvarlar hasar görmeden güçlendirilen duvarlar olduğu ve deneysel göçme nedenlerinin yığma birimlerde meydana gelen hasarlardan kaynaklanmış olduğu göz önünde bulundurularak, nümerik modeller oluşturulmuştur. 1X300, 3X100, 3X150, 1X450 kodlu duvarlar ise yalın olarak test edildikten sonra LP elemanla sargılanmıştır. Bu duvarlarda nümerik olarak maksimum asal şekil değiştirme kriterine göre yük- yer değiştirme eğrileri deneysel eğrilerle uygun sonuçlar vermiştir. W-4-C-RT kodlu duvarın her iki yüzeyi tamamen LP elemanla

sargılanmıştır ve LP eleman kopma birim şekil değiştirme durumuna göre analiz sonlandırılmıştır ve fiziksel durumla yatay yük- yer değiştirme eğrisi karşılaştırıldığında uygun sonuçlar elde edilmiştir.

Deneysel çalışmalarda üç (3) şerit halinde sargı kullanılan duvarların (H-URM 3X100, H-URM 3X150) kendi aralarında tek şerit olan duvarlarla (H-URM 1X300, H-URM 1X450) kıyaslamada süneklik açısından 3'lü sargının daha etkin olduğu araştırmacılar tarafından belirtilmiştir. Bu duvarların analizi nümerik olarak maksimum asal şekil değiştirme kriterine göre sonlandırıldığında, deney duvarları elde edilen deneysel verileri destekleyecek sayısal sonuçlar elde edilmiştir ki bu da önerilen kriterin doğruluğunun bir göstergesidir.

URM W6 kodlu duvarın yükseklik ve genişlik geometrik ölçüleri diğer duvarlara oranla daha büyük olduğu için blok boyutları 2 (iki) çıkarılarak basitleştirilmiş mikro modelleme ile makro modelleme arasında bir geçiş kriteri irdelenmiştir.

Düşey ve yatay yükler etkisindeki yığma duvarların deneysel çalışmalar ile sayısal model sonuçları karşılaştırıldığında taşıma güçlerinin doğru olarak belirlendiği görülmüştür. Taşıma gücüne ulaşıldıktan sonra bazı deney duvarlarında görülen yumuşama davranışı ise önerilen kriter ile tam olarak belirlenememektedir. Bu sebeple, yumuşama davranışı bu tezin kapsamı dışında, bir başka çalışmanın konusu olacak şekilde bırakılmıştır. Ayrıca, yalın ve güçlendirilmiş yığma duvarlarda stabilite analizleri ile yatay ve düşeyde tuğla/beton blok sayısı fazla olan duvarların nümerik analizinde mikro modellemeden makro modellemeye geçiş kriteri geliştirilerek çalışmaların bu doğrultuda genişletilmesi, yığma birimler için kullanılan 3 boyutlu katı elemanlar yerine 2 boyutlu düzlem gerilme elemanlarının kullanılması ve elde edilen sonuçların karşılaştırılması bir başka çalışmanın konusu olarak düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

-
- [1] Lourenço, P.B.,(1996). Computational Strategies for Masonry Structures, Ph.D Thesis, Civil Engineering and Geosciences, Delft University, Eindhoven, Netherland.
 - [2] Chaïmoon, K., ve Attard Mario M., (2007). " Modeling of Unreinforced Masonry Walls Under Shear and Compression", Engineering Structures, 29: 2056–2068.
 - [3] Chaïmoon, K., ve Attard Mario M., (2009). " Experimental and Numerical Investigation of Masonry Under Three-Point Bending In- Plane." Engineering Structures, 31: 103–112.
 - [4] Giambanco, G., Rizzo S., ve Spallino R.,(2001). "Numerical Analysis of Masonry Structures via Interface Models" Computational Methods Applied Mechanical Engineering, 190: 6493-6511.
 - [5] Lourenco, P. B. Ve Rots, J. G. (1997). "Multisurface interface model for analysis of masonry structures." Journal of Engineering Mechanics, 123 (7):660-668.
 - [6] Formica, G., Sansalone V., ve Casciaro R., (2002). "A Mixed Solution Strategy for The Nonlinear Analysis of Brick Masonry Walls", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering; 191 (51-52): 5847-5876.
 - [7] Pandey, B. H., ve Meguro K., (2004). "Simulation of Brick Masonry Wall Behaviour Under in Plane Lateral Loading Using Applied Element Method." 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, Paper No: 1664.
 - [8] Mahrebel, H. A., (2006). Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Özellikleri, Hasarlar, Onarım ve Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
 - [9] Stratford, T., Pascale, G., Manfrodi O., ve Bonfiglioli B.,(2004). " Shear Strengthening Masonry Panels with Sheet Glass-Fiber Reinforced Polymer." Journal of Composites for Construction 8 (5): 434-443.
 - [10] Capozucca, R., (2011). "Experimental Analysis of Historic Masonry Walls Reinforced by CFRP Under in- Plane Cyclic Loading." Composite Structures, 94: 277-289.
 - [11] Capozucca, R., (2011). "Shear Behaviour of Historic Masonry Made of Clay Bricks" The open Construction and Building Technology Journal, 5, (Supple 1-M6): 89-96.
 - [12] Stoian, V., T. Nagy-György, D. D., ve Gergely, J., (2003). "Retrofitting the Shear Capacity of the Masonry Walls Using CFRP Composite Overlays ", The SE 40EE International Conference in Earthquake Engineering, Spokje, Macedonia.

- [13] Weng,D.,Lu, X., Zhou, C., Kube, T., ve Li, K., (2004). "Experimental Study on Seismic Retrofitting of Masonry Walls Using GFRP."13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, Paper No. 1981.
- [14] Lu, X., Weng, D., Zhou, C., ve Yan J.(2003). "Seismic Resistance Assesment of Masonry Walls Strengthened by GFRP Sheets." 6. EqTAP Multilateral Workshop Proceedings December 1-2, Ise- Kashikojlima, Japan.
- [15] Weng, D., Lu, X., Li, K., ve Kube, T., (2001). "Experimental Study on Seismic Resistant Capacity of Masonry Walls.", 4. EqTAP Multilateral Workshop Proceedings December 3-4, 2001, Kamahura, Japan.
- [16] Hisdorff, H.K. (1969). "Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression. In: Proceeding of designing, engineering and constructing with masonry products. Houston (Texas, USA): Gulf Publishing Company; 34-41.
- [17] Mann, W., ve Betzler M. (1994). " Investigations on the Effect of Different Forms of Test Samples to Test the Compressive Strength of Masonry. In: Proceeding of the 10th international brick and block masonry, 1305-13.
- [18] ElGawady,M.A.,Lestuzzi, T., ve Badoux, M., (2007). "Static Cyclic Responce of Masonry Walls Retrofitted with Fiber- Reinforced Polymers." Journal of Composites for Construction, 11: (1), February 1.
- [19] ElGawady, M.A.,Lestuzzi, T., ve Badoux, M., (2005). "In- Plane Seismic Responce of URM Walls Upgraded with FRP." Journal of Composites for Construction, 9: (6), December 1.
- [20] ElGawady, M.A.,Hegner, J., Lestuzzi, T., ve Badoux, M., (2004). "Static Cyclic Tests on URM Wall Before and After Retofitting With Composites " 13. International Brick and Block Masonry Conference, Amsterdam, July 4-7.
- [21] Zhao, T., Xie, J., ve Li, H. (2003). "Strenthening of Cracked Concrete Block Masonry Walls Using Continuous Carbon Fiber Sheet. " 9th NAMC, Clemson, S.C., 156-167.
- [22] Ertan O., (2007). Yığma Yapılarda taşıyıcı Tuğla Duvarların CFRP ile Güçlendirilmesinin Deneyisel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [23] Alcoino P., ve Santa- Maria H., (2008). "Experimental Responce of Externally Retrofitted Masonry Walls Subjected to Shear Loading" Journal of Composites for Construction, 12: (5), October 1.
- [24] Alcoino P., ve Santa- Maria H. (2008). "Shear Responce of Masonry Walls with External CFRP Reinforcement" The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, Beijing, China.
- [25] Santa- Maria, H., Duarte, G., ve Garib, A. (2004). "Experimental Investigation of Masonry Panels Externally Strengthened with CFRP Laminates and Fabric Subjected to In-Plane Shear Load" 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, Paper No. 1627.

- [26] Santa- Maria, H., Alcaino, P., ve Luders, C. (2006). "Experimental Responce of Masonry Walls Externally Reinforced with Carbon Fiber Fabrics" Proceedings of the 8th National Conference on Earthquake Engineering, April 18-22, San Francisco, California, USA. Paper No. 1402.
- [27] Aş, E.F., (2007). Tarihi Tuğlalar ile Örülen Duvarların Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [28] Parisi,F., (2010). Non- Linear Seismic Analysis of Masonry Buildings, Ph.D Thesis, Department of Structural Engineering, Naples Federico II University, Naples, Italy.
- [29] Parisi,F., Lignola G.P.,Augenti, N., Prota, A., ve Manfredi, G.(2011). "Nonlinear Behavior of A Masonry Sub- Assemblage Before and After Strengthening With Inorganic Matrix- Grid Composites." Journal of Composites for Construction. Submitted September 27, 2010; Accepted January 7, 2011; DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614. 0000203.
- [30] Mohebkah, A., Tasnimi A. A., ve Moghadam H. A., (2008). "Nonlinear Analysis of Masonry Infilled- Steel Frames With Openings Using Discrete Element Method." Journal of Constructional Steel Research, 64: 1463-1472.
- [31] Tasnimi A. A., ve Mohebkah, A., (2011). "Investigation on The Behavior of Brick- Infilled Steel Frames With Openings, Experimental and Analytical Approaches." Engineering Structures 33: 968-980.
- [32] Akbarzade, A.A., ve Tasnimi A.A., (2010). " Nonlinear Analysis and Modeling of Unreinforced Masonry Shear Walls Based on Plastic Damage Model." Japanese Society for Engineering Education, Winter, 11 (4). 189-203.
- [33] Ganz, H.R., ve Thürlimann, B., (1984). "Tests On Masonry Walls Under Normal And Shear Loading ", (in German). Report No. 7502-4. Institute of Structural Engineering, ETH Zurich.
- [34] Vermeltfoort, A.Th., Raijmakers, T.M.J., (1993). "Deformation Controlled Tests in Masonry Shear Walls", Part 2 (in Dutch). Report TUE/BKO/93.08. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands.
- [35] Al- Salloum Y. A., ve Almusallam T.H., (2005)." Load Capacity of Concrete Masonry Block Walls Strengthened with Epoxy- Bonded GFRP Sheets" Journal of Composite Materials, 39 (19) ,1719-1745.
- [36] Almusallam T.H.,ve Al- Salloum Y. A.,ve Alsayed, S.A.(2006). "Rehabilitation of Infrastructure Using Externally Bonded FRP Composites", International Workshop on Civil Engineering Infrastructure Systems High Performance Materials, Monitoring and Management National Science Foundation and American University in Dubai, April 29-May 01, Dubai, UAE.
- [37] Grande E.,Milani G., ve Sacco, E., (2008). "Modeling and Analysis of FRPS trengthened Masonry Panels"Engineering Structures, 30: 1842-1860.
- [38] Milani, G. (2010). "3D FE Analysis Model for Multi- Layer Masonry Structures Reinforced with FRP Strips" International Journal Mechanical Sciences, 52: 784-203.

- [39] Fouchal, F., Lebon, F., ve Titeux, I.,(2009). "Contribution to the Modelling of Interfaces in Masonry Construction" *Construction and Building Materials*,23: (6), 2428-2441.
- [40] Gambarotta, L., ve Lagomarsino, S. (1997). "Damage Models for The Seismic Responce of Brick Masonry Shear Walls, Part I: The Mortar Joint and Its Applications", *Eartquake Engineering Structural Dynamics*, 26(4).
- [41] Farshchi, M.D., Motavalli, M.,Schumacher, A., ve Marefat, M.S. (2009). " Numerical Modeling of In-Plane Behaviour of URM Walls and an Investigation into the Aspect Ratio, Vertical And Horizontal Post- Tensioning and Head Joint as A Parametric Study, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 9:(1).
- [42] Triantafillou, T.C., (1998). " Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy-Bonded FRP Laminates" *Journal of Composites for Construction*, 2: (2), 96-104.
- [43] Ehsani, M. ve Saadatmanesh, H.,(1996). " Seismic Retrofit of URM Walls with Fiber Composites, *TMS Journal, The Masonry Society*, 13: (2), 63-72.
- [44] Holberg A. M., ve Hamilton, H.R. III. (2002). "Strengthening URM with GFRP Composites and Ductile Connections " *EQ Spectra March*.
- [45] ICBO E.S.,(2000). "Proposed Revisions to the Acceptance Criteria for Concrete, Reinforced and Unreinforced Masonry Strengthening Fiber Reinforced Composite Systems AC 125,"*International Conference of Building Officials Evaluation Service Inc., Whitter, CA*.
- [46] ACI,(2001). "ACI 440: Guidelines forthe Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures," *American Concrete Institute, Farmington Hills. MI*.
- [47] Rahman, A., ve Ueda T., (2011). "Numerical Simulation of FRP Retrofitted Laterally Loaded Masonry"Eleventh North American Masonry Conference, Minneapolis, June 5-8.
- [48] Köksal, H.O., Doran B., Alacalı S.N., Özsoy A.E., (2004). " Nonlinear Modeling of Concentrically Loaded Reinforced Blockwork Masonry Columns", *Can. J. Civ. Eng.* 31: 1012-1023.
- [49] Köksal, H.O., Karakoç, C., ve Yıldırım H., (2005). "Compression Behavior and Failure Mechanisms of Concrete Masonry Prisms", *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 17: (1), 107-115, JAN-FEB.
- [50] Köksal, H.O., Doran, B., ve Turgay, T. (2009)." A Practical Approach for Modeling FRP Wrapped Concrete Columns" *Construction and Building Materials*, 23 (3), 1429-1437.
- [51] Turgay, T.,Köksal, H.O., Polat, Z., ve Karakoç C.,(2007). "Stress- Strain Characteristics of RC Columns Externally Confined with CFRP Jackets, In: *International Association of Fructure Mechanics for Concrete and Concrete Structures, FraMCoS-6, Sixth International Conference on Fructure Mechanics of Concrete and concrete Structures, Catania, Italy, June 17-22, 2007*.
- [52] Turgay, T., Köksal, H.O., Polat, Z., ve Karakoç, C.(2009). " Stress- Strain Model for Concrete Confined with CFRP Jackets" *Materials and Design*, 30: 3243-3251.

- [53] Köksal, H.O, Karakoç, C ve Yıldırım, H. (2005).” Compression Behavior and Failure Mechanisms of Concrete Masonry Prisms”. Journal of Materials in Civil Engineering, 17:(1), 107-115.
- [54] Doran, B.,(2009). ”Numerical Simulation of Conventional RC Columns Under Concentric Loading”, J. Materials and Design, 30 (6), 2158-2166.
- [55] Doran, B., Köksal, H. O, ve Turgay, T.,(2009).” Nonlinear Finite Element Modeling of Rectangular/Square Concrete Columns Confined With FRP”, J. Materials and Design, 30 (8), 3066-3075.
- [56] Jafarov, O., ve Köksal, H.O., (2011).” Yalın ve Lifli Polimer Sargılı Duvarların Modellenmesi” Mimarlıkta Taşıyıcı Sistemler Sempozyumu, 24-26 Kasım, İKÜ, İstanbul.
- [57] Wisnumirti, S. M. W., ve MD, A. D. (2011). “Ductility Improvement of Brick Masonry Wall Using Local Materials for Anticipation of Earthquake Forces” J. Basic. Appl. Sci. Res., 1 (10), 1699-1703.
- [58] Kaushik, H. B., Rai D. C., ve Jain, S. K.(2007). “Stress- Strain Characteristics of Clay Brick Masonry Under Uniaxial Compression” Journal of Materials in Civil Engineering, 19 (9), September 1.
- [59] Bennett, R. M., Boyd, K. A., ve Flanagan, R. D. (1997). “Compressive Properties of Structural Clay Tile Prisms” Journal of Structural Engineering, 123 (7), 920-926.
- [60] Akhaveissy, A. H., and Desai, C. S. (2011). “Unreinforced Masonry Walls: Nonlinear Finite Element Analysis with a Unified Constitutive Model” Arch Comput. Methods Eng. 18: 485-502.
- [61] Federal Emergency Management Agency (FEMA) (1999). “Evaluation of Earthquake Damage Concrete and Masonry Walla Buildings, basic procedure manual. ATC-43, FEMA 306, Applied Technology Council, CA.
- [62] Masonry Standart Joint Committe (MSJC) (2002).” Building Code Requirements for Masonry structures. ACI 530-02/ ASCE 5-02/TMS 402-2, American Concrete Institute, Structural Engineering Insitute of the American Society of Civil Engineers, The Masonry Society” Detroit.
- [63] Canadian Standart Association (CSA) (2004). “ Design of Masonry Structures. S 304,1, Ontario, Canada.
- [64] Gumaste, K.S., Rao, N.,Reddy, V. B. V., ve Jagadish K.S.(2007). “ Strength and Elasticity of Brick Masonry Prisms and Wallestes Under Compression” Materials and Structures, 42: 241-253, DOI 10.1617/s11527-006-9141-9.
- [65] Köksal H.O., Aktan, S., ve Kuruşçu A.O.,(2011). “Elasto-Plastic FE Analysis of FRP- Confined Masonry Columns”, Revised from submitted to Journal of Composites for Construction. DOI 10.1061/(ASCE) CC. 1943- 56140000268.
- [66] FEA Ltd, LUSAS Finite Element System, UK, 2011.
- [67] Üstündağ, C. (200). Bir- İki Katlı Yığma Binaların yatay Yükler altındaki Davranışı ve Kesme Güvenliğinin Sağlanması, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [68] Çöğürçü, M., T., (2007). Yığma Yapıların Yatay Derz Güçlendirme Yöntemiyle Güçlendirilmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [69] Bayülke, N., (2011). “ Yığma yapıların Deprem Davranışı ve Güvenliği” 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-14 Ekim, ODTÜ, Ankara.
- [70] Kuruşçu, A. O., (2012). Yığma Duvar ve Temellerde Doğrusal Olmayan Modelleme, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [71] Celal Bayar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malzeme Ders Notları, (2010),
http://www.bayar.edu.tr/~insaat/Lisans%20DERSLER/DERS%20Notlari/Malzeme/2010_CBU_MALZEME_2_Hafta.pdf), 26.05.2012.
- [72] Erol, M., (2008).” Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü “Yeni Malzemeler Ders Notları”. Ankara.
- [73] Uludağ Üniversitesi, Gemlik Asım Kocabıyık Meslek Yüksek Okulu, Gıda Teknolojileri Bölümü, Kimya Ders Notları.
http://gemlik.uludag.edu.tr/wp-content/gallery/ders_notu/Atomun-Yap%C4%B1s%C4%B1-1.pdf), 25.05.2012.
- [74] Berto L., (2002). “An Orthotropic Damage Model for Masonary Structures”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 55(2):127-157.
- [75] Horng, Y. S., (2010). Compressive Strength Study of Brick Masonry subjected to axial loading, Bachelor of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, Jaya.
- [76] Vyas, Ch. V. U., ve Reddy, B.V. V., (2010). “ Prediction of Solid Block Masonry Prism Compressive Strength Using FE Model” Materials and Structures 43: 719-735, DOI 10.1617/s11527-009-9524-9.
- [77] Tomazeviç, M., (2009). “Shear Resistance of Masonry Walls and Eurocode 6: Shear Versus tensile Strength of Masonry” Materials and Structures, 42: 889-907, DOI 10.1617/s11527-008-9430-6.
- [78] CEN (2005). Eurocode 6: Design of Masonry Structures- Part 1-1: Common Rules for Reinforced and Unreinforced Masonry Structures. EN 1996-1-1: Brussels.
- [79] TS704, (1979). Duvarlar İçin Harman Tuğlaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [80] Balcı Tuğla: “Harman Tuğlası”
<http://www.balcitugla.com/index3.htm>).27.05.2012
- [81] TS705, (1985). Duvarlar İçin Dolu ve Delikli Fabrika Tuğlaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [82] Bayülke, N. (1992). Yığma Yapılar (Genişletilmiş 2nci Baskı). Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- [83] Gürfidan, A., (2006). Saframbolu Evlerinde Kullanılan Kerpiç Malzemenin Yüksek Fırın Curufu ile İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- [83] DBYBHY (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [84] Coşgun, N., İpekçi, A., Karaman, S., ve Yıldırım, M.B., (2000). Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Mimarlık fakültesi, Mimarlık Bölümü, Yapı Bilgisi Ders Notları.
- [85] Barbosa C. S., Lourenço, P. B.,Mohamad, G., ve Hanai, J.B.,(2010).” On The Compressive Strength Prediction for Concrete Masonry Prisms” Materials and Structures, 43: 331-344, DOI 10.1617/s11527-009-9492-0.
- [86] Köksal, E., Köksal, H.O., ve Yıldırım, H. (2004). “Eksenel Basınç Altında Beton Briket Yığma Prizmaların Sonlu Eleman Analizi” İMO Teknik Dergi, 3249-3265, Yazı 218.
- [87] ACI 530-92 (1992). “Bulding Code Requirements for Masonry Structures”, /ASCE 5-92/TMT 402-92.
- [88] British Standard 5628: Part 1,(1992). “Code of Practice for Use of Masonry”
- [89] European Committee of Standardization CEN(1996). “Design of masonry structures. Part 1-1: General rules for buildings—Reinforced and unreinforced masonry.” ENV 1996-1-1, Eurocode 6, Brussels, Belgium.
- [90] Dayaratnam, P. (1987). “ Brick and reinforced brick structures”, Oxford and IBH, New Delhi, India.
- [91] Barbosa, C.S., ve Hanai, J.B., (2009). ” Strength and Deformability of Hollow Concrete Blocks: Correlation of Block and Cylindrical SampleTest Results”Ibracon Structures and Materials Journal, 2(1), 85-99.
- [92] Khoo, C.L., (1972). A Failure Criterion For Brickwork in Axial Compression, Doktora Tezi, Endinburgh Üniversitesi, Edinburg.
- [93] McNary, W.S., (1984). Basic properties of clay-unit masonry in compression, MSc Thesis, Civil Eng. Dept. University of Colorado, Colorado.
- [94] Verhelst, F., Kjaer , E., Jaeger, W., Middendorf, B., Van Balen, K., ve Walker, P., (2011). “Masonry sustainable, contemporary and durable” Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 15(2), 118–122, April.
- [95] Center for Infrastructure Engineering Studies (CIES) (2001). “Strengthening of Masonry Elements with FRP Composites”, University of Missouri-Rolla, 223 Engineering Research Lab.
- [96] Haider, W. (2007). In Plane Responce of Wide Spaced Reinforced Masonry Shear Walls, Ph.D Thesis, Central Queensland University, Emerald, Australia.
- [97] AS3700 (2001). “ Australian Standards for Masonry Structures” Standards Australia International.

- [98] Drysdale, R.G. ve Gazzola, E. A., (1991). "Strength and deformation properties of grouted, dry stacked, interlocking concrete block system". 9th International Brick/Block Masonry Conference, Berlin, Germany, 164-171.
- [99] Chen, W. F., (1982). "Plasticity In Reinforced Concrete", McGraw-Hill Book Company.
- [100] Chen, W. F., ve Mizuno, E., (1990). "Nonlinear Analysis in Soil Mechanics", Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, Netherlands.
- [101] Davis, R. O., ve Selvadurai, A. P. S., (2002). "Plasticity and Geomechanics", Cambridge University Press.
- [102] Conil, N., Maigre, D.I., Cabrilacc, R., ve Su, K., (2004). "Poroplastic Damage Model for Clay Stones" Applied Clay Science, 26: 473– 487.
- [103] Ivorra, S., Ramón Irlas, R., Estevan, Adam, J.M., Francisco J. Pallares, F.J., ve Ferrer, B. (2010) "Drucker-Prager yield criterion application to study the behavior of CFRP confined concrete under compression" World Congress on Housing, October 26-29, Spain.
- [104] Yu, T. Teng, J.G., Wong, Y.L., ve Dong, S.L., (2010). "Finite Element Modeling of Confined Concrete-I: Drucker Prager Type" Engineering Structures, 3: 665-679.
- [105] Topçu, M., ve Taşgetiren, S., (2012). "Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodu" Pamukkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü Ders Notları.
- [106] Koksall, H.O., ve Doran, B., (2011). "Stress- Strain Model for Fibre- Reinforced Polymer Confined Rectangular Columns" Structures and Buildings, 164: (SB6,391-408), December.
- [107] Rots, J., (2010). "Non-Linear Analysis of Concrete and Masonry Structures" <http://dicata.ing.unibs.it/minelli/PhD/files/ROTS%20webpage%20new.pdf>, September 20-24. 12.04.2012.
- [108] Mohamed, O.S.A., (2004). Behaviour of Retrofitted Masonry Shear Walls Subjected to Cyclic Loading, Ph.D Thesis, Karlsruhe Üniversitesi, Karlsruhe, Germany.
- [109] Mosallam, A., ve Banerjee, S., (2011). "Enhancement in in-plane Shear Capacity of Unreinforced Masonry (URM) Walls Strengthened With Fiber Reinforced Polymer Composites" Composites: Part B, 42: 1657-1670.

NÜMERİK OLARAK DP KRİTERİ AKMA YÜZEYİ

```

REAL  $\alpha$ , k,  $\xi$ ,  $r_0$ ,  $\theta$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ 
  open(unit=10,file='sler.')
   $\alpha$  =0.467
  k=0.717
   $\xi$ =-2.
10.  $r_0=1.414*k+2.449*\alpha*\xi$ 
  do 20 l=1,358
     $\theta=(0.+l)/360.*6.28$ 
     $\sigma_1=\xi/1.732-0.816*r_0*\cos(0.523-\theta)$ 
     $\sigma_2=\xi/1.732-0.816*r_0*\sin(\theta)$ 
     $\sigma_3=\xi/1.732-0.816*r_0*\cos(0.523+\theta)$ 
    print*, $\sigma_1$ , $\sigma_2$ , $\sigma_3$ 
    write(10,50)  $\sigma_1$ , $\sigma_2$ , $\sigma_3$ 
50. format(F8.3,2X,F8.3,2X,F8.3)
20. end do
   $\xi = \xi -2.$ 
  IF ( $\xi$ .lt.-50.) go to 30
  go to 10
30. print*,  $\xi$ 
  close(10)
END

```

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Oktay JAFAROV
Doğum Tarihi ve Yeri : 16.08.1978, Azerbaycan
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : oktaycafer@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İnşaat Mühendisliği-Yapı Programı –Erciyes Üniversitesi		2005
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Erciyes Üniversitesi	2002
Lise	Sayısal	Nahçıvan Türk Lisesi	1996