

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

YIĞMA DUVAR VE TEMELLERDE DOĞRUSAL OLMAYAN MODELLEME

ALİ OSMAN KURUŞCU

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

**DANIŞMAN
PROF. DR. H. ORHUN KÖKSAL**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YIĞMA DUVAR VE TEMELLERDE DOĞRUSAL OLMAYAN MODELLEME

Ali Osman KURUŞCU tarafından hazırlanan tez çalışması 30.01.2012 tarihinde aşağıdaki 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. Görün ARUN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Gülten GÜLAY
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr. Sema Noyan ALACALI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ünal ALDEMİR
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmamı hazırlarken büyük desteğini gördüğüm tez danışmanım Sayın Prof.Dr. Orhun KÖKSAL ve Doç.Dr. Bilge DORAN'a

Her türlü bilgi, kaynak ve tecrübesini benden esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Görün ARUN'a,

Çalışmalarım süresince verdiği destek ve yardımlarından dolayı Eşim Sevcan KURUŞCU'ya ve sevgili kızım Seval KURUŞCU'ya,

Ayrıca hayatım boyunca bana sağladıkları maddi manevi tüm imkân ve destekleri için aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Ocak 2012

Ali Osman KURUŞCU

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xvi
ÖZET	xvii
ABSTRACT.....	xix
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	8
1.3 Bulgular	8
BÖLÜM 2	
YIĞMA YAPILARIN YAPIMINDA KULLANILAN MALZEME ÖZELLİKLERİ VE YIĞMA YAPI ELEMANLARI	10
2.1 Yığma Yapıların Yapısında Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	11
2.1.1 Tuğla	11
2.1.1.1 Harman Tuğlası	12
2.1.1.2 Fabrika Tuğlası.....	13
2.1.2 Doğal Yapı Taşları.....	15
2.1.3 Kerpiç.....	17
2.1.4 Beton Briket.....	19
2.1.5 Harç.....	20
2.2 Yığma Yapı Elemanlarının Dayanım Ölçütleri.....	23
2.2.1 Basınç Dayanımı.....	23
2.2.2 Kayma Dayanımı	26
2.2.3 Çekme Dayanımı	26
2.2.4 Elastisite Modülü	27

2.3	Yığma Yapı Elemanları.....	29
2.3.1	Duvar	30
2.3.2	Döşeme.....	32
2.3.3	Ayak ve Sütunlar	34
BÖLÜM 3		
KIRILMA VE PLASTİSİTE MODELLERİ		35
3.1	Gerilme hipotezleri	35
3.1.1	En Büyük Normal Gerilme hipotezi	35
3.1.2	En Büyük Kayma Gerilmesi Hipotezi.....	36
3.1.3	Coulomb Kayma Gerilmesi Kriteri	38
3.1.4	Mohr Genel Kayma Kriteri	40
3.2	Şekil Değişirme Hipotezleri.....	41
3.2.1	En Büyük Uzama veya Kısılma Hipotezi	41
3.2.2	Genel Şekil Değişirme Hipotezi	41
3.3	Enerji Hipotezleri	42
3.3.1	Toplam Şekil Değişirme Enerjisi Hipotezi	42
3.3.2	Biçim Değişirme Enerjisi Hipotezi.....	43
3.3.3	Drucker-Prager Akma Kriteri	45
BÖLÜM 4		
NÜMERİK MODELLER VE ANALİZLER		48
4.1	Makro Model Yaklaşımı ile Elasto-Plastik Analiz	53
4.1.1	Malzeme Parametreleri.....	55
4.1.1.1	Malzemenin İçsel Sürtünme Açısı ve Kohezyonu.....	55
4.1.1.2	Malzemenin Elastisite Modülü.....	57
4.1.2	Makro Modelleme Tekniği İçin Sayısal İrdellemeler	58
4.1.2.1	TU Eindhoven Duvarları	58
4.1.2.2	Oliveira Deney Duvarları	79
4.1.2.3	Roca Deney Duvarları (Seri 2 ve Seri 3).....	95
4.1.2.4	ETHZ Deney Duvarları	99
4.1.2.5	Formica Duvarı	106
4.1.2.6	JRC Duvarları	111
4.2	Mikro Model Yaklaşımı ile Plastik analiz	118
4.2.1	TU Eindhoven Duvarları.....	121
4.2.2	ETHZ Duvarları	130
4.3	Makro ve Mikro Model Karşılaştırılması.....	136
BÖLÜM 5		
YIĞMA YAPI TEMELLERİ		139
5.1	Tarihi Yapı Temelleri	140
5.1.1	Tarihi Yapılardaki Temel Örnekleri	140
5.1.1.1	Süleymaniye Cami	140
5.1.1.2	Yeni Cami.....	142
5.1.1.3	Nur-u Osmaniye Cami	143

5.1.1.4	Konjiç Köprüsü	145	
5.1.1.5	Sokullu Mehmet Paşa (Drina) Köprüsü	147	
5.1.1.6	Acemhöyük.....	148	
5.1.1.7	Dikilitaş.....	149	
5.1.1.8	Diğer Örnekler	149	
5.2	Tarihi Yapılardaki Temel Örneklerine Ait Modellerin Oluşturulması.....	151	
5.2.1	Temelin Yuvarlak Ahşap Elemanlar Üzerine Yerleştirilmesi Durumu.....	151	
5.2.2	Temelin Zayıf Malzeme Tabaka Üzerine Yerleştirilmesi Durumu ...	153	
5.2.3	Temel-Zemin Etkileşiminin Elastik Yaylar ile Tarif Edilmesi Durumu.....	156	
5.2.4	Temelin Sürtülmeli Yüzey Üzerine Yerleştirilmesi Durumu	159	
5.3	Değerlendirme	160	
BÖLÜM 6			
SONUÇ VE ÖNERİLER			161
KAYNAKLAR			164
ÖZGEÇMİŞ			172

SİMGE LİSTESİ

f_b	Birim elemanın basınç dayanımı
P_k	Kırılma anındaki yük
A_o	Tuğlanın basınç uygulanan yüzünün alanı
k^*	Tuğlanın biçim katsayısı
f_m'	Yığma yapı elemanın karakteristik basınç dayanımı (MPa)
f_{mr}	Harcın ortalama basınç dayanımı (MPa)
f_{bl}	Birim elemanın basınç dayanımı (MPa)
f_{wc}	Yığma yapı elemanın karakteristik basınç dayanımı(MPa)
f_{bc}	Blokbasınç dayanımı (MPa)
f_{mc}	Harcın ortalama basınç dayanımı(MPa)
f_k	Yığma yapı elemanın karakteristik basınç dayanımı(MPa)
f_m	Harcın ortalama basınç dayanımı (MPa)
f_b'	Normalize edilmiş basınç dayanımı (MPa)
K, α, β	Sabit değerler
f_b	Birim elemanın basınç dayanımı (MPa)
δ_m	Birim elemanın nem oranını gösteren faktörü
δ_s	Birim elemanın biçim ve boyuta bağlı olan şekil faktörü
τ	Kayma dayanımı (MPa)
τ_o	Kohezyon değerini
μ	Sürtünme açısı
f_n	Basınç dayanımı(MPa)
E_m	Elastisite modülü

E_d	Elastisite modülü
δ	Malzemenin özgül ağırlığı
d'	Duvar anma kalınlığı
h'	Yükseklik
λ	Narinlik
σ_m	Çekme mukavemeti
σ'_m	Basınç mukavemeti
a	Cismin kohezyonunu karakterize eden boyutsuz bir çarpan
b	İç sürtünmeyi karakterize eden boyutsuz bir çarpan
α, k	Malzeme katsayıları
I_1	Gerilme tansörünün birinci invariantı
J_2	Deviatorik(şekil fonksiyonu) kayma gerilme tansörünün ikinci invariantı
ϕ	İçsel sürtünme açısı
c	Kohezyon
σ	Gerilme
ϵ	Birim deformasyon
ν	Poisson Oranı
h	Duvar yüksekliği
l	Duvar uzunluğu
P_e	Kırılma yükü
I	Atalet momenti
e	Eksantriklik
t	Duvar kalınlığı
f_c	Tek eksenli basınç dayanımı
c_{mu}	Yığma blok kohezyonu
f_{mu}	Basınç dayanımı
ϕ_{mu}	Yığma blok yüzeylerdeki sürtünme açısı
K	Yay katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

M.Ö.	Milattan Önce
M.S.	Milattan Sonra
TS	Türk Standartları
DOHT	Dolu Harman Tuğlası
DEHT	Delikli Harman Tuğlası
B.A.	Betonarme
EC	Eurocode
ABYYHY	Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
ETHZ	Zurich Institute of Structural Engineering
JRC	Joint Research Center
ACI	American Concrete Institute

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Kerpiç blokları (Ölçüler mm)..... 18
Şekil 2.2	Beton briket örnekleri 20
Şekil 2.3	Yığma yapı elemanın elastisite modülünü gösteren gerilme-birim deformasyon eğrisi 27
Şekil 2.4	Yığma taşıyıcı sisteminin yapım aşamaları a,b,c,d,e [63] 30
Şekil 2.5	Tuğla duvar örgü kuralları [63] 31
Şekil 2.6	Taşların açılı ya da tuğla ile almaşık dizilimi [66] 31
Şekil 2.7	Duvarda boşluk oluşturma [64]..... 32
Şekil 2.8	Yığma yapılarda çeşitli döşemeler [69]..... 33
Şekil 2.9	Çapraz ve Manastır tonozu [66] 33
Şekil 2.10	Ayak ve sütun[66] 34
Şekil 3.1	En büyük Normal Gerilme hipotezine göre gerilme alanı [71]..... 35
Şekil 3.2	Tresca hipotezinin Mohr Daireleri Yöntemi ile gösterimi [71]..... 36
Şekil 3.3	Tresca akma yüzeyi[72] 37
Şekil 3.4	Tresca altıgeni..... 38
Şekil 3.5	Mohr kriterinin grafik gösterimi 39
Şekil 3.6	Mohr kriterinin gösterdiği bölge 39
Şekil 3.7	Mohr kriterinin genel hali..... 40
Şekil 3.8	Mohr Coulomb akma yüzeyi..... 41
Şekil 3.9	Von-Misses Akma yüzeyi 43
Şekil 3.10	Basınç bölgesinde Drucker-Prager kriteri..... 45
Şekil 3.11	Meridyenleri ve π - düzlemindeki kesiti 46
Şekil 3.12	Mohr Coulomb ile Drucker-Prager kırılma yüzeyinin karşılaştırılması a)asal gerilme uzayında b)deviatorik düzlemde[72] 46
Şekil 3.13	Drucker-Prager Akma Yüzeyi[76] 47
Şekil 4.1	Literatürde az rastlanan deneysel çalışmalarda kullanılan duvar örnekleri [1] 48
Şekil 4.2	Modelleme yöntemleri a)Detaylı mikro modelleme b)Basitleştirilmiş .. mikro modelleme c)Makro modelleme [79] 53
Şekil 4.3	Önerilen sonlu eleman düzeni..... 54
Şekil 4.4	Sonlu eleman ağı boyutlarının düzenlenmesi 54
Şekil 4.5	Makro yaklaşımda kohezyon değeri için önerilen bağıntının literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırılması..... 56
Şekil 4.6	Makro yaklaşımda içsel sürtünme açısı için önerilen bağıntının literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırılması..... 57

Şekil 4.7	Eindhoven duvarının ölçüleri ve yükleme şekli	58
Şekil 4.8	Örnek duvarlara uygulanan yükler ve çatlak şekilleri	59
Şekil 4.9	TU Eindhoven deney düzeneği	60
Şekil 4.10	$p=0.30\text{N/mm}^2$ düşey yayılı yük uygulandığında elde edilen sonlu eleman analiz sonuçları ile deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	61
Şekil 4.11	$p=1.21\text{N/mm}^2$ düşey yayılı yük uygulandığında elde edilen sonlu eleman analiz sonuçları ile deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	62
Şekil 4.12	$p=2.12\text{N/mm}^2$ düşey yayılı yük uygulandığında elde edilen sonlu eleman analiz sonuçları ile deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	62
Şekil 4.13	$P=0,30\text{N/mm}^2$ için Nümerik model ve deney sonucu	63
Şekil 4.14	$P=30\text{ kN}$ Düşey yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı	64
Şekil 4.15	Düşey yük uygulanmasının ardından başlangıç seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı	64
Şekil 4.16	Düşey yük uygulanmasının ardından orta seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı	65
Şekil 4.17	Düşey yük uygulanmasının ardından ileri seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı	65
Şekil 4.18	Düşey yük uygulanmasının ardından üst seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı	66
Şekil 4.19	$P=1,21\text{N/mm}^2$ için Nümerik model ve deney sonucu	66
Şekil 4.20	$P=120\text{ kN}$ Düşey yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı	67
Şekil 4.21	Düşey yük uygulanmasının ardından başlangıç seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı	67
Şekil 4.22	Düşey yük uygulanmasının ardından orta seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı	68
Şekil 4.23	Düşey yük uygulanmasının ardından ileri seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı	68
Şekil 4.24	Düşey yük uygulanmasının ardından üst seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı	69
Şekil 4.25	$P=2,12\text{N/mm}^2$ için Nümerik model ve deney sonucu	69
Şekil 4.26	$P=210\text{ kN}$ Düşey yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı	70
Şekil 4.27	Düşey yük uygulanmasının ardından başlangıç seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı	70
Şekil 4.28	Düşey yük uygulanmasının ardından orta seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı	71
Şekil 4.29	Düşey yük uygulanmasının ardından ileri seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı	71
Şekil 4.30	Düşey yük uygulanmasının ardından üst seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı	72
Şekil 4.31	Farklı düşey yük seviyelerinde yatay yük-yer değiştirme eğrisi	72
Şekil 4.32	Narinlik Oranı $h/l=1$ için Düşey Yük-Moment taşıma kapasitesi eğrisi	74
Şekil 4.33	Narinlik Oranı $h/l=10$ için Düşey Yük-Moment taşıma kapasitesi eğrisi	74
Şekil 4.34	Narinlik Oranı $h/l=12,50$ için Düşey Yük-Moment taşıma kapasitesi eğrisi.....	75
Şekil 4.35	Narinlik Oranı $h/l=15$ için Düşey Yük-Moment taşıma kapasitesi	

	eğrisi	75
Şekil 4.36	Narinlik Oranı $h/l=20$ için Düşey Yük-Moment taşıma kapasitesi eğrisi	76
Şekil 4.37	Farklı Narinlik Oranları için Düşey Yük-Moment taşıma kapasitesi eğrileri.....	76
Şekil 4.38	Eurocode 6'da duvarın narinlik oranı, eksantriklik ve taşıma kapasite ile ilgili ilişki[60]	78
Şekil 4.39	Oliveira 1.seri deneyleri geometrik verileri.....	79
Şekil 4.40	Oliveira 1.seri deneyleri Yatay yük-Yer Değiştirme eğrileri [96]	81
Şekil 4.41	Oliveira 1.seri deneyleri sonlu eleman ağı	82
Şekil 4.42	Oliveira 1.seri deneylerinde 30kN düşey yük için bulunan Yatay yük-Şekil değiştirme eğrileri	83
Şekil 4.43	30kN düşey yük için gerilme dağılımı	83
Şekil 4.44	30kN düşey yük için başlangıç gerilme dağılımı	84
Şekil 4.45	30kN düşey yük için gerilme dağılımı gelişimi	84
Şekil 4.46	30kN düşey yük için göçme durumundaki gerilme dağılımı.....	85
Şekil 4.47	Oliveira (Roca) 1.seri deneylerinde 30kN düşey yük için göçme durumu fotoğrafları[96]	85
Şekil 4.48	Oliveira 1.seri deneyleri 100kN düşey yük için bulunan Yatay yük-Şekil değiştirme eğrileri	86
Şekil 4.49	100kN düşey yük için gerilme dağılımı	86
Şekil 4.50	100kN düşey yük için başlangıç gerilme dağılımı	87
Şekil 4.51	100kN düşey yük için gerilme dağılımı gelişimi	87
Şekil 4.52	100kN düşey yük için göçme durumundaki gerilme dağılımı.....	88
Şekil 4.53	Oliveira (Roca) 1.seri deneylerinde 100kN düşey yük için göçme durumu fotoğrafları[96]	88
Şekil 4.54	Oliveira 1.seri deneyleri 200kN düşey yük için bulunan Yatay yük-Şekil değiştirme eğrileri	89
Şekil 4.55	200kN düşey yük için gerilme dağılımı	89
Şekil 4.56	200kN düşey yük için başlangıç gerilme dağılımı	90
Şekil 4.57	200kN düşey yük için gerilme dağılımı gelişimi	90
Şekil 4.58	200kN düşey yük için göçme durumundaki gerilme dağılımı.....	91
Şekil 4.59	Oliveira (Roca) 1.seri deneylerinde 200kN düşey yük için göçme durumu fotoğrafları[96]	91
Şekil 4.60	Oliveira 1.seri deneyleri 250kN düşey yük için bulunan Yatay yük-Şekil değiştirme eğrileri	92
Şekil 4.61	250kN düşey yük için gerilme dağılımı	92
Şekil 4.62	250kN düşey yük için başlangıç gerilme dağılımı	93
Şekil 4.63	250kN düşey yük için gerilme dağılımı gelişimi	93
Şekil 4.64	250kN düşey yük için göçme durumundaki gerilme dağılımı.....	94
Şekil 4.65	Oliveira (Roca) 1.seri deneylerinde 250kN düşey yük için göçme durumu fotoğrafları[96]	94
Şekil 4.66	Oliveira 1.seri deneylerinde Yatay yük-Düşey yük değişimi.....	95
Şekil 4.67	Roca deneyleri 2. Seri deney düzeneği.....	95
Şekil 4.68	Roca deneyleri 2.seri deneyleri için önerilen sonlu eleman ağı.....	96
Şekil 4.69	Roca deneyleri 2.seri deneyleri için Yatay Yük- Düşey Yük ilişkisi.....	97
Şekil 4.70	Roca deneyleri 2.seri deneyleri için Yatay Yük- Düşey Yük ilişkisi.....	97

Şekil 4.71	Roca deneyleri 2.seri deneyleri için göçme durumu fotoğrafları.....	98
Şekil 4.72	Roca deneyleri 3.seri deneyleri için Yatay Yük- Düşey Yük ilişkisi.....	98
Şekil 4.73	Roca deneyleri 3.seri deneyleri için göçme durumu fotoğrafları[98]	99
Şekil 4.74	ETHZ deneyi geometrik parametreleri	99
Şekil 4.75	W1 duvarı göçme fotoğrafları[103].....	101
Şekil 4.76	W2 duvarı göçme fotoğrafları[103].....	101
Şekil 4.77	W1 duvarı şekil değiştirme eğrileri.....	102
Şekil 4.78	W1 duvarını için 415kN düşey yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı	103
Şekil 4.79	W1 duvarını için yatay yükleme durumunda gerilme dağılımı	103
Şekil 4.80	W1 duvarını için göçme durumunda gerilme dağılımı	104
Şekil 4.81	W2 duvarı şekil değiştirme eğrileri.....	104
Şekil 4.82	W2 duvarını için 1287kN düşey yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı	105
Şekil 4.83	W2 duvarını için yatay yükleme durumunda gerilme dağılımı	105
Şekil 4.84	W2 duvarını için göçme durumunda gerilme dağılımı	106
Şekil 4.85	Formica model duvarı [4]	107
Şekil 4.86	Formica duvarı ile önerilen makro modelin karşılaştırılması	108
Şekil 4.87	Formica duvarı için düşey yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı	108
Şekil 4.88	Formica duvarı için kayma gerilmesi dağılımı	109
Şekil 4.89	Formica duvarı için kayma gerilmesi dağılımı	109
Şekil 4.90	Formica duvarı için göçme durumunda kayma gerilmesi dağılımı...	110
Şekil 4.91	JRC duvarlarının ölçüleri	111
Şekil 4.92	HW150 duvarı Yatay yük-Yatay Deplasman Eğrisi.....	112
Şekil 4.93	HW150 duvarı için düşey yük gerilme durumu	113
Şekil 4.94	HW150 duvarı için başlangıç seviye yatay yükleme için S3 gerilme durumu	114
Şekil 4.95	HW150 duvarı için üst seviye yatay yükleme için S3 gerilme durumu	115
Şekil 4.96	LW150 duvarı Yatay yük-Yatay Deplasman Eğrisi	116
Şekil 4.97	LW150 duvarı için düşey yükleme için S3 gerilme durumu	116
Şekil 4.98	LW150 duvarı için başlangıç seviye yatay yükleme için S3 gerilme durumu	117
Şekil 4.99	LW150 duvarı için orta seviye yatay yükleme için S3 gerilme durumu	117
Şekil 4.100	LW150 duvarı için üst seviye yatay yükleme için S3 gerilme durumu	118
Şekil 4.101	Harç için önerilen bağıntısının literatürdeki bağıntı ile karşılaştırılması[104].....	119
Şekil 4.102	Yığma blok için önerilen kohezyon bağıntısının literatürdeki bağıntı ile karşılaştırılması[104].....	120
Şekil 4.103	Yığma blok için önerilen içsel sürtünme açısı bağıntısının değişimi[104]	121
Şekil 4.104	Eindhoven Duvarı	121
Şekil 4.105	Sonlu Eleman Modeli.....	122
Şekil 4.106	P=30kN için yatay yük ve yatay şekil değiştirme grafiği.....	123

Şekil 4.107	P=30kN için düşey yükleme durumunda gerilme dağılımı.....	123
Şekil 4.108	P=30kN için yatay ve düşey yükleme durumunda S3 gerilme dağılımı	124
Şekil 4.109	P=30kN için yatay ve düşey yükleme durumunda S3 gerilme dağılımı	124
Şekil 4.110	P=30kN için yatay ve düşey yükleme durumunda Sxy gerilme dağılımı	125
Şekil 4.111	P=120kN için yatay yük ve yatay şekil değiştirme grafiği.....	125
Şekil 4.112	P=120kN için düşey yükleme durumunda gerilme dağılımı.....	126
Şekil 4.113	P=120kN için yatay ve düşey yükleme durumunda Sxy gerilme dağılımı	126
Şekil 4.114	P=120kN için yatay ve düşey yükleme durumunda Sxy gerilme dağılımı	127
Şekil 4.115	P=120kN için göçme durumunda Sxy gerilme dağılımı	127
Şekil 4.116	P=210kN için yatay yük ve yatay şekil değiştirme grafiği.....	128
Şekil 4.117	P=210kN için düşey yükleme durumunda gerilme dağılımı.....	128
Şekil 4.118	P=210kN için yatay ve düşey yükleme durumunda Sxy gerilme dağılımı	129
Şekil 4.119	P=210kN için göçme durumunda Sxy gerilme dağılımı	129
Şekil 4.120	ETHZ deneyi için kullanılan sonlu eleman modeli	130
Şekil 4.121	W1 duvarı için Yatay yük – Şekil değiştirme grafiği.....	131
Şekil 4.122	P=415kN için düşey yükleme durumunda gerilme dağılımı.....	131
Şekil 4.123	P=415kN için yatay ve düşey yükleme durumunda Sxy gerilme dağılımı	132
Şekil 4.124	P=415kN için yatay ve düşey yükleme durumunda Sxy gerilme dağılımı	132
Şekil 4.125	P=415kN için göçme durumundaki Sxy gerilme dağılımı	133
Şekil 4.126	W2 duvarı için yatay yük – şekil değiştirme grafiği	133
Şekil 4.127	P=1287kN için düşey yükleme durumunda gerilme dağılımı.....	134
Şekil 4.128	P=1287kN için yatay ve düşey yükleme durumunda Sxy gerilme dağılımı	134
Şekil 4.129	P=1287kN için yatay ve düşey yükleme durumunda Sxy gerilme dağılımı	135
Şekil 4.130	P=1287kN için göçme durumundaki Sxy gerilme dağılımı	135
Şekil 4.131	P=30kN için yatay yük ve yatay şekil değiştirme grafiği.....	136
Şekil 4.132	P=120kN için yatay yük ve yatay şekil değiştirme grafiği.....	136
Şekil 4.133	P=210kN için yatay yük ve yatay şekil değiştirme grafiği.....	137
Şekil 4.134	W1 duvarı için Yatay yük – Şekil değiştirme grafiği.....	137
Şekil 4.135	W2 duvarı için Yatay yük – Şekil değiştirme grafiği.....	138
Şekil 5.1	Süleymaniye Cami [105]	141
Şekil 5.2	Süleymaniye Cami Zemin kesiti [106].....	141
Şekil 5.3	Süleymaniye Cami Temel Rölevesi ve muayene kuyularının açıldığı yerler [106]	142
Şekil 5.4	Yeni Cami ve Jeolojik Kesiti.....	142
Şekil 5.5	Nur-u Osmaniye Cami Kesiti[106]	143
Şekil 5.6	Nur-u Osmaniye Cami Temel Kesiti[106]	144
Şekil 5.7	Nur-u Osmaniye Cami bodrum kat planı ve temel kesiti[106].....	144

Şekil 5.8	Bizans dönemine ait temel detayı[106]	145
Şekil 5.9	Konjiç köprüsünün restorasyon önceki durumu [107].....	145
Şekil 5.10	Konjiç Köprüsü	146
Şekil 5.11	Konjiç Köprüsü ayağı temeli su altından fotoğrafı [109]	146
Şekil 5.12	Konjiç köprüsünün temel inşaatı [107]	147
Şekil 5.13	Mehmet Paşa Köprüsü [110]	148
Şekil 5.14	Duvar tabanına yerleştirilmiş kütükler [109].....	148
Şekil 5.15	Sultanahmet Meydanında bulunan Dikilitaş	149
Şekil 5.16	Yığma yapı zemininde oluşan kısmı oturma [113]	150
Şekil 5.17	Edirnekapi sarnıcındaki ters tonoz temeller[114]	150
Şekil 5.18	Önerilen sonlu eleman modeli	151
Şekil 5.19	Duvarın ahşap kütükler üzerine oturma durumu düşey yüklemede gerilme dağılımı	152
Şekil 5.20	Duvarın ahşap kütükler üzerine oturma durumu yatay yüklemede S3 gerilme dağılımı.....	152
Şekil 5.21	Duvarın ahşap kütükler üzerine oturma durumu yatay yüklemede S1 gerilme dağılımı.....	153
Şekil 5.22	Temel altına serilen kum tabakası ve sonlu eleman modeli	154
Şekil 5.23	Duvarın zayıf tabaka üzerine oturması durumunda gerilme dağılımı	154
Şekil 5.24	Duvarın zayıf tabaka üzerine oturması durumunda S1 gerilme dağılımı	155
Şekil 5.25	Duvarın zayıf tabaka üzerine oturması durumunda S1 gerilme değişimi.....	155
Şekil 5.26	Duvarın Yaylar Üzerine oturması durumu.....	156
Şekil 5.27	Duvarın yaylar üzerine oturması durumunda düşey gerilme dağılımı	157
Şekil 5.28	Duvarın yaylar üzerine oturması durumunda gerilme dağılımı	157
Şekil 5.29	Eindhoven deneyinde farklı yatay yay katsayısı için elde edilen yük-şekil değiştirme eğrileri	158
Şekil 5.30	Duvarın sürtünmeli tabaka üzerine oturması durumu.....	159
Şekil 5.31	Duvarın sürtünmeli tabaka üzerine oturması durumunda gerilme dağılımı	159
Şekil 5.32	Duvarın sürtünmeli tabaka üzerine oturması kayma gerilme dağılımı	160

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Tuğlaların ortalama fiziksel özellikleri [43]..... 12
Çizelge 2.2	Biçim ve basınç dayanımlarına göre harman tuğlası sınıfları[45]..... 13
Çizelge 2.3	Harman tuğlasının boyutları [45] 13
Çizelge 2.4	Fabrika tuğlasının birim hacim ağırlığı ve basınç dayanımı[46] 14
Çizelge 2.5	Fabrika tuğlasının yükseklikleri ve biçim katsayıları[46] 15
Çizelge 2.6	Doğal yapı taşlarının ortalama fiziksel özellikleri [43] 16
Çizelge 2.7	Doğal yapı taşlarının minimum basınç ve eğilmede çekme dayanımları[48] 166
Çizelge 2.8	Kerpiçlerin sınıflandırılması[52]..... 18
Çizelge 2.9	Beton briketlerin boyutları[54]..... 19
Çizelge 2.10	Beton blok ve briketlerin basınç mukavemetleri[54] 19
Çizelge 2.11	Harç karışımları (Hacim olarak) [51] 22
Çizelge 2.12	Harçlarda minimum basınç dayanımları..... 22
Çizelge 2.13	İki farklı duvar kalınlığı için uygun bulunmuş katsayılar[59] 25
Çizelge 4.1	Sonlu eleman modelinin malzeme özellikleri..... 60
Çizelge 4.2	BS 5628 ise yük azaltma katsayıları 78
Çizelge 4.3	Yığma binalar için depreme dayanıklı tasarım kuralları [95]..... 78
Çizelge 4.4	Oliveira 1.seri deneyleri özet bilgileri 80
Çizelge 4.5	Nümerik Modelde kullanılan parametreler..... 82
Çizelge 4.6	Katalonya Üniversitesinde yapılan deneylerle ilgili özet bilgiler [1] .. 96
Çizelge 4.7	ETHZ deneyi eleman boyutları ve yükleme durumu 100
Çizelge 4.8	ETHZ duvarları için kullanılan parametreler[102] 100
Çizelge 4.9	Önerilen makro modelde kullanılan parametreler 107
Çizelge 4.10	JRC Duvarların özet bilgileri 112
Çizelge 4.11	Mikro modelde kullanılan yük ve parametreler 122
Çizelge 4.12	ETHZ deneyi için Mikro modelde kullanılan yük ve parametreler ... 130

YIĞMA DUVAR VE TEMELLERDE DOĞRUSAL OLMAYAN MODELLEME

Ali Osman KURUŞCU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. H. Orhun KÖKSAL

Eş Danışman: Doç. Dr. Bilge DORAN

Bu tez çalışmasında amaç, yığma duvar ve temellerinde zemin-üstyapı etkileşimini de içine alan 3-boyutlu yapısal analizler gerçekleştirmektir. Bunun için; tarihi yapılarda çeşitli temel ve temel altı zemin düzenlemeleri incelenmiş, zemin ve yapı malzemelerine ait tasarım parametreleri belirlenerek yapıların sonlu eleman analizleri yapılmıştır.

Yapı elemanlarının geometrik boyutları ile ilgili veri edinme zorluğu, büyük en-kesitli yapı elemanlarının dışarıdan görünmeyen iç bölümlerinin belirsizliği, yapı elemanlarının yapım sürecinin ve sırasının tam olarak bilinmemesi ve aynı eleman kesiti içinde bile farklı malzemelerin kullanılabilmesi gibi nedenlerle yapı malzemelerinin özelliklerinin belirlenmesindeki güçlükler, malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesindeki eksiklikler, yapım tekniğinden ve doğal malzeme kullanımından kaynaklanan veri çeşitliliği, yapıdaki mevcut hasarın neden olduğu genel stabilitenin ve dayanım sürekliliğinin tam olarak saptanamaması, çağdaş yapı malzemelerinin kullanılması, güncel yapısal analizlerin karmaşıklığı gibi problemler nedeniyle literatürdeki mevcut yapısal çözümleme ve analizler pek çok varsayıma dayanmaktadır. Bütün bu olumsuzluklara karşın yığma konusundaki çalışmalarda, yığma yapı ve elemanların doğrusal elastik modelleme ağırlıklı olmak üzere çok sayıda 3-boyutlu (3B) ya da düzlemsel çözümleri bulunmaktadır. Ancak, bu analiz sonuçlarının geçerliliği ileri düzey malzeme modellerinin gerektirdiği parametreler bakımından tartışmaya açıktır.

Bu alışma kapsamında, Drucker-Prager kırılma kriterinin ihtiyaç duyduğu malzeme parametreleri için bağıntılar geliştirilmiş ve duvar davranışının modellenmesinde kullanılmıştır. Aynı parametreler duvara başlangıçta uygulanan hidrostatik basına bağımlı hale getirilerek daha detaylı analizler de gerçekleştirilmiştir. Söz konusu modeller kullanılarak altı farklı çalışmadan ellibir (51) duvarın detaylı çözümlenmeleri yapılarak deneysel davranışları başarıyla tahmin edilmiştir. Makro-modelleme yaklaşımı ile duvarlarda doğrusal olmayan malzeme davranışını temel alan stabilite sorunları da araştırılmıştır. İkinici adımda yığma yapılar da temel zeminine ait geometri ve malzeme bilgileri irdelenmiştir. Bu bilgiler sonucunda, daha önceden zmlenen duvarların farklı mesnetlenme durumları ile dikkate alınarak temel-duvar etkileşimi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar, Yığma yapılar, Doğrusal olmayan analiz, Druger-Prager, Temeller, Stabilite, Yığma Duvar

NON-LINEER MODELING OF MASONRY WALLS AND FOUNDATIONS

Ali Osman KURUŞCU

Civil Engineering Division

PhD Thesis

Advisor: Prof. Dr. H. Orhun KÖKSAL

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

The aim of this study is to accomplish 3-dimensional structural analyses of masonry walls and their foundations considering the soil-superstructure interaction. For this purpose, various historic buildings foundation walls and organizations on the soil under the foundations were examined and after the assessment of the design parameters for the ground and building materials, several finite element analyses were successively conducted.

However, numerical models and analysis in literature are based on too many assumptions due to the difficulty in obtaining data for geometric dimensions of structural elements, uncertainty in the inner core of the thick cross sectioned building elements that are invisible from the outside, difficulties in determining the properties of building materials due to the unknown construction period and sequence of construction process and use of different materials even within the same cross-section, deficiencies in the determination of mechanical properties of the construction materials, the variety of construction techniques and the use of natural materials, difficulties in assessment of the stability and resistance caused by the current damage in the structure, the use of modern building materials and complexity of modern structural analysis. Despite all these negative issues, there is a large number of 3-dimensional (3D) or planar models, mostly on linear elastic analysis, of masonry building and elements in the literature. However, the validity of the results of these

analyses is open to debate in terms of parameters that advanced material models require.

In the scope of this work, the parameters of Drucker-Prager failure criterion were calibrated and new relations are recommended for the macro-modeling approach of the wall behavior. Comprehensive constitutive models based on the modified and stress dependent forms of the same parameters were also proposed making the parameters related with the hydrostatic pressure values. Using the proposed approach, fifty-one (51) walls from six different studies were analyzed in detail and their test behavior was successfully estimated. Non-linear stability problems based on material behavior were also investigated through macro-modeling approach. In the second step, the geometry and material information of the foundation soil of masonry structures are discussed. As a result of this information, previously resolved cases of walls with different supports were investigated taking into account the foundation-wall interaction.

Key words: Finite Element Analysis, Masonry Structures, Non-linear Analysis, Drucker-Prager, Foundations, Stability, Masonry Wall

1.1 Literatür Özeti

Geometrik ve malzeme bakımından pek çok karmaşık ve belirsizlik içeren sistemlerden oluşan yığma yapılarla ilgili analitik çalışmalar ve tasarım yaklaşımları çok sayıda varsayım yapılmasına ihtiyaç duymaktadır. Bu varsayımların daha küçük boyutlu kısmı geometrik modellemeyle ilgili; önemli bir kısmı ise malzemelerin davranışlarını açıklayan modeller kapsamında yapılmaktadır. Özellikle önemli bir tarihi yapı stoğuna sahip bulunan Akdeniz ve Ortadoğu bölgesi araştırmacıları, hem deneysel hem de teorik modeller üzerinde çalışmaktadırlar. Bu çalışmalar özellikle çok eksenli gerilmeler altında yığma davranışının açıklanması üzerinde yoğunlaşmaktadır. Gerçekçi davranış modellerinin sonlu eleman yöntemi kapsamında değerlendirilmesi ile daha büyük ölçekli yığma yapıların incelenmesi sağlanabilecektir. Literatürde geniş bir yer tutan doğrusal davranış modelleri ise yığma davranışını açıklamakta yetersiz kalmakta ve özellikle deprem etkisindeki sistemlerde güvenilir sonuç verememektedirler. Bu modeller genellikle deprem etkisini daha detaylı inceleyen çalışmalarda önem kazanmaktadırlar. Bu tez kapsamında ise aşağıda açıklanacağı üzere yığma yapıların en önemli taşıyıcı elemanı olan duvar davranışını konusunda gerçekleştirilen çok sayıda deneysel ve teorik çalışmalar öncelikli olarak değerlendirilmiştir. Daha sonraki aşamalarda duvarlar farklı temel sistemleri ile beraber modellenmiştir. Burada amaç hem sayısal olarak kolaylık sağlayacak hem de belli bir seviyenin altına düşmeyecek gerçekçi sonuçlar veren yığma yapı modellemesine ulaşmaktır.

Roca vd.[1], [2], [3] tarafından yapılan çalışmalarda, Fransa'nın güneyinde Roma zamanından kalma çok sayıda önemli yapıda uygulanan kuru örgü duvar konusunun araştırılması gerektiği belirtilmektedir. Ayrıca, bu çalışmalarda, zamanla harçların çevresel etkiler ile aşınması ve

yok olmasından dolayı harçlı duvarların da mekanik olarak kuru örgü duvarlar ile benzer davranış gösterdiği tespit edilmiş, kuru örgü duvar yapıları korumak için kuru örgü duvarlarda deneyler yapma gerekliliği belirtilerek bu kapsamda 7 adet kuru örgü duvar modellenmiş ve yük-şekil değiştirme eğrileri oluşturulmuştur. Bu deneylerde özellikle iki eksenli yükleme durumundaki kuru örgü duvarlar hakkında daha önemli bir yaklaşım geliştirmek amaçlanmıştır. Mikro modelleme tekniğine dayalı olarak 2 farklı yaklaşım yapılmıştır. İlkinde yarı gevrek malzemeleri dikkate alan birleşim (enterfaz) modeli, ikincisinde çok yüzeyli enterfaz modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak, aksenal basınç altında kuru örgülü yığma duvar örnekleri harçlı olanlara göre daha az dirençli ve daha fazla şekil değiştirdiği anlaşılmıştır. Orta derece düşey gerilme durumunda basınç-kesme yüklemesinden oluşan kırılma biçimi lineer kırılma zarfı ile açıklanmaktadır. Yani kırılma anındaki kesme gerilmesi basınç gerilmesi ile orantılı olmaktadır. Daha büyük aksenal yük değeri için düzlem dışı burkulma, duvarların kapasitesini azaltmıştır. İlk modellemede çatlak gelişimi ve oluşumu doğrusal olmayan tabanlı elemanlar kullanılmıştır. İkincisinde ise tüm doğrusal olmayan davranış ve şekil değiştirme kapasitesini düğüm noktalarına gönderen model tercih edilmiştir.

Formica vd.[4] tarafından 2002 yılında yapılan çalışmada yığma yapıların modellenmesinde çok sayıda sorun bulunduğu, bunun göstergesinin ise deneysel çalışmalar ile nümerik modellemelerdeki farklılıkların fazla olduğu belirtilmiştir. Tam ölçekli deneylerin tahmini için hala oldukça uzak durumda olduğunu belirten Formica vd. davranışın modellenmesi kadar uygun nümerik modellerin geliştirilmesinin de önemli olduğunu vurgulamaktadır. Tuğlaları rijit blok olarak düşünen Formica, harç birleşimlerini ise enterfaz elemanlarla modellemiştir. Dolayısıyla kırılma harç bağlantılarında gelişmektedir. Hasarı ve sürtünmeyi bu bölgelerde toplayan elastisite cinsinden modellemiştir.

Ganz ve Thürlimann [5] tarafından 1984 yılında yapılan çalışmalarda tuğla ve derzlerdeki farklı kırılma biçimlerini dikkate alan bir kırılma kriteri geliştirilmiştir. Çekme mukavemeti olan ve olmayan olmak üzere iki farklı kriter önerilmiştir. Literatürde ETHZ duvarları olarak bilinen, çok sayıda araştırmacı tarafından kullanılan deneyler gerçekleştirilmiştir.

Berto vd.[6], [7] tarafından 2001 ve 2002 yılında yapılan çalışmalarda: Güvenilir bir analiz yöntemi olarak, ortotropik davranışı ele alınmakta ve her iki doğrultuda da farklı dayanım değeri kabul edilmektedir. Bu çalışmada Berto vd.'ye göre modeller açık bir çatlak üzerinde kayma ve sürtünme etkilerini dikkate almalı, basınç altındaki kalıcı şekil değiştirmeleri

gösterebilmelidir. Mikro modellemede tuğlalar ve derzler ayrı ayrı düşünülerek uygun bünyesel bağıntılar dikkate alınmaktadır. Mikro modelleme, makro modeller için gerekli mekanik özelliklerin kalibrasyonu için kullanılabilir. Birçok homojenleştirme tekniği olduğu belirtilen çalışmada, makro modelleme ile incelenen sistemin iç yapısının hassas şekilde tanımlanamadığı ancak genel şekil değiştirme, yük davranışının tanımlanmasında kullanılabileceği açıklanmaktadır.

Orduna vd.[8], [9] çalışmasında yapısal değerlendirme için mühendisin yığma yapının bünyesindeki malzemeleri tanımlayan modellere ihtiyaç duyduğunu, ancak bu modellerin çok karmaşık veya çok sade olmak üzere çok geniş aralıkta olduğunu belirtmektedir. Çok detaylı model parametreleri hassas olarak belirlenmiş ise davranış, hassas mekanik modeller ile çok iyi tahmin edebilmektedir. Ancak bu modellerin gerektirdiği hassas özellikler, pratik kullanımda yeri olmayan ve ölçülmesi kolay olmayan değerlerdir. Dolayısıyla önemli tarihi yapıların değerlendirilmesinde bu modellerin kullanılması tercih edilebilir. Diğer yandan, basit modeller yapısal davranış hakkında sınırlı ve yaklaşık bilgi edinmek için kullanılmaktadır. Bu yöntem tarihi yapıların deprem analizlerinde tercih edilen yoldur. Orduna vd., mühendisler için yapısal modellemeyi daha da basitleştirmek için yapıyı elemanlara bölerek incelemeyi önermekte, her bir elemanı ayrı modelledikten sonra bu elemanları yapısal modeli oluşturmak için birleştirilebileceğini söylemektedir.

Arya ve Hegemier [10], çalışmalarında Von Misses kriterinde çekme bölgesini kısıtlayarak yumuşama davranışını dikkate alan bir model geliştirmiştir.

Senthinel vd. 2006 ve 2009 yıllarındaki çalışmalarında[11], [12], mikro modellerde yığma birimleri, harç sürekli ortamı veya ayrık elemanlar olarak modellenebilmektedir. Makro modellerde (eşdeğer malzeme modelleri) yığma blokların ortalama özelliklerini kullanan tek bir malzeme olarak düşünülebileceğini anlatmaktadır. Mikro modellerde sürekli ortam olarak düşünülen malzemeler enterfaz elemanlarla bağlanmıştır.

Pande vd.[13] ile [14] çalışmalarında makro modellerin yığma birimler ve harç içindeki gerilme dağılımlarını doğru şekilde göstereceğini belirtmektedir. Mikro modellerde iki yaklaşım vardır; birinci birimler ve harç ayrı ayrı sürekli ortam olarak düşünülürken, ikincisinde harç birleşimlerinin davranışı enterfaz elemanlar ile sergilenmektedir. Düşey ve yatay yük etkisinin birlikte olduğu duvarlarda yapılan 2 boyutlu çözümlerin 3 boyutlu çözümler ile oldukça yakın sonuçlar verdiği belirtilmektedir.

Khattab ve Drysdale [15] yaptığı çalışmada duvarlarda harç elemanların zayıflık düzlemleri oluşturduğu ve kırılmaların oluşan zayıflık düzlemlerinde meydana geldiğini anlatmaktadır.

Lopez vd.[16]1999 yılında yaptığı çalışmada yığma duvarın heterojen malzeme olması nedeniyle doğrusal olmayan davranışının belirlenmesinin çok zor olmadığını ve tarihi yapılarda kırılma ve göçme durumunun tahmini için güvenilir ve gerçekçi analizlerle onarım ve korunmasına fayda sağlanacağını belirtmektedir. Doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerde sonlu eleman yönteminin oldukça güçlü bir yöntem olduğundan bahsederek bunun için hassas ve etkin bünyesel modellere ihtiyaç olduğunu vurgulamaktadır. Lopez vd. anizotropi etkisini sanal izotropik gerilme ve şekil değiştirmeler şeklinde dikkate alarak homojenize edilmiş anizotropik elastoplastik model kullanmıştır.

Buhan ve Felice [17] 1997 yılındaki çalışmada yığma yapının kırılma anını modellemek için sürekli ortam modeli önermektedir. Homojenize edilmiş malzeme modeli, düzgün şekilde dağılmış birim eleman harç ile ayrılmış şekilde belirlenmektedir. Eşdeğer ortama dönüştürülen duvarda bağlantı elemanı olan harç için belirlenen kohezyon ve içsel sürtünme açısı ile göçme tanımlanmaktadır. Mühendislik açısından harç özellikleri ve tuğla geometrisini gerektiren bu pratik yaklaşım oldukça önemli görülmektedir.

Lourenço [18], [19],[20], [21], [22], [22] yaptığı çalışmalarda, yapının yükleme biçimine uygun çözüm teknikleri ve bünyesel modeller geliştirmeyi amaçlamaktadır. Çekme, basınç ve kesme kuvvetlerinden oluşan tüm kırılma biçimlerini ve yumuşamayı da sergileyen bünyesel model oluşturarak mikro model özelliklerinden makro yaklaşıma geçmeyi amaçlayan homojenleştirme tekniklerinin uygunluğunu tartışmaya açmaktadır. Ayrıca anizotrop özellikleri kapsayan bir makro modelleme yaklaşımı getirerek geliştirdiği modelleri, deneysel veriler ile karşılaştırmaktadır. Bu çalışmalarda öncelikle kırılma yükü tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Nawrotski 2007'deki çalışmasında[23] depremler ve zemindeki farklı oturmaların yapılardaki hasarların temel nedenleri olduğundan bahsetmektedir. Üst yapıyı alt yapı etkisinden koruyan mesnetler kullanarak yapının korunabileceğini belirterek, genelde yeni binalarda kullanılan sönümleyici ve yayların (elastik mesnetler)tarihi binalar için kullanılmasındaki zorluklardan söz etmektedir. Doğrusal elastik yaylar ve özellikleri belli olan mesnet tipleri ile yapı modellemesinin kolay yapılabileceğini anlatmaktadır. Bu elemanların üst yapı ile rijit bağlantısı bulunmamakta ve yapı hedeflenen performans seviyesine göre

tasarlanabilmektedir. Almanya'da bulunan Remiguis Kilisesi'ne uygulanan elastik mesnetlerin düşey yönde uygulamasından bahsetmektedir.

Giordano, Mele vd 2002 yılında [24], [25]İtalya'daki depremlerin yığma yapılara verdiği hasarlardan bahsedilen çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi ile yapı modellemesi yapılmakta, yapıların tipolojik karakterleri ve malzeme özellikleri ile ilgili belirsizliklerin yapı modellemesine getirdiği zorluklardan bahsedilmektedir. Mevcut birçok belirsizlik ve eksiklikten dolayı homojen malzeme kullanılan makro modellerin kullanılmasının gerekliliği anlatılmaktadır. Ancak tek bir yapısal elemanın incelendiği durumda mikro yaklaşım yapmanın doğru olduğunu belirtilmektedir. Düşey ve yatay harçların varlığı yığma yapı elemanını anizotrop yapmaktadır. Bu çalışmada iki malzeme modeli ile yapılan mikro modelde her iki malzeme için ayrı ayrı bünyesel modeller kullanılıp gerçek geometrileri dikkate alınarak modellenmektedir. Diğer bir modelleme yaklaşımına göre ise bloklar sürekli ortam, harç birleşimleri ise enterfaz elemanlar ise simüle edilmektedir. Bu enterfaz elemanlarda ise düğüm noktalarına atanan sürtünme ile ilgili yasalar kullanılmaktadır. Ayrıca rijit veya şekil değiştirebilen bloklar birbirleri ile elastoplastik kontak elemanları tanımlanmaktadır.

Şen B. 2006[26], çalışması kapsamında önerdiği modelin doğruluğunun tespiti, 3D sonlu elemanlar modeli (FEM) ve Lineer Elastik analizinin binanın değerlendirilmesi amacıyla kullanılıp kullanılmayacağına belirlenmesi amacıyla 3D FEM modellemesi ve Lineer Elastik analizi üzerinde yoğunlaşmaktadır. Modelleme çalışması için seçilen 105 yaşında yığma bir bina olan Hemdat Israil Sinagogu'nun düşey ve yatay (deprem tipi) yükler altında incelenmesi ve binanın beklenen tepkisinin değerlendirilmesi amacıyla Sap 2000 programı kullanılarak Lineer Elastik analiz yapılmıştır. Ayrıca yığma binalarda bulunabilen geniş pencere çerçevelerinin binanın sismik davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla pencere çerçevesiz ve pencere çerçevesiz olarak iki değişik model yaratılmış ve analiz edilmiştir. Son olarak yapı elemanlarının gereken dayanımı malzemelerin varsayılan elastik kapasiteleri ile karşılaştırılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

İşçi Z. P., 2006 [27] yılında yaptığı çalışmada incelenen 5 katlı yapının hesapları yapılmış ve kauçuk esaslı sismik izolatör kullanımına karar verilmiştir. Başta El Centro depremi olmak üzere çeşitli deprem ivmeleri uygulanan modellerde yapıya gelen kesme kuvvetleri yaklaşık

9'da birine düşmektedir. Dolayısıyla yapı daha az zorlanmakta ve yapı elemanların kesitlerinde önemli küçülmeler yapılabilmektedir.

Chaimoon ve Attard,2007 yılında [28] yaptıkları çalışma kapsamında blok ve harcı ayrı ayrı dikkate alan basitleştirilmiş mikro model yaklaşımı kullanılmıştır. Harç bağlantıları için sıfır kalınlıklı enterfaz düğüm noktaları olarak düşünülmüş tuğla boyutları geometriyi sağlayacak şekilde genişletilmiştir. Beton için önerilen ve sadece çekme gerilmelerini dikkate alan bağıntıdan sonra, basınç kırılmasını da içine alacak bir model üzerinde çalışılmış ve geliştirilmiştir. Enterfaz davranışta yumuşama oluşuyorsa, üçgen sonlu eleman birimi içindeki malzeme doğrusal elastik kalmaktadır. Doğrusal olmayan özelliklerin hepsinin enterfaz elemana atandığından bahsedilmektedir.

Massia M. 2004[29], bu çalışma kapsamında zemin yapı etkileşimini incelemiş, toprak hareketinden dolayı yığma yapılarda oluşacak çatlak gelişimi üzerinde çalışmıştır. Temel kırışlarının bilinen şekil değiştirmelerine göre yığma duvar temel sisteminin davranışını simule etmiştir. Tam ölçekte yapılan duvar davranışını saptayacak şekilde tahminler geliştirmiş ve bu kapsamda yapılan varsayımları tartışmıştır. Zemin hareketini temel altındaki ilave sonlu eleman ağı ile tanımlamıştır. Etkili derinlik hesaplanmış ve belirlediği mesnet koşulları ile çevrelemiştir. Etkili derinlik olarak büzülme, genleşme hareketi olmayan ve zemin suyu seviyesinden etkilenmeyen derinlik olarak tanımlamıştır.

Corrêa ve Ramalho (2004) [30], yaptıkları çalışmada farklı düzlemlerde birleşen komşu yığma duvarların farklı yüklemeye seviyeleri altında birbirine yük aktarabilmesi konusunda yeni yaklaşımlarda bulunmuşlardır. Bilgisayar destekli sonlu elemanlar metodu kullanarak yaptıkları çalışmada farklı düzlemlerde birleşen duvarlara üstten düşey yükler uygulayarak yığma duvarların bu yüklemelere birlikte gösterdikleri tepkileri geliştirdikleri yöntemle incelemişlerdir. Aynı duvar modelini diğer bilinen metotlarla da çözmüşler ve geliştirdikleri yöntemin doğruluğunu irdelemişlerdir.

Zucchini ve Lourenço (2002) [31] yaptıkları çalışmada yığma duvarların homojenleştirilmesi için bir mikro-mekanik yöntem önermişlerdir. Yöntem, iki aşamalı homojenleştirme işlemini dikkate alarak yığma duvardaki gerçek deformasyonlardan yola çıkarak türetilmiştir. Önerilen yöntemde yığma birim ile harcın rijitlik oranları 1/1000 değerine kadar, hesaplanan homojenleştirilmiş kompozitin Elastisite Modülü'ndeki hata %5'ten az olmuştur.

Shing ve Mehrabi (2002) [32], [33], [34] çalışmalarında yığma dolgulu çerçeve yapılar için farklı analitik modeller önermişlerdir. Ayrıca bu tür yapıların analizi için sonlu eleman modelleri geliştirilmiştir. Çalışmalarında ilk önce yığma dolgulu çerçeve yapıların davranışları hakkında bilgiler verildikten sonra, olması muhtemel göçme mekanizmalarından bahsedilmiş, sonlu elemanlar metodu ve deprem tepki analizi hakkında bilgiler verilmiştir.

Mohebkah vd. (2008)[35], çalışmalarında çelik çerçevesiz ve yığma dolgu duvarlar için UDEC isimli doğrusal olmayan statik analiz yapabilen bir sonlu elemanlar programı geliştirmişler ve bu program yardımıyla bir yığma duvar modelini düzlem içi yükleyerek doğrusal olmayan davranışlarını incelemişlerdir. Modelde mikro modelleme yöntemi kullanılmış ve yığma birimler arasında büyük deplasman ve dönme değerleri de dikkate alınmıştır. Çalışmalarından elde ettikleri sonuçları literatürde daha önce yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

Asteris ve Tzamtzis (2003) [36], çalışmalarında donatısız yığma yapıların sonlu elemanlar modellemesinde makro modellemeyi dikkate alarak iki eksenli gerilme hali için bir algoritma önermişlerdir. İki eksenli gerilme altındaki model için, anizotropik kırılma yüzeyi tanımlamışlardır.

Asteris ve Syrmakizis (2005) [37], ve Asteris (2005)[38], çalışmalarında yığma duvarların düşey tekil yükler altındaki davranışlarını, ortotropik ve anizotropik elemanlar kullanarak, geliştirmiş oldukları sonlu elemanlar yazılımı yardımıyla incelemişlerdir. İki eksenli gerilme altında farklı bir anizotropik kırılma yüzeyi önermişlerdir. Çalışmalarının ilerleyen aşamalarında geliştirdikleri kod yardımıyla bazı parametrik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Berto vd. (2004) [39], yığma duvarların kayma davranışlarını parametrik çalışmalar yardımıyla belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmaları kapsamında mikro modelleme yardımıyla harç davranışını belirlemek için izotropik hasar modeli ve yığma duvarın doğrusal olmayan davranışını belirlemek amacıyla makro modelleme şeklinde iki farklı hasar modeli kullanmışlardır. Ayrıca, yığma duvarların örgü biçimlerinden düz örgü ve şaşırtmalı örgü biçimlerini mikro ve makro yöntemleri ile analizlerini yaparak sonuçları karşılaştırılmıştır.

Köksal vd. (2004, 2005)[40] [41], yaptıkları çalışmalarda yığma prizmaların ve sıvalı beton prizmaların basınç dayanımlarına ilişkin hesaplamaları elasto-plastik yaklaşıma ve izotropik hasar modeline göre yapmışlar, Drucker-Prager kırılma kriteri için gerekli olan kohezyon ve

sürtünme açısı değerleriyle ilgili bir bağıntı önermişlerdir. Buna göre blok ve harca ait kohezyon değerleri belirledikleri formüller ile hesaplanmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Türkiye ve dünya genelinde çok sayıda yığma yapı stoğu bulunmaktadır. Bu yapıların önemli bir kısmı tarihi değerdedir. Bugün bile inşa edilmesi oldukça güç olan bu yapıların davranışı, betonarme ya da çelik gibi güncel yapı sistemlerinden farklıdır ve davranış belirlenmesinde ileri yapısal çözümlene ve değerlendirme yöntemlerinin kullanımını gerektirmektedir. Mevcut kültürel mirasın korunması, bu binaların ve taşıyıcı sistem davranışlarının bilinmesi ve gerçekçi modellerin oluşturularak incelenmesi ile mümkündür. Tarihi yapı davranışlarının incelenmesinde, üzerine inşa edildikleri zemin ile beraber değerlendirilmeleri daha gerçekçi bir yaklaşım olacaktır. Anadolu'da, deprem bölgelerinde yapılan arkeolojik kazılar, yapıların depreme karşı dayanımını artıracak şekilde temel sistemlerini ve temel altı zeminlerinin düzenlendiğini göstermektedir. Bu tezin amacı, yığma yapıların en önemli taşıyıcı elemanı olan duvarlar için etkin ve gerçekçi bir modelleme tekniği geliştirmek ve malzeme özellikleri belirlenmiş zemin-yapı modelleri oluşturmak ve yığma yapılardaki farklı mesnet şekillerinin yatay yükler altında yapısal davranışa etkisini incelemektir.

1.3 Bulgular

Tez kapsamında, bünyesindeki malzemelerin mekanik özellikleri açısından çok sayıda belirsizlik ve eksiklikler bulunan yığma duvarların modellemesi için basit ve gerçekçi yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler, yığma yapıların bünyesel davranışlarının incelenmesinde ve tasarımlarda yararlı olacaktır. Bu çalışmada geliştirilen orijinal bir makro modelleme yaklaşımı ile yığmanın ortotropik davranışını yansıtabilen, duvarın sadece yatay derzler boyunca sonlu elemanlara bölünmesiyle oluşan bir model önerinde bulunulmuştur. Bu model için ayrıca yığmanın bünyesel davranışı, Drucker-Prager kriterinin ihtiyaç duyduğu kohezyon ve içsel sürtünme açısı için tez kapsamında önerilen bağıntı ve değerlerle elasto-plastik olarak dikkate alınmıştır. Duvarda yer alan malzemelerin (yığma blok ve harç) ayrı ayrı bünyesel davranışlarını açıklamak için Drucker-Prager kriterinin kohezyon ve içsel sürtünme açıları için yeni bağıntılar ileri sürülmüştür. Bu bağıntılarla Drucker-Prager kriteri hidrostatik basınca bağımlı hale getirilerek basınç meridyeni doğrusal formdan eğrisel bir biçime dönüştürülmüştür.

Ayrıca, tarihi yapılarda uygulanan birçok yapım tekniğinin, yapıların doğa koşullarına karşı koyarak bugüne kadar ayakta kalmasına olan etkisi, araştırılması gereken bir konudur. Bu konuda, aktif deprem kuşağı üzerinde yer alan Türkiye’de, gerçekleştirilen arkeolojik kazılardan ve bilimsel yayınlardan zemin-yapı etkileşimi konusunda geçmişte edinilen birçok tecrübe ve birikimlerden faydalanılarak tarihi yapıların çeşitli yapısal düzenlemelerle depreme karşı dayanıklı hale geldiği belirlenmiştir. Bu tez kapsamında yapılan analizlerde, tarih boyunca geliştirilmiş çeşitli yapım teknikleri ve temel altı düzenlemelerinin yatay yükler altında yığma yapı davranışına olan etkisi de incelenmiştir. Bu tür yapı ve temel düzenlemelerinin modellenmesi de bu çalışmada geliştirilen mikro ve makro modelleme yöntemleri ile mümkün olmuştur. Görgüye ve tarihsel birikime dayalı olarak kullanılan yapısal ve temel altı düzenleme yöntemlerinin bugünün modern tasarım anlayışı ile değerlendirilmesi mümkün olmuştur. Bu çalışmalar sonucunda mimarlık ve mühendislik tarihi açısından oldukça önemli bir kazanç sağlanmış olacaktır.

YIĞMA YAPILARIN YAPIMINDA KULLANILAN MALZEME ÖZELLİKLERİ VE YIĞMA YAPI ELEMANLARI

Yığma yapıyı oluşturan yapı malzemeleri, killi topraktan yapılmış kerpiçten doğal taşa kadar geniş bir yelpazededir ve içinde metalik özellik taşımayan inorganik malzemeler bulunur. Yığma yapı elemanlarının dayanım ve deformasyon özelliklerinin analitik yöntemlerle belirlenmesi oldukça zordur. Ayrıca mevcut tarihi yapıları oluşturan yığma yapı taşıyıcı elemanlarının taşıma gücünün laboratuvar deneyleriyle belirlenmesi neredeyse olanaksızdır. Ancak, sanatsal ve kültürel değerlerini yaralamadan, bu yapılardan alınabilecek çok küçük örnekler veya aynı özellikleri taşıyan prototip modeller laboratuvarlarda test edilebilmektedir. Fakat bu deneyler sonucunda elde edilen veriler hiç bir zaman tam doğru sonuç vermez. Küçük bir örnekten elde edilen sonuçlar çok daha büyük boyutu olan mevcut yapı elemanlarının gerçek davranış özelliğini yansıtmaz [42], [43].

Malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, yığma yapıların yük taşıma performansını çok yakından etkiler. Bu özellikler, dayanıklılık, su emme katsayısı, basınç dayanımı, kayma dayanımı, çekme dayanımı ve ısı genleşme özellikleridir. Hava kirliliği, rüzgârın ve aşırı ısının neden olduğu aşınma, çatlaklara dolan suyun donması sonucunda oluşan basıncın neden olduğu zararlara karşı malzemenin dayanıklılığı, basınç dayanımı ve su emme kapasitesi ile ölçülmektedir.

Yapı elemanının basınç dayanımı yığma yapıların yük taşıma kapasiteleri açısından çok büyük önem taşır. Yığma yapı elemanları, beton gibi çok küçük çekme dayanımı olan, kırılğan malzeme özelliğindedir. Eğilme momenti ve kayma gerilmelerine karşı da, yığma yapı malzemeleri ve beton çok çarpıcı benzerlikler gösterir. Yığma yapı elemanları, belirli bir büyüklükte kerpiç, tuğla, taş ya da beton blokların harç veya başka bağlayıcı malzeme ile

birleştirilmesiyle elde edilmiş, bir bütün olarak davranan elemanlardır. Betonun oluşturan, agrega ve çimento da hemen hemen aynı özellikleri taşımaktadır. Ancak, yığma yapıyı oluşturan bloklara göre betondaki agreganın boyutları oldukça küçüktür. Bu özelliğinden dolayı beton homojen bir malzeme olarak kabul edilebilir. Buna karşılık, yığma yapıyı oluşturan blokların boyutunun, yığma yapı elemanının kesit boyutuna göre oranı daha büyüktür. Ayrıca yığma yapıyı elemanını oluşturan bloklar ve bağlayıcı eleman olan harç çoğunlukla birbirinden oldukça farklı malzeme özelliklidir. Bu özelliklerinden dolayı yığma yapı elemanı, genellikle blok boyutları ve birbirine bağlanma şekline göre homojen malzeme olarak kabul edilebilir. Yığma yapı elemanlarında blokların bağlanma şekli yapı elemanının taşıma gücü bakımından da çok önemlidir[42].

2.1 Yığma Yapıların Yapısında Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

2.1.1 Tuğla

Tuğla kelimesinin kökeni Latinceye uzanmaktadır. Latince tuğla kelimesinin karşılığı "tegula" dir. 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 malzemesidir. Tuğlalar "Seramik" olarak tanımlanan bir malzeme türüdür ve inorganik, yüksek ısıda işlem görmüş silikatlar ve metal oksitlerdir. Oksitlenmiş bir malzeme olduğundan kimyasal bakımdan denge noktasındadır ve yeni bir kimyasal tepkimeye girmez. Fiziki olarak sert, gevrek ve ısıya dayanıklıdır.

Tuğlanın ana malzemesi olan kil doğada üç şekilde bulunur[44].

- Yüzeyde bulunan kil
- Yüksek basınçta sertleşmiş kil ve killi topraklar
- Yer kabuğunun derinlerinde bulunan ve ısı nedeniyle sertleşmiş kil

Yapılan araştırmalar, Roma döneminden çok önce bile tuğlanın önemli bir yığma yapı malzemesi olarak kullanıldığını göstermektedir. Tarihi yapılarda kullanılan tuğlalar saf kaolin ve kil karışımının fırınlarda yüksek ısı altında pişirilmesiyle elde edilir. Tuğla boyutu döneme göre değişir. 18. yy'den itibaren normal fabrika tuğlasının boyutları: 19x9x5cm'dir.

Tuğla ile yapılmış yığma yapı elemanının dayanımı, tuğlayı oluşturan malzemenin kalitesi, kullanılan harç ve tuğlanın örülme desenine bağlıdır. Tuğlaların basınç dayanımı malzeme özelliklerine bağlı olarak 10MPa dan 30MPa a kadar değişir. İyi fırınlanmış tuğla dayanımı, iyi fırınlanmamış tuğlaya göre daha fazladır. Genel olarak tuğlanın çekme dayanımı basınç dayanımının %10'u, kayma dayanımı ise basınç dayanımının %30'u kadardır. Çok rastlanan bazı tuğla cinslerinin ortalama fiziksel özellikleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 Tuğlaların ortalama fiziksel özellikleri [43]

Basınç dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Kayma dayanımı (MPa)
10-30	2,7-5,0	10-20

Tuğla, homojen, porozitesi düşük ve ince taneli, iyi pişmiş, kenar ve yüzeyleri düzgün olacak şekilde düzgün kalıplanmış olmalı, çatlak, yarık ve boşluklar bulunmamalıdır. Tuğla yanık olmamalı, 1,50m yüksekten sert bir zemine bırakıldığında, ikiden fazla parçaya ayrılmamalıdır. Üzerine çekiçle vurulduğunda, tiz ve berrak bir ses vermelidir. Ayrıca, su içerisinde 12 saat bekletildiğinde, ağırlığının %20'sinden fazla su emmemiş olmalıdır[44].

Tuğla, ölçüsü ve oluşturduğu düzenlerle, duvarın görünüşüne de ayrı bir özellik kazandırır. Örneğin Geleneksel İslam Mimarisinde tuğla, zengin geometrik düzenlerde kullanılmış ve etkileyici dekoratif değerler elde edilmiştir.

Pişmiş kilden üretilen tuğlalar, görünüşleri ve işlevlerine göre birçok kritere göre sınıflandırılabilir.

2.1.1.1 Harman Tuğlası

Harman tuğlası, kil, killi toprak ve balçığın ayrı ayrı veya birlikte yoğrulup gerektiğinde kum, öğütülmüş tuğla, kiremit tozu ve benzerleri ile karıştırılıp su ile şekillendirildikten sonra kurutulup genellikle harman yerinde ocaklarda pişirilmesi yolu ile elde edilen ve duvar yapımında kullanılan bir malzemedir [45].

Harman tuğlaları basınç dayanımlarına ve biçimlerine göre iki şekilde sınıflandırılırlar.

Basınç dayanımlarına göre harman tuğlaları;

- Orta dayanımlı harman tuğlası

- Az dayanımlı harman tuğlası olmak üzere iki sınıfa ayrılır.

Biçimlerine göre harman tuğlaları;

- Dolu Harman Tuğlası (DOHT)
- Delikli Harman Tuğlası (DEHT) olmak üzere iki sınıfa ayrılır.

Harman tuğlasının biçim ve basınç dayanımları Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 Biçim ve basınç dayanımlarına göre harman tuğlası sınıfları[45]

SINIFLAR		Tuğlanın Sembolü	Ortalama Hacim Ağırlığı (max) kg/dm ³	Ortalama Basınç Dayanımı (min) MPa	Basınç Dayanımı (min) MPa
Dolu Harman Tuğlası	Orta Dayanımlı	DOHT/50	Sınırlandırılmamıştır	5	4
	Az Dayanımlı	DOHT/30	Sınırlandırılmamıştır	3	2,5
Delikli Harman Tuğlası	Orta Dayanımlı	DEHT/50	1,40	5	4
	Az Dayanımlı	DEHT/30	1,40	3	2,5

Çizelge 2.3 Harman tuğlasının boyutları [45]

Boyutlar (mm)		Toleranslar (mm)
Uzunluk	190	+6
		-13
Genişlik	90	+4
		-5
Yükseklik	50	+3
		-2

2.1.1.2 Fabrika Tuğlası

Fabrika tuğlası, kil, killi toprak ve balçığın ayrı ayrı veya harman edilip, gerektiğinde kum, öğütülmüş tuğla ve kiremit tozu, kül ve benzerlerinin ilavesiyle su ile karıştırılarak makinelerle şekillendirildikten ve kurutulduktan sonra fırınlarda pişirilmesi ile elde edilen bir malzemedir[46].

Fabrika tuğlaları; dona dayanıklılıklarına göre Dona Dayanımlı, Dona Dayanımsız olmak üzere iki sınıfa, delik oranlarına göre Dolu Tuğla, Seyrek Delikli Tuğla ve Az Delikli Tuğla olmak üzere üç sınıfa ayrılırlar.

Fabrika Tuğlasının Basınç Dayanımı, yapıldığı toprağın cinsi, porozitesi, pişirilme ısı ve üretim biçimi gibi birçok faktöre bağlıdır.

Delikli tuğlanın basınç dayanımı ise deliklerin miktarına, deliklerin yerine, kenarların biçimine ve yükleme yönüne göre değişir.

Delik oranlarına göre fabrika tuğlalarının birim hacim ağırlık ve basınç dayanımları çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4 Fabrika tuğlasının birim hacim ağırlığı ve basınç dayanımı[46]

Tuğla Sınıfı	Tipi	Tuğla Sembolleri	Basınç Dayanımı		Hacim Ağırlığı (kg/m ³)		Delik Oranı (%)
			Aritmetik Ortalama (MPa)	En Küçük Değer (MPa)	Max.	Min.	
Dolu Tuğla	2000 kg/m ³	2,0/240	24	19	2000	1801	15
		2,0/180	18	14,5			
		2,0/120	12	9,5			
	1800 kg/m ³	1,8/220	22	17,5	1800	1601	
		1,8/150	15	12			
		1,8/100	10	8			
Seyrek Delikli Tuğla	1600 kg/m ³	1,6/220	22	17,5	1600	1401	20
		1,6/150	15	12			
		1,6/100	10	8			
	1400 kg/m ³	1,4/200	20	16	1400	1201	25
		1,4/120	12	9,5			
		1,4/80	8	6,5			
Az Delikli Tuğla	1200 kg/m ³	1,2/150	15	12	1200	1001	35
		1,2/100	10	8			
		1,2/60	6	4,5			

Fabrika tuğlasının basınç dayanımı, TS705'e göre [46] uygun olarak hazırlanan numunenin kırılmasına neden olan P_k yükü, A_o yükleme alanına bölünerek (2.1)'deki bağıntıyla hesaplanır:

$$f_b = \frac{P_k}{A_o} * k^* \quad (2.1)$$

Burada;

f_b Tuğlanın basınç dayanımı (MPa)

P_k Kırılma anındaki yük (N)

A_o Tuğlanın basınç uygulanan yüzünün alanı (mm²)

k^* Tuğlanın biçim katsayısı

Alanın hesaplanmasında, delik alanları A_o yükleme alanından düşülmez.

Çizelge 2.5 Fabrika tuğlasının yükseklikleri ve biçim katsayıları[46]

Tuğla Anma Yüksekliği (mm)	Biçim Katsayısı (k*)
135>	1,00
185	1,10
235	1,25

Delikli tuğlaların basınç dayanımını deliklerin oranı kadar biçimleri de etkiler. Delik oranı aynı fakat daha çok sayıda küçük deliklerden oluşan bir tuğlanın basınç dayanımı daha yüksek olmaktadır. Bunun nedeni küçük delikli tuğlalarda boşlukları çevreleyen dolu kesitlerin burkulma boylarının daha küçük olmasıdır. Ayrıca boşluk oranı aynı fakat delik biçimleri farklı olan tuğlaların da basınç dayanımı farklı olmaktadır. Aynı boşluk oranı bulunan fakat farklı boşluk şekillerinden oluşan tuğlalar üzerinde yapılan bir araştırmada [47] delikler nedeniyle oluşan gerilme birikimlerinin oranları karşılaştırılmıştır. Buna göre dolu tuğlada gerilme birikimi 1,0 olarak alınırsa dairesel delikli tuğlada bu oran 4,97, eliptik delikli tuğlada 9,91, dikdörtgen delikli tuğlada 7,1 olmaktadır[43]. Eğer dikdörtgen deliklerin köşeleri yuvarlatılırsa gerilme birikimi daha da azalmaktadır. Söz konusu araştırmada dairesel delikli tuğla, delik oranlarının aynı olduğu dikdörtgen ve kare delikli tuğlalara göre daha yüksek dayanımlı olduğu ortaya çıkmıştır.

2.1.2 Doğal Yapı Taşları

Taş en eski yapı malzemelerinden biridir. Doğal yapı taşı, doğada mevcut taş ocaklarından çıkarılan, homojen, atmosfer etkilerine dayanıklı, kaya bilimi ve teknolojik özellikleri bakımından yapı işlerinde kullanılmaya elverişli taştır. Yığma binaların yapımında kullanılacak doğal taşlar, ocak taşı olmalı, bünyelerinde çatlak kısımlar ve hava etkisi ile ayrıışmış veya ayrıışmaya başlamış kısımlar bulunmamalıdır [48].

Taşın çoklukla bulunduğu yörelerde hem sivil mimarlık örneklerinde hem de büyük saraylar ve köşkler, dinsel ve resmi yapılar gibi büyük ölçekli prestij binalarında doğal taş kullanımı her zaman çok olmuştur. Taşın tarihi yapılarda yaygın olarak kullanılmasının en önemli nedeni, hemen hemen her yerde ve arazi koşullarında kolaylıkla bulunabilmesidir. Taşın strüktürel dayanıklılığı, jeolojik ve kimyasal özellikleri ile incelenebilir. Taş basınç kuvvetlerine karşı çok dayanıklı, çekme kuvvetlerine karşı ise oldukça zayıftır.

Bazı taşların, basınç yükleri altında deformasyon yapma kabiliyeti, betonunkine oldukça yakın veya daha azdır. Elastisite modülünün bilinmesi ile taşıyıcı elemanın yüklenmesi sonucu

yaptığı sehim hesaplanabilir. Elastisite modülü, malzeme laboratuvarlarında, statik basınç yükleri altında, numuneler üzerinde yapılan kırma deneyleriyle elde edilir. Eski yapılarda, genellikle numune alınamayacağından, elastisite modülünün belirlenmesi özel olarak geliştirilmiş ultrasonik araçlarla yerinde yapılır.

Duvarda kullanılan taşların boyutları da duvar kalınlığı ile orantılı olmalıdır. Duvarda çok büyük boyutlu taşların bulunması, harcın taşları birbirine bağlamasını güçleştirir. Duvarlarda kullanılacak yapıtaşlarının 10x20x20cm gibi ya da buna yakın boyutlarda olması hem işçilik bakımından kolaylık sağlar hem de taşlar birbirine iyi bağlanabilir[49], [50].

Yığma taş yapı elemanlarının da dayanım, dayanıklılık ve diğer malzeme özellikleri, taş, taşın işleniş biçimi, harç ya da kenet ve birleşim dokusuna bağlıdır. Genellikle tarihi yapılarda kullanılan yapı taşlarının ortalama fiziksel özellikleri çizelge 2.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 2.6 Doğal yapı taşlarının ortalama fiziksel özellikleri [43]

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

Doğal yapı taşlarının cinslerine göre TS 2513'de [48] verilen minimum basınç ve eğilmede çekme dayanımları çizelge 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.7 Doğal yapı taşlarının minimum basınç ve eğilmede çekme dayanımları[48]

Taşın Cinsi	Minimum Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilmede Minimum Çekme Dayanımı (MPa)
Kalker, traverten, kireç bağlayıcılı kumtaşı	35	3
Yoğun kalker, dolomit, bazalt	50	4
Silis bağlayıcılı kumtaşı, grovak	80	6
Granit, siyenit, diorit, melafir, diabaz, andezit	120	7,5
Diğer tortul ve metamorfik taşlar	50	5
Diğer püskürük taşlar	140	8

Doğal yapı taşlarının basınç dayanımları 35MPa ile 140MPa arasında olmasına rağmen örülüş duvarların emniyet gerilmeleri TS2510'da [51] belirtildiği gibi oldukça küçüktür.

Yığılma taşı yapı elemanlarının dayanımı genel olarak taşı ve harç birleşiminin ortak davranışına göre belirlenir. Tarihi yapılarda kullanılan taşı yığılma taşı elemanları çok geniş bir dayanım değeri gösterir. Taşı yığılma taşı elemanlarının kayma dayanımı genel olarak basınç dayanımının %25'i kadardır [45].

2.1.3 Kerpiç

Kerpiç, mimarlık tarihinin eski dönemlerinde, önemli yapı malzemelerinden birisidir. Ağaç varlığının az olduğu, taşın kolay bulunmadığı yöre ve ülkelerde kerpiç yaygın biçimde uygulanmıştır. Bundan 6000 yıl önce Mezopotamya'da Asurlular kerpiç kullanarak yığılma yapılar inşa etmişlerdir.

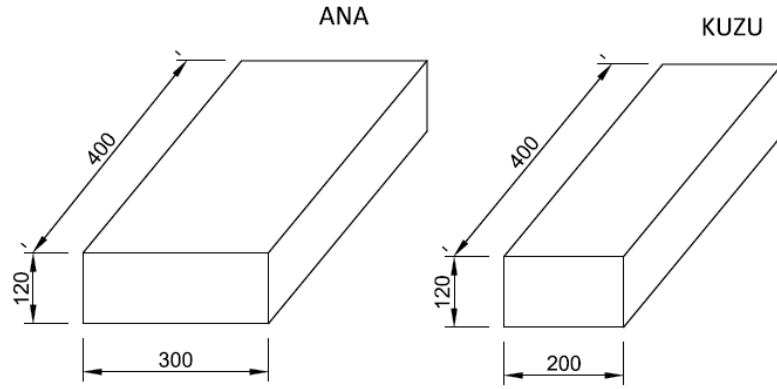
Eski Mısır'da da kerpiç bilinmekte ve kullanılmaktadır. 3000 yıl önce inşa edilmiş olan II.Ramses'in Luksor'daki Ölüler Tapınağının girişindeki tonozlar kerpiçlerden üretilmiştir ve bugün hala ayakta durmaktadır. Birçok dinsel yapıların ve hatta prestij yapılarının, örneğin ünlü Babil Asma Bahçeleri ve ziguratların yapımında çoğunlukla kerpiç kullanılmıştır [44]. Bugün kerpiç yeniden güncel bir yapı malzemesi olarak görülmeye başlanmıştır. Bunun nedeni; kerpicin doğal, sağlıklı bir malzeme olması, yöresel malzeme olarak kolay elde edilip, ekonomik olarak üretilmesi ve üretiminde tuğla veya betona oranla çok daha az enerji gerektirmesidir. Yöresellik, ekonomik oluşu ve çevre uyumluluğu gibi özellikleri, gelişmekte olan ülkelerde dar gelirli konut yapımında bir çıkış yolu olarak belirlemektedir.

Kerpiç yapılar TS2515'e [52] göre : "Duvarları kerpiçle örülen, tavan ve kat döşemeleri ahşap olan yapılar" olmaktadır. Afet yönetmeliğindeki tanımlama ise şöyledir: "Temel ve bodrum duvarları doğal taşı taşıyıcı duvarları kesme ya da yerinde dökme kerpiç, tavan ve kat döşemeleri ahşap olan yapılara kerpiç yapılar denir".

Kerpiç bloklar, killi ve uygun nitelikte toprağın içine saman, diğer bitkisel lifler vb. katkı maddeleri karıştırılıp su ile yoğrulduktan sonra kalıplara dökülerek şekillendirmek ve açık havada, güneşte kurutmak suretiyle elde edilen mamullerdir. Kerpicin basınç dayanımı tuğla kadar yüksek değildir ve suya karşı dayanıksızdır. Kerpiç blokları boyutlarına göre, ana ve kuzu diye adlandırılır (Şekil 2.1) (Çizelge 2.8).

Kerpicin ana maddesi kum ve kildir. Kil kumu bağlama, birleştirme görevini görür. Kum, kil ve su karışımı kerpiç hamuru adını alır. Kerpiç hamuru içindeki kil miktarı, kerpicin niteliğini belirler. Uygun kum/kil oranı olarak 1/5, kısaca 1 birim kum için 5 birim kil önerilmektedir.

Kerpicin içine saman karıştırarak malzeme dayanımını artırmak eskiden beri bilinen ve uygulanan bir yöntemdir. Saman yerine diğer bitkilerin kurumuş liflerini karıştırmak da olasıdır. Bu bitkisel katkılar malzeme içindeki rutubetin dışarıya atılmasını sağlayarak kerpicin çatlamasını belli ölçüde önlemekte, karışımın birleşme ve yapışma (kohezyon) özelliğini artırmakta ve buna bağlı olarak statik dayanımını güçlendirmektedir. Bugün bitkisel katkıların çürüyüp bozulmalara neden olduğu anlaşılmıştır. O nedenle statik dayanımı artırmak için kerpiç hamuruna alçı veya çimento (%2-4) katmak yoluna gidilmektedir. Fiziksel özellikler ve yağmura dayanıklılık yönünden olumlu sonuçlara varabilmek için de bitüm emülsiyonları v.b. gibi katkı maddelerinin ilavesi yolu seçilmektedir.



Şekil 2.1 Kerpiç blokları (Ölçüler mm)

Çizelge 2.8 Kerpiçlerin sınıflandırılması[52]

Sınıf	Boyutlar (cm)	Hacim (dm ³)	Yaklaşık Ağırlık (kg)
I	12x19x40	9,12	10-12 (Kuzu)
II	12x30x40	14,40	15-25 (Ana)
III	12x18x30	6,48	7-11 (Kuzu)
IV	12x25x30	9,00	10-15 (Ana)

Kerpiçlerin en küçük basınç dayanımı 8MPa'den az ve ölçülen numunelerin ortalaması 1MPa'den az olmamalıdır. Nejat Bayülke [53] ise deneylerinde 45 günlük dayanımı 3MPa bulmuştur.

2.1.4 Beton Briket

Beton briketler, çimento, hafif ve normal ağırlıkta agregalar, su ve gerektiğinde başka katkı maddeleri ile üretilir. Üretimlerinde agrega olarak kum ve çakıl kullanıldığı gibi cüruf ve bims gibi doğal hafif agrega da kullanılmaktadır. Beton briketler çoğunlukla boşluklu olarak üretilir. Genellikle piyasa için üretilenler betonarme yapıların dolgu duvarlarında ve döşemelerinde dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Çok sayıda yapıyı içeren inşaat uygulamalarında şantiyede bile üretilmektedir [50].

Beton briketler çoğunlukla tuğlanın üretilmediği ve tuğla taşıma bedelinin yüksek olduğu bölgelerde ve de özellikle çevrede hafif agreganın bol bulunduğu yerlerde yoğun olarak üretilmektedir. Örneğin İç Anadolu Bölgesinde, Kayseri, Niğde ve Nevşehir çevresinde volkanik bir taş olan tuf ve ponza taşı da denen malzemenin yoğun olarak bulunması bu bölgede hafif beton briket üretimini çok yaygınlaştırmıştır. 1980'li yılların başında, yapılarda ısı yalıtımı yapma zorunluluğu da bu tür ısı yalıtımı yüksek, hafif beton briket üretimini teşvik etmiştir.

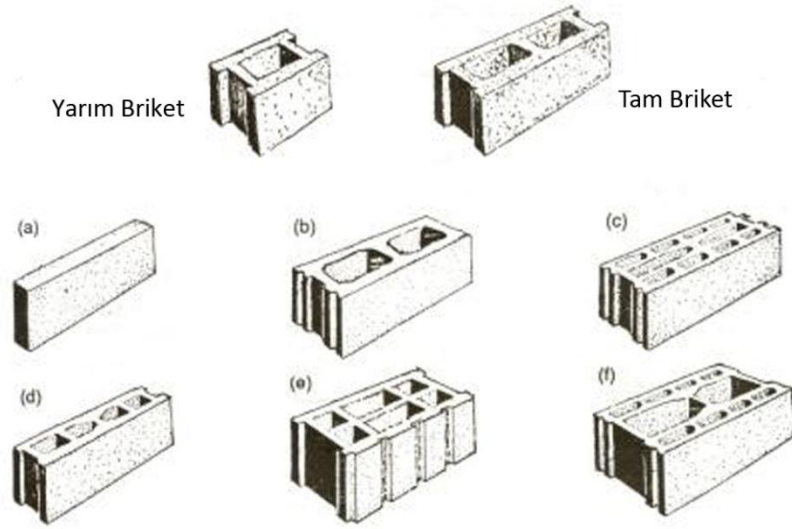
TS406[54] Beton blok ve briketler için standartta beton briket, boşluklu olup olmamasına göre, Dolu briket, Boşluklu briket olmak üzere iki sınıfa; hacim ağırlıklarına göre on iki sınıfa ayrılmaktadır (Şekil 2.2). Beton blok ve briketler basınç mukavemetlerine göre BB2, BB4, BB6, BB12 olmak üzere dört türe ayrılır[50]. Beton briketlerin boyutları çizelge 2.9da, basınç mukavemetleri çizelge 2.11'te verilmiştir.

Çizelge 2.9 Beton briketlerin boyutları[54]

	Beton Briketlerin Boyutları						
Genişlik (cm)		g	10	15	20	25	30
Yükseklik (cm)		y	19	19	19	24	24
Uzunluk (cm)	Tam	u	39	39	39	49	49
	Yarım	u/2	19	19	19	24	24

Çizelge 2.10 Beton blok ve briketlerin basınç mukavemetleri[54]

Türler	Basınç Mukavemeti Değerleri	
	Ortalama Değer(MPa)	Minimum Değer(MPa)
BB2	2,5	2
BB4	5	4
BB6	7,5	6
BB12	15	12



Şekil 2.2 Beton briket örnekleri

2.1.5 Harç

Harç, yığma yapılarda, taşıyıcı duvarları oluşturan taş, tuğla vb. blokları birbirine bağlayan malzemeydir.

Topraktan elde edilen kerpiç ve tuğlanın yapı malzemesi olarak kullanılması “harcın” doğmasına neden olmuştur. İlk kullanılan harç “çamur” dur. İlk olarak kireç harcının Mısırlılar tarafından kullanıldığı tahmin edilmektedir. Bugün daha güçlü bir bağlayıcı madde olan kireç harcının Romalılar döneminde kullanıldığı bilinmektedir. Kireç, kum ve su karışımından oluşan bu bağlayıcı, taş ve tuğla duvar yapımında kullanılmaya bu dönemde başlanmıştır. Sonraları Romalılar kum ve kireç karışımı içine pişmiş kil veya puzolan (pouzzolane) denilen volkanik tuf ve çakıl ekleyip su ile karıştırarak elde ettikleri karışımı kalıp içine dökerek “opus concreticus” dedikleri, beton türünü ile tonoz, kubbe ve kemerler yapılmışlardır [55]. Romalılar puzolanı Napoli yakınındaki Pozzuoli yöresindeki volkanik taşlardan elde etmişlerdir.

Romalılar devrinde üretilen harcın üstünlüğü, içine eklenen kireç ve diğer maddelerin kalitesine, miktarına ve inceliğine bağlıdır. Bu özellikler göz önüne alınarak Romalılar devrinde harç tekniği epey geliştirilmiştir. Ayrıca albümin ve kasein gibi maddeler ilave ederek, harcın kullanılacağı yere göre, özelliklerinin değiştirilmesi ile ilgili çeşitli uygulamaların yapıldığı bilinmektedir. Bugün yapılan araştırmalarda, Roma devrinde üretilen

harcın homojen olduğu, içindeki kirecin iyi piştiği ve puzolan maddesinin iyi kaliteli bir hidrolik bağlayıcı olduğu görülmüştür. Ortaçağda Roman ve Gotik devirlerde kullanılan harç kalitesinin Roma harcından daha düşük kaldığı, o devir yapılar üzerinde yapılan incelemeler sonucu anlaşılmıştır. Selçuklu ve Osmanlı mimarisinde de kireç ve kum karışımı içine, pişmiş tuğla'nın öğütülerek katılması ile "Horasan" denilen harcın kullanıldığı görülmektedir. Horasanın mukavemeti kirecin kalitesine ve tuğla tozunun inceliğine bağlıdır. Bu nedenle eski yapılarda kullanılmış olan horasanın kalitesi ve mukavemeti yöresel koşullara bağlı olarak değişir [55].

Bugün yığma yapılarda harç, bağlayıcı özelliği olan malzeme, kum ve suyun karışımından oluşur ve zamanla sertleşir. Bağlayıcı malzeme olarak genellikle kireç kaymağı, sönmüş kireç veya Portland çimentosu kullanılmaktadır. Harcın ana görevi, taş ve tuğla gibi yığma yapı bloklarını bir arada tutarak birleşik bir yapı elemanı oluşturmaktır. Yığma yapı bloklarının bağlanma şekli ve özellikleri strüktürel güvenilirlik bakımından çok önemlidir. Elemanın basınç dayanımı, kayma dayanımı ve çekme dayanımı açısından harcın çok önemli bir rolü vardır. Yığma yapı elemanlarında esas olarak, çekme birleşim dayanımı ve kayma birleşim dayanımı olmak üzere iki çeşit birleşim dayanımı vardır. Çekme dayanımı, tuğla veya taş ile harcın birleşim noktasına dik yönde oluşan çekme kuvvetlerine, kayma dayanımı ise bu noktalara paralel oluşan kuvvetlere karşı koyar.

Harç ile taş veya tuğla blokları arasındaki birleşim dayanımını etkileyen faktörler şunlardır:

- Bağlayıcı malzemenin miktarı birleşim dayanımını artırır.
- Karışımdaki su oranı harcın kolay işlenmesini sağlar ancak birleşim dayanımını azaltır.

Taş ve tuğla gibi blokların yüzey dokusu harcın boşluklara girmesini sağlayarak bloklar arasında kusursuz bir birleşim dayanımı oluşturur.

Harcın basınç dayanımı çoğunlukla bağlayıcı malzemenin tipine, kalitesine ve harç karışımını oluşturan malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Harcın basınç dayanımı deney için hazırlanmış bir örneğin test edilmesiyle ölçülebilir. Ancak, örnek malzemedeki ölçülen basınç dayanımı çoğunlukla, yığma yapı elemanının birleşim noktasındaki basınç dayanımını tam olarak yansıtmaz [43].

Duvar harcı, TS2717'ye [56] uygun harç kumu ile bağlayıcı olarak çimento, kireç hamuru, söndürülmüş toz kireç, harç çimentosunun ayrı ayrı veya bir kaçı bir arada kullanılarak ve

yeteri kadar su ve gerektiğinde katkı maddeleri ile karıştırılarak elde edilen ve duvarların örülmesinde kullanılan yapı malzemesidir. Yönetmelikte harçlar basınç dayanımlarına göre A, B, C, D, ve E sınıfı olmak üzere beş sınıfa ayrılır.

Duvar harcı karışımlarında, harç grubuna göre gerekli agrega ve bağlayıcı miktarları hacim olarak çizelge 2.11’te verilen değerlere uygun olmalıdır. Harca kullanılacağı yere ve koşullara uygun kıvamda olabilmelerini sağlayacak miktarda su katılmalıdır. Özel hal ve gerekler dışında yerleştirildiği derzden akıp giderek derzi kısmen boş bırakacak kadar akıcı olmayan ve kolay işlenebilen plastik bir kıvam gerçekleştirilmelidir.

Çizelge 2.11 Harç karışımları (Hacim olarak) [51]

Harç Sınıfı	Tip No	Kum	Çimento	Harç Çimentosu	Kireç Hamuru	Toz Kireç
		1,3 t/m ³	1,2 t/m ³	1,0 t/m ³	1,3 t/m ³	0,6 t/m ³
A	-	3	1	-	-	-
B	1	4	1	-	-	-
	2	4	1	1/2	-	-
	3	4	1	-	-	1/2
	4	4	1	-	-	1
C	1	7-9	1	2	-	-
	2	5	1	-	-	-
	3	5	1	-	1	-
D	1	6-8	1	-	2	-
	2	6-8	1	-	-	3
	3	2-3	-	1	-	-
E	-	3	-	-	1	-

Çizelge 2.11’te malzemelerin altında t/m³ cinsinden verilen değerler, malzemelerin birim hacim ağırlıklarıdır. Harçların basınç dayanımı sarsma tablası deneyinde %110±5 oranında bir yayılma oluşturacak kıvamdaki harç üzerinde TS2848’de [57] tarif edilen basınç dayanımı deneyi uygulandığında bulunacak sonuç harç sınıfları için aşağıda verilen değerlere uygun olmalıdır (Çizelge 2.12).

Çizelge 2.12 Harçlarda minimum basınç dayanımları

Harç Sınıfı	Minimum Basınç Dayanımı (MPa)
A	15
B	11
C	5
D	2
E	0,5

2.2 Yığma Yapı Elemanlarının Dayanım Ölçütleri

Yapı elemanları ve yapı malzemeleri açısından en önemli konu yeterli dayanım ve rijitliktir. Malzemelerin bu özellikleri, karşı koyabileceği en yüksek gerilme değeri ve deformasyon sonucu oluşan gerilme değeri ile ölçülür. Birçok malzeme için dayanım ve rijitlik yüklemenin şekline göre değişir. Gerilmeler basınç ve çekme gerilmeleri olarak eleman içinde birçok yönde oluşur. Deformasyonlar genellikle sabit oranda artmaz. Bu nedenle, yığma yapı elemanında gerilme ve rijitlik, deformasyonun oranına göre değişir. Malzeme özelliklerindeki bu değişim gerilme-birim deformasyon eğrileri ile gösterilir. Malzemenin genel karakteristik özellikleri ve davranışı bu eğriler incelenerek araştırılır [43].

2.2.1 Basınç Dayanımı

Yığma yapı elemanları bileşik bir malzeme olarak göz önüne alınır ve her bileşeni doğrusal elastik kırılğan bir malzeme olarak kabul edilir. Blokların geometrik özellikleri, tipi, biçimi, dayanımı, su emme kapasitesi ile harcın karışım oranı, nem miktarı, harç kalınlığı ve deformasyon özelliği yığma yapı elemanının basınç dayanımını etkileyen faktörlerdir.

Yığma yapı elemanlarının basınç dayanımı, olası boşluklar göz önüne alınmaksızın, elemana etki eden en büyük basınç kuvvetinin net kesit alanına bölünmesi ile tanımlanır. Basınç dayanımı genellikle yığma yapı elemanının harç ve bloklar ile birlikte hazırlanmış bir örneğin ya da blokların laboratuvarında test edilmesi sonucunda belirlenir. Tuğla gibi düzenli bloklar ile örülmüş elemanların basınç dayanımı, blok basınç dayanımına çok yakın bir değerdedir. Genellikle taşın kullanıldığı daha masif düzensiz elemanlarda ise yığma yapı elemanının basınç dayanımı, birim elemanları bağlayan harcın cinsine ve kalınlığına bağlıdır ve blok basınç dayanımının elemanın genel dayanımındaki etkisi azdır. Genellikle duvar basınç dayanımı, düşük basınç dayanımlı bloklarda blok basınç dayanımının % 50'si, yüksek dayanımlı bloklarda % 25 'i kadardır [49].

Dünyanın birçok yerinde, yığma yapı elemanları üzerine çeşitli tiplerde ve özelliklerde testler yapılmış ve çeşitli veriler elde edilmiştir.

Aköz tarafından 2005 [58] yılında yapılan çalışmada belirtildiği gibi duvarlarda mevcut gerilme ve şekil değiştirmeleri flatjack aleti ile ölçmek mümkündür. Yığma yapılarda ASTM C1196-92'ye uygun olarak gerçekleştirilen yerinde basınç deneyi, basınç uygulayan bir

kompresör ve bir basınç ölçer, basınç kuvvetini yüzeye uygulamaya yarayan plaklar, deplasman ölçmeye yarayan pimlerden oluşmaktadır.

Herhangi bir yığma yapı elemanın dayanım özelliklerini belirleyebilmek için, eğer özgün malzeme üzerinde test yapılmadıysa, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilere göre, malzemenin benzer özellikleri dikkate alınmak kaydıyla deneylere dayalı denklemler kullanılabilir. Bu denklemler blok ile harcın basınç dayanımlarının ortalamasına göre hesaplanabilir.

Köksal vd. [40] tarafından yapılan araştırmalar ve deneysel çalışmalarda yığma duvarın basınç dayanımı için önerilen bağıntı (2.3) oldukça gerçekçi sonuçlar vermektedir.

$$f'_m = 1,57 * \ln(f_{mr}) + 0,75 f_{bl} \quad (2.3)$$

f'_m Yığma yapı elemanın karakteristik basınç dayanımını (MPa)

f_{mr} Harcın ortalama basınç dayanımını (MPa)

f_{bl} Birim elemanın basınç dayanımını (MPa)

Ayrıca, 925 adet deney numunesi üzerinde Mann tarafından yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilmiş olan 2.4 bağıntısı da literatürdeki önemli yaklaşımlar arasında yer almaktadır [58].

$$f_{wc} = 0,83 * f_{bc}^{0,67} * f_{mc}^{0,33} \quad (2.4)$$

f_{wc} Yığma yapı elemanın karakteristik basınç dayanımını (MPa)

f_{bc} Birim elemanın basınç dayanımını (MPa)

f_{mc} Harcın ortalama basınç dayanımını (MPa)

Diğer bir bağıntı 2.5 ise 2 farklı kalınlıkta duvar için yapılan deneyler sonucunda çıkarılmıştır. Uygun bulunan bağıntı ve her bir duvar kalınlığı için bulunan katsayılar Çizelge 2.13'te verilmiştir [59].

$$f_{wc} = K_2 * f_{bc}^j * f_{mc}^k \quad (2.5)$$

Çizelge 2.13 İki farklı duvar kalınlığı için uygun bulunmuş katsayılar[59]

$t_w(\text{mm})$ Duvar kalınlığı	K_2	j	k
102,5	0,865	0,542	0,191
215,0	0,356	0,662	0,212
102,5	0,783	0,532	0,208
215,0	0,214	0,780	0,235

Her ne kadar tarihi yapılarda kullanılan yığma yapı elemanları kendilerine özgü malzeme özellikleri gösteriyorsa da, yapı mühendisliğinin modern şartnamelerinde basınç dayanımı için gösterilen deneysel yaklaşımlar tarihi yapılar için de kullanılabilir. “Eurocode EC6” da yığma yapı elemanlarının karakteristik basınç dayanımı aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır [59], [60], [61].

$$f_k = K(f'_b)^\alpha (f_m)^\beta \quad (2.6)$$

Bağıntı 2.6'da;

f_k Yığma yapı elemanın karakteristik basınç dayanımını (MPa)

f_m Harcın ortalama basınç dayanımını (MPa)

f'_b Normalize edilmiş basınç dayanımını (MPa)

K, α, β Sabit değerleri göstermektedir.

Tuğla veya taşın normalize edilmiş basınç dayanımı (f'_b) aşağıdaki denklemle hesaplanabilir;

$$f'_b = f_b \delta_m \delta_s \quad (2.7)$$

Bağıntı 2.7'de:

f_b Birim elemanın basınç dayanımını (MPa)

δ_m Birim elemanın nem oranını gösteren faktörü

δ_s Birim elemanın biçim ve boyuta bağlı olan şekil faktörünü göstermektedir.

Yukarıdaki denklemlerde, K, α ve β sabit değerleri için sırasıyla çeşitli deneyler sonucunda elde edilen değerler kullanılabilir. Yukarıdaki denklemlerden de anlaşılacağı gibi, yığma

yapı elemanlarının karakteristik basınç dayanımını etkileyen önemli faktörler elemanın nem içerme oranı, birim elemanın şekli ve boyutudur.

2.2.2 Kayma Dayanımı

Yığma yapı elemanlarının kayma gerilmesi, harç ve blok arasındaki birleşim şekline bağlıdır. Blok ve harç arasındaki mekanizma tam anlamıyla anlaşılmamış olsa da, tuğla veya taş ile harcın fiziksel ve kimyasal özelliklerinden etkilenmektedir. Yığma yapı elemanları basınç ve çekme kırılmalarına ek olarak, çoğunlukla kayma kırılmalarının da tehlikesi altındadır. Bu nedenle taş ve tuğladan oluşan yığma yapı elemanlarının kayma dayanımı birçok deney ile araştırılmış, bu çalışmalar sonucunda aşağıdaki denklem elde edilmiştir [43].

$$\tau = \tau_o + \mu f_n [61] \quad (2.8)$$

Bağıntı 2.8'de:

τ	Kayma dayanımını (MPa)
τ_o	Kohezyon değerini
μ	İç sürtünme açısını
f_n	Basınç dayanımını (MPa) göstermektedir.

Yapılan çeşitli deney sonuçlarına göre τ_o ve μ değerleri sırasıyla 0,2-0,5 ve 0,2-1,0 olarak belirlenmiştir.

Yığma yapılarda ASTM C1531-03 'ye uygun olarak gerçekleştirilen yerinde kayma deneyinde, uygun olarak belirlenen deney seti, kuvvet uygulanan kompresör, kuvvet ölçer ve deplasman tespit eden transducer'den oluşur. Deneyin uygulanmasında, ölçüm yapılacak bölgenin iki tarafı açılır ve bir taraftan yatay kuvvet (P_y , kN) uygulanır. Bu uygulama sırasından diğer tarafa yerleştirilen transducer deplasman kaydetmeye başladığı andaki kayma gerilmesi, yapıdaki kayma dayanımı olarak tespit edilmiş olur[58].

2.2.3 Çekme Dayanımı

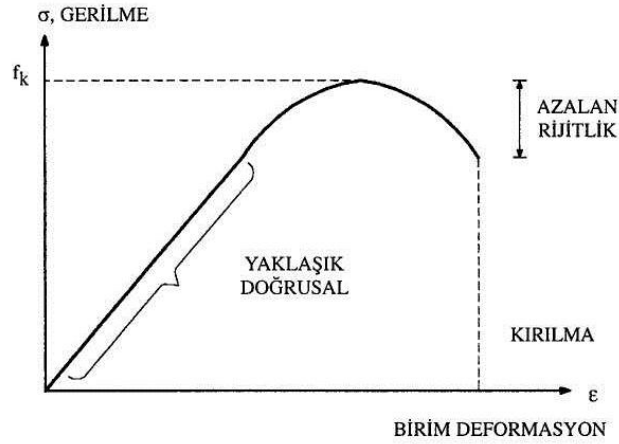
Yığma yapı malzemeleri oldukça kırılığandır (gevrek) ve genellikle ani çekme kırılmalarına karşı büyük risk taşır. Özellikle tarihi yığma yapılarda, çekme gerilmeleri daha çok kubbe, kemer ve tonoz gibi eğilmeye yatkın elemanlarda oluşur. Kayma gerilmeleri de duvar ve

sütun gibi elemanlarda diyagonal çekme gerilmeleri oluşturur. Nemden ve ısı değişimlerinden dolayı uzama ve kısalma gibi şekil değiştirmeler de önemli ölçüde çekme gerilmesi oluşmasına neden olur.

Tarihi yığma yapılarda doğrudan aksenal çekme gerilmeleri etkisinde kalan elemanlara ender rastlanıldığı için yapı elemanlarında eğilmeden dolayı oluşan çekme gerilmeleri, aksenal çekme gerilmelerine göre daha fazla önem taşır. Araştırmalar yığma yapı elemanlarında eğilmeden dolayı oluşan çekme gerilmesi dayanımının malzemenin nem oranı, harcın yoğunluğu ve blokların yüzey dokusu ile doğrudan ilgili olduğunu ortaya çıkarmıştır. Harç kalınlığı da daha fazla dayanım sağladığı için ince birleşim noktaları malzemenin çekme dayanımını artırmaktadır [43].

2.2.4 Elastisite Modülü

Yığma yapı elemanlarının elastisite modülü gerilme-birim deformasyon arasında doğrusal olmayan bir ilişki ile tanımlanır. Gerilme-birim deformasyon (σ - ϵ) eğrisinin şekli betonda olduğu gibi paraboliktir. Ancak Şekil 2.3'te de gösterildiği gibi, çok küçük gerilme düzeylerinde S şeklindeki eğriyle teğet modülünde artma eğilimi görülmektedir.



Şekil 2.3 Yığma yapı elemanın elastisite modülünü gösteren gerilme-birim deformasyon eğrisi Gerilme-birim deformasyon eğrisinden de görüldüğü gibi, ilk sertleşme bölgesinden sonra, eleman üzerindeki yük artıp harcın sıkışmasıyla dayanım daha da artmakta ve bunun sonucunda elastisite modülü de artmaktadır. Yığma yapı elemanının elastisite modülünü (E_m) etkileyen faktörler öncelikle yığma yapı elemanını oluşturan bileşenler, yani taş veya tuğla blokları ile bağlayıcı malzeme harcın elastisite modülüdür.

Yığma yapı elemanı elastisite modülünün doğrusal elastik olamayan özelliklerinden dolayı, tarihi yapıların analizini yapan mühendis ya da mimar, matematiksel modelleme ve strüktürel analiz sırasında E_m değerini kullanırken çok dikkat etmelidir. Yapılan çeşitli araştırmalar ve laboratuvar deneyleri sonucunda yığma yapı elemanının elastisite modülü E_m aşağıdaki denkleme göre de hesaplanabilir[40].

$$\text{Beton yığma halinde: } E_m = 1000 f_k [62] \quad (2.9)$$

$$\text{Kil tuğla yığma halinde: } E_m = 750 f_{br} [62] \quad (2.10)$$

Bağıntı 2.9 ve 2.10'da, f_k ve f_{br} değeri, yığma yapı elemanının karakteristik basınç gerilmesini (MPa) göstermektedir. E_m değerinin, gerilme-birim deformasyon diyagramının doğrusal bölümünden elde edildiği kabul edilmektedir.

Kaynaklarda yığma yapı elemanının f'_m basınç mukavemeti ve E_m elastisite modülü arasındaki ilişki için farklı bağıntılar önerilmektedir. Bu, kısmen malzeme özelliklerinin istatistiksel dağılımının çok geniş olmasından kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda, basınç deneylerinde şekil değiştirmeleri ölçmek için benimsenen yöntemlerin değişik olmasıyla da ilgilidir. Birçok araştırmacı beton bloklar kil tuğla elemanlar için aşağıdaki bağıntıları önermektedir:

Beton yığma halinde[40]:

$$E_m = 500f'_{bl} \text{ ile } 1500f'_{bl} \quad (2.11)$$

Tuğla yığma halinde [40]:

$$E_m = 500f'_{br} \text{ ile } 1000f'_{br} \quad (2.12)$$

Burada f'_{bl} 've f'_{br} , sırasıyla, beton ve kil tuğlanın basınç mukavemetlerini göstermektedir. Bağıntı (2.11) ve (2.12) ile verilen değerlerden ve kaynaklardan, sonlu eleman analizlerinde çok geniş aralıkta değerler kabul edilebileceği belirlenmektedir.

$$E_m = 100f'_{br} \text{ ile } 1000f'_{br} \text{ kabul edilebilmektedir.} \quad (2.13)$$

Ayrıca farklı tipteki harçlar, farklı tip bloklar ve farklı örgü biçimi ile işçilik için elastisite modülü değerlerinin $100f'_{mr}$ 've $1000f'_{mr}$ arasında değişmekte olduğu anlaşılmaktadır.

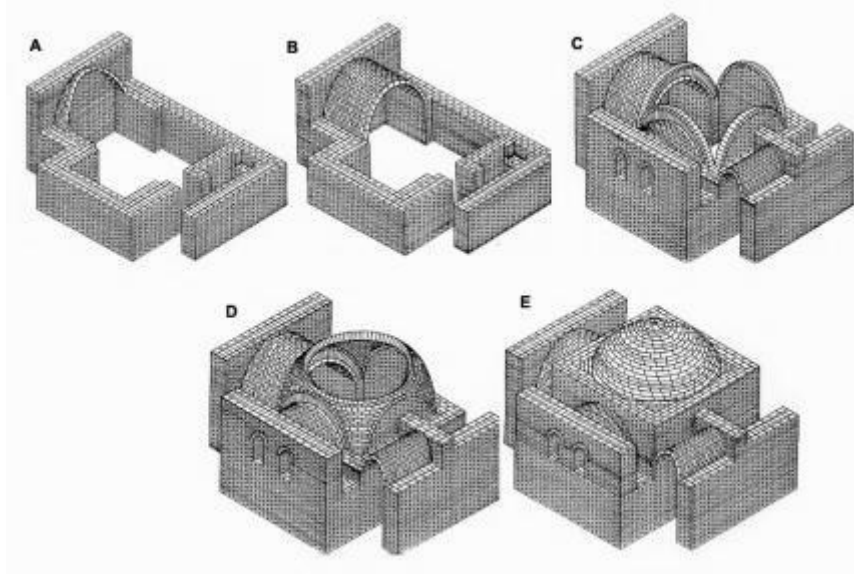
Elastisite modülü genellikle malzeme laboratuvarlarında, numuneler üzerinde statik basınç yükleri altında, yapılan kırma deneyleriyle elde edilir. Ancak tarihi yapılarda, numune alınmasının yapıya zarar verme ihtimali olduğu için elastisite modülünün belirlenmesi özel

olarak geliştirilmiş yöntemler kullanılır. Bu yöntemlerden en basiti ultrasonik araçlarla yerinde yapılır. Bunun için taşıyıcı elemanın ölçülebilen bir kalınlığı boyunca, elemanın içine verilen ses hızı ölçülür. Malzemenin özgül ağırlığı ve elastisite modülü E_d belirlenebilir[55].Diğer bir yöntemde ise mevcut yapılarda, elastisite modülünü ölçmek için flatjack aletinin kullanılabileceği belirtilmektedir. Deneyin uygulanmasında, öncelikle deplasman ölçüleceği pimler, şablona uygun olarak yapıştırılır, başlangıçtaki uzaklık (L_0 , mm) ve ölçülür. Flatjack plakasını yerleştirmek için duvarda oyuk açılır. Meydana gelen boy değişiminin belirlenmesi için pimler arasındaki mesafe (ΔL , mm) tekrar ölçülür. Açılan bölgeye plak yerleştirilir ve plak içerisine yağ pompalanarak kuvvet uygulanır. Belirli aralıklarda tekrarlanarak kuvvet-deplasman ölçümleri yapılır. Deneylerden gerilme ve şekil değiştirmeler, elastisite modülü (E , MPa) belirlenir[58].

2.3 Yığma Yapı Elemanları

Doğal taş, tuğla vb. blokların, harç ya da kenetle birleştirilmesi ile elde edilen yapıya “kagir” adı verilir. Kagir bir yapının taşıma gücü, yapımında gösterilen özenle ve yapım tekniği ile geniş aralıkta değişir ve çok farklı davranış gösterebilir. Taşıma gücü yapım tekniğine bağlı olduğu kadar, yapıldıktan sonra, sertleşme süreci içindeki çevreden gelecek etki biçimlerine de bağlıdır.

Geleneksel yapılarda taşıyıcı sistemi oluşturan elemanlar düşey taşıyıcı elemanlar, yatay veya eğrisel örtü elemanları ile sağlanmıştır. Yığma yapıyı oluşturan bloklar basınca dayanıklı olduğu için yapı taşıyıcı sistemi basınç alacak şekilde biçimlenmiştir. Şekil 2.4’de yığma yapı taşıyıcı sistemin yapım aşamaları görülmektedir.

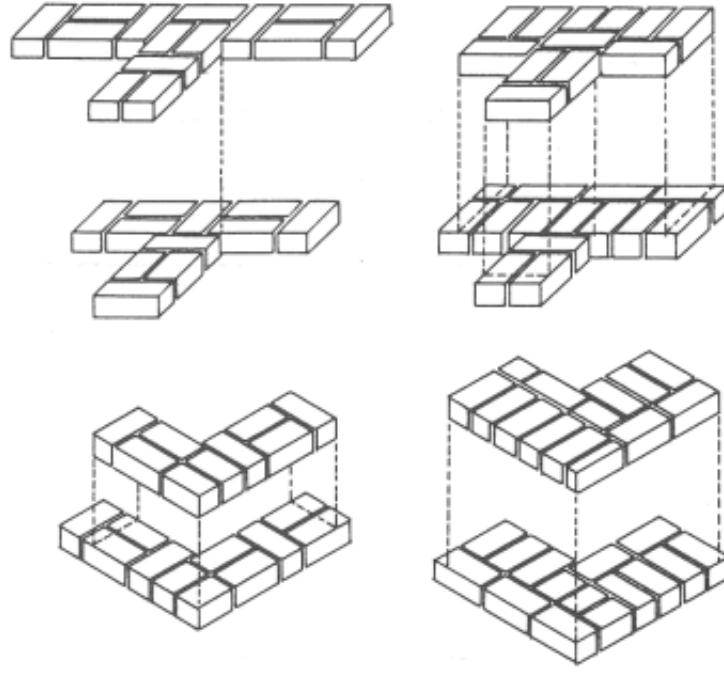


Şekil 2.4 Yığma taşıyıcı sisteminin yapım aşamaları a,b,c,d,e [63]

2.3.1 Duvar

Duvar, mimari mekânı sınırlayan, üzerine mekân örtüsünden ve deprem gibi dış etkilerle gelen yükleri zemine ileten sürekli elemandır. Duvar boyutlarını bu etkiler belirler. Yığma bloklar ile örülen duvarlarda, iki tabakanın derzleri üst üste gelmemeli, duvar yüksekliğince oluşturulan düşey derz 45^0 açı yapmamalıdır [64].

Kalın bir yığma kâgir duvar, dolu ya da dış duvarlar arası moloz taş ve harçla dolu sandık duvar şeklinde yapılmış olabilir [65]. Dolu duvar yapımında; tuğla ve taş blokları yatay dizilir (Şekil 2.5). Zayıf dayanımlı taşlarla oluşturulan duvarlarda taşların açılı ya da taş ve tuğlanın almaşık dizildiği görülür (Şekil 2.6). İki yüzü arası dolu duvarlar, duvarın düşey yükler altında duvarın şişip açılmasını önlemek ve burkulma boyunu azaltmak için belli seviyelerde uygun hatıllarla bağlanmalıdır [66].



Şekil 2.5 Tuğla duvar örgü kuralları [63]



Şekil 2.6 Taşların açılı ya da tuğla ile alması dizilimi [66]

Yığma yapılarda, duvarın taşıyabileceği yük miktarı ve davranışı, duvar kalınlığına ve düşey ve yatay narinliğine bağlıdır. Düşey narinlik, λ , duvar yüksekliğinin kalınlığına oranı, yatay narinlik duvarın mesnetlenmemiş uzunluğunun kalınlığına oranı olarak tanımlanır [64]. Düşey narinliği; 10' u geçmeyen tuğla duvarların ve 5'i geçmeyen kerpiç duvarların, yatay narinliği 18'i geçmeyen tuğla duvarların ve 9'u geçmeyen kerpiç duvarların depremde iyi davrandığı gözlemlenmiştir [67].

Duvarların kalın ya da ince olarak sınıflandırılması narinliklerine göre yapılmaktadır [68].

Kalın: $\lambda < 6$

Orta: $\lambda = 6 - 8$

İnce: $\lambda > 8$

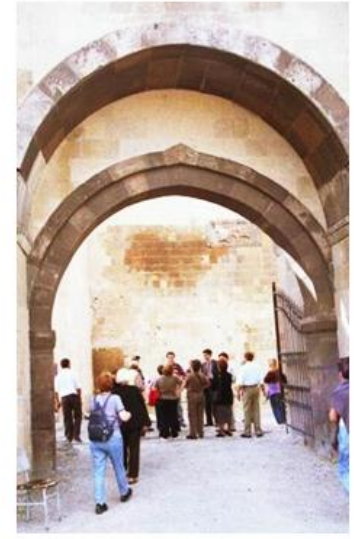
Tarih boyunca taş, tuğla ve kerpiç gibi küçük bloklarla oluşturulan yapı duvarlarında kapı ya da pencere boşluklarını oluşturmak ve boşluk üzerindeki duvarın desteklenmesi için boşluk açıklığının büyüklüğüne bağlı olarak; blok taş, ahşap ya da demir lento, bindirmeli kemer ve kemer kullanılmıştır (Şekil 2.7). Bu yöntemlerde mesnetlerden beklenen davranış farklıdır [65].



Lento



Bindirmeli Kemer

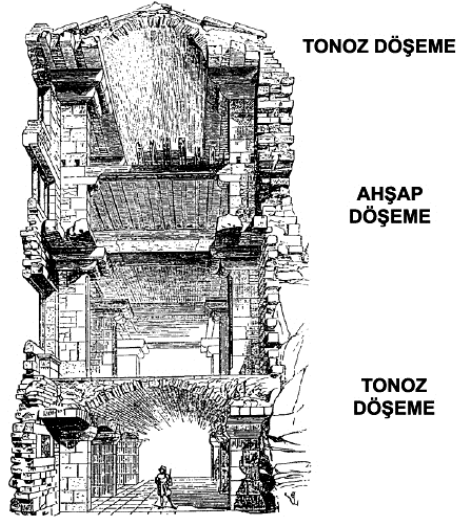


Kemer

Şekil 2.7 Duvarda boşluk oluşturma [64].

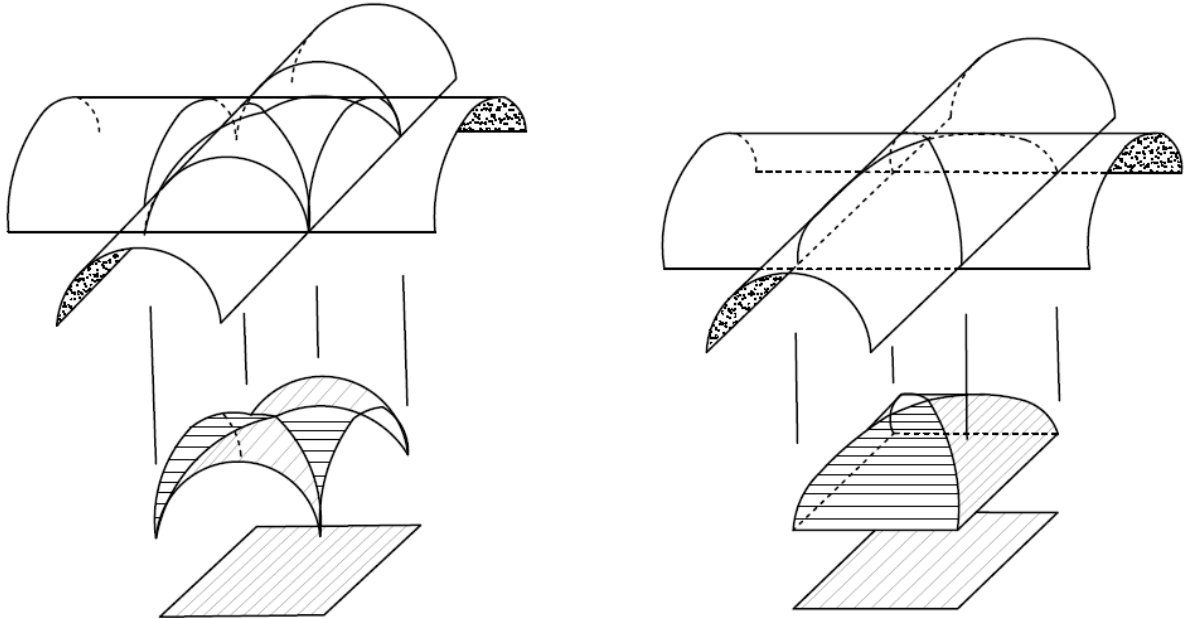
2.3.2 Döşeme

Yığma kagir duvarlar arasını örten döşeme ve çatı; ahşap kiriş ve mertekler, ahşap ya da demir kırıli volta döşeme, yerinde dökme betonarme döşeme ve tonoz ve kubbeler ile yapılır [64](Şekil 2.8).



Şekil 2.8 Yığma yapılarda çeşitli döşemeler [69]

Tonoz, tek ya da iki doğrultuda eğrilikli olarak dikdörtgen planlı mekanların örtülmesinde kullanılmıştır. İlk olarak Mezopotamya ve Mısır'da birbirinden bağımsız kemerlerin yan yana konması ile tonoz oluşmuştur. Tonoz geometrisi davranış değerlendirilmesi açısından önemlidir [70]. Tonozların kesiştirilmesi, radyal sıralanması ya da nervürler arası tonozla kapatılarak kare ya da dikdörtgen mekanlar üzeri tonoz kubbeler ile örtülmüştür. Tonozların kesiştirilmesi ile çapraz ya da manastır tonozu oluşturulmuştur (Şekil 2.9). Tonozlarla oluşturulan kubbelerde tonozlar aynı geometrili olabildiği gibi farklı geometrili de yapılmıştır [66].



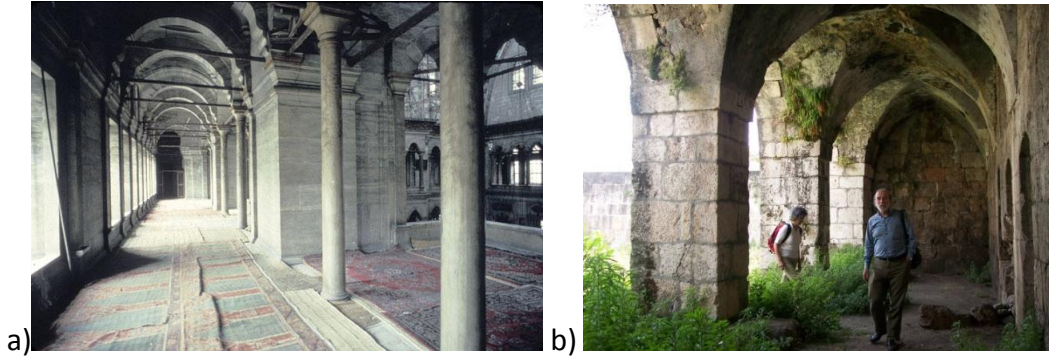
Şekil 2.9 Çapraz ve Manastır tonozu [66]

Kubbe, bir meridyen eğrisinin (kemer) bir eksen etrafında döndürülmesiyle oluşturulan dönel yüzeydir. Meridyen eğrisi olan kemer geometrisi daire, parabol ya da elips parçası olabilir [69]. Kare planların örtülmesinde pandantif kubbe ya da pandantif, bindirmeli üçgen, tromp ve üçgenli kuşak şeklinde geçiş elemanları kullanılmıştır [66]

2.3.3 Ayak ve Sütunlar

Mekan örtü yüklerinin tekil noktalardan iletilmesi halinde, düşey taşıyıcılar sütun ya da ayak ile oluşturulur.

Sütun enkesiti tek parça taştır. Bir sütun düşeyde tek bir blok taşla ya da üst üste yerleştirilmiş birkaç taş ile oluşturulur (Şekil 2.10a). Sütun enkesiti genellikle kare, çokgen ya da daire şeklindedir. Ayaklar ise, yığma blokların örülmesiyle oluşturulur (Şekil 2.10b). Mekân örtüsünden iletilen yüklerin iletiliş biçimlerine göre çeşitli şekilde biçimlenen ayakların etkili yüklerle karşı davranışı duvarlar ile aynıdır [66].



Şekil 2.10 Ayak ve sütun[66]

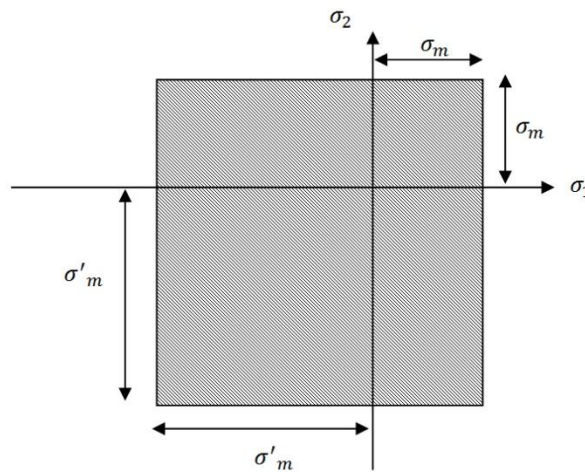
KIRILMA VE PLASTİSİTE MODELLERİ

Kırılma ve plastik hale geçişte çeşitli etkileri göz önünde bulunduran hipotezleri üç grupta incelemek mümkündür[71].

3.1 Gerilme hipotezleri

3.1.1 En Büyük Normal Gerilme hipotezi

En büyük Normal Gerilme hipotezine göre tehlikeli duruma geçişte en önemli rolü σ_1 gerilmesi üstlenir. σ_1 gerilmesine göre daha küçük olan σ_2 ve σ_3 gerilme değerlerini dikkate almayan bu hipotez en eski hipotezlerdendir ve Galilei, Leibniz, Navier ve Lamé tarafından ileri sürülmüştür. Bu hipotezin gösterdiği sınır koordinat düzlemine paralel olan bir dikdörtgen prizmadır (Şekil 3.1)[71].



Şekil 3.1 En büyük Normal Gerilme hipotezine göre gerilme alanı [71].

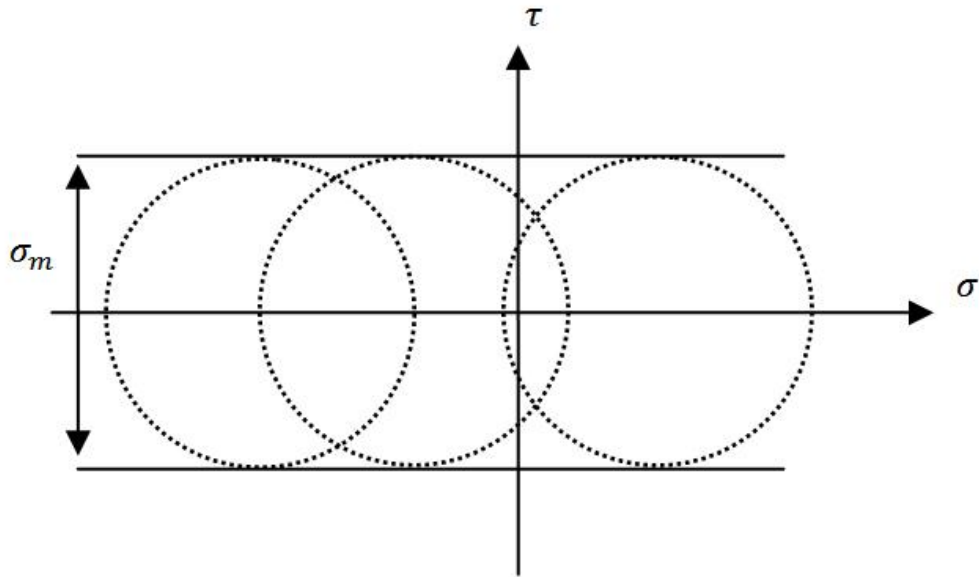
3.1.2 En Büyük Kayma Gerilmesi Hipotezi

En büyük kayma gerilmesi hipotezi plastik hale geçmede veya kırılmada esas rolü kayma gerilmesine vermektedir. $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ olmak koşuluyla, kıyaslama

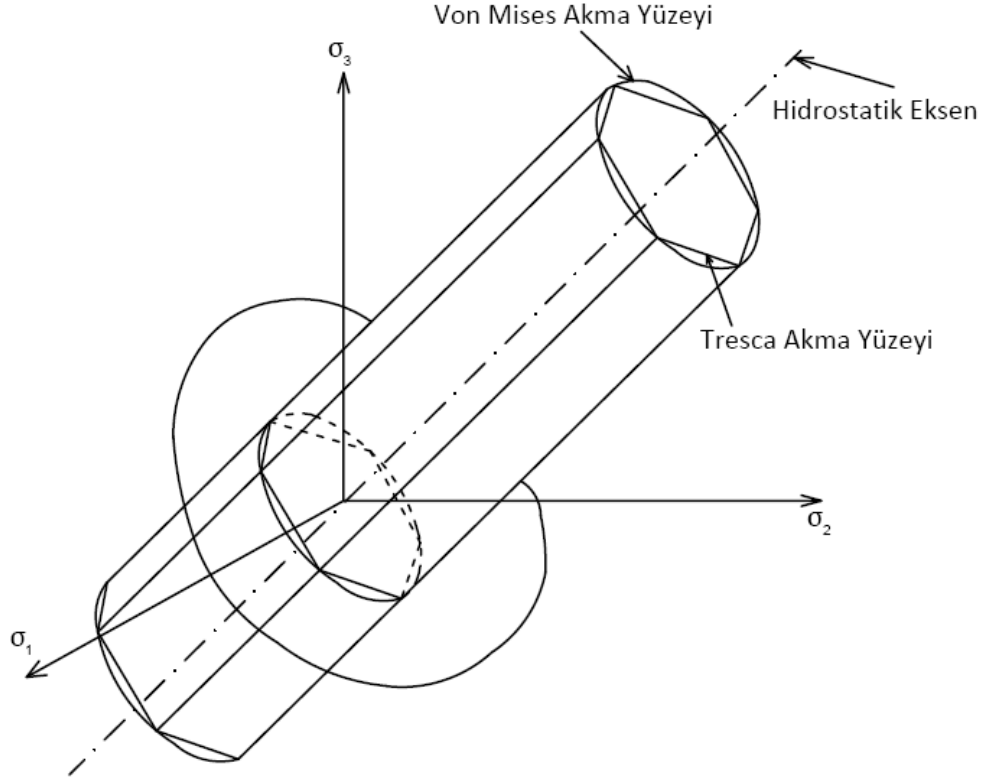
$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0 \quad (3.1)$$

denklemleri yapılacaktır.

Burada $\sigma_1 - \sigma_3$ en büyük kayma gerilmesinin iki katını göstermektedir. Hipotez en küçük ve en büyük normal gerilmeleri ele alırken, ortanca asal gerilme değeri malzeme davranışını ifade ederken önem vermemektedir. Bu koşullar Mohr daireleri ile gösterilirse, Mohr dairesinin merkezi nerede olursa olsun çapı sabit olacağından zarflar σ eksenine paralel iki doğrudan ibaret olur (Şekil 3.2). Bu hipotezin esasları çok basittir ve Tresca hipotezi olarak bilinmektedir. Akma yüzeyi 3 boyutlu olarak Şekil 3.3'te gösterildiği gibidir.



Şekil 3.2 Tresca hipotezinin Mohr Daireleri Yöntemi ile gösterimi [71]



Şekil 3.3 Tresca akma yüzeyi[72]

Tarihsel olarak metaller için birleşik gerilme durumu için ilk akma kriteridir. Akmanın maksimum kayma gerilmesine (kritik bir k değerine) ulaştığı noktada oluştuğunu öne süren Tresca tarafından 1864 yılında ortaya atılmıştır. Tresca bu kriteri şöyle ifade etmiştir. Kesit ikili olarak ele alınan asal gerilmeler arasındaki farklardan mutlak değerce en büyük olanın yarısına eşittir. (Bağıntı3.2)

$$\max \left\{ \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right|, \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right|, \left| \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \right| \right\} = k \quad (3.2)$$

Bu denklemdaki k malzeme sabiti basit çekme deneyinden elde edilir.

$$k = \frac{\sigma_0}{2} \quad (3.3)$$

$\sigma_1 - \sigma_2$ düzleminde σ_1 ve σ_2 'nin izafi büyüklüğü ve işaretine bağlı olarak değişen bölgelerde altı farklı ifade vardır. Birinci çeyrekte $\sigma_1 - \sigma_2$ ile σ_1 eksenlerinin açığortay doğrusu arasında gerilmelerin sırası şunu gerektirmektedir(Şekil 3.4).

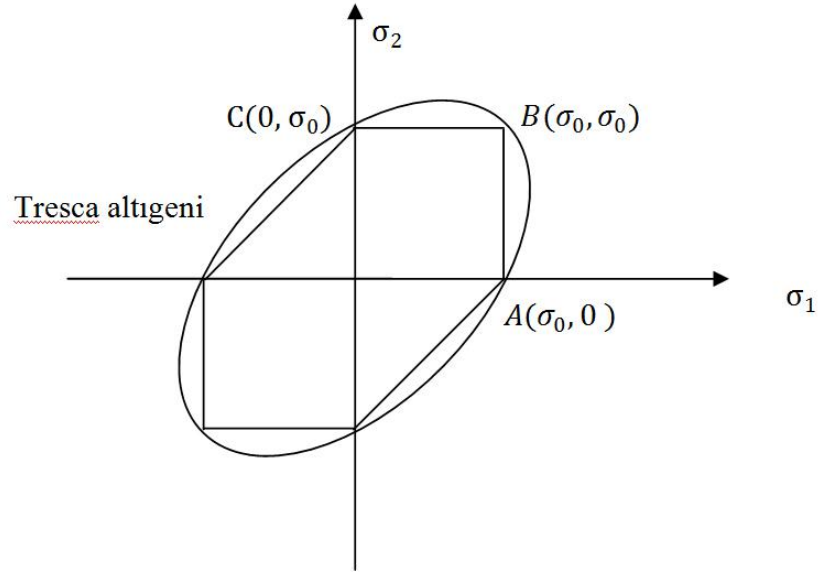
$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1}{2} \quad (3.4)$$

Bundan dolayı akma koşulu $\sigma_1 = \sigma_0$ 'a dönüşmekte ve AB doğru parçasını oluşturmaktadır.

Aynı bölgede açıortay ile σ_2 eksenini arasında

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_2}{2} \quad (3.5)$$

olur ve akma koşulu $\sigma_2 = \sigma_0$ olur ki bu da BC doğru parçasını oluşturur.



Şekil 3.4 Tresca altıgeni

3.1.3 Coulomb Kayma Gerilmesi Kriteri

Bu hipotez Tresca hipotezinin eksik taraflarını tamamlayan ve biraz genişletilmiş halidir. Burada cismin mukavemetinin sona ermesinde yine esas olarak kayma gerilmesi alınmakla birlikte, kayma gerilmesinin etkidiği yüzeydeki normal gerilmelerinde iç sürtünme nedeniyle bir rolü olacağı düşünülmektedir. Bu hipotezde, en büyük kayma gerilmesinin iki katı olan $\sigma_1 - \sigma_3$ farkının sabit olmadığı, bunun $\sigma_1 + \sigma_3$ toplamının lineer bir fonksiyonu olduğu düşünülmektedir.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = a - b (\sigma_1 + \sigma_3) \quad (3.6)$$

Burada a cismin kohezyonu, b de iç sürtünmeyi karakterize eden boyutsuz bir çarpandır. Eğer b sıfır değerini alırsa bağıntının (3.1)'e dönüştüğü görülmektedir. σ_m çekme mukavemeti ve σ'_m basınç mukavemeti olur ve a, b birbirinden farklı kabul edilirse, çekme mukavemeti

$$\sigma_m - 0 = a - b (\sigma_m + 0) \quad (3.7)$$

ve basınç mukavemeti için ise

$$0 - (-\sigma'_m) = a - b (0 + (-\sigma'_m)) \quad (3.8)$$

şartlarından

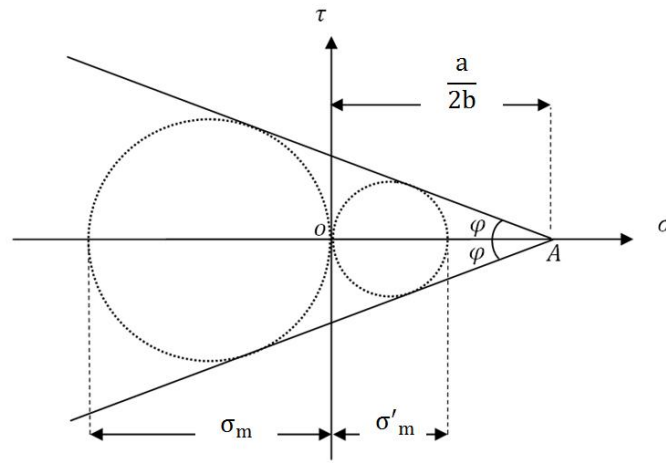
$$a = \frac{2 \sigma_m \sigma'_m}{\sigma_m + \sigma'_m} \quad (3.9)$$

$$b = \frac{\sigma'_m - \sigma_m}{\sigma_m + \sigma'_m} \quad (3.10)$$

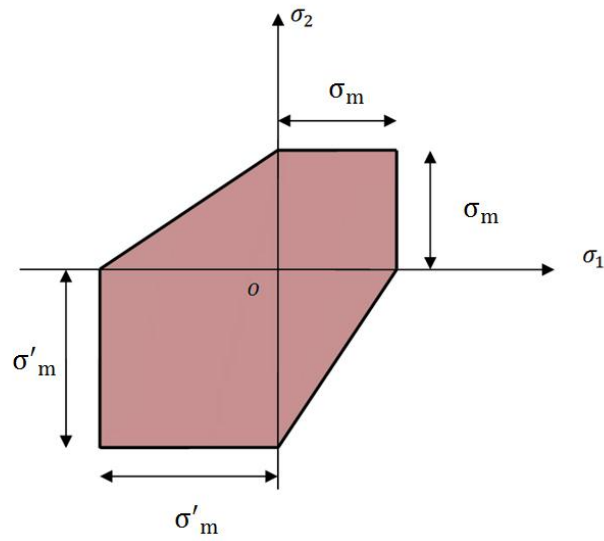
şeklinde elde edilir. Ayrıca doğruların kestiği a noktasının apsisi ise

$$OA = \frac{a}{2b} = \frac{\sigma_m \sigma'_m}{\sigma'_m - \sigma_m} \quad (3.11)$$

değerini alacaktır (Şekil 3.5, Şekil 3.6).



Şekil 3.5 Mohr kriterinin grafik gösterimi



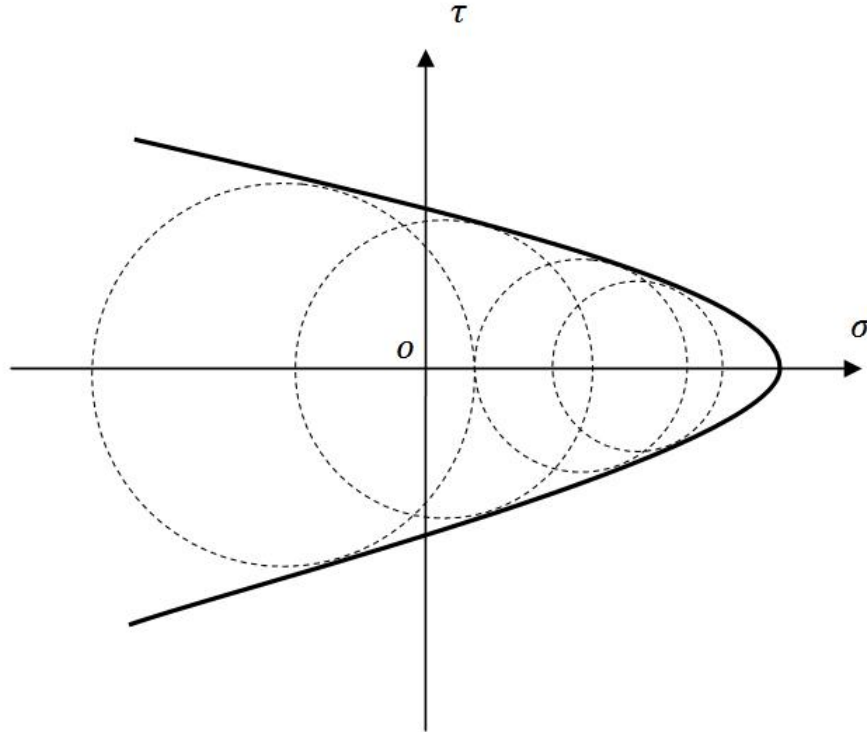
Şekil 3.6 Mohr kriterinin gösterdiği bölge

3.1.4 Mohr Genel Kayma Kriteri

En büyük kayma gerilmesi hipotezinin gevrek cisimler için uygun olmadığı deneysel çalışmalar sonucunda anlaşılmıştır. Mohr daireleri zarfı iki doğru parçasından oluştuğunda her durumu kapsamamaktadır. Bu durumu genelleştirmek için Mohr, en büyük kayma gerilmesini, üzerine etkileyen normal bağlamıştır ancak bu bağıllık lineer değildir.

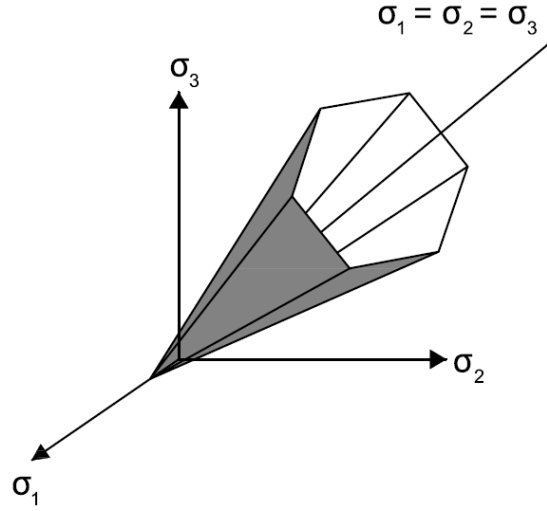
$$\sigma_1 - \sigma_3 = F(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (3.12)$$

Mohr'a göre yukarıdaki denklemde olduğu gibi genel bir fonksiyonla ifade edilebilir. Mohr dairelerinin doğru olmayan eğrisi Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Mohr kriterinin genel hali

Bu eğri her malzeme için karakteristik bir özelliğe sahiptir. Ayrı ayrı deneylerle bulunabilmektedir. Mohr kriterinin genel halinden çıkarılacak önemli sonuç eğrinin basınç tarafının açık olmasıdır. Bundan dolayı cisimler sonsuz büyüklükte hidrostatik basıncı taşıyabilir sonucuna varmak mümkündür, ancak bu durum doğadaki gerçek malzeme davranışı ile çelişkilidir. Bu nedenle malzemenin taşıma kapasitesi bazı kesme yüzeyleri ile sınırlandırılmıştır.



Şekil 3.8 Mohr Coulomb akma yüzeyi

3.2 Şekil Değişirme Hipotezleri

Şekil değiştirme hipotezlerine göre akma veya kırılmaya şekil değiştirmenin sebep olduğunu esas alan hipotezlerdir.

3.2.1 En Büyük Uzama veya Kısılma Hipotezi

Günümüzde geçerliliğini yitirmiş olan hipotez Mariotte, St. Venant ve Poncelet tarafından ileri sürülmüştür. Üç eksenli zorlanmalarda tehlikeli halin, en büyük uzama veya kısılmanın bir eksenlideki değere eşit olduğu zaman doğacağı kabul edilmektedir. Örneğin mutlak değerce en büyük asal boy değişimi uzama olduğu durumda,

$$\sigma_1 - \nu (\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_m \quad (3.13)$$

mutlak değerce en büyük asal boy değişimi kısılma olduğu durumda ise,

$$\sigma_3 - \nu (\sigma_1 + \sigma_2) = -\sigma'_m \quad (3.14)$$

Bağıntısı ile gösterilmektedir.

3.2.2 Genel Şekil Değişirme Hipotezi

Burada ε_{\max} ve ε_{\min} yerine, üç asal uzama oranının bileşkesi olan ε_d ile hesap yapılır.

$$\varepsilon_d = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2} \quad (3.15)$$

Eğer bu değer tek eksenlideki karşıtına eşit olursa, iki hali birbiri ile kıyaslanabilir.

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \frac{2\nu(2-\nu)}{1+2\nu^2}(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3) = \sigma_m^2 \quad (3.16)$$

$\sigma_3 = 0$ düzlem hali için

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \frac{2\nu(2-\nu)}{1+2\nu^2}(\sigma_1\sigma_2) = \sigma_m^2 \quad (3.17)$$

olur. Elipsin yarıçapları a ve b olmak üzere,

$$a = \sqrt{\frac{1+2\nu^2}{1+3\nu^2-2\nu}} \sigma_m \quad (3.18)$$

$$b = \sqrt{\frac{1+2\nu^2}{1+\nu^2+2\nu}} \sigma_m \quad (3.19)$$

ile ifade edilebilir.

Bu hipotezin en belirgin özelliği plastik özelliği fazla cisimlerde, iki eksenli zorlanmalar için tatmin edici sonuçlar vermesidir.

3.3 Enerji Hipotezleri

Bu hipotezler, malzemenin plastik hale geçme veya mukavemetinin yenilmesinde, şekil değiştirme enerjisinin veya bunun bir kısmının rol aldığını kabul eder. Enerji belirli bir değere ulaşıncaya cisim sınır duruma ulaşmış demektir. Enerjinin bu belirli değeri de tek eksenli sınır gerilmesindeki enerjidir [71].

3.3.1 Toplam Şekil Değiştirme Enerjisi Hipotezi

Beltrami tarafından ortaya konan bu hipoteze göre, kıyaslama her iki zorlanma şekil değiştirme enerjilerinin eşit olması kabul edilerek yapılır.

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3) = \sigma_m^2 \quad (3.20)$$

Denklemin gerilme uzayında elipsoid gösterir.

$\sigma_3 = 0$ düzlem hali için

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2) = \sigma_m^2 \quad (3.21)$$

şeklini alır. Bu hipotez ancak bazı özel şartlarda gevrek olmayan malzeme için kullanılır.

Gerilme düzleminde oluşan elipsin yarıçapları ise

$$a = \sqrt{\frac{1}{1-\nu}} \sigma_m \quad (3.22)$$

$$b = \sqrt{\frac{1}{1+\nu}} \sigma_m \quad (3.23)$$

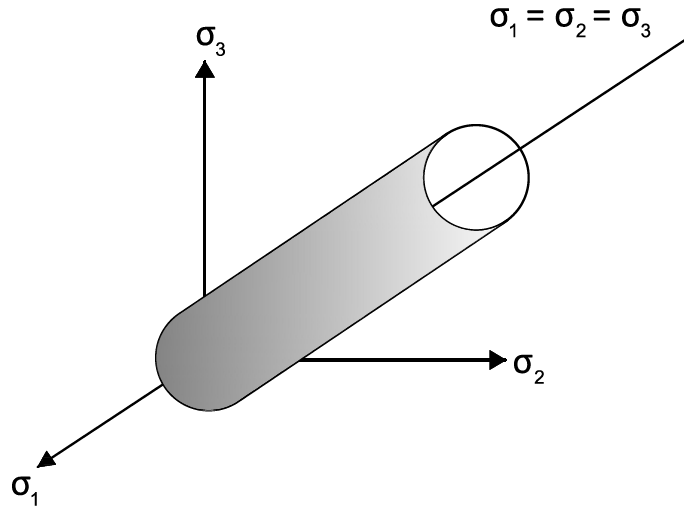
değerini alır.

3.3.2 Biçim Değiştirme Enerjisi Hipotezi

Enerji esasına dayanan bir hipotez kurulurken hacim değiştirme enerjisini hesaba katma doğru bir yaklaşım değildir. Enerjinin daha çok cismin geometrisini değiştirmeye sarf edilen kısmı, yani biçim değiştirme enerjisi kıyaslamada esas alınmalıdır.

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3) = \sigma_m^2 \quad (3.24)$$

Denklemin her iki tarafı açık olan bir silindirin yüzeyini gösterir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Von-Mises Akma yüzeyi

Biçim değiştirme enerjisi hipotezi düzlemsel gerilme hali için,

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - (\sigma_1\sigma_2) = \sigma_m^2 \quad (3.25)$$

Denklemin ile tarif edilen bir elips ile temsil edilir. Elipsin yarıçapları a ve b ise

$$a = \sqrt{2} \sigma_m \quad (3.26)$$

$$b = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_m \quad (3.27)$$

değerini alır.

Maksimum kayma gerilmesi kriteri basit olmasına rağmen orta asal gerilmelerin etkisini yansıtmaz. Sekizgen yüzeyli kayma gerilmesi veya şekil değiştirme enerjisinin bozulması basınca maruz olmayan malzemelerin akmasına sebep olur. Bu durumda bunlar temel bir değişken olarak maksimum kayma gerilmesine alternatif bir seçim olarak uygun olur. Von Misses akma kriteri 1913 yılında bu alternatif üzerine kurulmuştur. Bu kriterde (sekizgen yüzeyli) kayma gerilmesinin kritik olan k değerine ulaştığı zaman akmanın başladığı öne sürülür.

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3}J_2} = \sqrt{\frac{2}{3}k} \quad (3.28)$$

Daha basit haliyle,

$$f(J_2) = J_2 - k^2 = 0 \quad (3.29)$$

Ya da (3.29) bağıntısı asal gerilmeler cinsinden şöyle yazılabilir.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 6k^2 \quad (3.30)$$

Bu bağıntılarda k , yalnız kesme etkisinde akma gerilmesini göstermektedir. Tek eksenli gerilme deneyinde akma $\sigma_1 = \sigma_0, \sigma_2 = \sigma_0, \sigma_3 = 0$ olduğu zaman gerçekleşmektedir. Bu değerler denklemde yerine yazılırsa $k = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$ şeklinde olur.

Daha önceki ifadelerden basınca maruz olmayan izotrop malzemelerde akma kriterinin genel bir forma sahip olması gerekir. Bu şartlara en uyumlu eşitlik yarıçapı $\rho = \sqrt{2}k$ ve sapma düzlemiyle kesişimi bir daire olan dairesel silindiri ifade eder.

Von Misses kriteri için kullanılan eşitlikteki k ile tresca kriteri için kullanılan eşitlikteki k sabitleri kayma gerilmesinde akma gerilmesidir. Ancak iki kriterdeki k katsayıları arasında, basit çekmede akma gerilmesi olan σ_0 'a uyarlanırsa $k = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,15$ şeklinde olur. Grafik olarak Von Misses dairesi Tresca altıgenini çevreler. Bununla birlikte bu iki kriter sadece kayma gerilmesi halinde kullanılırsa(aynı k değeri) daire altıgen içinde kalır. İki eksenli gerilme durumu için Von Misses kriteri $\sigma_3 = 0$ koordinat düzlemi ile silindirin kesişimidir.

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - (\sigma_1\sigma_2) = \sigma_0^2 \quad (3.31)$$

Genel gerilme halinde Von Misses yüzeyi ile $\sigma_x = \tau_{xy}$ düzleminin kesişimi elips denklemdir.

$$\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2 = \sigma_0^2 \quad (3.32)$$

3.3.3 Drucker-Prager Akma Kriteri

Son yıllarda tanecikli ve sürtünen maddelerin davranışlarını inceleyen birçok matematiksel modeller ele alınmaktadır. Bu modeller plastik, visko plastik ve kırılma teorileri gibi çeşitli parçalar içeren betonun mekanik davranışını tanımlayan modellerdir. Beton yapısının analizi için sonlu elemanlar programlarında kullanılan en yaygın model Drucker-Prager akma kriteri olarak başvurulan plastisite modelidir. Bu modelde davranış, hidrostatik basınca ve deviatorik kayma durumuna bağlı olarak ifade edilmektedir.

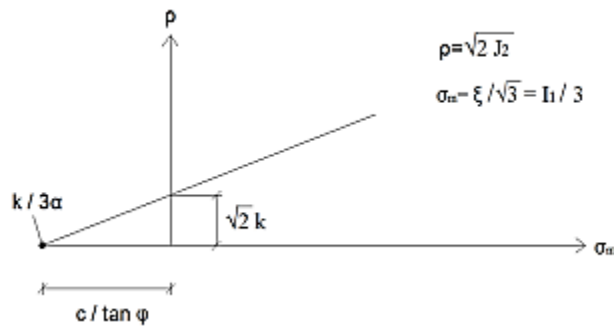
1952 yılında formüle edilen Drucker-Prager kriteri, Von Mises kriterinin geliştirilmiş halidir. Von Mises ifadesinde hasarlı bir parçada hidrostatik bir basıncın etkisi ek bir süre olarak tanımlanır ve daha sonra bu kriter aşağıdaki gibi şekillenir [73], [74].

$$f(I_1, J_1) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (3.33)$$

ξ ve ρ değişkenleri kullanılarak,

$$f(\xi, \rho) = \sqrt{6}\alpha\xi + \rho - \sqrt{2}k = 0 \quad (3.34)$$

Drucker-Prager konisi aynı zamanda Mohr Coulomb Kriterine düz bir yaklaşımdır. Eğer Drucker-Prager dairesi Mohr Coulomb Altıgeninin meridyen gerilmesi koninin içinden geçmek için yapılırsa $\theta = 0^\circ$ olur ve dayanım sabitliği ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir[75].



Şekil 3.10 Basınç bölgesinde Drucker-Prager kriteri

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (3.35)$$

$$k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (3.36)$$

Burada,

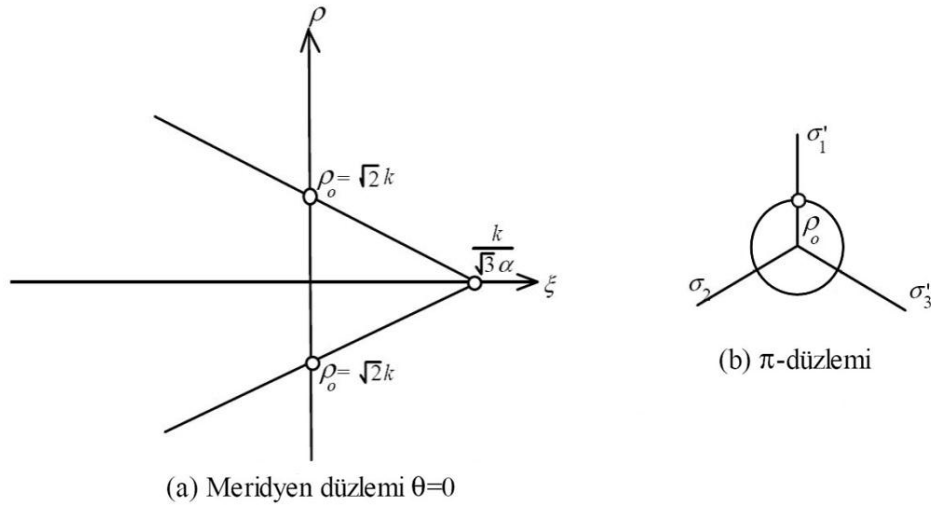
α ve k malzeme katsayılarıdır.

I_1 gerilme tansörünün birinci invariantını (hidrostatik basınç etkisi, hacimsel değişim),

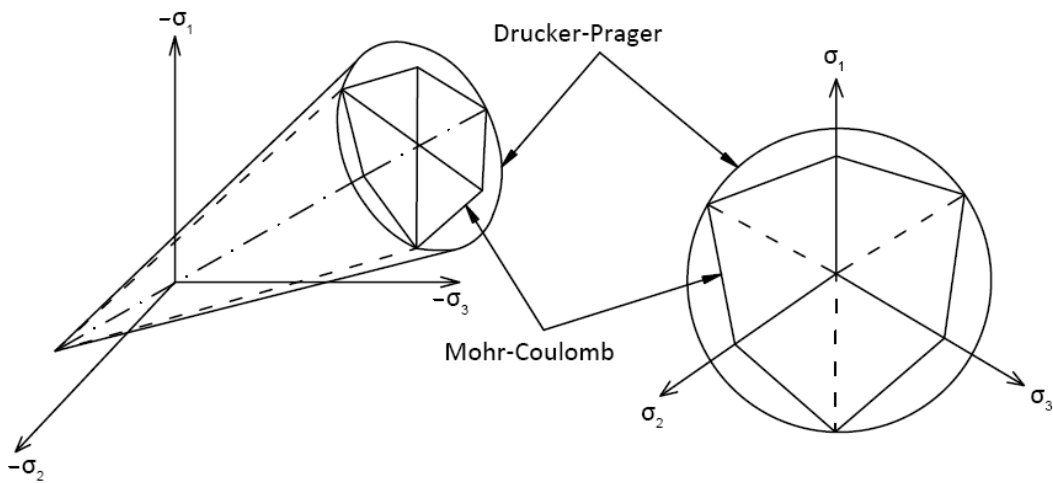
J_2 ise deviatorik gerilme tansörünün ikinci invariantını (Kayma Gerilmeleri Etkisi) göstermektedir.

$\alpha = 0$ olması durumunda kriter, Von-Mises kriteri ile aynı olacaktır. Bağıntı (3.34)'ün gösterdiği akma yüzeyi, asal gerilme uzayında bir dairesel koni olacaktır;

Meridyenleri ve π - düzlemindeki kesiti Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Ayrıca Mohr coulomb kriteri ile Drucker-Prager kırılma yüzeyinin karşılaştırılması a) asal gerilme uzayında b) deviatorik düzlemde olmak üzere Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Meridyenleri ve π - düzlemindeki kesiti



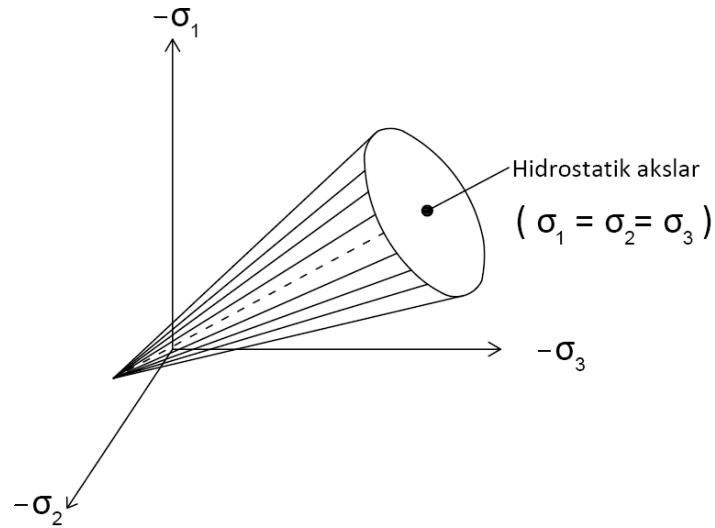
Şekil 3.12 Mohr Coulomb ile Drucker-Prager kırılma yüzeyinin karşılaştırılması a) asal gerilme uzayında b) deviatorik düzlemde [72]

Mohr Coulomb altıgen kırılma yüzeyi bu altıgen kenardan birinin kullanılacağı açıkça bilinen problemler için matematiksel olarak uygundur. Eğer bu bilgi önceden bilinmiyorsa bir sayısal çözümün elde edilmesinde karışıklıklara sebep olabilir. Mohr Coulomb kriterine bir yaklaşım yapılırsa Drucker-Prager kriteri koninin boyutları ayarlanarak Mohr Coulomb kriterine uyarlanabilir. Örneğin Drucker-Prager dairesi eğer Mohr Coulomb altıgeninin zirve noktalarına uyarlanırsa iki yüzey $\theta=60^\circ$ olan basınç meridyeni ρ_c boyunca çakışır (Şekil 3.13). Böylece denklemlerdeki α ve k sabitleri ile c ve ϕ sabitleri ilişkilendirilir.

Burada,

ϕ içsel sürtünme açısı,

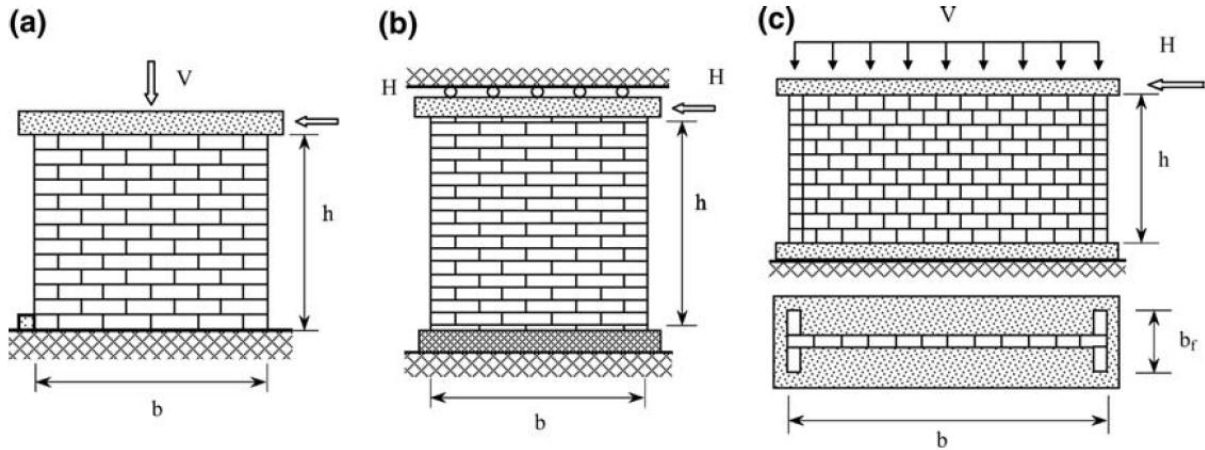
c kohezyondur.



Şekil 3.13 Drucker-Prager Akma Yüzeyi[76]

NÜMERİK MODELLER VE ANALİZLER

Türkiye’de çok sayıda anıtsal özellik taşıyan tarihi yığma yapı mevcuttur. Bu yapılara ilişkin mimari, tarihi ve sanatsal yönden birçok incelemeler yapılmış olmasına rağmen, gerçeğe yakın davranışı belirlemek üzerine, özellikle düşey yük ve yatay yüklerin birlikte düşünüldüğü deneysel ve nümerik çalışma kısıtlı sayıdadır. Başlıca duvar örnekleri, literatürde Oliveira deneyleri, Eindhoven deneyleri, Zürich ETZ deneyleri ve Vicente de Fora deneyleridir (Şekil 4.1). Bu deneylerde düşey ve yatay yükler altında duvar parçalarının yatay yük-şekil değiştirmesi ilişki ve duvarın yük taşıma kapasitesi belirlenmektedir.



Şekil 4.1 Literatürde az rastlanan deneysel çalışmalarda kullanılan duvar örnekleri [1]

Doğa koşullarına ve insan vandalizmine karşı koymuş, yüzyıllardır ayakta kalarak ve bugüne ulaşmış tarihi yığma yapı davranışının, gerilme durumunun ve şekil değiştirmesinin incelenerek yapının mevcut durumunun değerlendirilmesi gerekliliktir. Bu doğrultuda yapılacak çalışmalar ile güncel yapım teknolojilerine ışık tutmak amaçlanmaktadır.

Son yıllarda gelişen bilgisayar teknolojisi sayesinde yapısal analiz tekniklerinin hızlanması, klasik analiz yöntemleri tamamen terk edilerek doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin dikkate alındığı, taş blokları birbirine bağlayan harçta oluşan çatlakların neden olduğu mafsal davranışının göz önüne alındığı plastik analiz yaklaşımı daha yaygın bir hale gelmiştir. Taşıyıcı sistem elemanları taş ve/veya tuğladan oluşan yığma tüm yapıların yapısal analizi oldukça karmaşık bir işlemdir. Öncelikle yapı elemanlarını oluşturan malzemelerin mekanik özellikleri iyi bir şekilde araştırılmalı ve tanımlanmalıdır. Çok sayıda örneği bulunan, taş veya tuğla malzeme ile yapılmış yığma yapıların analizi için, yapının tarihine, kültürel ve sanatsal değerine herhangi bir zarar verilmeden tahribatsız örnek alınmalı ve laboratuvar ortamında özelliklerini incelemek amacıyla deneyler yapılmalıdır. Özellikle büyük önem taşıyan, tarihi yapıların yapısal analizinde karşılaşılan belli başlı sorunların bazıları şunlardır [19].

Yapı malzemelerinin özelliklerinin belirlenmesindeki güçlükler,

- Yapının inşaat süresinin çok uzun olması nedeniyle aynı eleman kesiti içinde bile farklı malzeme kullanılması,
- Geometrik boyutlarla ilgili veri eksikliği,
- Büyük kesitli yapı elemanlarının dışarıdan görünmeyen iç bölümlerinin malzeme özelliklerinin belirsizliği,
- Yapım tekniğinden ve doğal malzeme kullanımından kaynaklanan veri çeşitliliği,
- Yapım sürecinin ve sırasının tam olarak bilinmemesi,
- Çağdaş yapı malzemesi, yapısal analiz, tasarım ve yük şartnamelerinin uygulanamaması.
- Yapıdaki mevcut hasarın neden olduğu dayanım ve stabilite problemlerinin tam olarak saptanamaması,

Yığma yapıların ayrıntılı yapısal analizlerinde genellikle sonlu elemanlar yöntemi kullanılır. Yapısal analiz, yapının tamamı ya da belirli bir taşıyıcı elemanın matematiksel modelinin hazırlanmasıyla başlar. Bu işlem yapılırken, yapının geometrik tanımlanmasının yanı sıra taşıyıcı elemana etkiyen yükler ve elemanın süreklilik şartlarının gözetilmesi modelin gerçeğe yakın olmasında önemli rol oynar. Yapı modeli oluşturulurken analizin amacına uygun bir şekilde ve sayıda sonlu elemanlara ayrılır. Yapıyı oluşturan strüktürel elemanlar, yapının geometrik boyutları, yapı üzerine etki eden yükler, mesnetlerin ve elemanların birleşim

noktalarının hareket yetenekleri ve serbestlik derecesi göz önüne alınarak model içerisinde tanımlanır.

Matematiksel modellemenin amacı, yapının tamamının, belli bir bölümünü oluşturan strüktürel elemanlarının çeşitli yükler veya fiziksel etkiler altında gerçek davranışının gözlenmesini sağlamaktır. Yapının gerçek davranışı genellikle çok karmaşıktır. Bu nedenle, yapıyı modellemek için belirli varsayımlara dayanmak koşulu ile bazı basitleştirmelerin yapılması zorunludur. Yalın ve basit bir model elde etmek için, yapı elemanlarını oluşturan malzemenin mekanik özelliklerinin de uygun bir şekilde tanımlanması gereklidir.

Yapıların çeşitli yük ve çevresel etkilerden dolayı göstereceği davranışı, deformasyonları ve yapı elemanlarında oluşan kuvvetleri doğru bir şekilde elde etmek için yapılacak olan matematiksel modellemenin temel prensipleri şunlardır [77]:

- Analizin amacının ve kapsamının dışına çıkan daha ayrıntılı ve karmaşık modeller hata riskini artırır.
- Matematiksel modeli oluşturan elemanların boyutları seçilirken, analiz için gerekli olan bütün strüktürel etkiler göz önünde bulundurulmalıdır.
- Yapının tamamını tanımlayan büyük bir modelin bir bölümünü ayırarak yapılan model, o bölümün ya da elemanın ayrıntılı davranışını incelemek için yeterli değildir. Ayrıntılı davranış için sınır koşullarını ve bağlantı şekillerini doğru bir şekilde tanımlayan modeller gereklidir.

Bir yapının matematiksel modelini oluşturmak için aşağıda belirtilen temel aşamaları izlemek gerekmektedir:

Malzeme davranışı ile ilgili olarak yapılan kabuller, diferansiyel eleman olarak da bilinen, malzemenin çok küçük bir parçasının davranışına göre belirlenir. Malzeme modelinde, malzemenin gerilme-birim deformasyon özellikleri göz önüne alınır. Sonlu eleman ağının belirlediği sınırları içerisinde kalan her bir eleman için belirlenen malzeme bağıntıları süreklilik şartları dikkate alınarak birleştirildiğinde yapı sistemine ait toplam sistem malzeme matrisi oluşturulur. Son aşamada ise, sınır koşulları, mesnetlerin ve düğüm noktalarının serbestlik dereceleri ve model üzerine etki edecek olan yükler belirlenir. Sonlu elemanlar analizinde öncelikle modeli oluşturan elemanların bireysel davranışı, sonra da matematiksel modelin

tamamının davranışı önemlidir. Kusursuz bir model oluşturmak için malzeme davranışı ve elemanların bireysel davranışının çok iyi incelenmesi gereklidir [43].

Taş veya tuğla yığma yapım tekniği ile yapılmış yapılar için çeşitli analiz yöntemleri uygulanmaktadır. Belli başlı yapısal analiz teknikleri, elastik analiz, plastik deformasyonların da göz önüne alındığı doğrusal-elastik olmayan analiz ve çökme mekanizmasının incelendiği limit analiz yöntemleridir. Doğrusal-elastik olmayan analiz ve limit analiz yöntemleri hem karmaşık olup hem de malzemelerin gerçek gerilme-birim deformasyon özelliklerinin çok iyi tanımlanmasını zorunlu kıldıklarından, hesap yönteminin uygulanmasında çok dikkatli olunması gerekmektedir.

Yapısal elemanların içerdiği süreksizliklerden dolayı heterojen ve anizotropik olması yapım sürecinin uzunluğuna bağlı olarak işçilik ve malzeme kalitesinin değişebilmesi ve mevcut hasar durumunun tam olarak bilinmemesi sebebiyle yığma yapıların sayısal analizleri güç olmaktadır. Yığma yapıyı oluşturan blokların bağlantı bölgelerinde oluşan süreksizliklerin çekme dayanımları oldukça düşüktür. Düşey yük altında bloklar ile harç arasında oluşan sürtünmeden dolayı kesme kuvvetleri oluşmaktadır. Bu nedenle harç-blok arasındaki birleşim yüzeyinin kesme dayanımı da yapının mekanik davranışını etkilemektedir.

Çok karmaşık geometrik formlara sahip olan tarihi yapılar öncelikle elastik yöntemlerle analiz edilmeli, yapı içerisinde gerilme dağılım mekanizması belirlenmeli ve daha sonra daha karışık modellemeler yapılmalıdır. Yığma yapıların analiz edilebilmesi için bugüne kadar çeşitli yöntemler geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bunlar kısaca[78]:

- Geometrik yük faktörü yöntemi

Geometrik yük faktörü yönteminde, geometrik güvenlik faktörü duvarın kalınlığının, uygulanan yükü karşılayabilecek minimum kalınlığa oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntem yük altında duvarda oluşan deformasyonları hesaplayamamaktadır ve sonuçları, mühendisin yargısına oldukça hassas bir biçimde bağlıdır.

- Doğrusal elastik sonlu elemanlar analizi,

Doğrusal elastik sonlu elemanlar yöntemi ise işletme yükleri (emniyetli yükler) altında yığma yapıda, duvarda oluşacak olan deformasyonları hesaplayabilmekle birlikte yapının göçme mekanizmasını ve yükünü verememektedir. Ancak bu tür analizlerde malzemelerin taşıma güçlerine ulaşması mümkün olmamaktadır. Kırılma elastik bölgede kalmaktadır.

- Limit bloklı analiz (Basitleştirilmiş mikro modelleme)

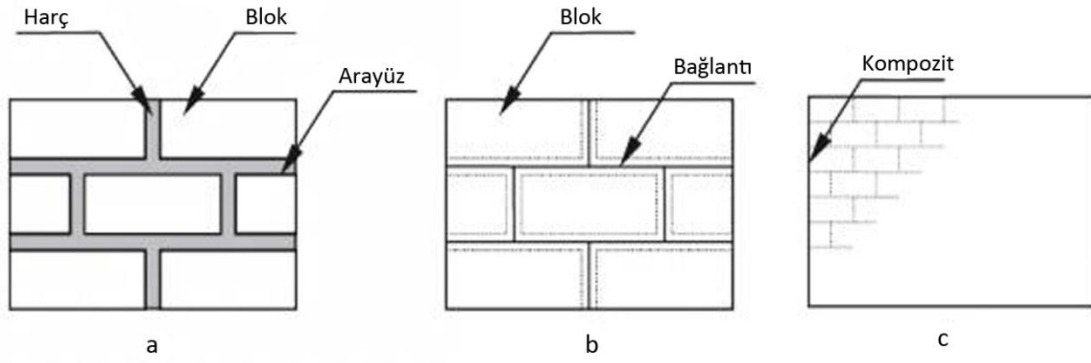
Basitleştirilmiş mikro modellemede yığılma blok ve düğümlerden oluşur. Düğümler ise harç ve iki tane harç-blok arayüzünden oluşur ve ortalama bir arayüz teşkil eder (Şekil 4.2). Modelin şeklini tamamlamak için ise blok boyutları genişletilmiştir. Bu yöntemde bloklar düğüm noktalarından potansiyel kırılma-kayma yüzeyleri ile birbirine bağlanmıştır. Harcın poisson etkisi göz ardı edildiğinden dolayı doğruluk payı düşüktür [19].

- Doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi, (Makro Modelleme)

Doğrusal olmayan sonlu elemanlar yönteminde ise, elastik-plastik bağıntılar yardımıyla hem yığılma yapı sisteminin deformasyonlarını hem de göçme mekanizması ile plastik bölgelerini hesaplayabilmektedir. Genellikle ve uygulamaya yönelik çalışmalarda blok ile harç arasındaki etkileşim tüm yapı davranışını incelerken ihmal edilir. Bu tür analiz yapılmasına makro modelleme denir. Bu yaklaşımda malzeme kompozit kabul edilir. Yapının veya elemanların detaylı analizlerinin istendiği durumlarda uygun bir model değildir. Bu yöntemde açık olmayan malzeme gerilmeleri için büyük ölçekli deneylerden elde edilen yığılma gerilme değerleri kullanılır [21]. Yöntem uygulanırken yığılma homojen, izotrop veya anizotrop sürekli kabul edilir[36]. Elemanın farklı yerlerindeki farklı malzeme özelliklerinin ortalaması alınarak homojenize edilir. Genellikle karmaşık sistemli tarihi yapıların duvar parçalarının, ayak, payanda, kemer ve tonozlarının modellenmesine uygundur. Tarihi yapıların duvar örgüsündeki düzen makro modelleme yaparken kabul edilen deneysel verilere dayanan homojenleştirmenin çok umut verici sonuçlar verdiğini göstermektedir (Şekil 4.2).

- Ayrık elemanlar yöntemi. (Detaylı mikro modelleme)

Blok, harç ve harç-blok arasındaki arayüz süresiz düğüm noktalarının ayrı ayrı modellenerek, detaylı analiz edilmesine mikro modelleme denir. Mikro modelleme yapılırken elemanlar ve harç arasındaki ilişki çok iyi araştırılmalı ve tanımlanmalıdır. Bu yaklaşımda elastisite modülü, Poisson oranı ve diğer elastik olmayan malzeme özellikleri hem blok hem de harç için hesaba katılır. Arayüzde oluşan kayma düzlemi sahte bir rijitlik göstererek elemanların birbirleri içine girmelerini engeller [19],[79]. Bu yaklaşım hassas gerilme ve şekil değiştirmeleri ölçmede kullanılır [36], [80].



Şekil 4.2 Modelleme yöntemleri a) Detaylı mikro modelleme b) Basitleştirilmiş mikro modelleme c) Makro modelleme [79]

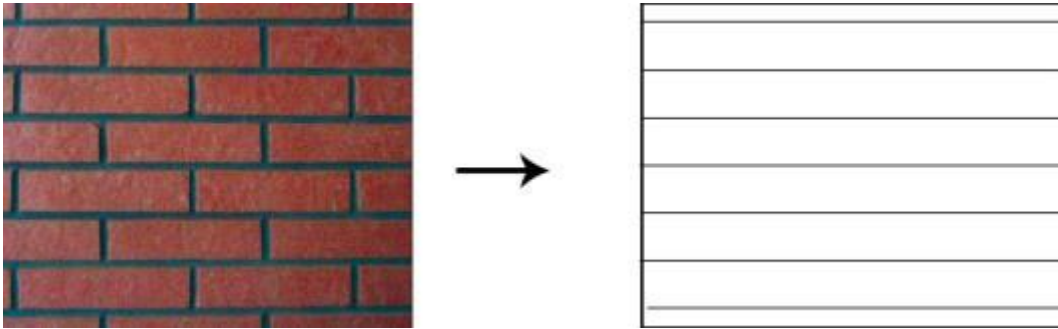
4.1 Makro Model Yaklaşımı ile Elasto-Plastik Analiz

Yığılma elemanlar, yapısı gereği her yönde aynı davranışı sergilemez ve izotrop değildir. Bu nedenle toprak, taş ve beton gibi birçok homojen malzemedan imal edilmiş yapı elemanlarının plastik analizinde kullanılmak üzere öngörülen Drucker-Prager malzeme modelinin, elemanları ortotrop davranış gösteren yığılma sistemde kullanılabilmesi için sonlu eleman boyutlarında bazı düzenlemeler yapılması gerekmektedir. Derzler, bloklar ve aradaki enterfaz davranışın ayrı modellendiği çözümler, pek çok belirsiz ya da ölçülemeyen malzeme parametrelerinin tanımlanmasını gerektirmektedir. Bundan dolayı bu tür yöntemlerde parametrelerin belirlenmesinde hata oranı yüksektir ve yapısal çözümler son derece karmaşıktır.

Beton elemanların doğrusal olmayan analizlerinde kare ya da küp şeklinde elemanlar kullanılması önerilmektedir [81]. Eğer bir boyut daha küçük seçilirse, eleman o doğrultuda zayıf olacağından çatlakın seçilen doğrultuda oluşması daha kolay olacaktır. Kare veya küp elemanlar gibi birbirine yakın boyutlardaki elemanlar kullanıldığında çatlak doğrultusu üzerinde modellemeden kaynaklanan herhangi bir yapay etki yaratılmamış olur.

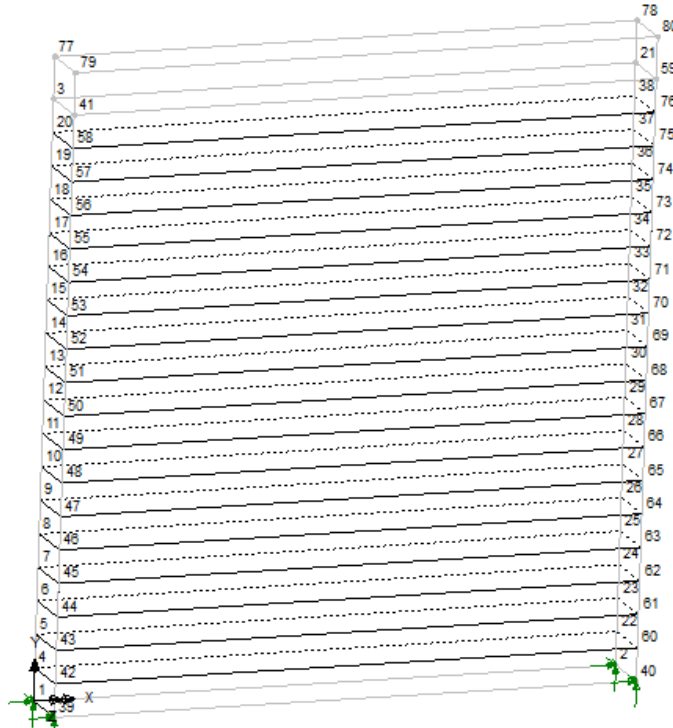
Yığılma elemana ait sonlu eleman modeli, sonlu eleman geometrisinde yapılacak düzenlemeler ile elemanın, tuğla ile harç arasındaki derzlerden ve sadece yatay kayma düzlemlerinden geçen sonlu eleman ağı ile oluşturulması durumunda duvarın iki doğrultuda farklı davranış göstermesi yapay olarak sağlanmış olur (Şekil 4.3). Bu durumda duvarda kullanılacak sonlu eleman; yatayda bütün, düşeyde ise derzlerden geçtiği düşünülen zayıflık düzlemleri ile parçalanmıştır. Böylece malzemenin izotrop malzeme kabulü ile yapay

ortotrop davranış göstermesi, basit ve etkili bir şekilde elde edilmiş olacaktır. Oldukça gerçekçi davranış sergileyen ve deneysel çalışmalara yakın sonuçlar veren bu yaklaşım, sonuca ulaşmakta büyük ölçüde pratiklik sağlamaktadır. Literatürde, yığma yapılar için önerilen ortotropik malzeme yaklaşımlarında yığma eleman için yapılan analitik çözümler deneysel çalışmalara uyumlu sonuçlar vermiştir. Ancak son derece karmaşık olan mikro modeller yapının tümü yerine sadece belirli elemanlarında kullanılmıştır [20]. Bu da yığma duvar veya ayaklardır.



Şekil 4.3 Önerilen sonlu eleman düzeni

Önerilen sonlu eleman üç boyutlu düzlemde seçildiğinde sekiz düğüm noktalı dikdörtgen prizmalarından oluşmaktadır. Lusas[82], [83] programında oluşturulan nümerik modelde sekiz düğüm noktalı katı elemanlar seçilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Sonlu eleman ağı boyutlarının düzenlenmesi

4.1.1 Malzeme Parametreleri

Nümerik analiz için malzemenin akma yüzeyi, elastisite modülü ve Poisson oranının belirlenmesi önemlidir. Yığma duvarların plastik analizinde kullanılacak olan Drucker-Prager malzeme modeli, çekme dayanımı zayıf, basınç dayanımı yüksek sünek malzemelerin davranışını tanımlamakta sıklıkla kullanılan bir modeldir. Modelin, diğer malzeme modellerine nazaran daha çok tercih edilmesindeki başlıca neden, akma yüzeyi (sınır yüzey) tarif edecek parametre sayısının az ve yeterli olmasıdır. Bu model içsel sürtünme açısı, ϕ ve kohezyon, c olmak üzere iki gerekli parametre ile tanımlanır.

4.1.1.1 Malzemenin İçsel Sürtünme Açısı ve Kohezyonu

Drucker-Prager malzeme modelinde, akma yüzeyini belirleyebilmek için Bölüm 4.1'de açıklandığı gibi iç sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (c) olmak üzere iki malzeme parametresine ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı yapı malzemeleri için literatürde birçok sayısal değer önerilmiştir, çok geniş aralıkta kabul edilen içsel sürtünme açısı ve iç kohezyon değerleri için çeşitli formüller verilmiştir. Ramamurty vd., 2000[84] ve Khalaf vd., 1994[85] tarafından beton elemanlar için bazı formüller önerilmektedir (Bağıntı 4.1, 4.2 ve 4.3). Ayrıca (Köksal vd. 2004[40], Köksal vd.2005[41]) yayınlarında (Bağıntı 4.1, 4.2 ve 4.3) yığma elemanlar için kullanmış oldukça başarılı sonuçlar elde etmiştir.

$$c = 0.129 f_{mr} + 1.85 \quad (4.1)$$

$$\phi = 1.519 f_{mr} \quad (4.2)$$

$$c = f_{bl}/4 \quad (4.3)$$

Ancak beton malzemeye göre uygun olan bu değerler, yığma duvara uyarlandığında malzemenin iç kohezyonunun betona göre daha düşük değer aldığı görülmektedir. Chaimoon K. ve Attard M.[28], 2007 tarafından yapılan çalışmada yığma yapılar için incelenen ϕ değerinin 30° ile 60° aralığında, c katsayısının ise 2 ile 3,2 aralığında, uygun değerler verdiği görülmüştür. ϕ katsayısı kayma direncini doğru yansıtmakta, c katsayısı ise malzemenin normal kuvvete karşı gösterdiği davranışta belirleyici rol almaktadır.

Zemin mekaniğinde ϕ değeri ince daneli malzemeler için $25-45^\circ$ aralığında öngörülmektedir. Dane boyutu büyüdükçe ϕ değeri büyümektedir. Yığma duvarlarda her bir tuğla parçası tek başına daneymiş gibi davranacağı öngörülmekte ve ϕ değerinin artacağı beklenmektedir.

Mohebkhaha vd. [35], 2008 tarafından önerilen bağıntılarda içsel sürtünme açısı için alt değer olarak 49.71 değeri belirlenmiştir (Bağıntı 4.4 ve 4.5).

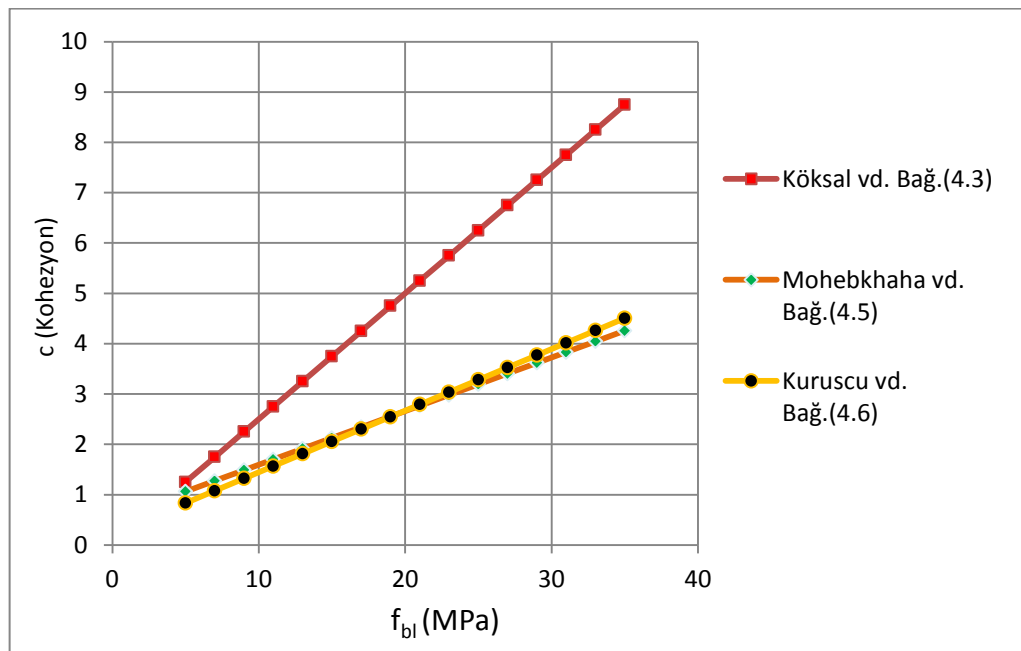
$$\phi = 0.145 f_c (MPa) + 49.71 \quad (4.4)$$

$$c = 0.1065 f_c (MPa) + 0.531 \quad (4.5)$$

Colas vd. [86], 2008 tarafından yapılan çalışmalarda ise iç sürtünme açısı 20 ile 45 derece aralığında karşılaştırılmıştır. Ayrıca iç sürtünme açısını 22,5 ile 45 derece aralığında değerlendiren Roca P. [1], 2006 deneysel veriler ile uygun sonuçlar bulmuştur. Gerçekleştirilen nümerik çözümler sonucunda önerilen modele en uygun kohezyon değerleri için 4.6bağıntısı önerilmektedir[87].

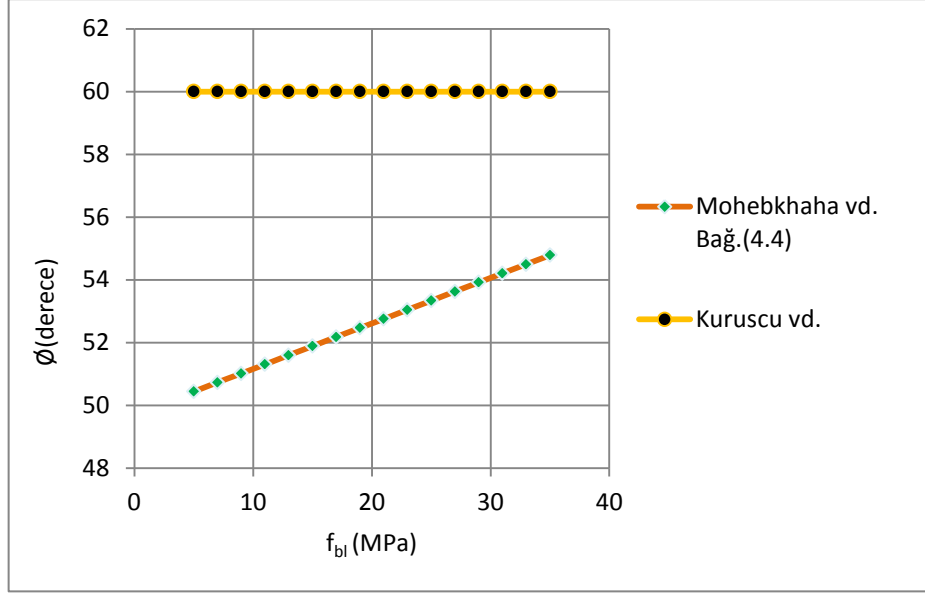
$$c = 0.1225 f_c (MPa) + 0.22 \quad (4.6)$$

Kohezyon değeri için önerilen bağıntının literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırılması Şekil 4.5’de gösterilmektedir.



Şekil 4.5 Makro yaklaşımda kohezyon değeri için önerilen bağıntının literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırılması

İçsel sürtünme açısı uygun bulunan değer ve literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırılması Şekil 4.6’de gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Makro yaklaşımda içsel sürtünme açısı için önerilen bağıntının literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırılması

4.1.1.2 Malzemenin Elastisite Modülü

Malzemenin karmaşık yapısı nedeniyle Elastisite modülü çok geniş bir aralıkta değişmektedir. Çeşitli yayınlarda verilen bağıntılar şunlardır.

Beton yığıma halinde:

$$E_m = 1000 f_k [62] \quad (4.7)$$

Kil tuğla yığıma halinde:

$$E_m = 750 f_{br} [62] \quad (4.8)$$

Beton yığıma halinde[40]:

$$E_m = 500 f'_{bl} \text{ ile } 1500 f'_{bl} \quad (4.9)$$

Kil tuğla yığıma halinde[40]:

$$E_m = 500 f'_{br} \text{ ile } 1000 f'_{br} \quad (4.10)$$

Bayülke[88], 2011 yılındaki yayınında duvar elastisite modülünün duvar basınç dayanımının 200 katı olarak alınabileceğini belirtmektedir.

Bu çalışmada, literatürde yer alan farklı deneysel çalışmalara ait veriler dikkate alınarak, yük yer değiştirme eğrilerinde aynı başlangıç eğimini veren Elastisite modülü dikkate alınmıştır.

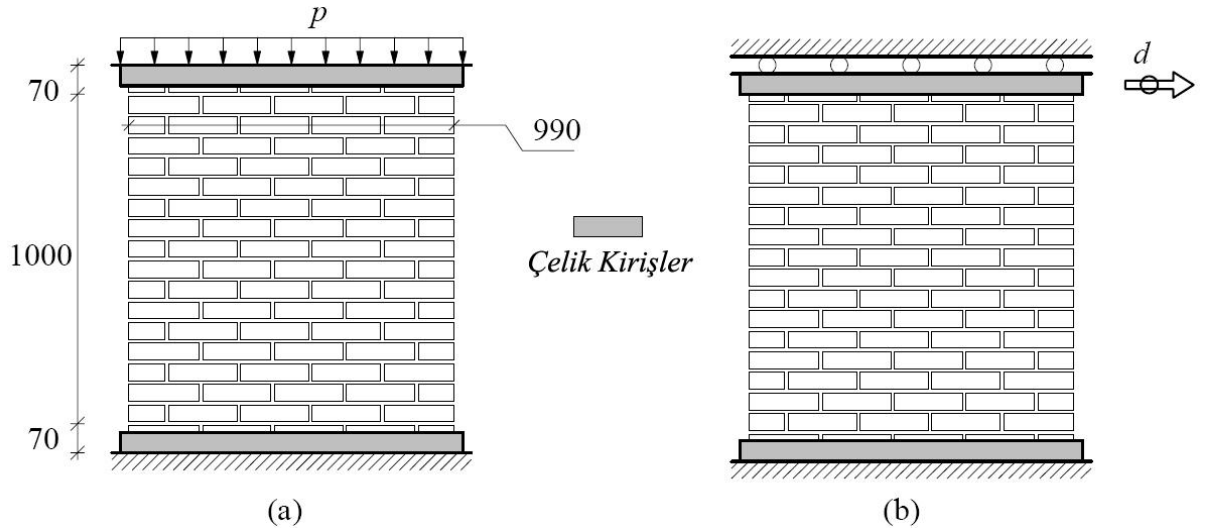
Bazı durumlarda ise deneysel verilerle uyumlu olacak şekilde elastisite modülünün bağıntılarda verilen sınırların dışına çıktığı belirlenmiştir. Benzer şekilde Poisson oranı 0,15 olarak alınmıştır.

4.1.2 Makro Modelleme Tekniği İçin Sayısal İrdemeler

Literatürde bulunan çeşitli modeller kullanılarak altı farklı çalışmadan, ellibir (51) duvarın detaylı çözümlenmeleri yapılarak deneysel davranışları başarıyla tahmin edilmiştir. Makro-modelleme yaklaşımı ile duvarlarda doğrusal olmayan malzeme davranışını temel alan stabilite sorunları da araştırılmıştır.

4.1.2.1 TU Eindhoven Duvarları

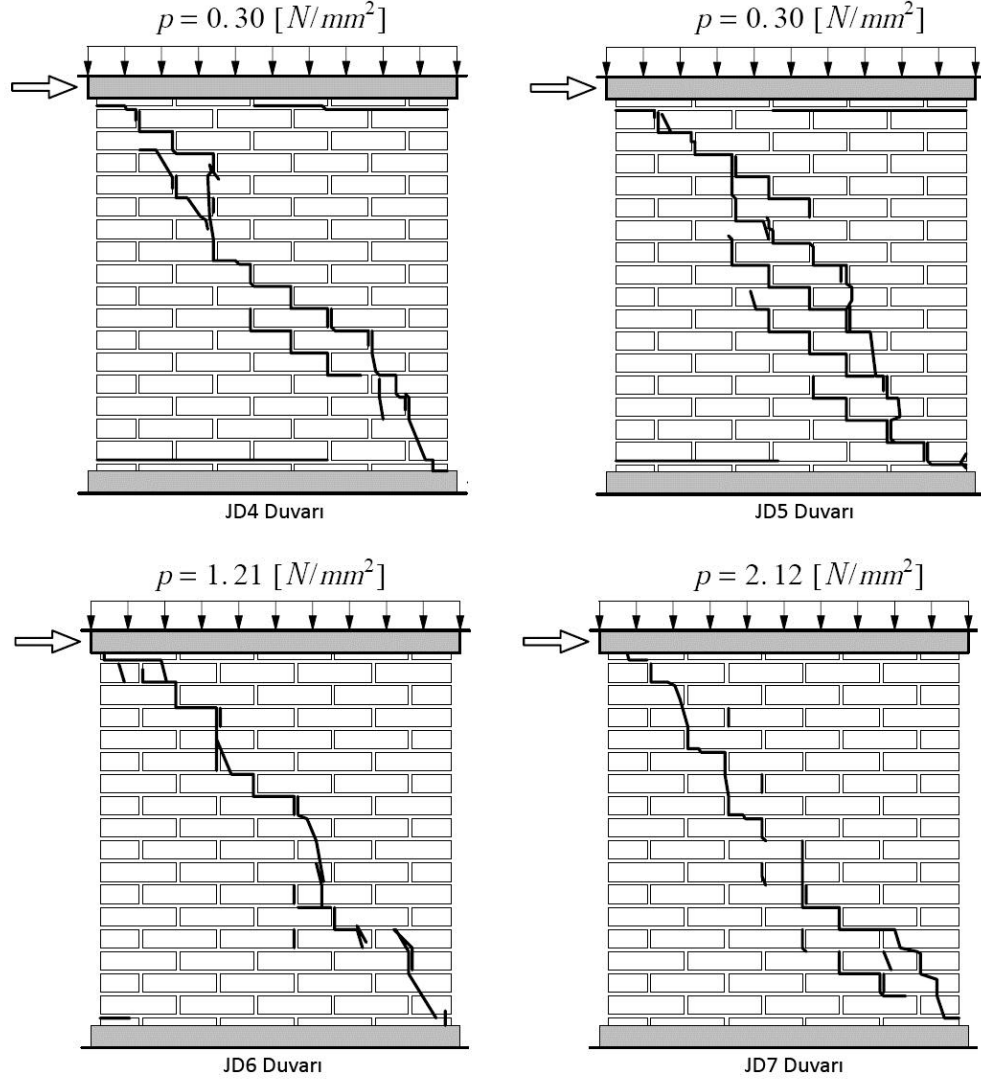
Bu çalışmada ilk olarak literatürde önemli yeri bulunan, Raijmakers ve Vermeltfoort [89] (1992) ve Vermeltfoort ve Raijmakers[90] (1993) tarafından CUR Project 1997 isimli proje kapsamında deneye tabi tutulan yığma duvarlar için gerçekleştirilmiş deneysel çalışmalar ele alınmıştır. Bu deneyler boşluklu ve dolu olmak üzere 2 tip duvar üzerinde yapılmıştır. Dolu duvar deneyi, 1000x990x100mm boyutunda, 10mm kalınlığında harç ile derzlenmiş 210x52x100mm boyutlarında tuğlaların kullanıldığı duvarlar üzerinde yapılmıştır. Örnek duvar Şekil 4.7’de görüldüğü gibi üst ve altından 70mm kalınlıklı çelik profillerle rijit bir düzlem oluşturacak şekilde bağlanmıştır.



Şekil 4.7 Eindhoven duvarının ölçüleri ve yükleme şekli

a)Düşey yükleme b)Yatay yükleme ve yer değiştirme ölçümü

J4D, J5D, J6D, J7D, olmak üzere 4 adet örnek dolu duvar imal edilmiş ve bunlara şekilde görüldüğü gibi sırasıyla ilk ikisine $p=0.30\text{N/mm}^2$, diğerlerine $p=1.21\text{N/mm}^2$ ve $p=2.12\text{N/mm}^2$ düşey yayılı yük uygulanmıştır[91], [92]. Toplam düşey yük ise sırasıyla 30 kN, 120 kN ve 210 kN olmaktadır (Şekil 4.8).



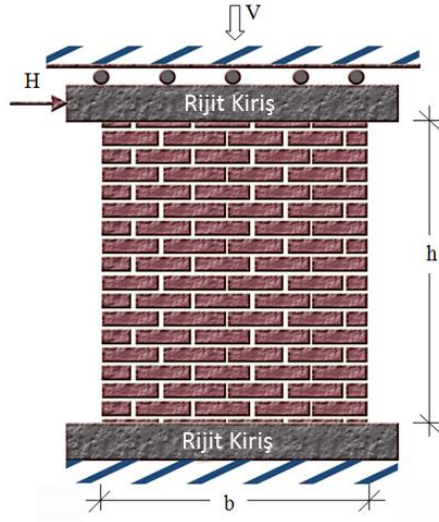
Şekil 4.8 Örnek duvarlara uygulanan yükler ve çatlak şekilleri

Önerilen modelde kayma davranışını yansıtması için içsel sürtünme açısı 60° olarak belirlenmiştir. Kohezyon değeri ise (Bağıntı 4.6) ile hesaplanmış ve $2,2\text{N/mm}^2$ olarak bulunmuştur. Yukarıda açıklandığı gibi $E_0=5000\text{N/mm}^2$. Poisson oranı 0,15 olarak alınmıştır. Çizelge 4.1'de gösterilen parametreler kullanılarak elde edilen sonuçlar, deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.1 Sonlu eleman modelinin malzeme özellikleri

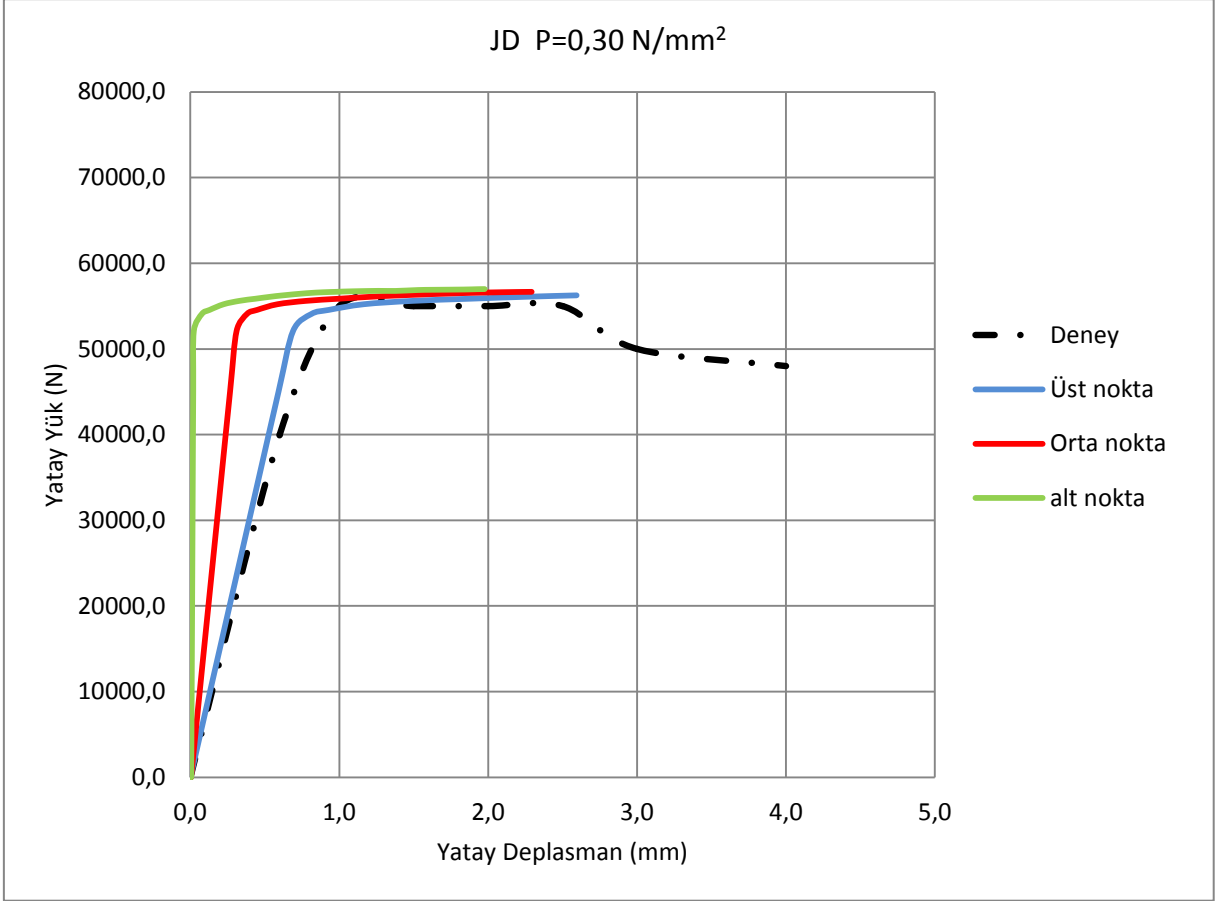
Deney	Derz (Kalınlık)	Ref. no	b (mm)	h (mm)	t (mm)	v	E_c (MPa)	ϕ	c (MPa)
TU Eindhoven	10mm	J4D	1000	990	100	0.15	5000	60°	2.2
		J6D				0.15			
		J7D				0.15			

Lusas sonlu eleman analiz programı yardımıyla oluşturulan nümerik modelde, taban kesitinin x, y ve z doğrultularında hareketi tutulmuştur (Şekil 4.9). Düşey yükler öncelikle duvarın üst kesimine yerleştirilmiş olan rijit plak vasıtasıyla homojen biçimde düzgün yayılı yük olarak duvara aktarılmış, ardından rijit plağa yatay doğrultuda artımsal yük uygulanmıştır (Şekil 4.9).



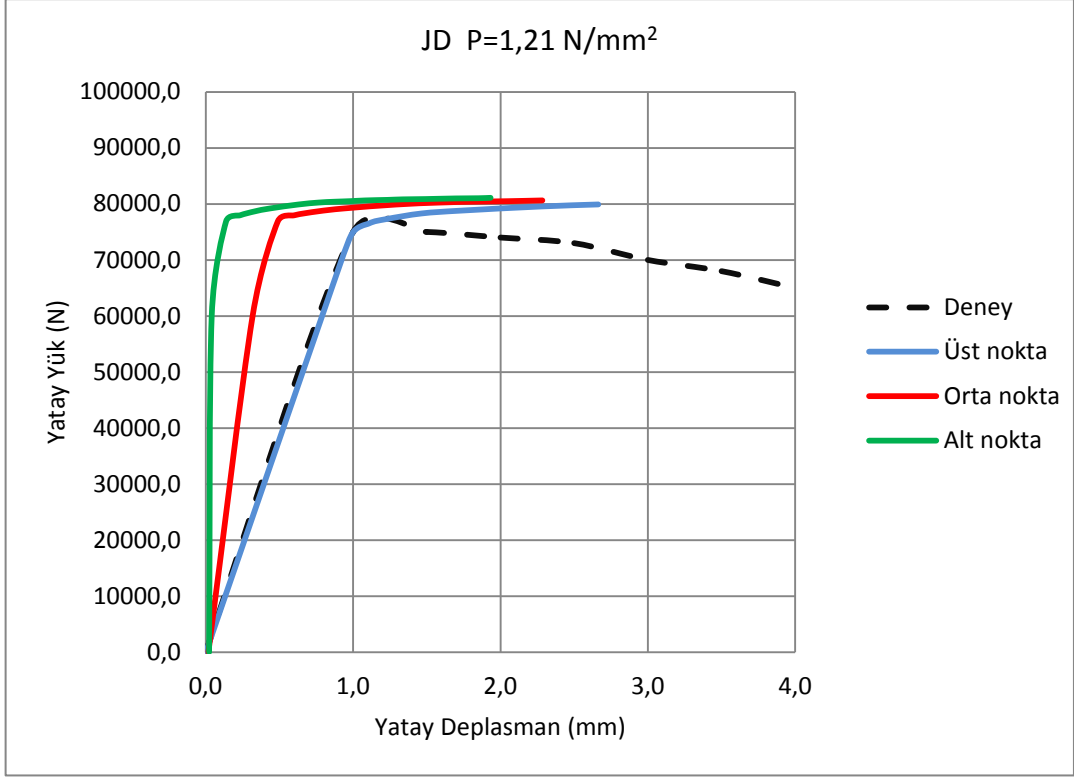
Şekil 4.9 TU Eindhoven deney düzeneği

Çeşitli yüklemeler için tekrar edilen analiz sonuçlarından üç farklı kesitte yer değiştirme okumaları yapılmıştır. Her bir yükleme için elde edilen yatay yük ile yer değiştirme arasındaki ilişki Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'da gösterilmiştir.

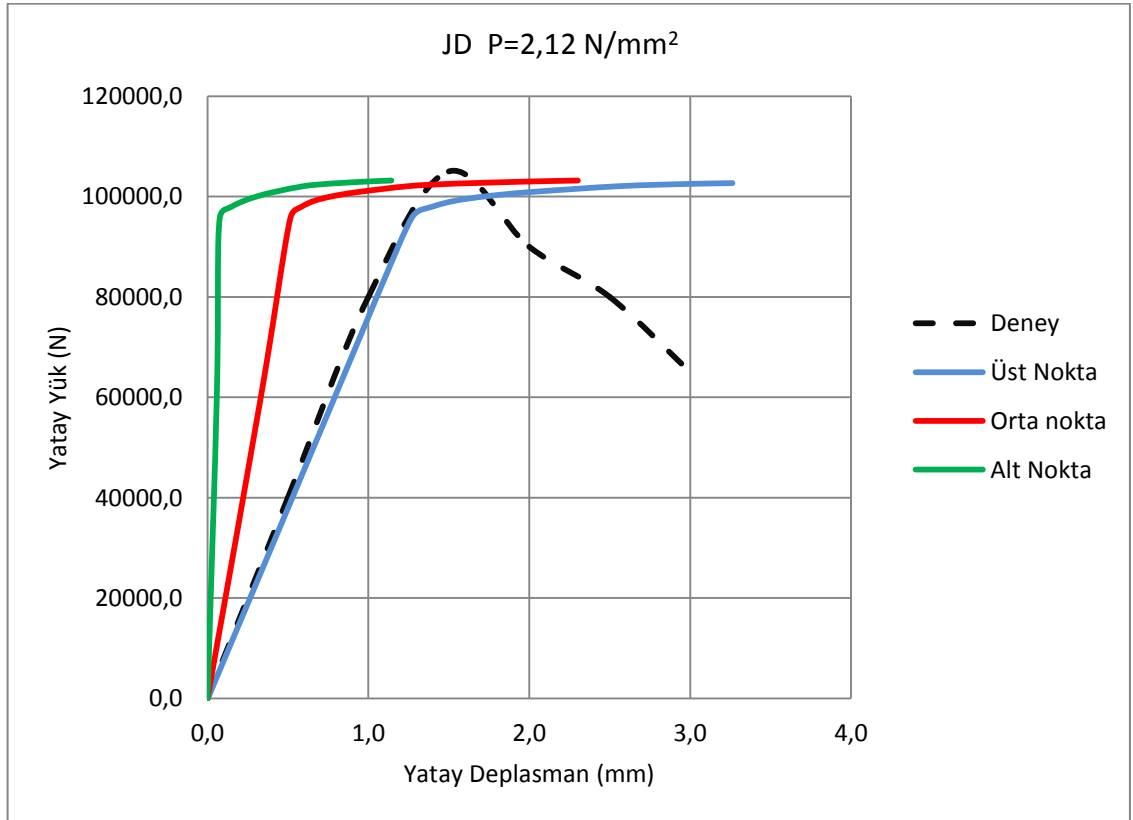


Şekil 4.10 $p=0.30\text{N/mm}^2$ düşey yayılı yük uygulandığında elde edilen sonlu eleman analiz sonuçları ile deney sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.8’de gösterilen J4D ve J5D duvar örneklerine uygulanan düşey $p=0.30\text{N/mm}^2$ değerindeki yayılı yük altında, artan yatay yük ve okunan nokta için yer değiştirme değeri görülmektedir. Elde edilen verilerde özellikle eğrinin başlangıç eğiminin, yani başlangıç elastisite modülünün deney sonuçları ile uyumuna dikkat edilmiş ve duvarın üst kesitindeki noktalarda deney verisine oldukça yakın sonuçlar elde edildiği gözlenmiştir. En alt kotta elde edilen değerler ise duvarın aşırı rijit olduğunu, üst kesitteki noktaya göre daha az yer değiştirme yaptığını göstermektedir. Orta kesitten alınan yer değiştirme ölçümlerinde ise üst kesitteki noktadan alınan okuma değerlerine göre daha az yer değiştirdiği görülmüştür. Öngörülen sonlu eleman modelinin ve Drucker-Prager malzeme modelinde belirlenen parametrelerin deney sonuçlarına uygun sonuçlar verdiği görülmektedir. Deney sırasında belirlenen ölçüm noktalarının yerleri oldukça önemlidir.

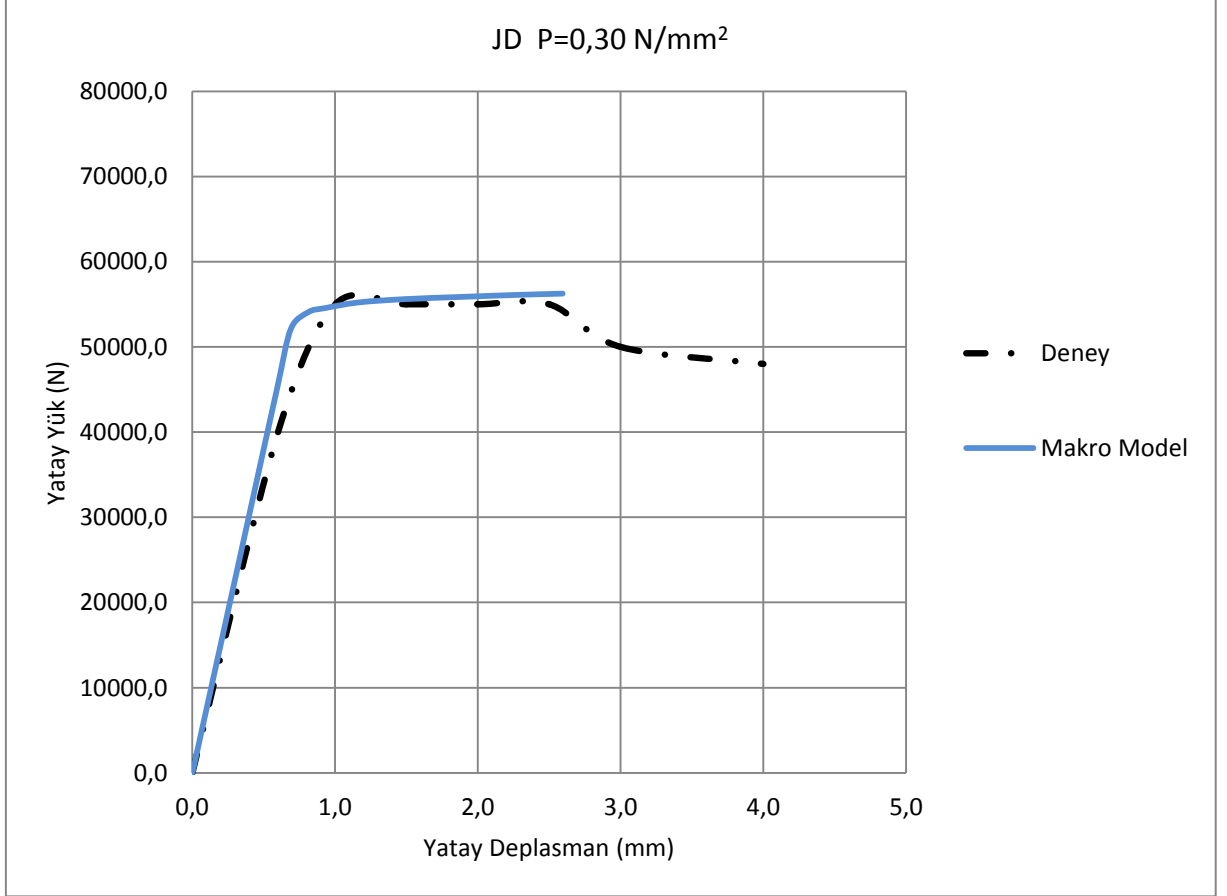


Şekil 4.11 $p=1.21\text{N/mm}^2$ düşey yayılı yük uygulandığında elde edilen sonlu eleman analiz sonuçları ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.12 $p=2.12\text{N/mm}^2$ düşey yayılı yük uygulandığında elde edilen sonlu eleman analiz sonuçları ile deney sonuçlarının karşılaştırılması

Yapılan çalışmalarda J4D, J5D, J6D ve J7D dolu duvar örneklerine uygulanan düşey yayılı yükler ve artan yatay yük altında, üstteki rijit düzlemin hemen altındaki duvar kesitindeki düğüm noktasından alınan yatay yük-yer değiştirme değerleri Şekil 4.13, 4.19 ve 4.25'deki grafiklerde verilmektedir.



Şekil 4.13 P=0,30N/mm² için Nümerik model ve deney sonucu

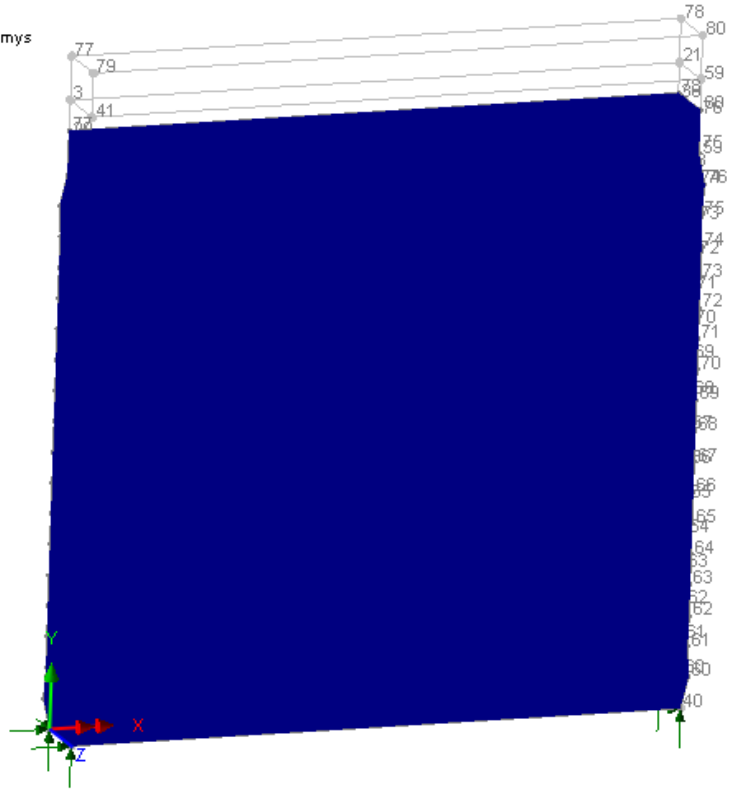
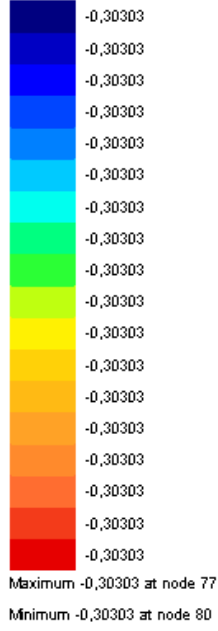
30kN Düşey yük uygulanan duvarın nümerik analizler sonunda elde edilen gerilme dağılımları Şekil 4.14-18'da gösterilmiştir.

Loadcase: 1:Increment 1

Results file: Eindhoven Makro \145 30KN.mys

Entity: Stress - Solids

Component: S3



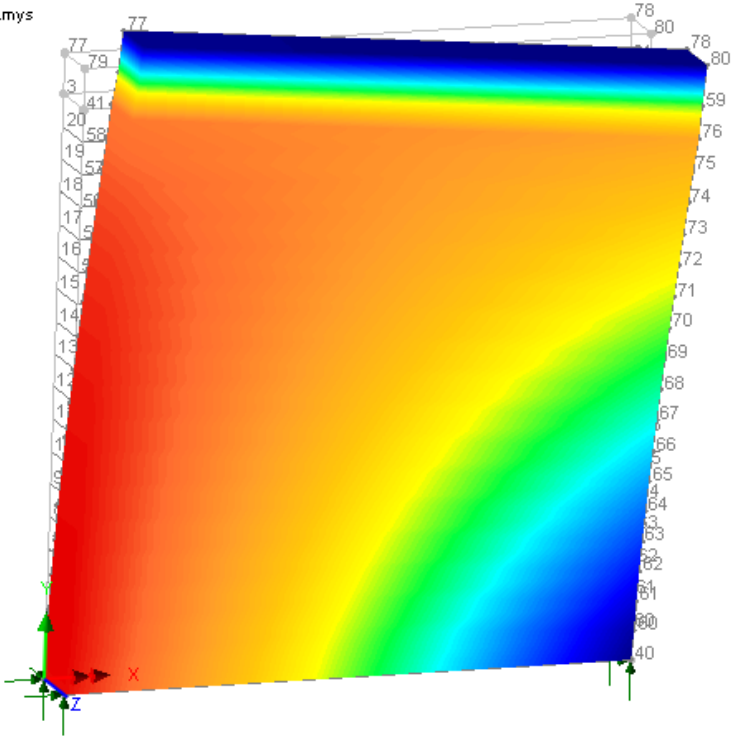
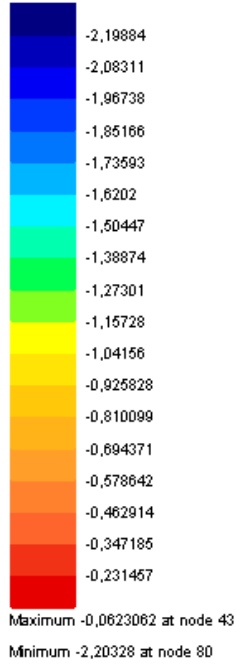
Şekil 4.14 P=30 kN Düşey yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı

Loadcase: 2:Increment 2 Load Factor = 0.250000E+01

Results file: Eindhoven Makro \145 30KN.mys

Entity: Stress - Solids

Component: S3



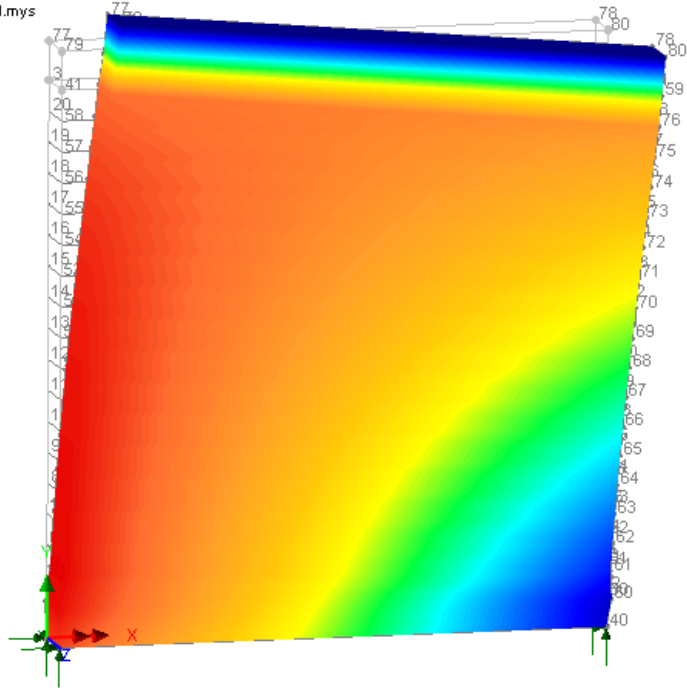
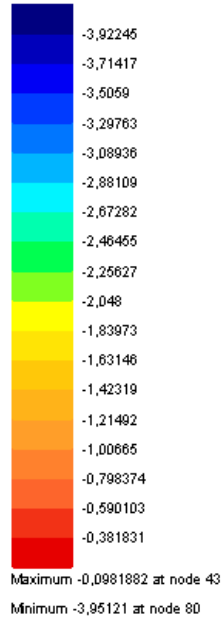
Şekil 4.15 Düşey yük uygulanmasının ardından başlangıç seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı

Loadcase: 5: Increment 5 Load Factor = 0.450576E-01

Results file: Eindhoven Makro V146 30KN.mys

Entity: Stress - Solids

Component: S3



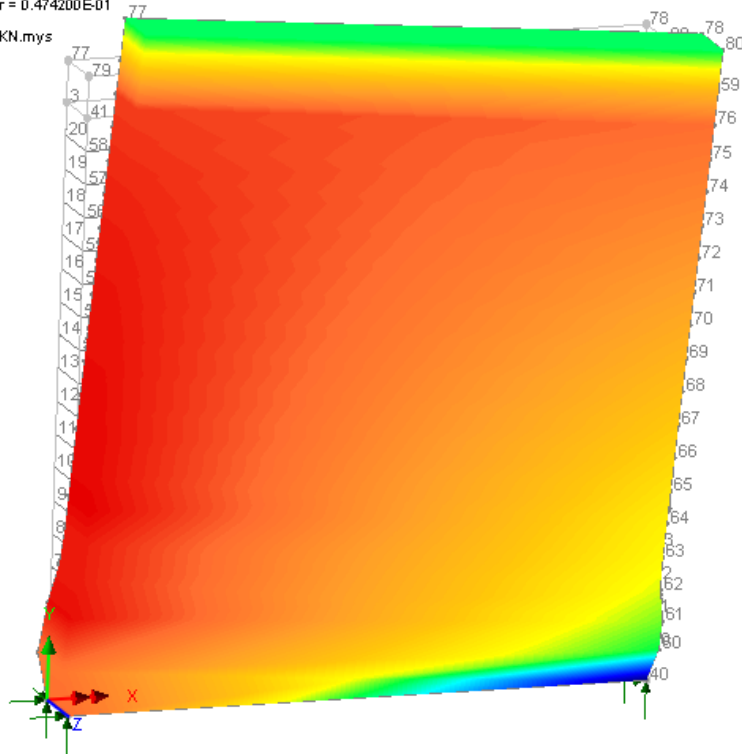
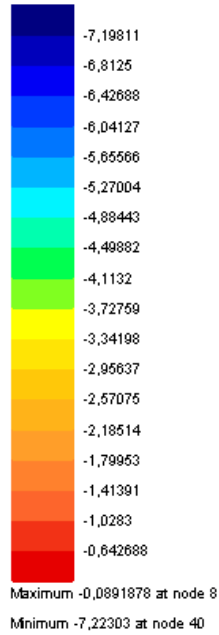
Şekil 4.16 Düşey yük uygulanmasının ardından orta seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı

Loadcase: 20: Increment 20 Load Factor = 0.474200E-01

Results file: Eindhoven Makro V146 30KN.mys

Entity: Stress - Solids

Component: S3



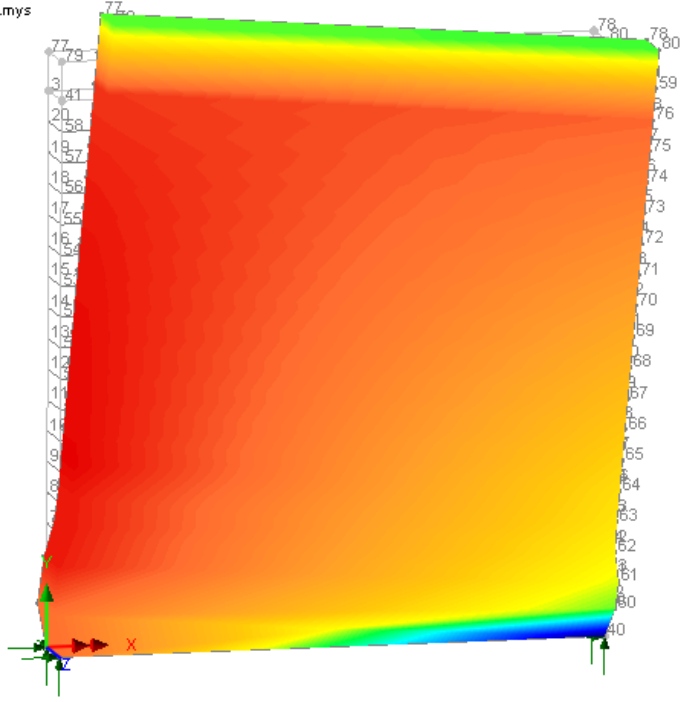
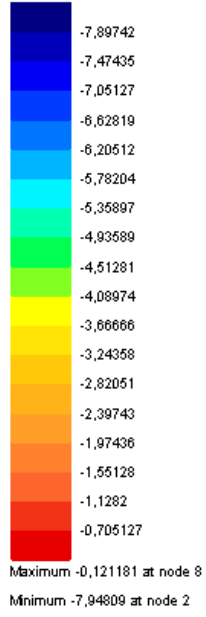
Şekil 4.17 Düşey yük uygulanmasının ardından ileri seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı

Loadcase: 25:Increment 25 Load Factor = 0.475131E-01

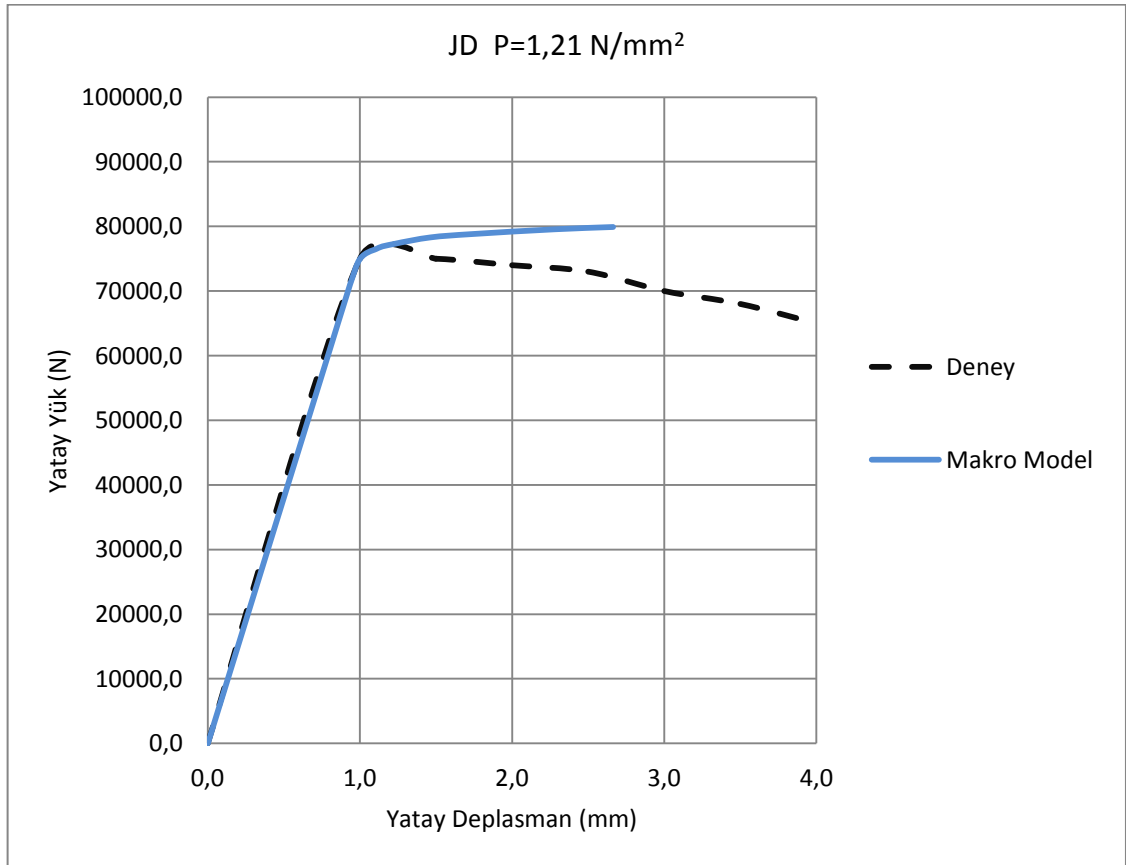
Results file: Eindhoven Makro V145 30KN.mys

Entity: Stress - Solids

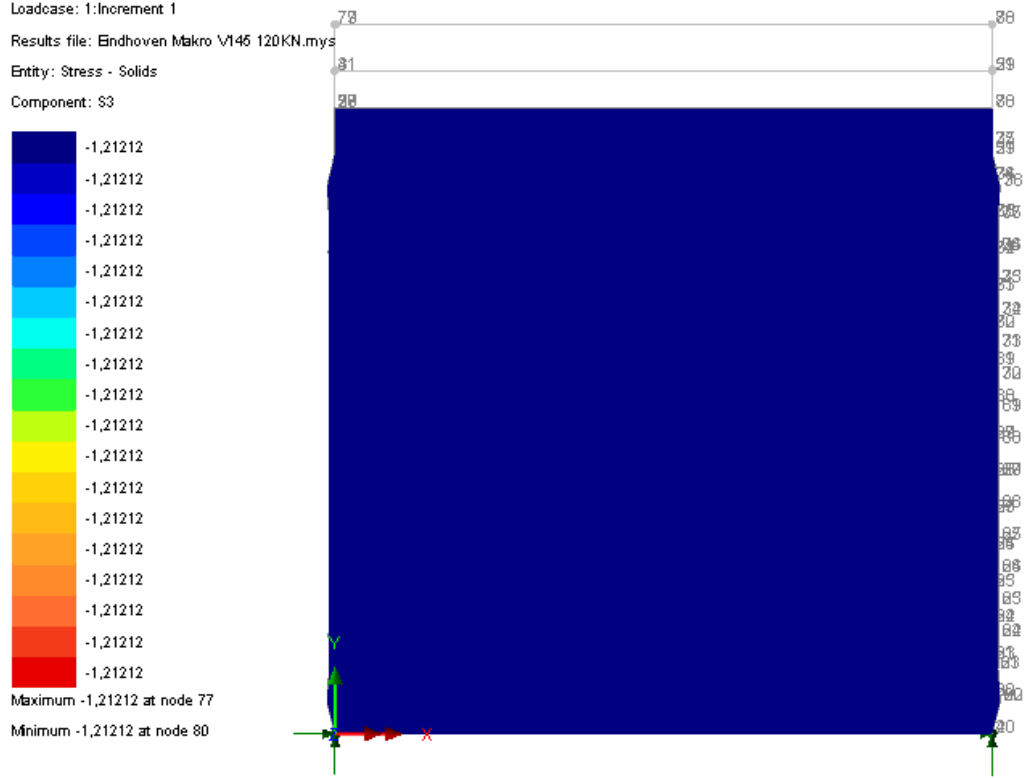
Component: S3



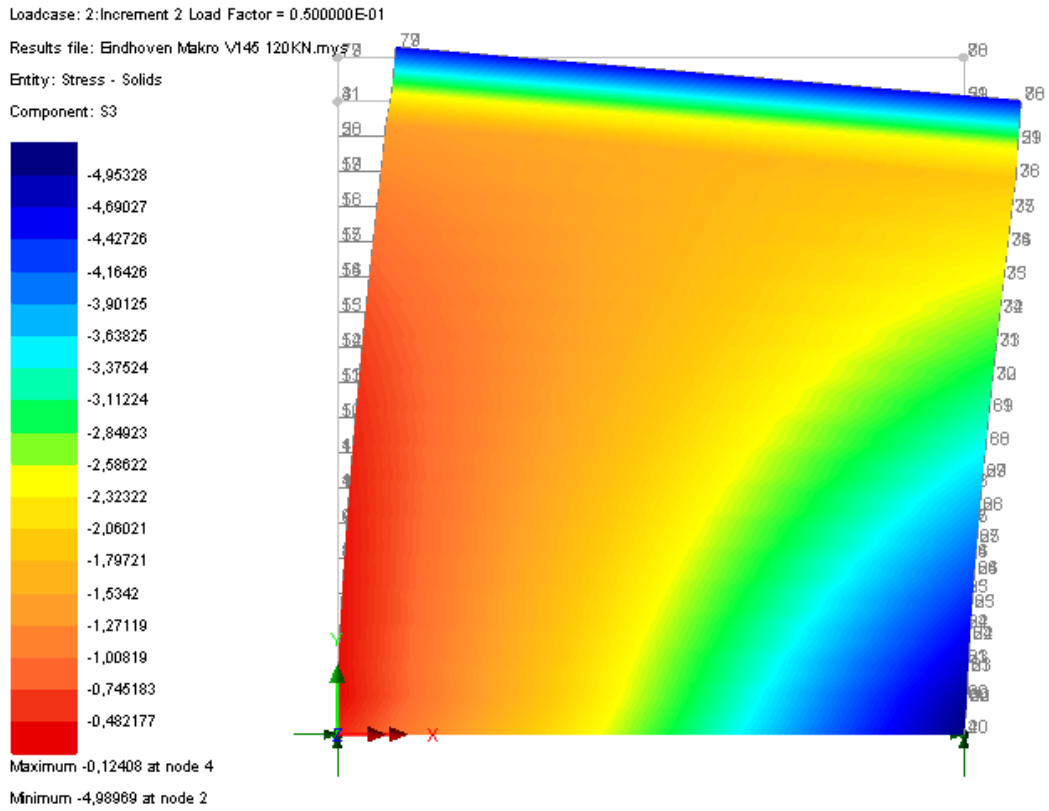
Şekil 4.18 Düşey yük uygulanmasının ardından üst seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı



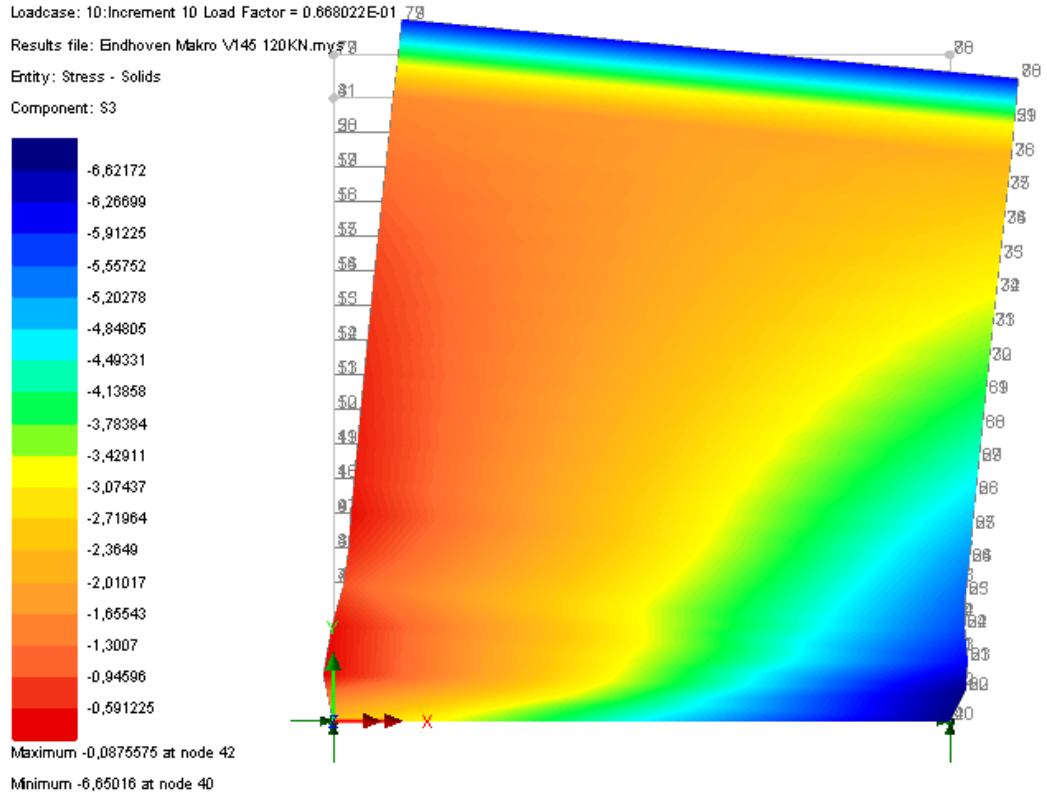
Şekil 4.19 $P=1,21 \text{ N/mm}^2$ için Nümerik model ve deney sonucu



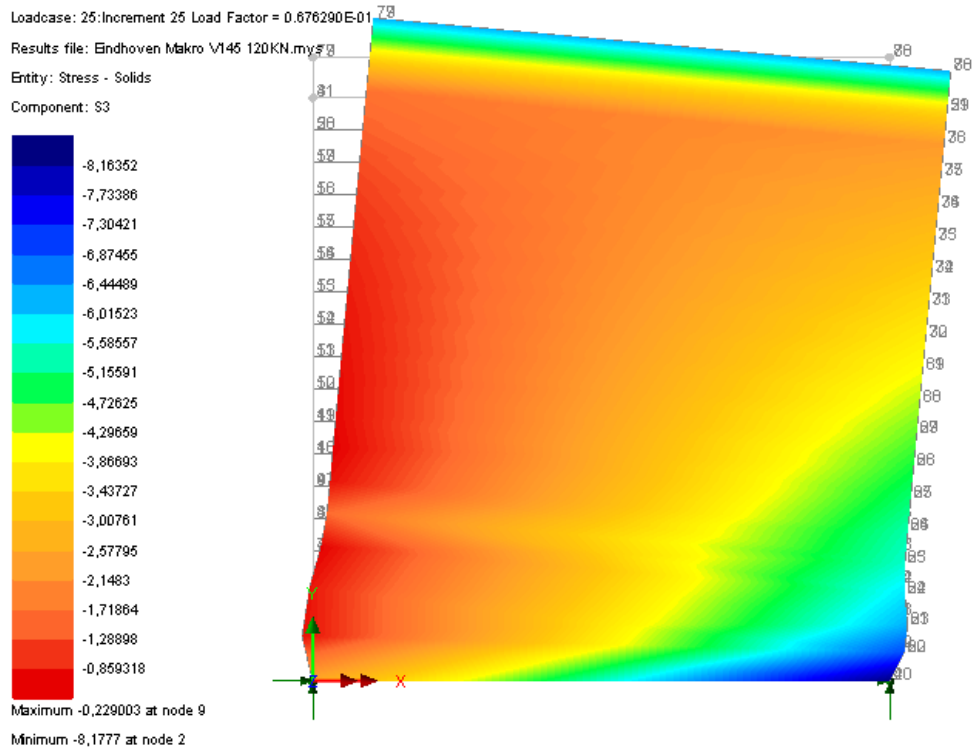
Şekil 4.20 P=120 kN Düşey yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı



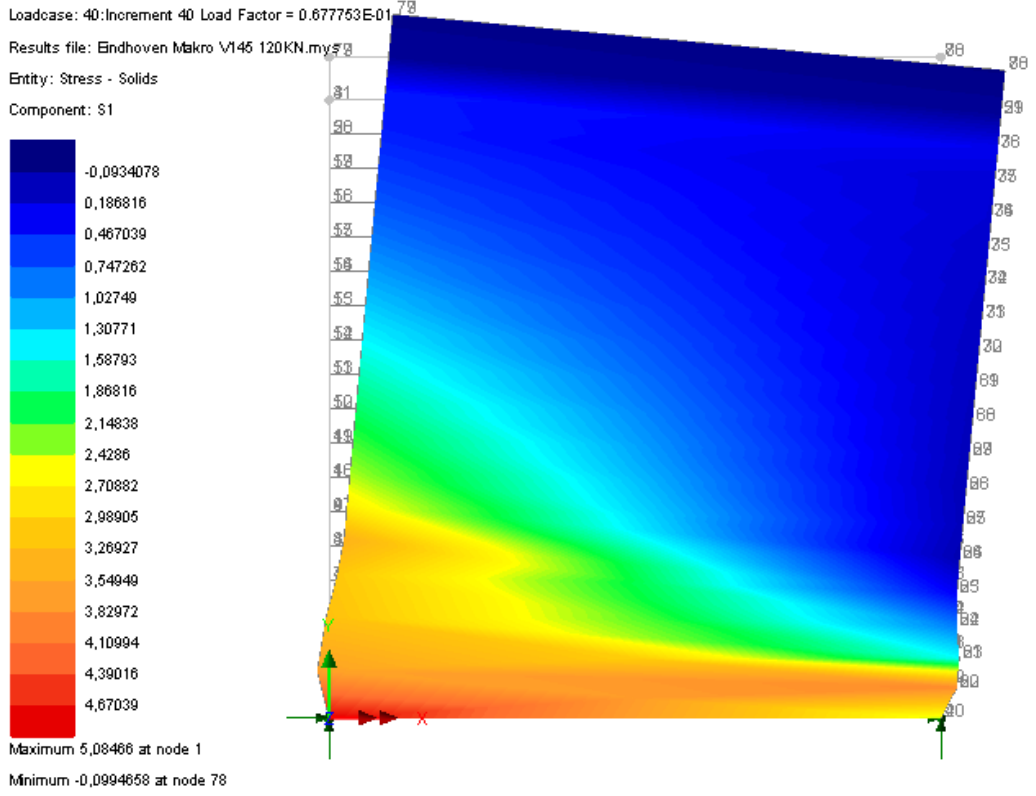
Şekil 4.21 Düşey yük uygulanmasının ardından başlangıç seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı



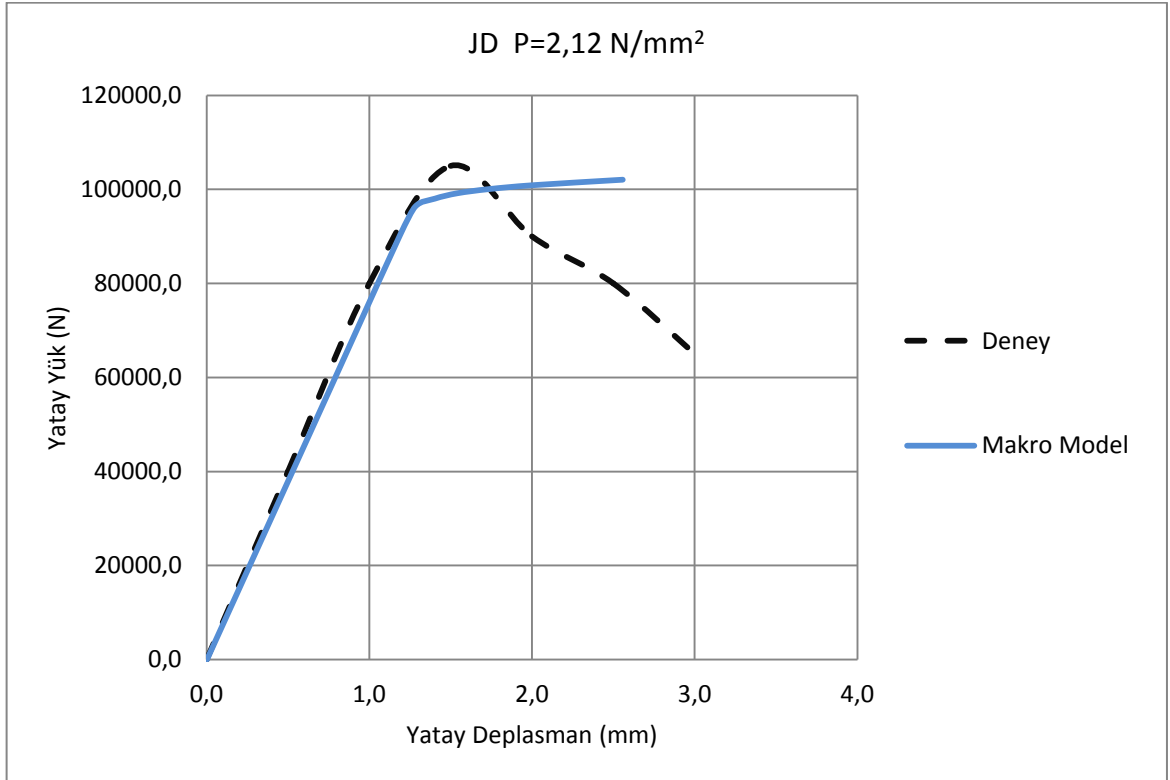
Şekil 4.22 Düşey yük uygulanmasının ardından orta seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı



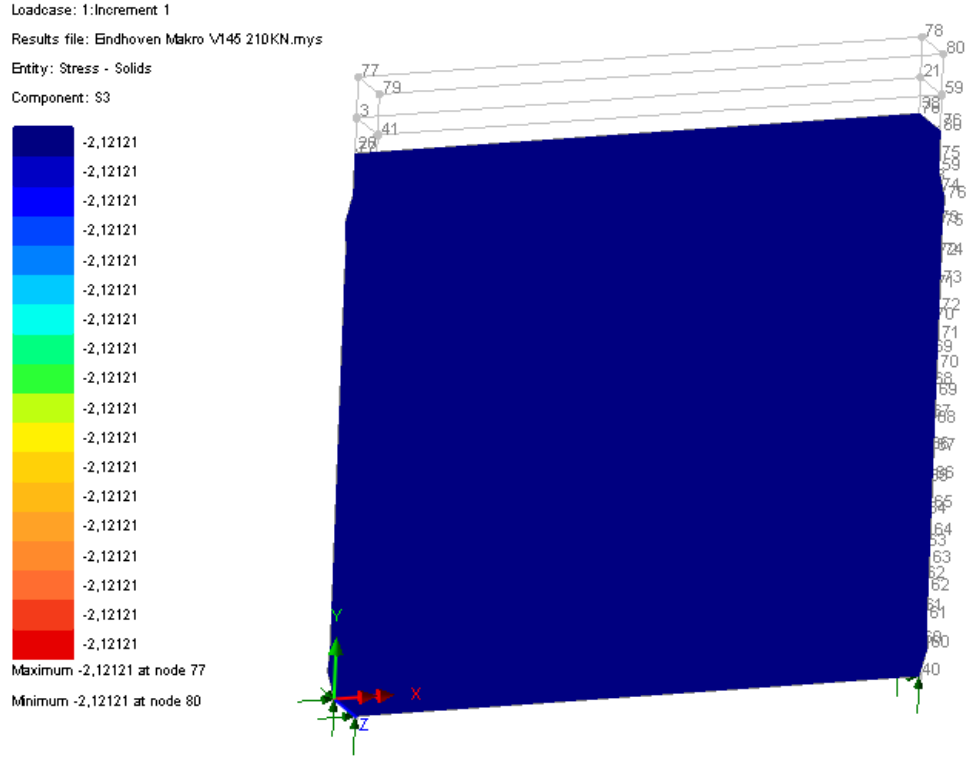
Şekil 4.23 Düşey yük uygulanmasının ardından ileri seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı



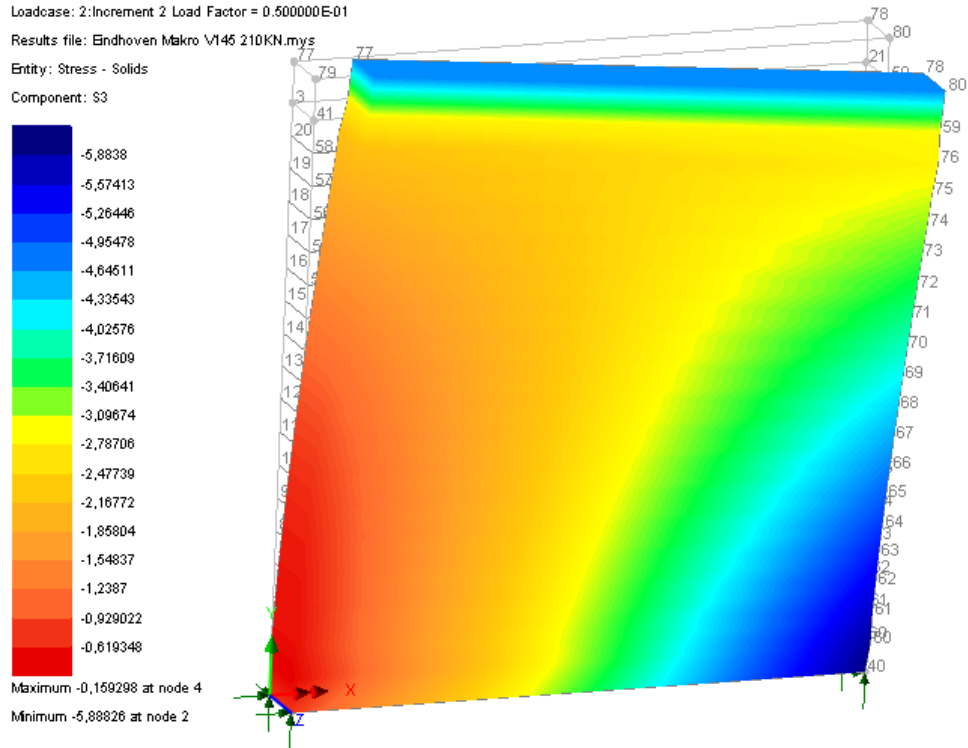
Şekil 4.24 Düşey yük uygulanmasının ardından üst seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı



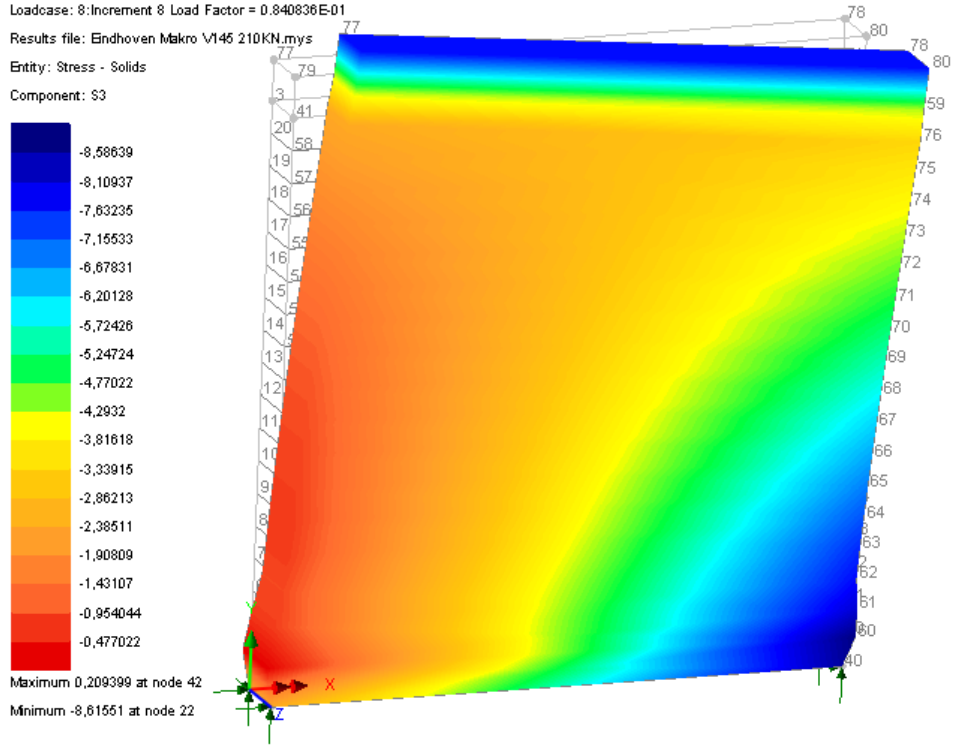
Şekil 4.25 $P=2,12 \text{ N/mm}^2$ için Nümerik model ve deney sonucu



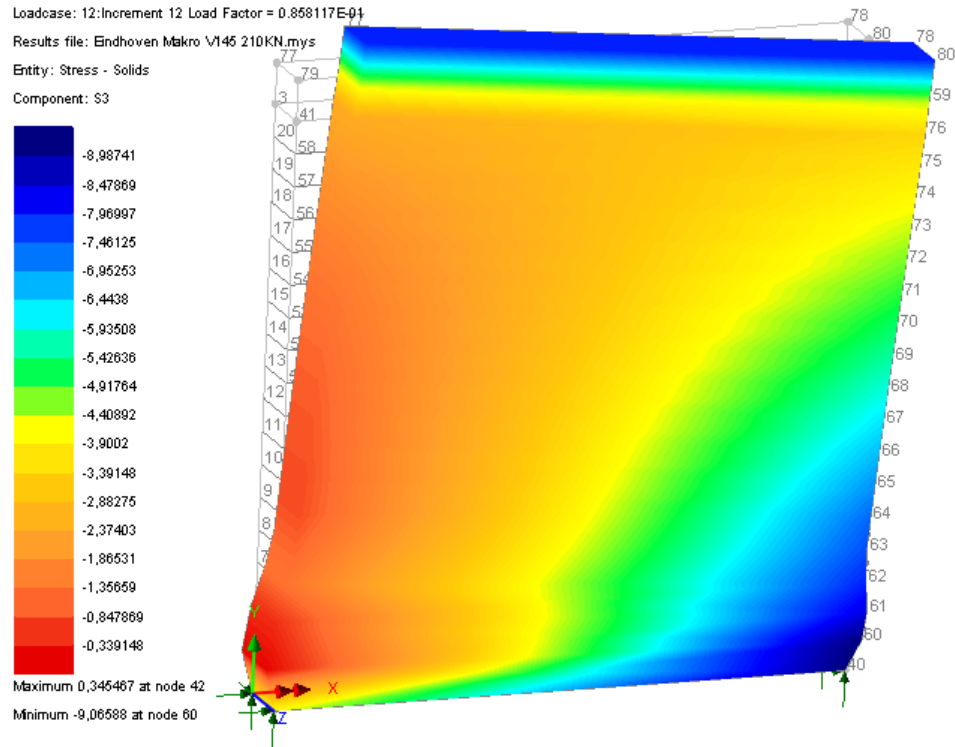
Şekil 4.26 P=210 kN Düşey yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı



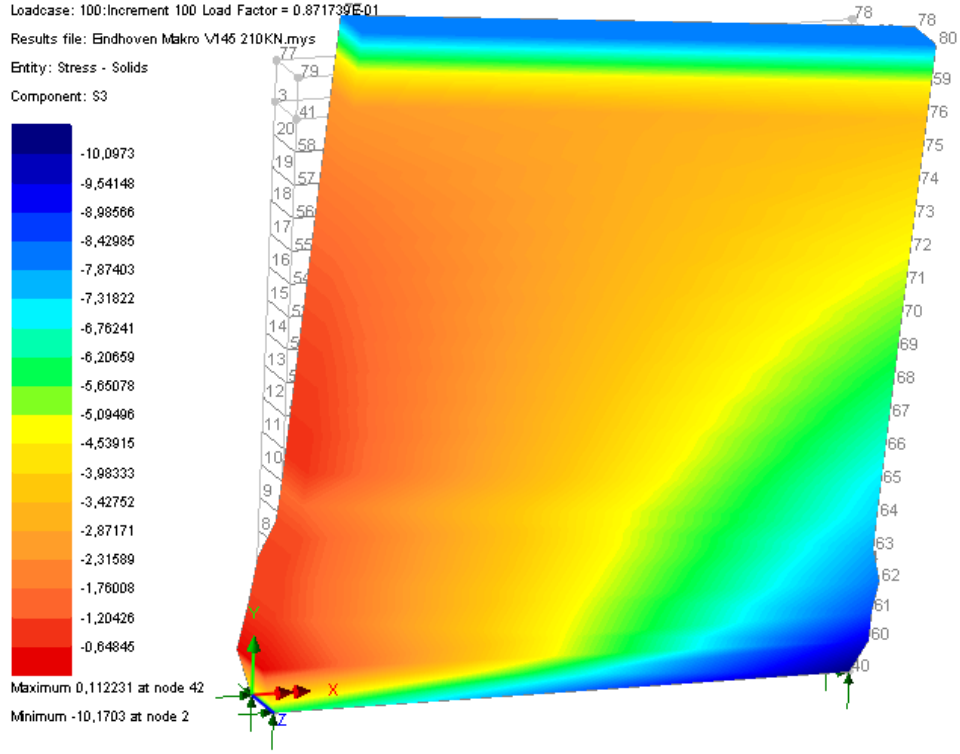
Şekil 4.27 Düşey yük uygulanmasının ardından başlangıç seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı



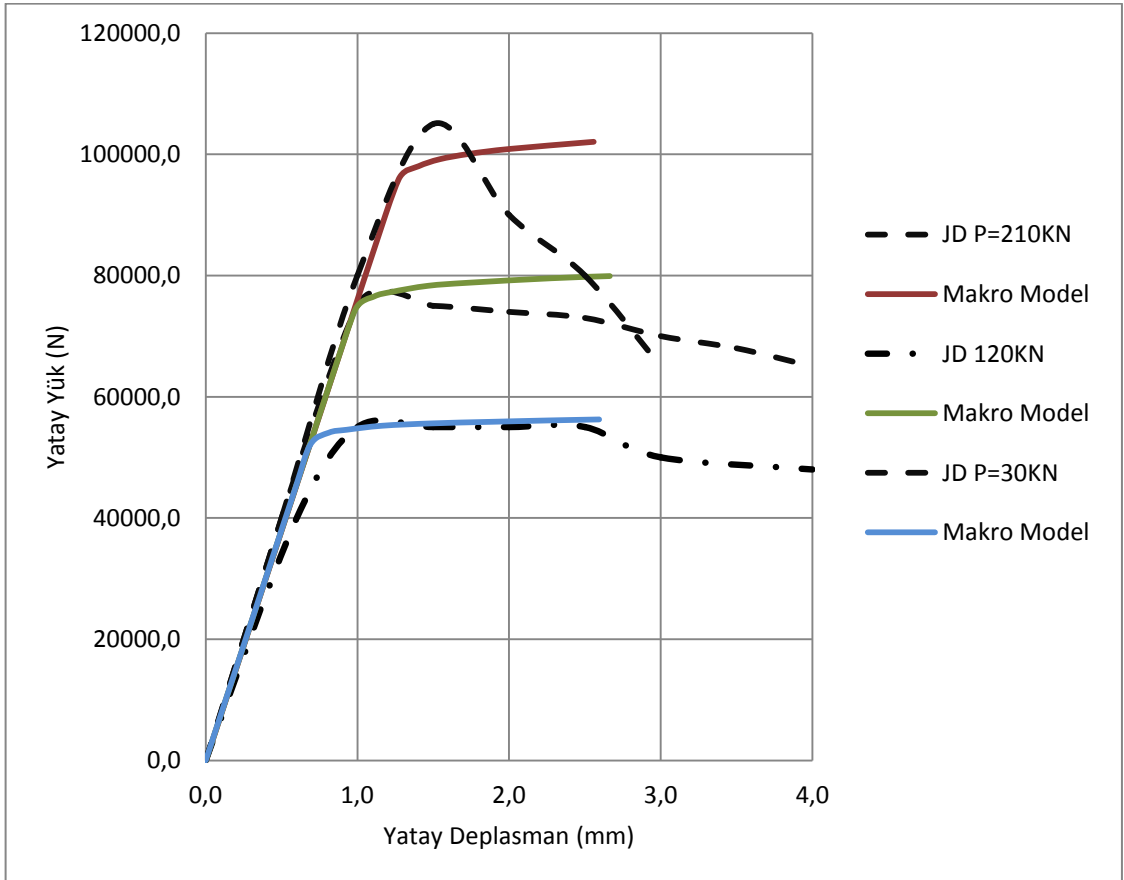
Şekil 4.28 Düşey yük uygulanmasının ardından orta seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı



Şekil 4.29 Düşey yük uygulanmasının ardından ileri seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı



Şekil 4.30 Düşey yük uygulanmasının ardından üst seviye yatay yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı



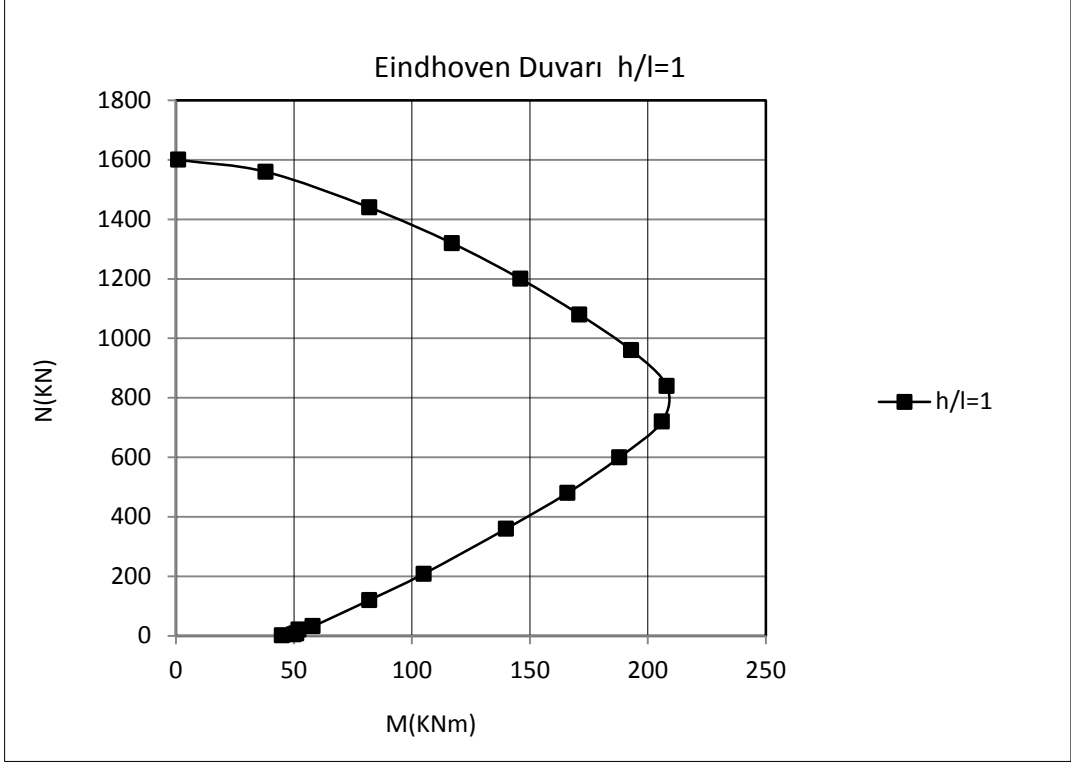
Şekil 4.31 Farklı düşey yük seviyelerinde yatay yük-yer değiştirme eğrisi

Ayrıca önerilen makro modelleme tekniği ile Eindhoven duvarı üzerinde narinlik etkisi araştırılmıştır. Farklı dűşey yük seviyeleri için narinlik oranının duvar davranışına etkisini irdelemek üzere aynı malzeme özellikli duvar örneklerinde duvar narinliği, yükseklik/kalınlık oranı 1, 10, 12,5, 15, 20 olacak şekilde farklı dűşey yük seviyeleri için çözümleneler yapılmış, karşılıklı etki diyagramları çizilmiştir. 2 boyutlu düzlemde çözümler alındığı için narinlik hesaplanırken uzunluk 1m olarak alınmıştır. Dűşey yükün dűřük olduğu durumlarda artan yatay yük etkisi ile kırılmanın yatay derzler doğrultusunda çatlaklar şeklinde olacağı görölmüştür.

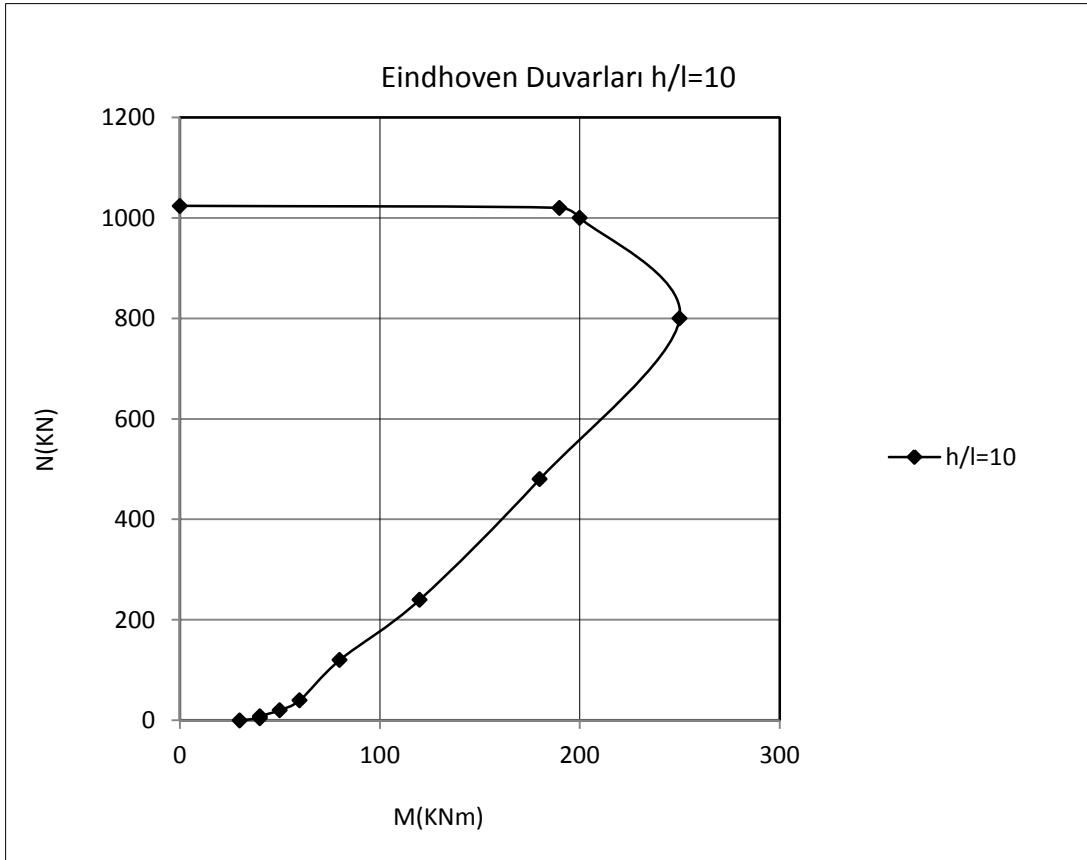
Yük taşıma kapasitesini belirlemek üzerine yapılan yaklaşımlarda sadece derzlerden geçen sonlu eleman ağı oluşturmak tatmin edici sonuçlar vermekte analiz sonuçları deneylerle uyum göstermektedir.

Dűşey yükün yüksek olduğu durumlarda karakteristik basınç kırılması şekli olan dűşey çatlaklar oluşması beklenmektedir. Ancak oluşturulan sonlu eleman ağı düzeni buna izin vermediği için yatay bantlardan oluşan modelde bu sonuç beklenemez. Burada tartışılması ve ilerde mikro modeller yardımıyla incelenmesi gereken, dűşey yükten dolayı oluşacak çatlamların dikkate alınabileceği dűşey derzleri kapsayan modellerin yapılmasıdır.

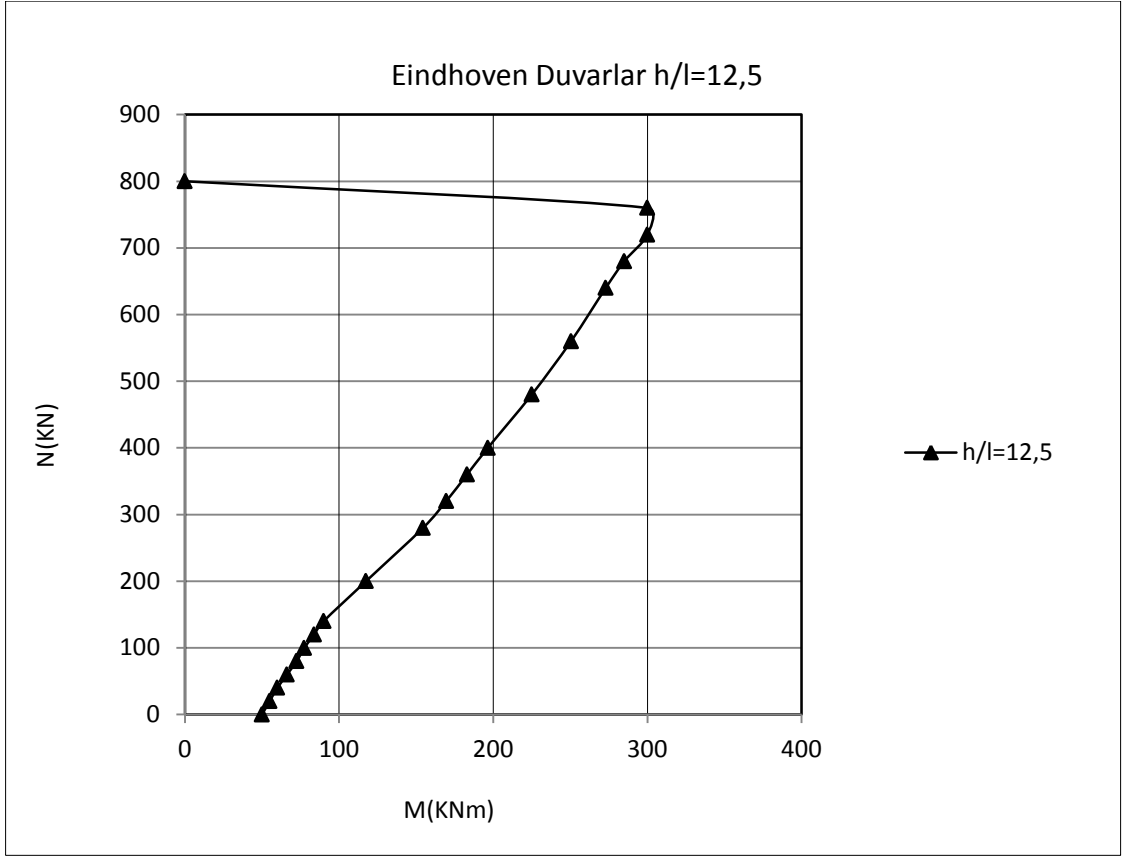
Ancak mevcut tarihi yapılar genellikle duvar taşıma kapasitesinin oldukça altında dűşey yük değerlerine zorlanmaktadır. Bu sebepten tarihi yapıların güvenlik katsayıları çok büyüktür [42].



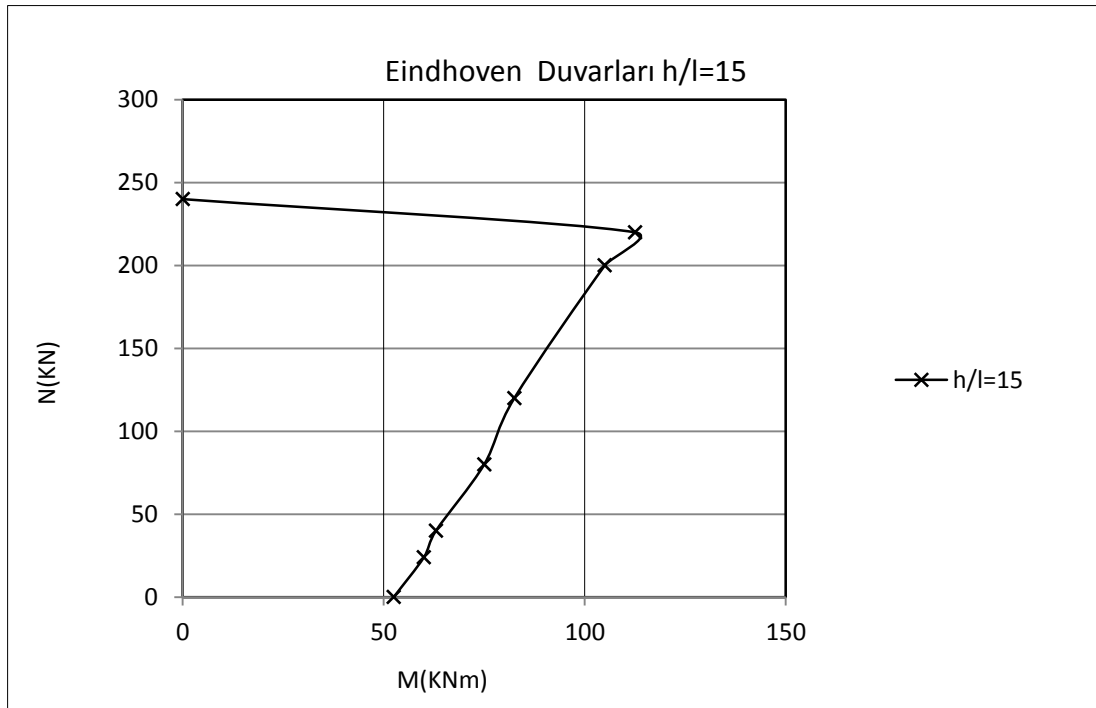
Şekil 4.32 Narinlik Oranı $h/l=1$ için Düşey Yük-Moment taşıma kapasitesi eğrisi



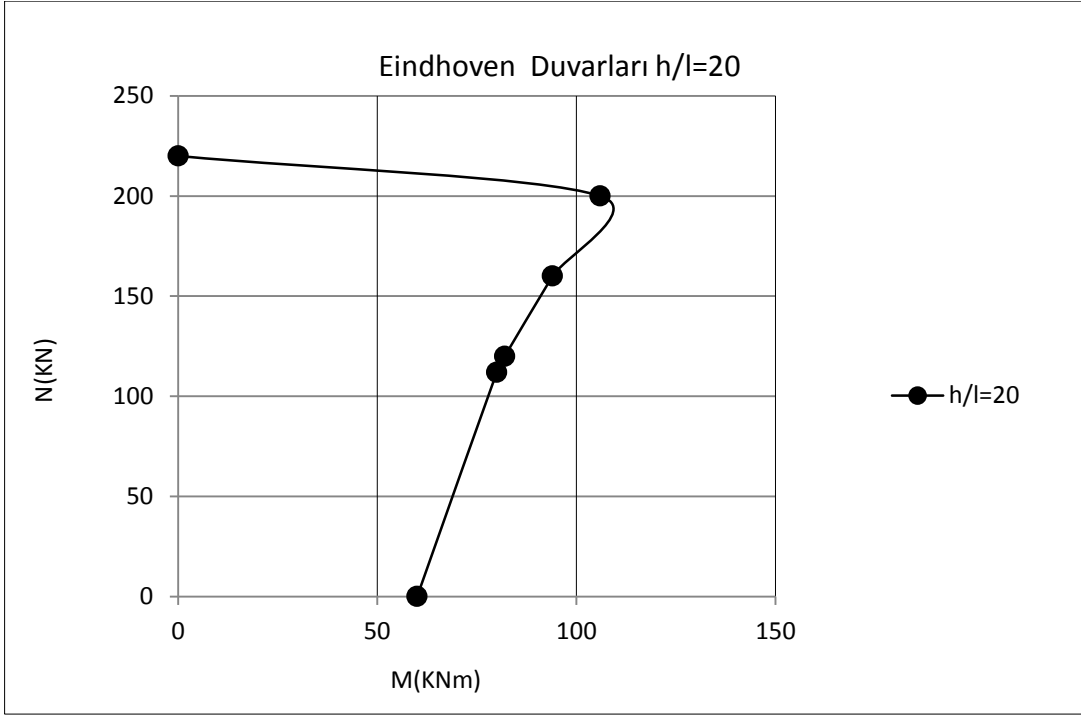
Şekil 4.33 Narinlik Oranı $h/l=10$ için Düşey Yük-Moment taşıma kapasitesi eğrisi



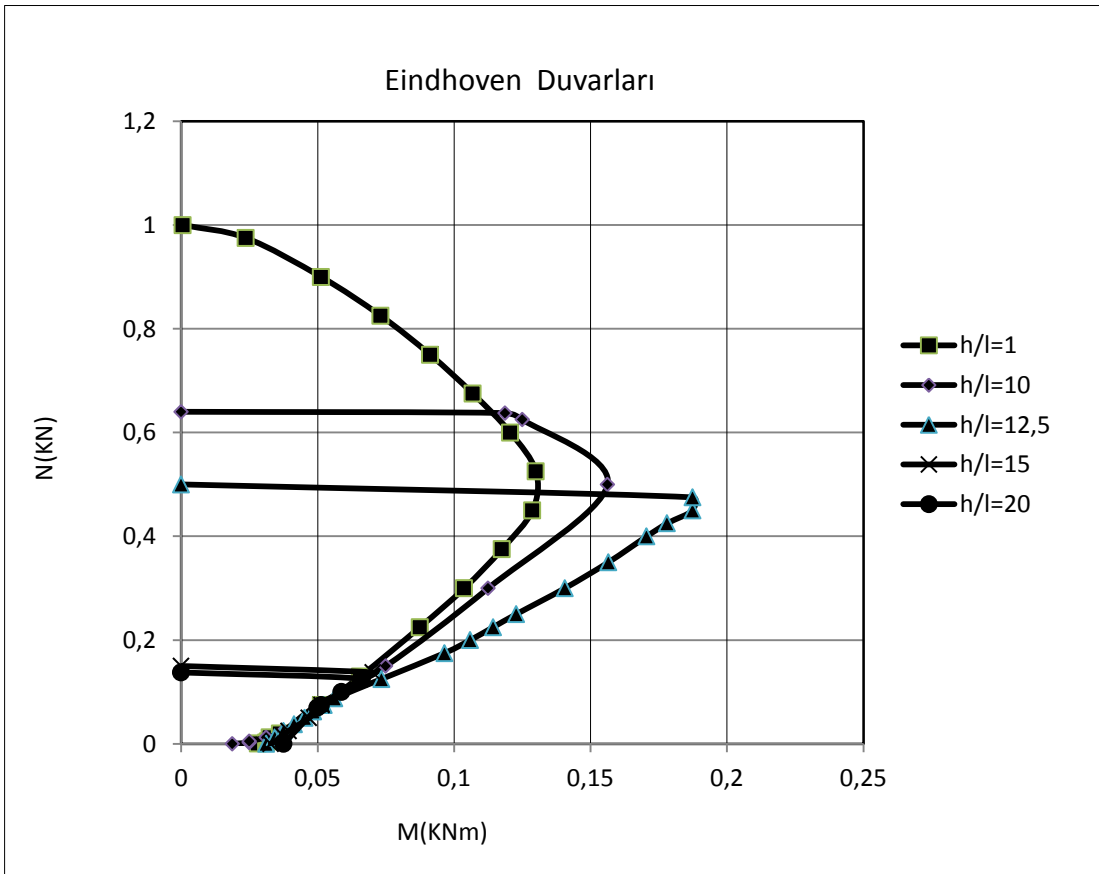
Şekil 4.34 Narinlik Oranı $h/l=12,50$ için Düşey Yük-Moment taşıma kapasitesi eğrisi



Şekil 4.35 Narinlik Oranı $h/l=15$ için Düşey Yük-Moment taşıma kapasitesi eğrisi



Şekil 4.36 Narinlik Oranı $h/l=20$ için Düşey Yük-Moment taşıma kapasitesi eğrisi



Şekil 4.37 Farklı Narinlik Oranları için Düşey Yük-Moment taşıma kapasitesi eğrileri

Şekil 4.32-37'de görülen grafiklerde, narinlik oranı sırasıyla $h/l=1$, $h/l=10$, $h/l=12,5$, $h/l=15$, $h/l=20$ için, öngörülen modelde $c=2,2$ ve $\phi=60^\circ$ alınarak yapılan çözümlerde yüksekliği artan duvarların düşey yük taşıma kapasitesindeki azalma açık bir şekilde gözlenmektedir.

Çeşitli kaynaklarda narinlik oranıyla ilgili belirtilen farklı katsayı ve sınırlamalar mevcuttur. Bu şartlardan önemli olanlardan bazıları şunlardır;

ACI standardı[93], narinlik oranına bağlı olarak f_a duvar basınç dayanımını hesaplamakta R gibi bir azaltma katsayısı öngörmekte ve elemanın çalışma gerilmesini düşük seviyeye çekmektedir.

$$f_a = Rf_m \quad (4.11)$$

$$h/t \leq 29 \text{ için}$$

$$R = 1 - (h/40t)^2 \quad (4.12)$$

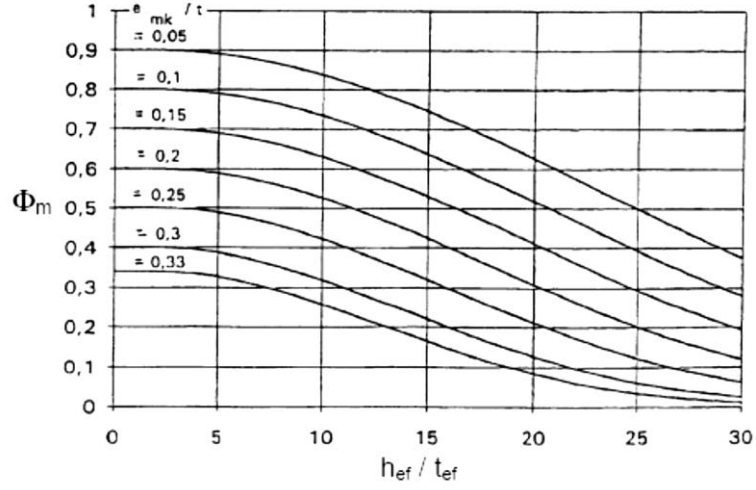
$$h/t > 29 \text{ için}$$

$$R = (20t/h)^2 \quad (4.13)$$

Ayrıca kritik yük Euler formülü ile hesaplanacak olursa bulunan değerin %25 azaltılması gerektiği vurgulanmaktadır.

$$P_e = \pi^2 EI / h^2 (1 - \frac{2e}{t}) \quad (4.14)$$

Eurocode 6 [60]'da duvarın narinlik oranı ve taşıma kapasitesi ile ilgili açıklamalar daha ayrıntılı yapılmaktadır. Burada duvarın mesnetlenme biçimine göre etkili yüksekliği farklı alınmakta, narinlik oranı 29 olarak sınırlandırılmakta ve azaltma katsayısını bulmak için Şekil 4.38'de görülen, eksantriklik ve narinlik oranı birlikte düşünülerek hazırlanmış, grafik sunulmaktadır.



Şekil 4.38 Eurocode 6’da duvarın narinlik oranı, eksantriklik ve taşıma kapasite ile ilgili ilişki[60]

BS 5628[94] ise yük azaltma katsayısı ile ilgili, yüklemenin eksantrik olması durumu da dikkate alınmış bir katsayı tablosu vermektedir (Çizelge 4.2). BS 5628’de narinlik oranı $h/t=27$ ile sınırlandırılmıştır.

Çizelge 4.2 BS 5628 ise yük azaltma katsayıları

Narinlik Oranı h_{ef}/t_{ef}	Eksantriklik oranı			
	$<0,05t$	$0,1t$	$0,2t$	$0,3t$
0	1	0,88	0,66	0,44
6	1	0,88	0,66	0,44
8	1	0,88	0,66	0,44
10	0,97	0,88	0,66	0,44
12	0,93	0,87	0,66	0,44
14	0,89	0,83	0,66	0,44
16	0,83	0,77	0,64	0,44
18	0,77	0,70	0,57	0,44
20	0,70	0,64	0,51	0,37
22	0,62	0,56	0,43	0,30
24	0,53	0,47	0,34	
26	0,45	0,38		
27	0,40	0,33		

“Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik 2007” [95]’de belirtilen azaltma katsayıları Çizelge 4.3’de verilmiştir.

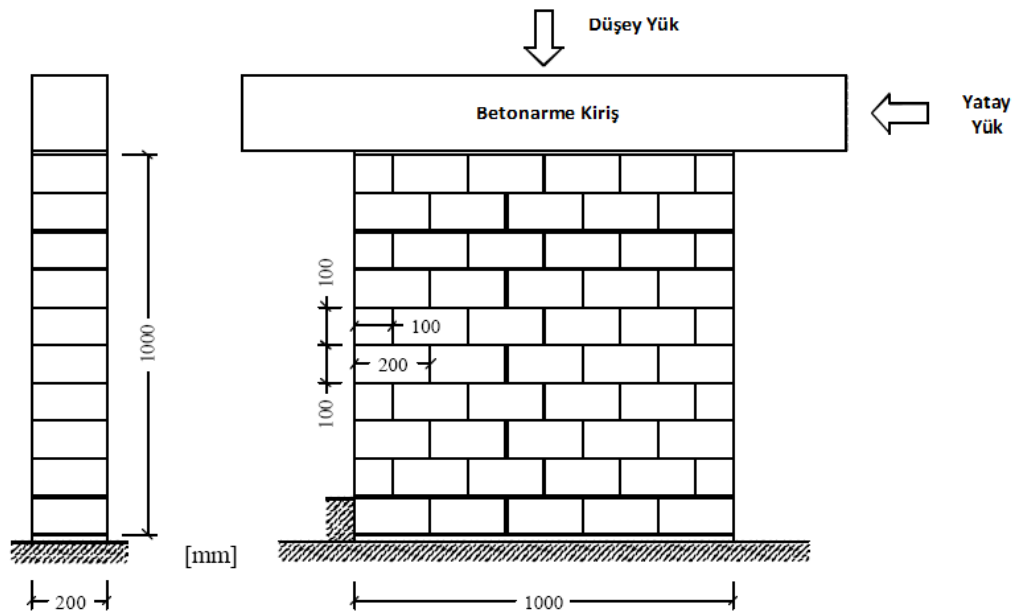
Çizelge 4.3 Yığma binalar için depreme dayanıklı tasarım kuralları [95]

Narinlik oranı	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Azaltma katsayısı	1.0	0.95	0.89	0.84	0.78	0.73	0.67	0.62	0.56	0.51

Birçok ülkenin şartnamelerinde duvarın narinliğine bağlı olarak, yüklerde değişik oranlarda azaltma katsayıları uygulanmaktadır. Yapılan hesaplarda azaltma katsayıları ile ilişkisi gösterilmiş (Çizelge 4.2-3) ve yönetmeliklerde belirtilen azaltma ile oldukça yakın değerler olduğu belirlenmiştir.

4.1.2.2 Oliveira Deney Duvarları

Minho Üniversitesi ve Katalonya Politeknik Üniversitesinin ortak yaptığı araştırma çerçevesinde, mevcut bilgileri geliştirmek amacıyla yığma duvar deneyi yapılmıştır. Bu deneyde 7 adet, 20x20x10cm boyutlarında taş ile kuru örülen 100x100x20cm boyutlarında taş duvar imal edilerek, yatay ve düşey yükler altındaki davranışı incelenmiştir[96], [97], [98], [99]. Deney düzeneği Şekil 4.39'de, bu duvarlar ile ilgili özet bilgiler Çizelge 4.4'de gösterilmektedir. Deney duvarları imal edilmeden önce laboratuvarında yapılan tek eksenli basınç ve kesme analizlerinde taş birimin basınç dayanımı ve elastisite modülü elde edilmiştir.



Şekil 4.39 Oliveira 1.seri deneyleri geometrik verileri

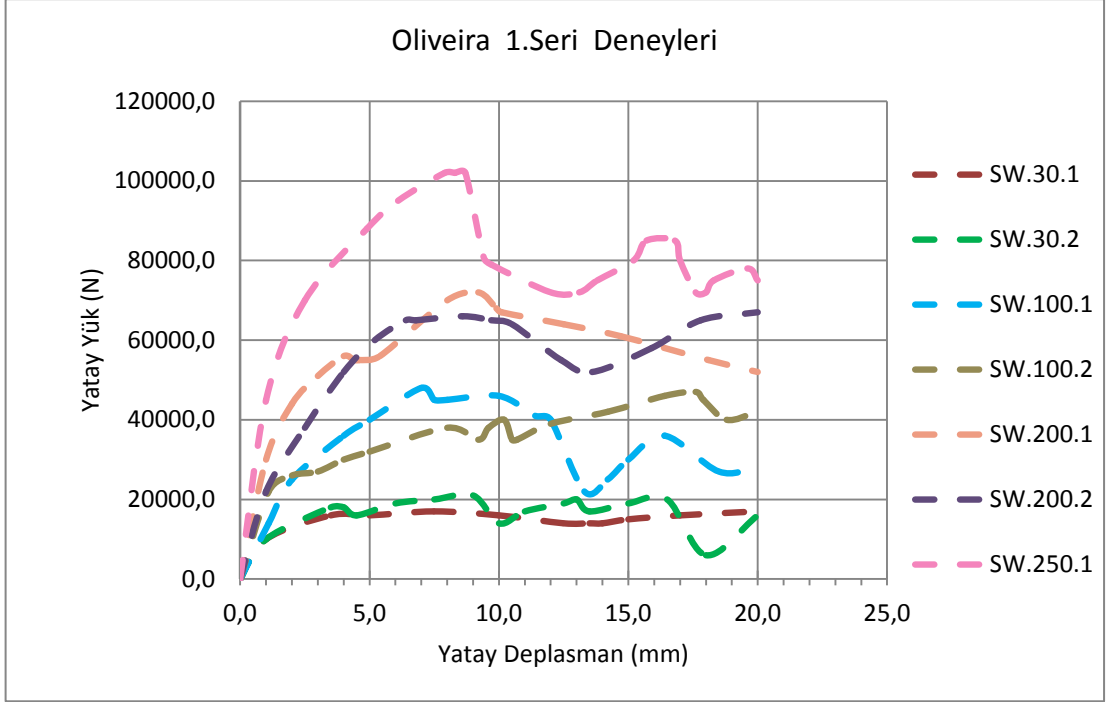
Çizelge 4.4 Oliveira 1.seri deneyleri özet bilgileri

Duvar isimleri	Duvar boyutları (cm)	Eleman boyutu (cm)	Uygulanan düşey yük (kN)	Düşey yükte gerilme (MPa)	Max. yatay yükler Deneysel	Max. yatay yükler Nümerik
SW.30.1	100x100x20	20x20x10	30	0,15	22	20
SW.30.2	100x100x20	20x20x10	30	0,15	23	20
SW.100.1	100x100x20	20x20x10	100	0,5	42	46
SW.100.2	100x100x20	20x20x10	100	0,5	49	46
SW.200.1	100x100x20	20x20x10	200	1	72	69
SW.200.2	100x100x20	20x20x10	200	1	69	69
SW.250.1	100x100x20	20x20x10	250	1,25	102	90

7 adet duvardan 2'sine 30kN'luk düşey yük uygulanmış ardından yatay yük etkilmiş ve yatay yük-yer değiştirme eğrileri elde edilmeye çalışılmıştır. Benzer şekilde 2 adet duvara düşeyde 100kN yük uygulanmış ve yatay yük-yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Kalan 3 duvardan ikisine 200'er kN düşey yük, tek duvara ise 250kN düşey uygulanarak benzer işlem tekrarlanmıştır. Duvarda oluşan gerilme değerleri, düşey yük değeri duvar kesit alanına oranlanarak bulunmuştur (Çizelge 4.4). Tarihi yığma yapılara benzerlik göstermesi amacıyla düşük düşey yükler altında çalışılmıştır. Yüksek düşey yük değerleri olan 200kN ve 250kN için burkulma riski bulunduğu belirtilmektedir [96]. 250kN düşey yük uygulanan duvar, çok küçük bir yatay yük ile göçmüş olan diğer bir deney duvarında burkulma ön plana çıktığı için değerlendirme dışı bırakılmıştır. Deney düzeneğinde tabanda yüksek dayanımlı ($\cong 50\text{MPa}$) hızlı sertleşen harç kullanılmıştır. Ardından duvarların üst kısmında benzer şekilde bağlantının çok iyi olması için yüksek dayanımlı harç ile düzeltme yapılmış ve üzerine yatay yükün üzerine uygulanacağı betonarme kiriş yerleştirilmiştir. Duvarın imalatı tamamlandıktan sonra belirlenen yerlere 8 adet yatay yer değiştirme ölçüm aleti, LVDT (Linear Variable Differential transformer), yerleştirilmiştir.

Deneyde 1000kN kapasiteli, yükleme hızı 1kN/s olan hidrolik pres kullanılmıştır. Betonarme kirişin düşey ve yatay yönde hareketi engellenmemiştir.

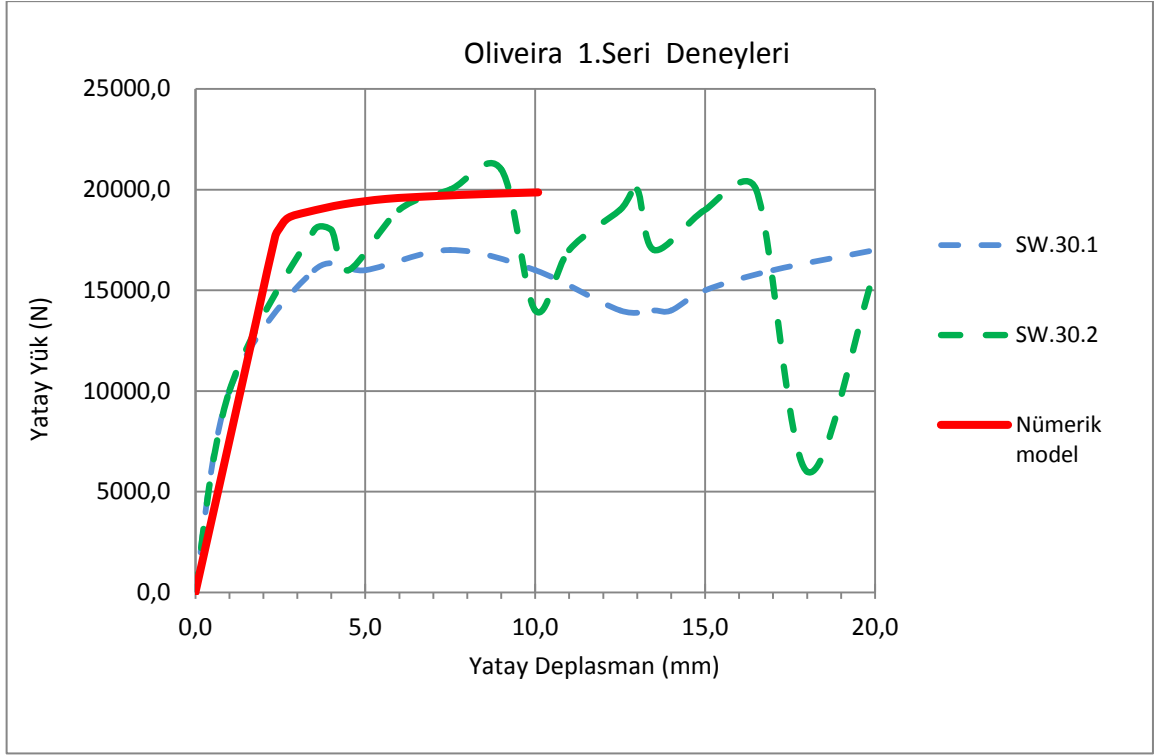
Yapılan bu deneyler sonucunda elde edilen yatay yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 4.40'da gösterilmektedir.



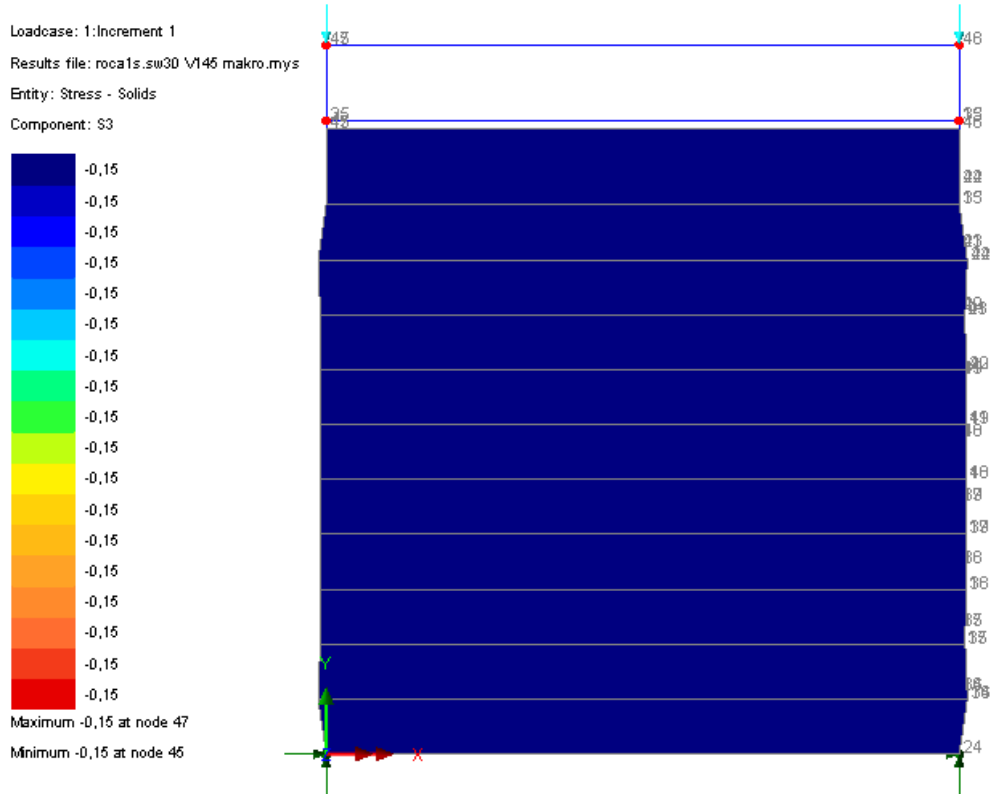
Şekil 4.40 Oliveira 1.seri deneyleri Yatay yük-Yer Değiştirme eğrileri [96]

Bu çalışmada önemli konulardan birisi duvar elemanın basınç dayanımı ve elastisite modülü hesaplarında ortaya çıkan belirsizliktir. Elastisite modülünün yüklemenin şekli, hızı ve şiddetine göre farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir. Oliveira doktora tezinde birim elemanda yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen elastisite değerleri ile duvardan alınan ölçümlerle bulunan sonuçlar arasında büyük farklar olduğunu belirtmektedir. Duvarda ölçülen elastisite modülü birim elemanın yaklaşık %3,5-7,5 'i kadar fark bulunmuştur. Ölçümler düşey yükün değişimi ile oldukça ilişkilidir [96].

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar ile önerilen modelin uygunluğunu kontrol etmek amacıyla duvarın sonlu eleman modeli oluşturulmuştur (Şekil 4.41). Oluşturulan model tabanda harekete izin verilmeyen ankastre mesnet ile tutturulmuştur. Üst tarafı ise rijit plak tanımlanarak uygulanacak yükün homojen olarak duvara aktarması düşünülmüştür.



Şekil 4.42 Oliveira 1.seri deneylerinde 30kN düşey yük için bulunan Yatay yük-Şekil değiştirme eğrileri



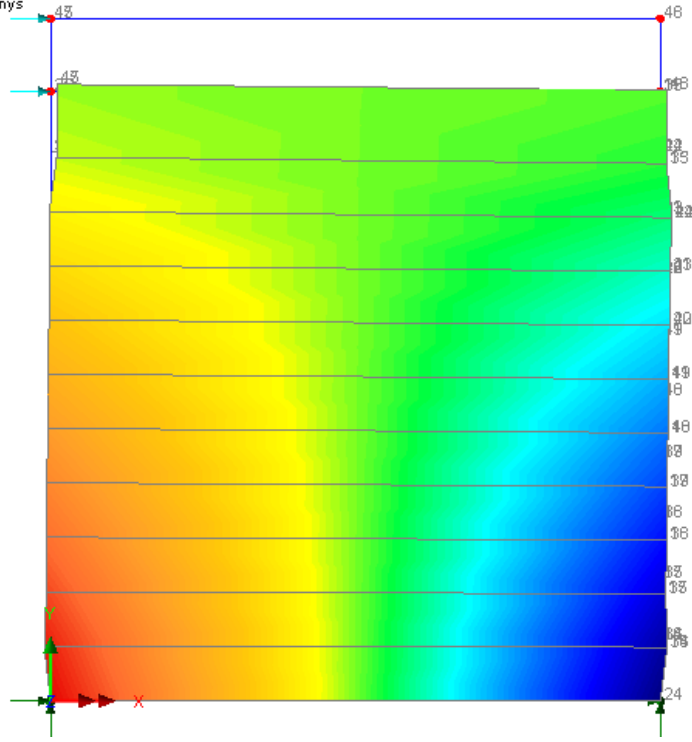
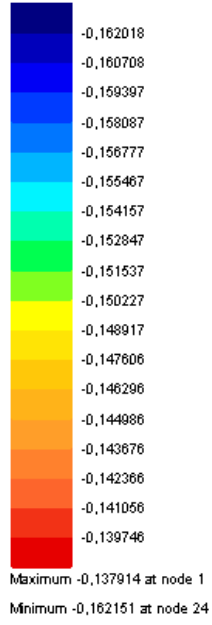
Şekil 4.43 30kN düşey yük için gerilme dağılımı

Loadcase: 2: Increment 2 Load Factor = 0.100000E-01

Results file: roca1s.sw30 \145 makro.mys

Entity: Stress - Solids

Component: S3



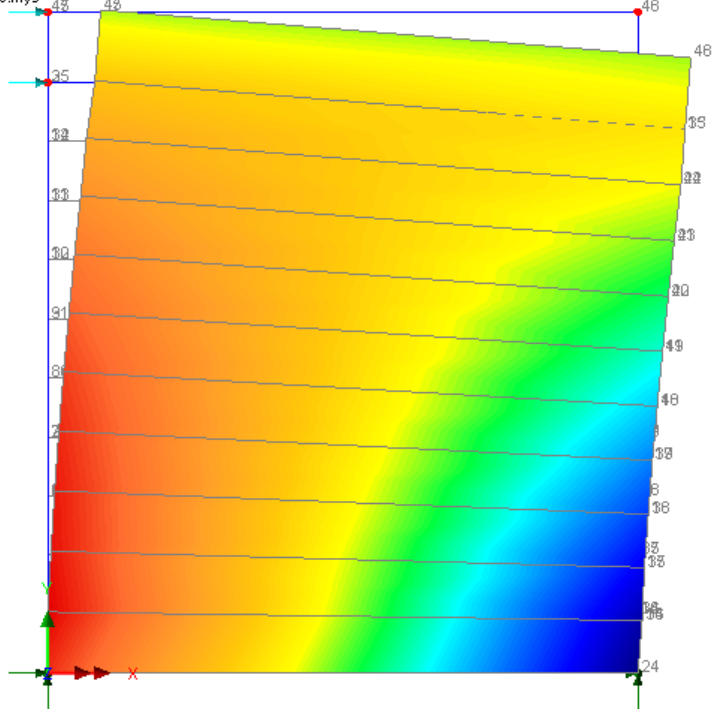
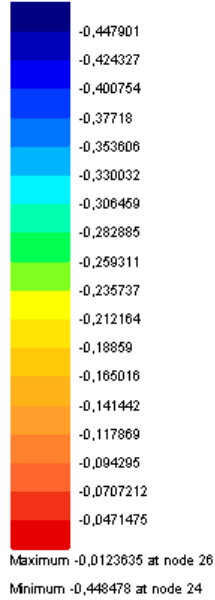
Şekil 4.44 30kN düşey yük için başlangıç gerilme dağılımı

Loadcase: 5: Increment 5 Load Factor = 0.241623

Results file: roca1s.sw30 \145 makro.mys

Entity: Stress - Solids

Component: S3



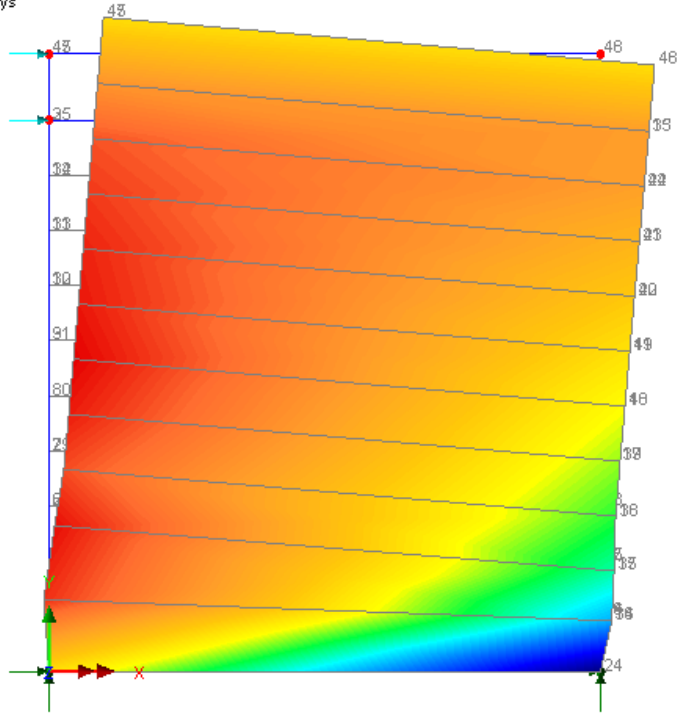
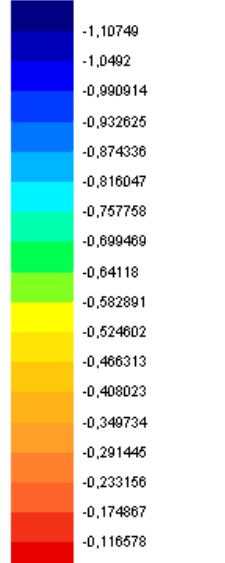
Şekil 4.45 30kN düşey yük için gerilme dağılımı gelişimi

Loadcase: 40: Increment 40 Load Factor = 0.504301

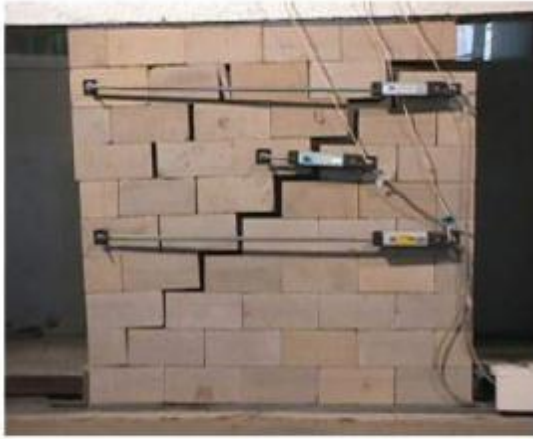
Results file: roca1s.sw30 \145 makro.mys

Entity: Stress - Solids

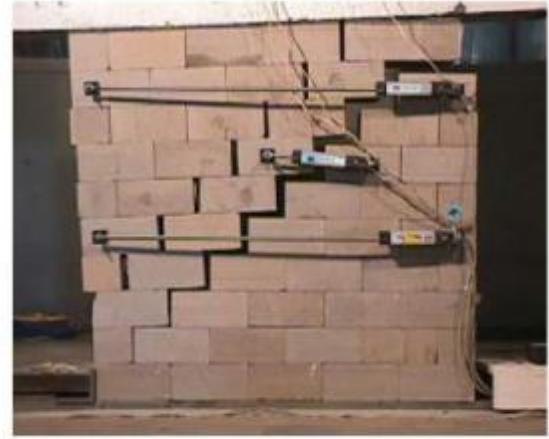
Component: S3



Şekil 4.46 30kN düşey yük için göçme durumundaki gerilme dağılımı

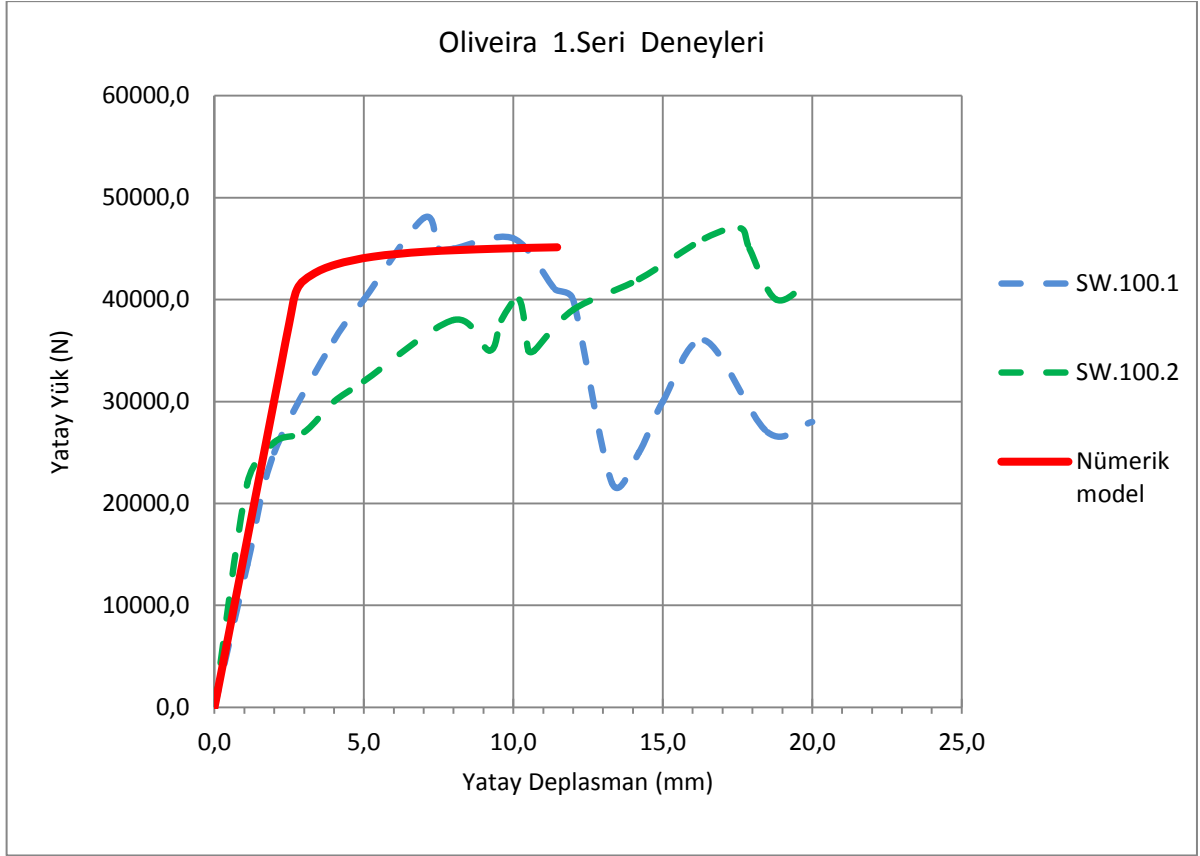


SW.30.1

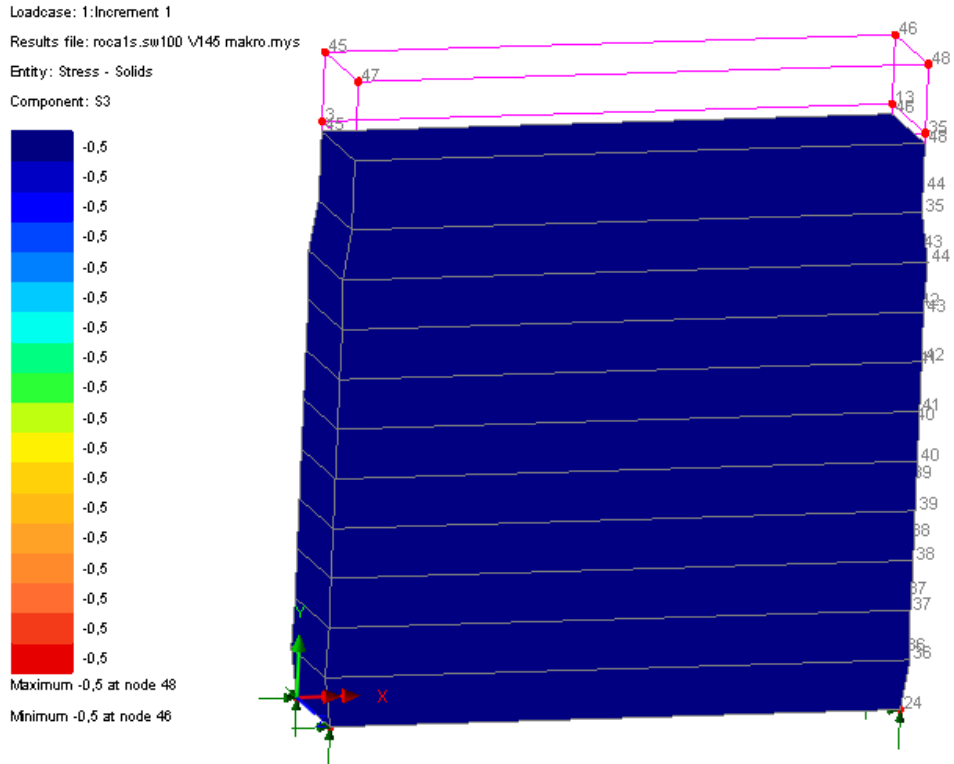


SW.30.2

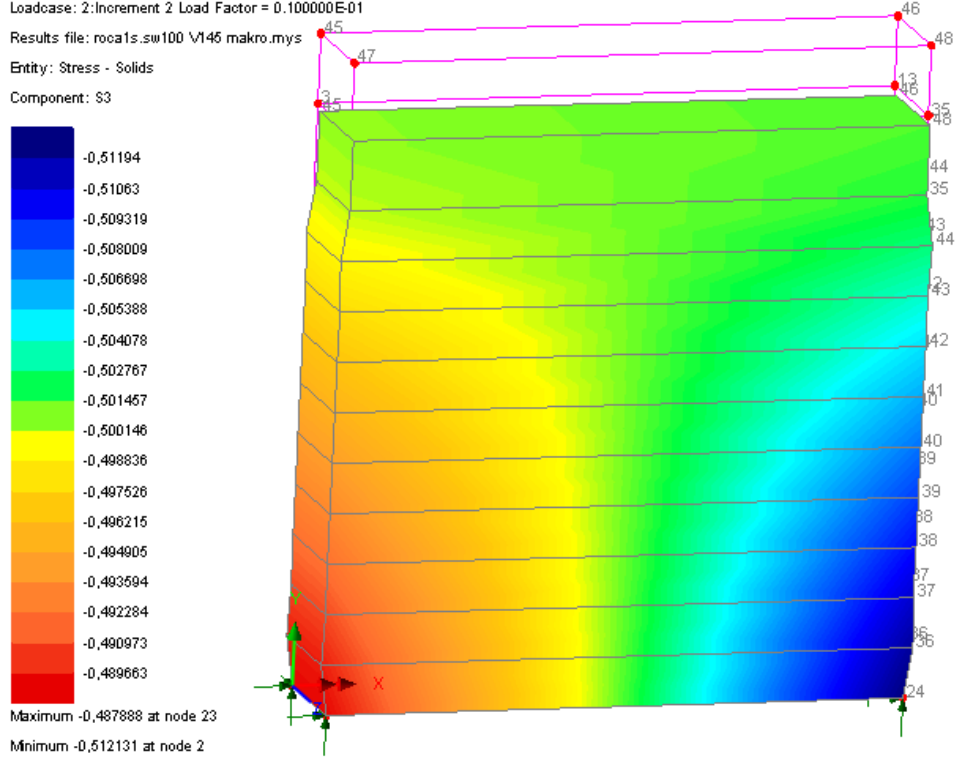
Şekil 4.47 Oliveira (Roca) 1.seri deneylerinde 30kN düşey yük için göçme durumu fotoğrafları[96]



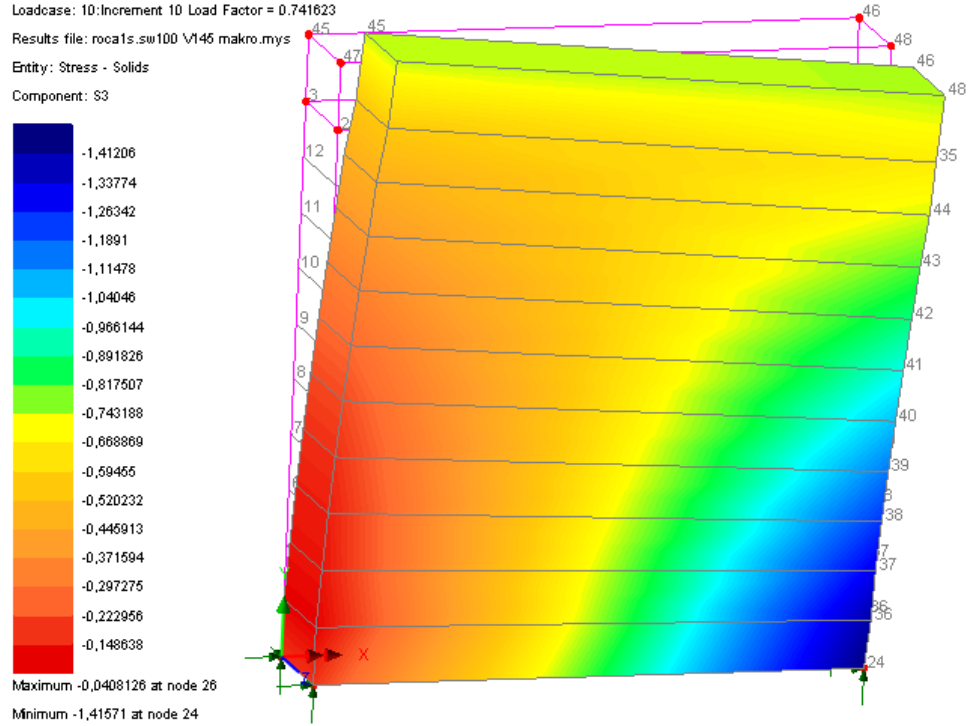
Şekil 4.48 Oliveira 1.seri deneyleri 100kN düşey yük için bulunan Yatay yük-Şekil değiştirme eğrileri



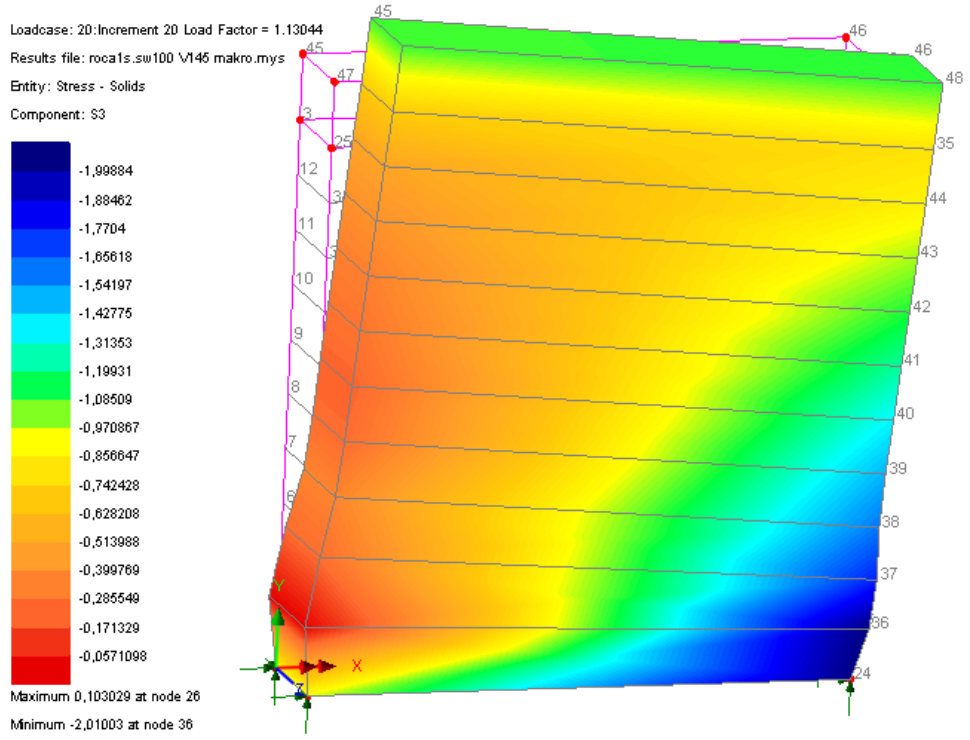
Şekil 4.49 100kN düşey yük için gerilme dağılımı



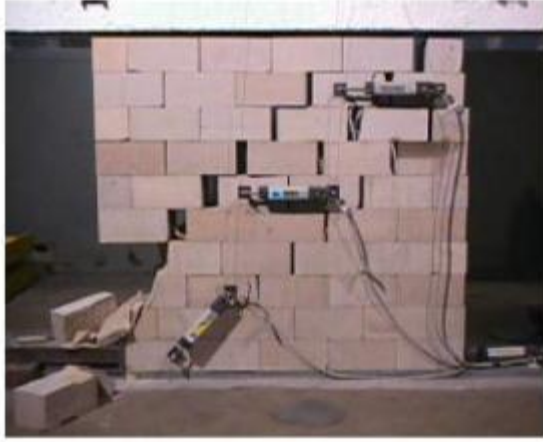
Şekil 4.50 100kN düşey yük için başlangıç gerilme dağılımı



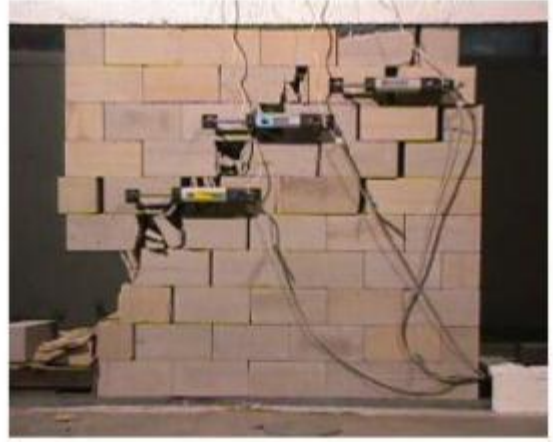
Şekil 4.51 100kN düşey yük için gerilme dağılımı gelişimi



Şekil 4.52 100kN düşey yük için göçme durumundaki gerilme dağılımı

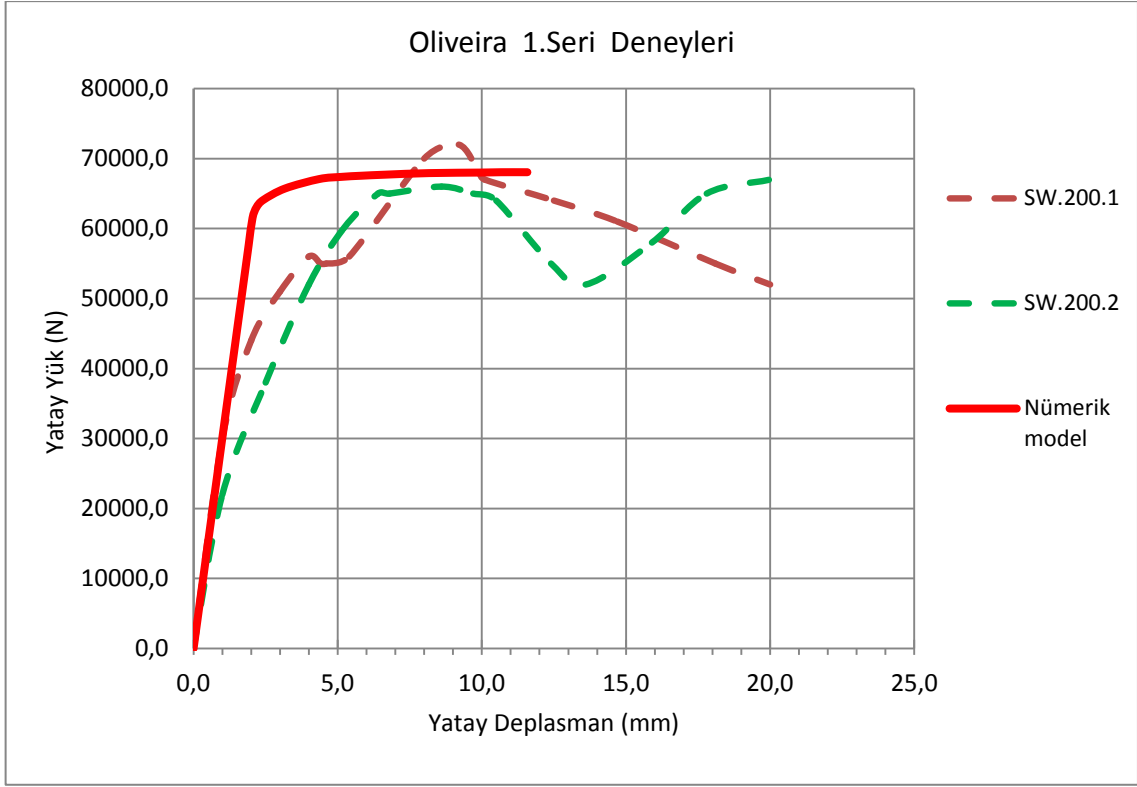


SW.100.1

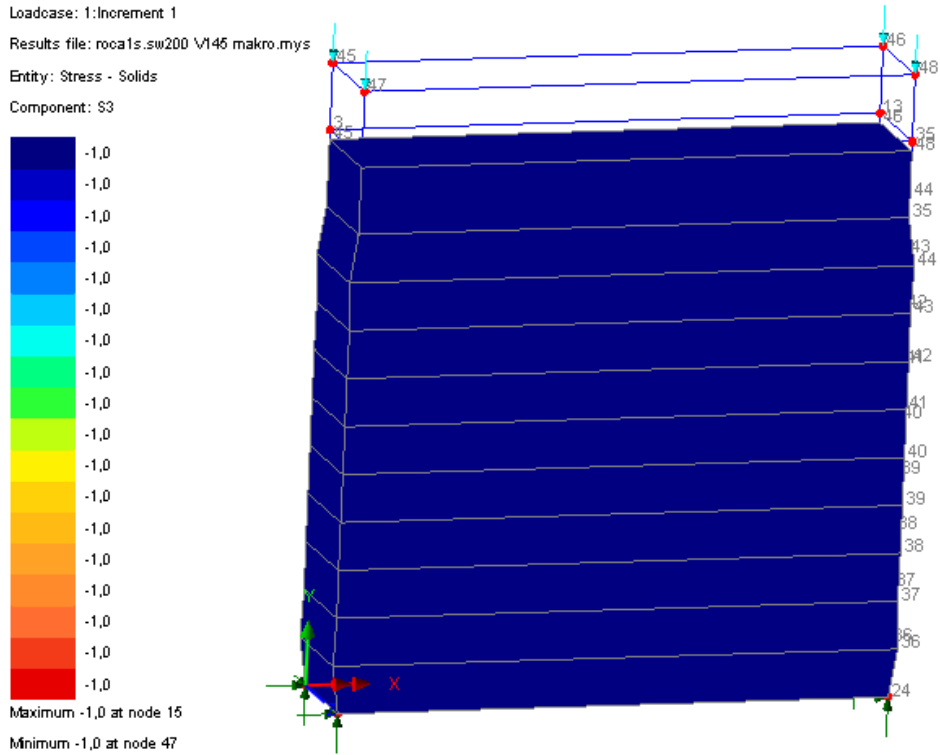


SW.100.2

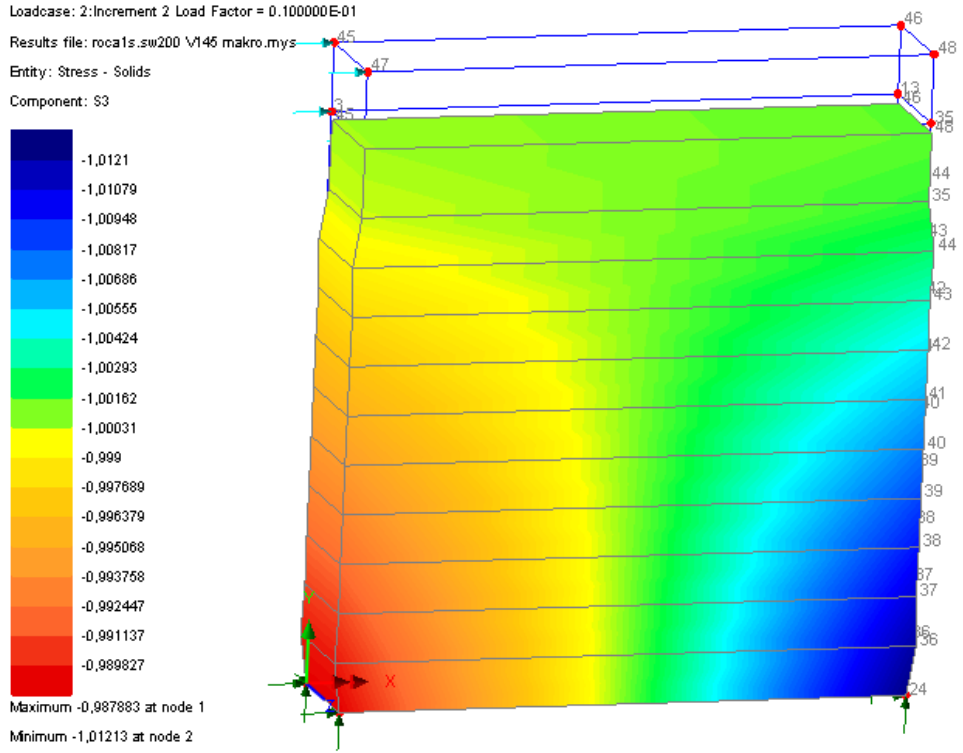
Şekil 4.53 Oliveira (Roca) 1.seri deneylerinde 100kN düşey yük için göçme durumu fotoğrafları[96]



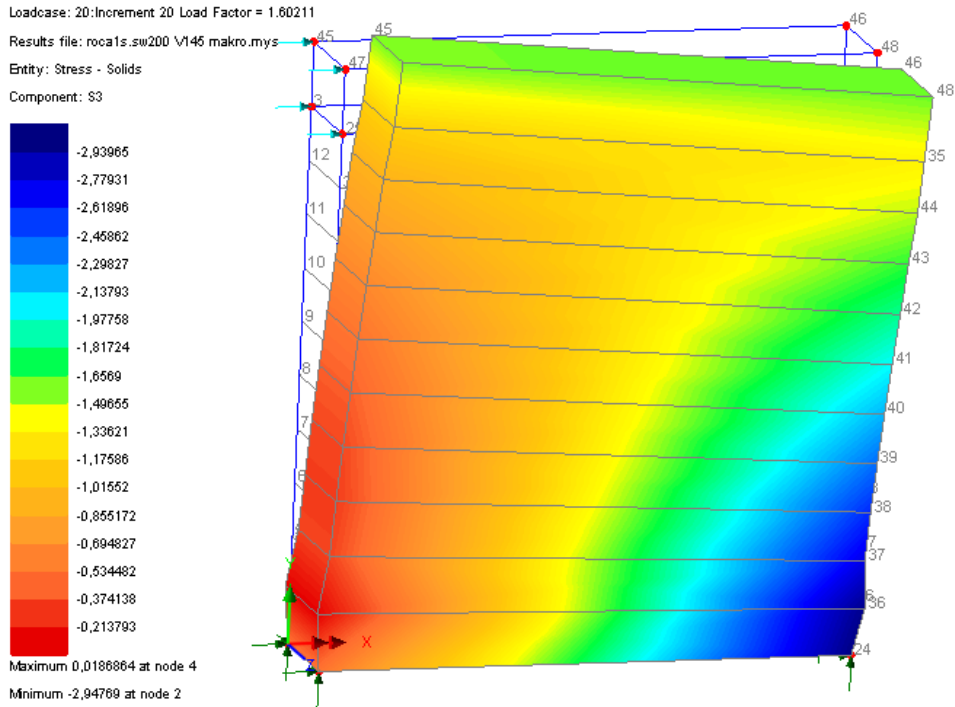
Şekil 4.54 Oliveira 1.seri deneyleri 200kN d¼Őey y¼k i¼in bulunan Yatay y¼k-Şekil değiştirme eğrileri



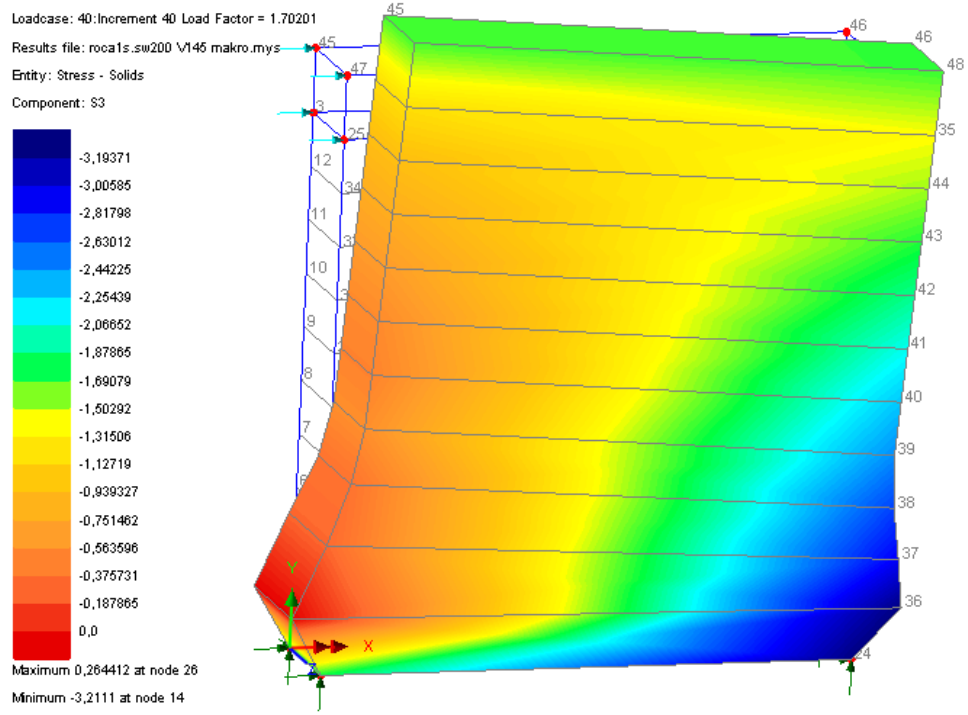
Şekil 4.55 200kN d¼Őey y¼k i¼in gerilme dağılımı



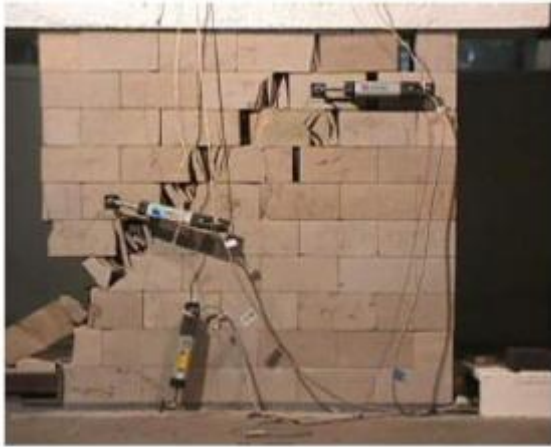
Şekil 4.56 200kN düşey yük için başlangıç gerilme dağılımı



Şekil 4.57 200kN düşey yük için gerilme dağılımı gelişimi



Şekil 4.58 200kN düşey yük için göçme durumundaki gerilme dağılımı

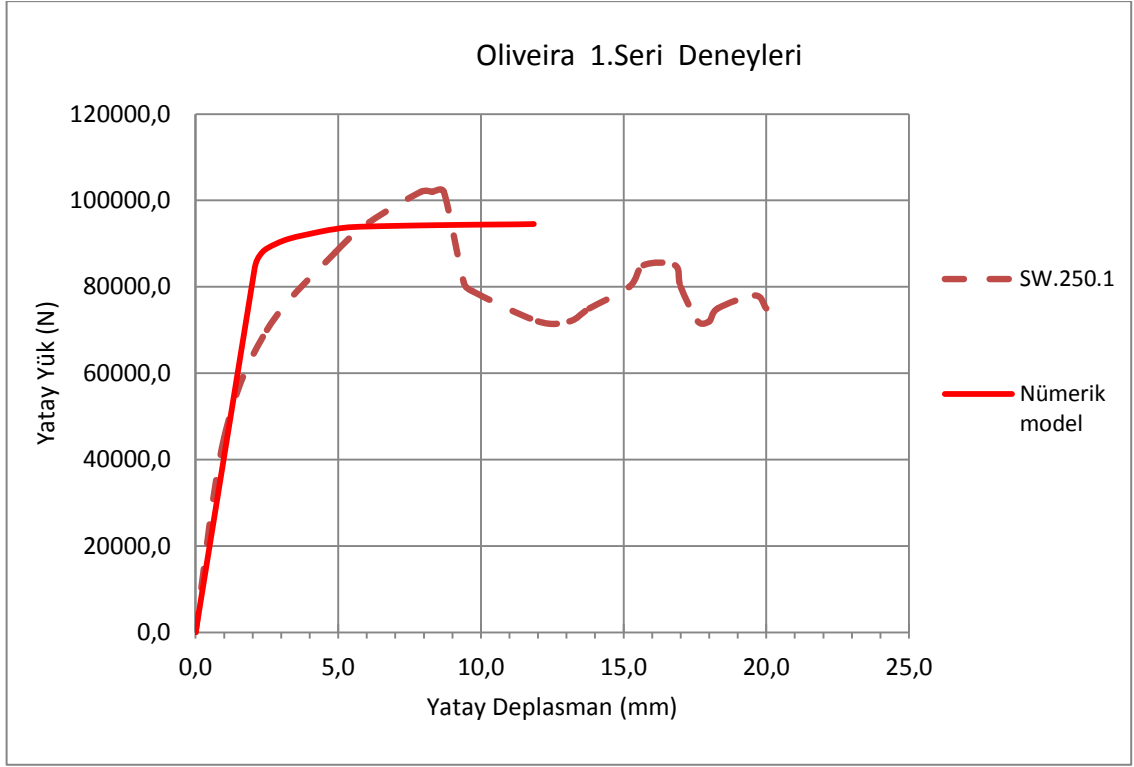


SW.200.1

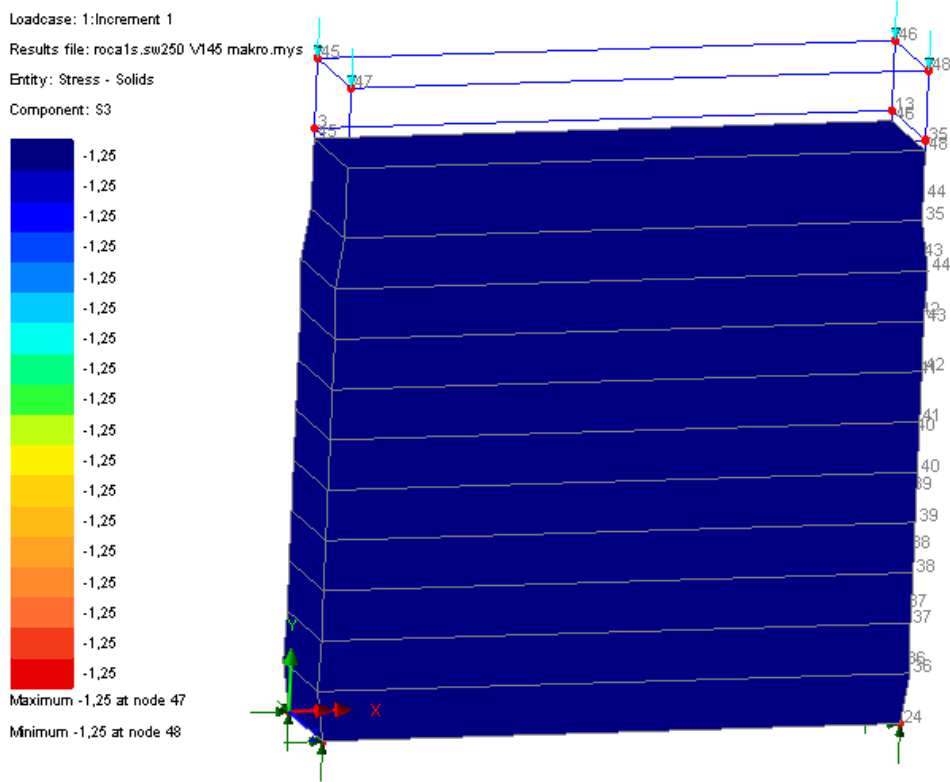


SW.200.2

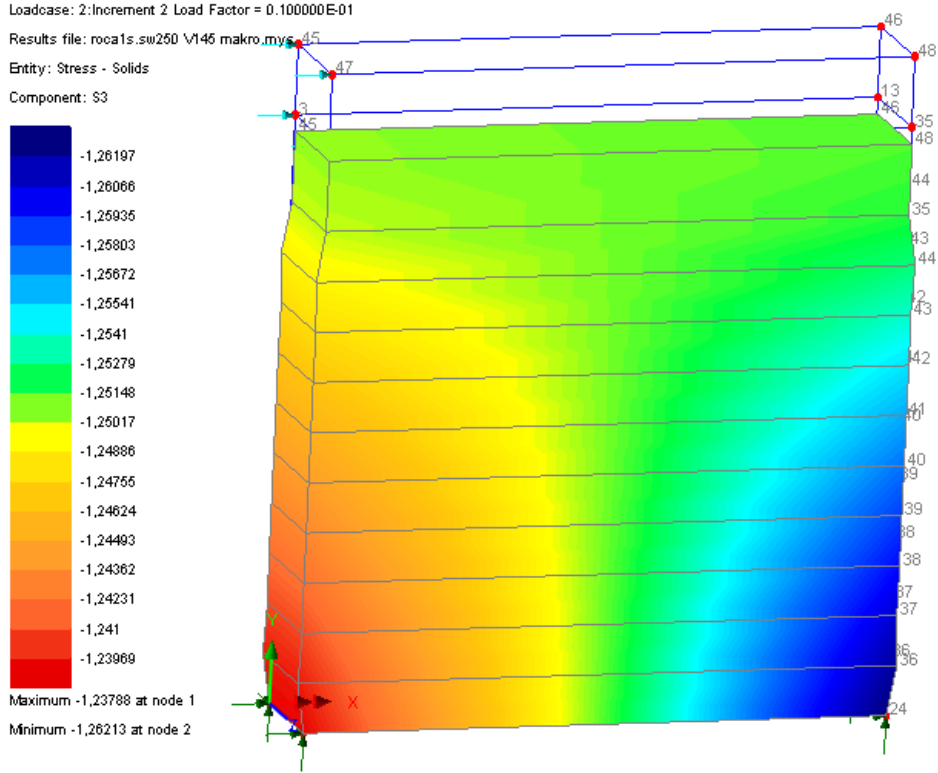
Şekil 4.59 Oliveira (Roca) 1.seri deneylerinde 200kN düşey yük için göçme durumu fotoğrafları[96]



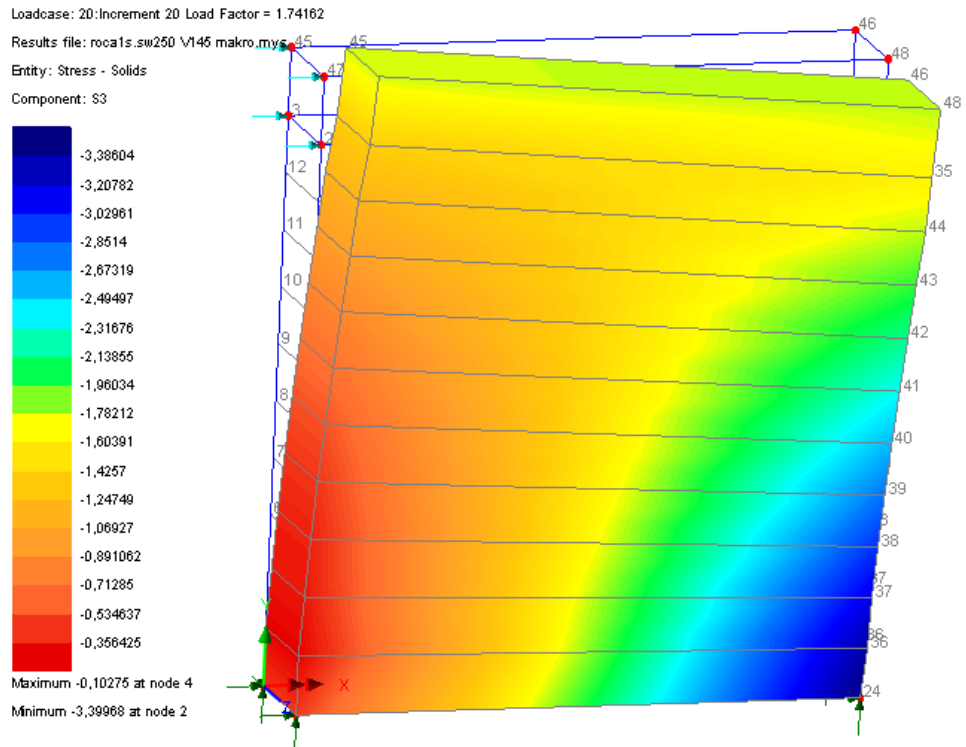
Şekil 4.60 Oliveira 1.seri deneyleri 250kN d¼şey y¼k i¼in bulunan Yatay y¼k-Şekil değiştirme eğrileri



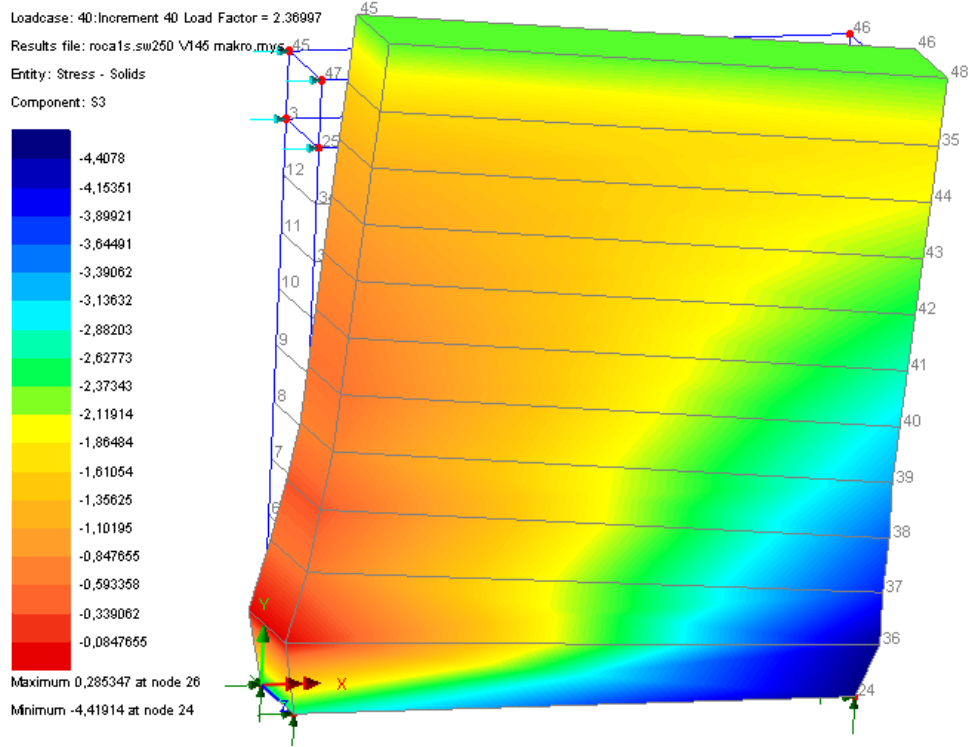
Şekil 4.61 250kN d¼şey y¼k i¼in gerilme dağılımı



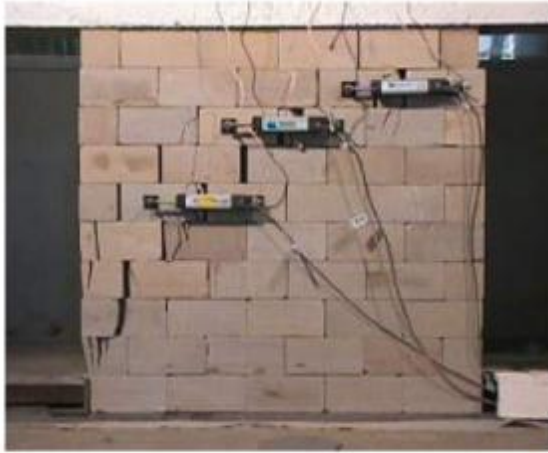
Şekil 4.62 250kN düşey yük için başlangıç gerilme dağılımı



Şekil 4.63 250kN düşey yük için gerilme dağılımı gelişimi



Şekil 4.64 250kN düşey yük için göçme durumundaki gerilme dağılımı

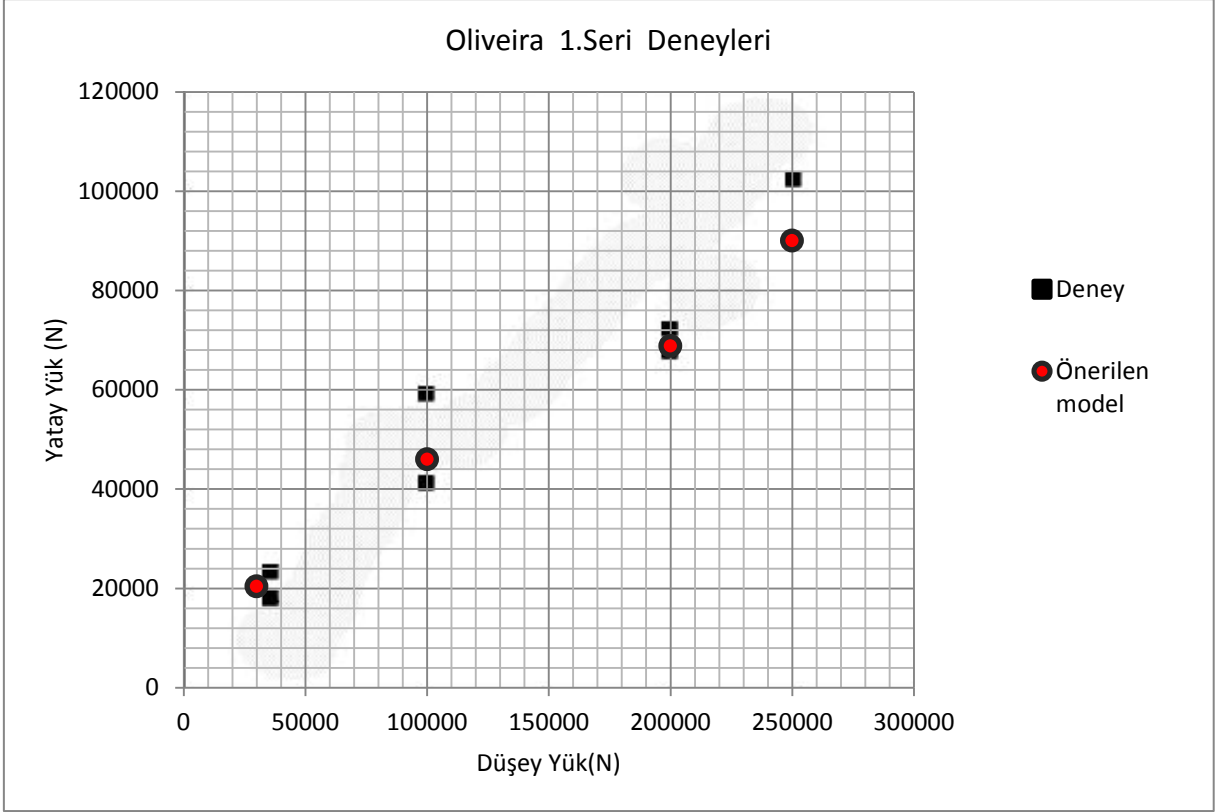


SW.250.1



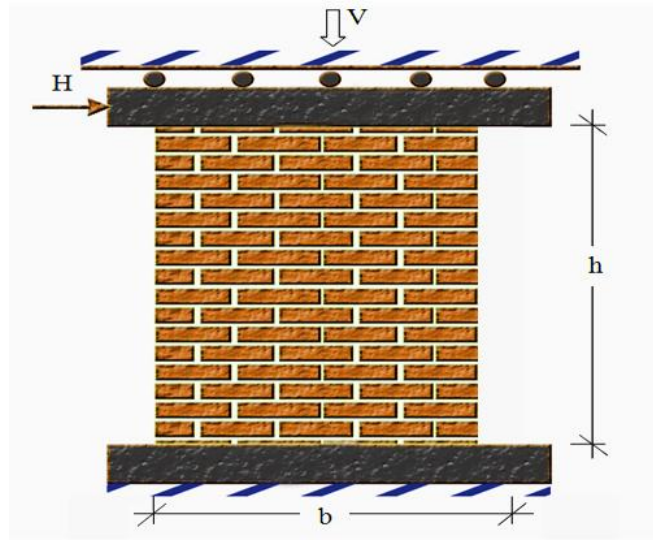
SW.250.1

Şekil 4.65 Oliveira (Roca) 1.seri deneylerinde 250kN düşey yük için göçme durumu fotoğrafları[96]



Şekil 4.66 Oliveira 1.seri deneylerinde Yatay yük-Düsey yük değişimi

4.1.2.3 Roca Deney Duvarları (Seri 2 ve Seri 3)



Şekil 4.67 Roca deneyleri 2. Seri deney düzeneği

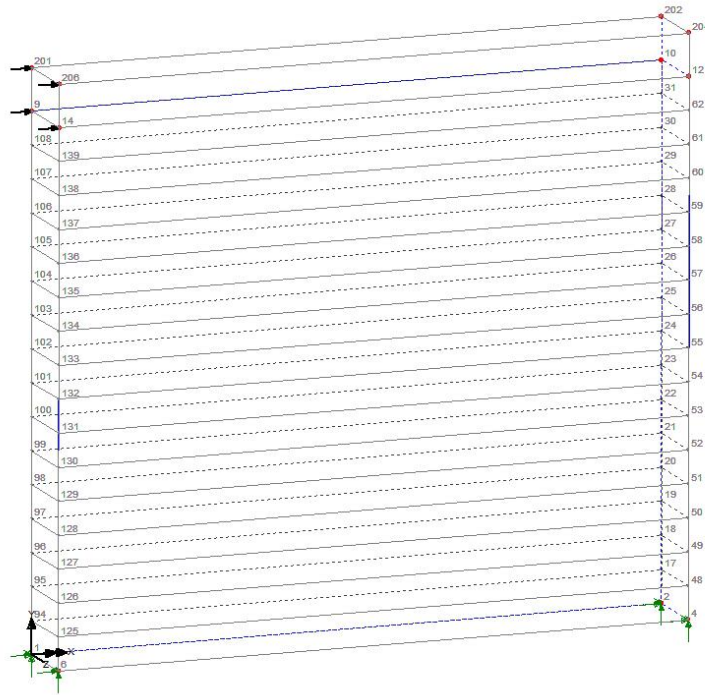
Katalonya Teknik Üniversitesi Yapı Teknolojileri laboratuvarlarında yapılan deneysel çalışmada, çeşitli özelliklerde üretilen 2.seri 15 adet duvar yatay ve düsey yükler altında kırılmıştır. 7,25x1,25x3,5cm boyutlarında tuğla ile örülmüş duvarlar 30x25x3,5cm boyutlarındadır (Şekil 4.67). Duvara düsey yük uygulandıktan sonra üst tarafından yatay yük

etkitilmiş ve tepe noktası için yer değiştirme ölçümleri alınmıştır. Deneyler ile ilgili özet bilgiler Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6 Katalonya Üniversitesinde yapılan deneylerle ilgili özet bilgiler [1]

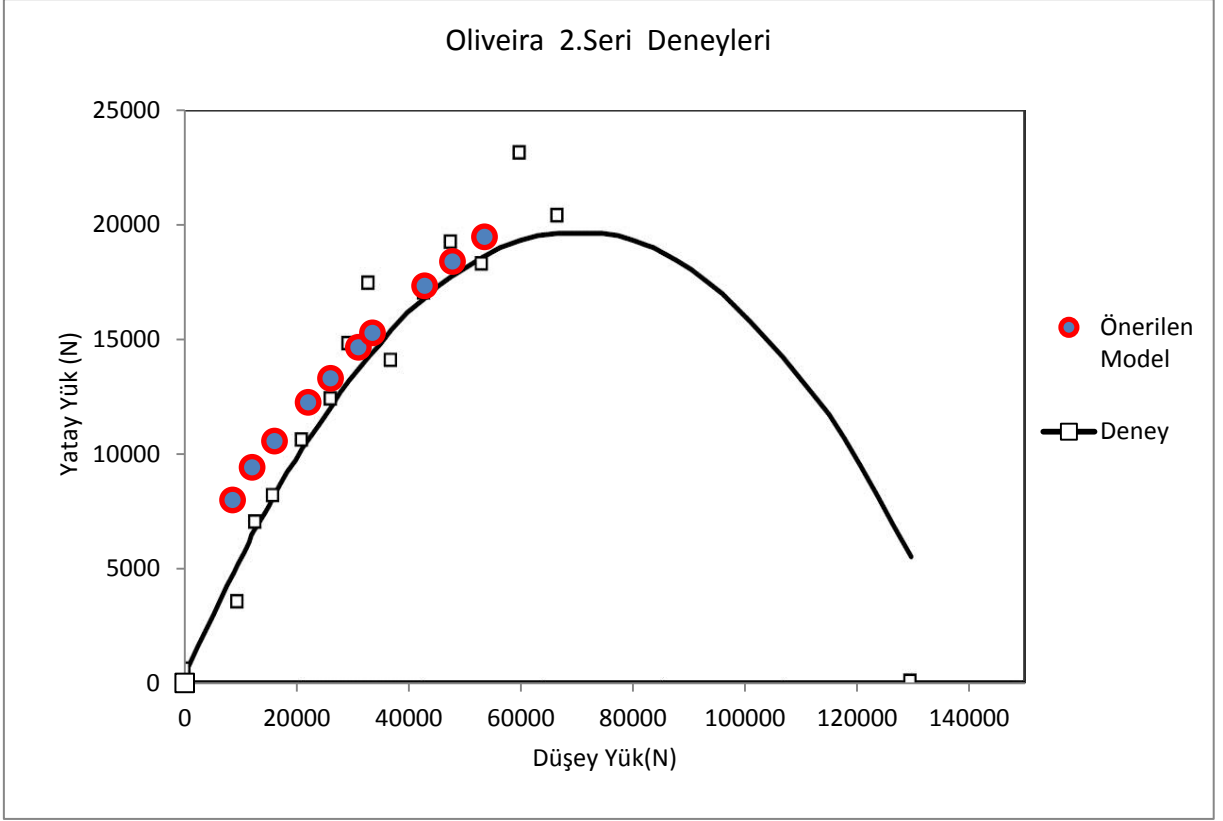
Seri (n)	Tür	Eleman	b cm	h cm	t cm	f_c N/mm ²	Yükleme Şekli
1(7)	Kuru örgü	Taş	100	100	20	30	Düzgün Yayılı
2(15)	Harçlı	Kil Tuğla	30	25	3,5	15	Düzgün Yayılı
3(20)	Harçlı	Kil Tuğla	30	25	3,5	12	Kısmi

n:duvar sayısı

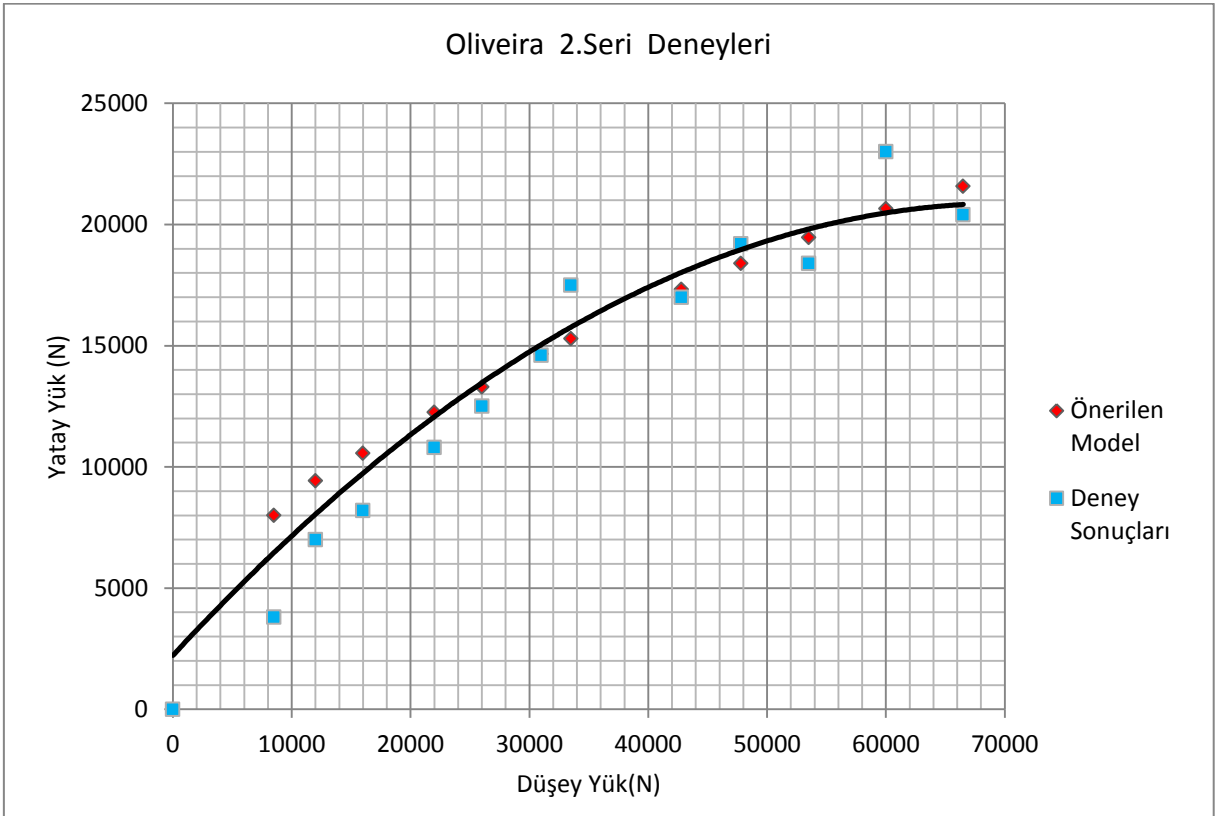


Şekil 4.68 Roca deneyleri 2.seri deneyleri için önerilen sonlu eleman ağı

Önerilen nümerik modelin karşılaştırılmasında dişey yük miktarı değiştirilerek farklı dişey yük seviyeleri altında duvarın taşıyacağı yatay yük miktarı araştırılmıştır. Seri 2 duvarlar için dişey yükün 70kN olduğu seviyelere kadar yapılan yüklemelerde deney ile model oldukça uyumlu sonuçlar vermektedir (Şekil 4.69). Tarihi yığma yapılar da dişey yük seviyesinin duvarın taşıma kapasitenin oldukça altında değerlerle yüklendiği düşünülürse, önerilen modelin kullanılması uygun olmaktadır. Dişey yük seviyesinin toplam kapasitenin %45-50'sini aştığı durumda belirsizlikler olmakta ve ani göçmeler gözlenmektedir (Şekil 4.70).



Şekil 4.69 Roca deneyleri 2.seri deneyleri için Yatay Yük- Düşey Yük ilişkisi

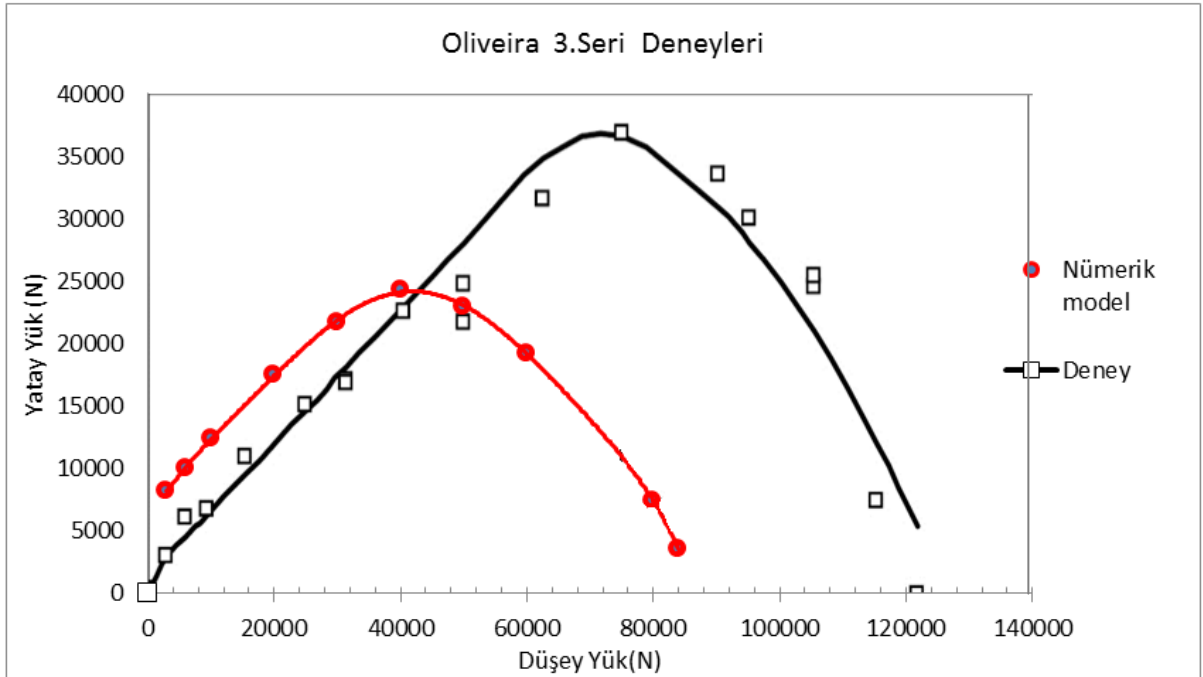


Şekil 4.70 Roca deneyleri 2.seri deneyleri için Yatay Yük- Düşey Yük ilişkisi



Şekil 4.71 Roca deneyleri 2.seri deneyleri için göçme durumu fotoğrafları

Seri 3 duvarları [98] için yapılan çalışmalarda duvarın taşıma kapasitesinin %35-40'ı olduğu duruma kadar önerilen modelle yapılan çözümler deneysel veriler ile tutarlılık göstermektedir. Ancak düşey yükün çok yüksek olduğu düzey için belirsizlikler bulunmaktadır(Şekil 4.72).

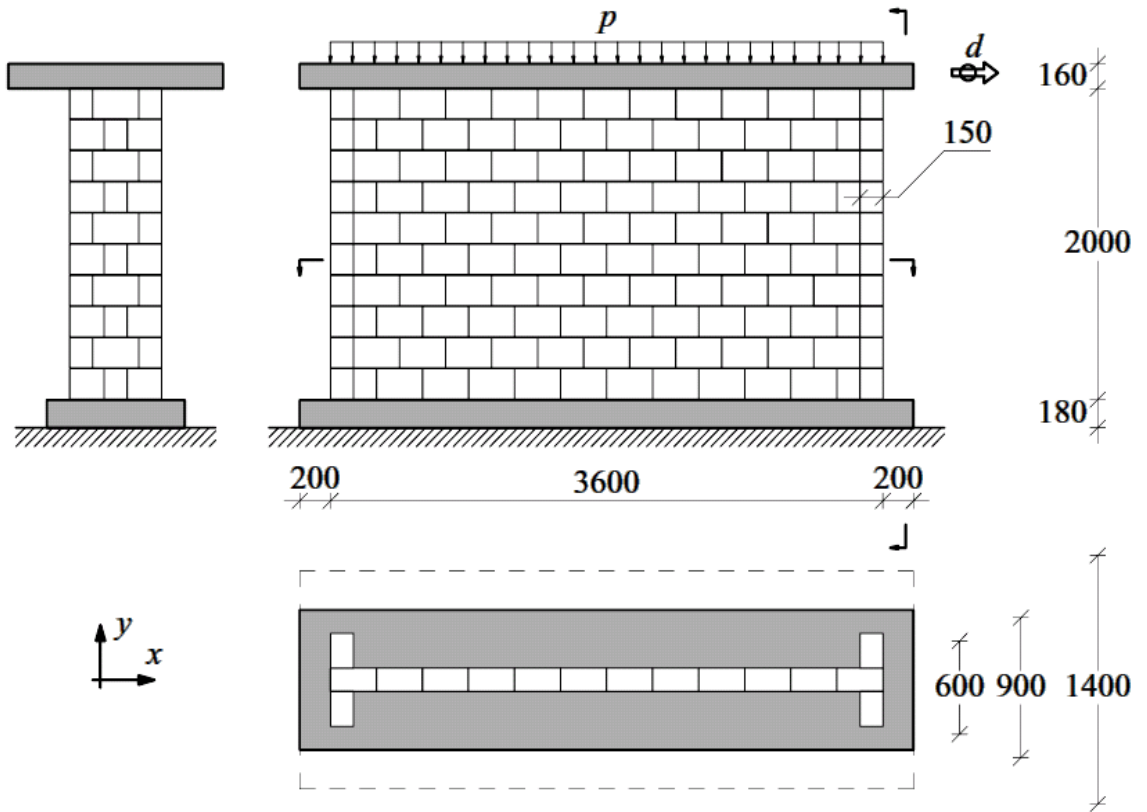


Şekil 4.72 Roca deneyleri 3.seri deneyleri için Yatay Yük- Düşey Yük ilişkisi



Şekil 4.73 Roca deneyleri 3.seri deneyleri için göçme durumu fotoğrafları[98]

4.1.2.4 ETHZ Deney Duvarları



Şekil 4.74 ETHZ deneyi geometrik parametreleri

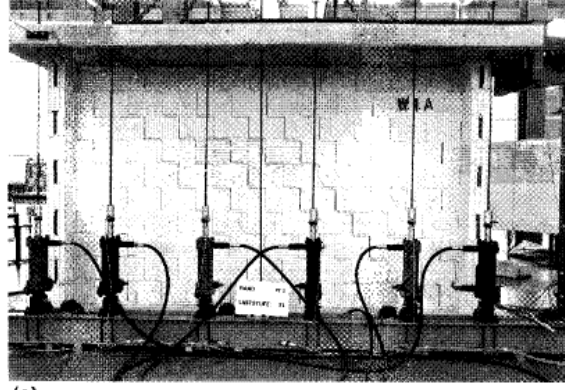
Çizelge 4.7 ETHZ deneyi eleman boyutları ve yükleme durumu

Duvar isimleri	Duvar boyutları (cm)	Eleman boyutu (cm)	Ugulanan düşey yük (kN)	Düşey yükte gerilme (Mpa)
W1	3600x2000x150	225x200x150	416	0,61
W2	3600x2000x150	225x200x150	1287	1,90

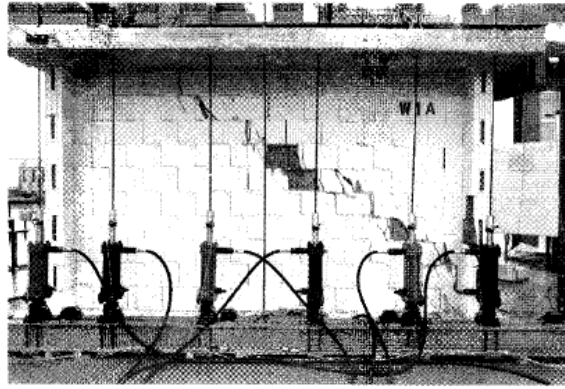
Ganz ve Thürlimann[100] tarafından 1984 yılında yapılan deney düzeneklerinden oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiş ve bu sonuçlar literatürde birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Bu çalışmada düşey yük değeri farklı 2 adet duvar bulunmaktadır. Duvar boşluklu kil tuğla elemanlar ile imal edilmiş ve düzlem dışı davranışı engellemek amacıyla duvarın iki ucuna başlıklar yapmak uygun görülmüştür[6]. Geometrik ölçüleri ve yükleme durumu Şekil 4.74’de verilmiştir. Aynı boyutta imal edilen bu 2 duvara 416kN ve 1287kN olmak üzere 2 farklı düşey yük uygulanmıştır[39]. Düşey yükün ardından yatay yük etkilmiş ve şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir[101]. Çizelge 4.7 veÇizelge 4.8’de ETHZ duvarları ile ilgili geometrik bilgiler ve malzeme özellikleri özetlenmiştir. W1 ve W2 duvarları için göçme fotoğrafları Şekil 4.75ve Şekil 4.76’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.8 ETHZ duvarları için kullanılan parametreler[102]

Duvar isimleri	Uygulanan düşey yük (kN)	Düşey yükte gerilme (MPa)	f_c (Mpa)	Elastisite modülü (GPa)	Poisson oranı	c (Kohezyon)	ϕ° İçsel Sürtünme Açısı
W1	416	0,62	1,87	2000	0,15	0,5	60
W2	1287	1,91	1,87	2000	0,15	0,5	60

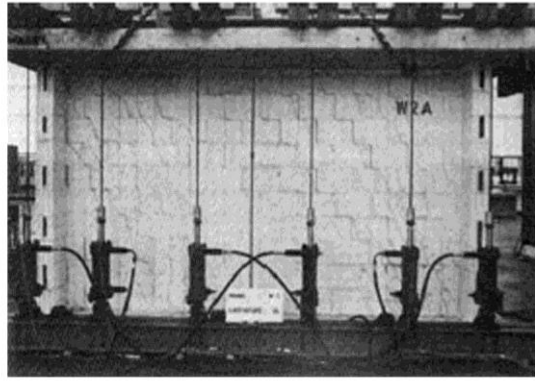


(a)

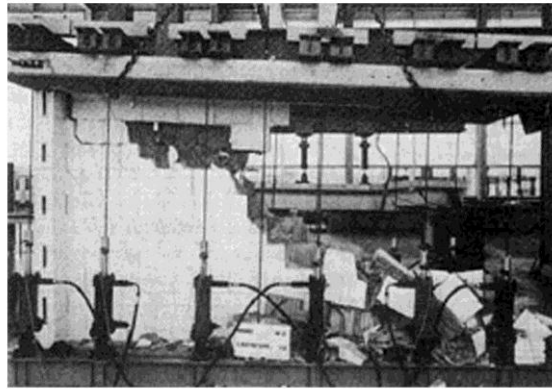


(b)

Şekil 4.75 W1 duvarı göçme fotoğrafları[103]



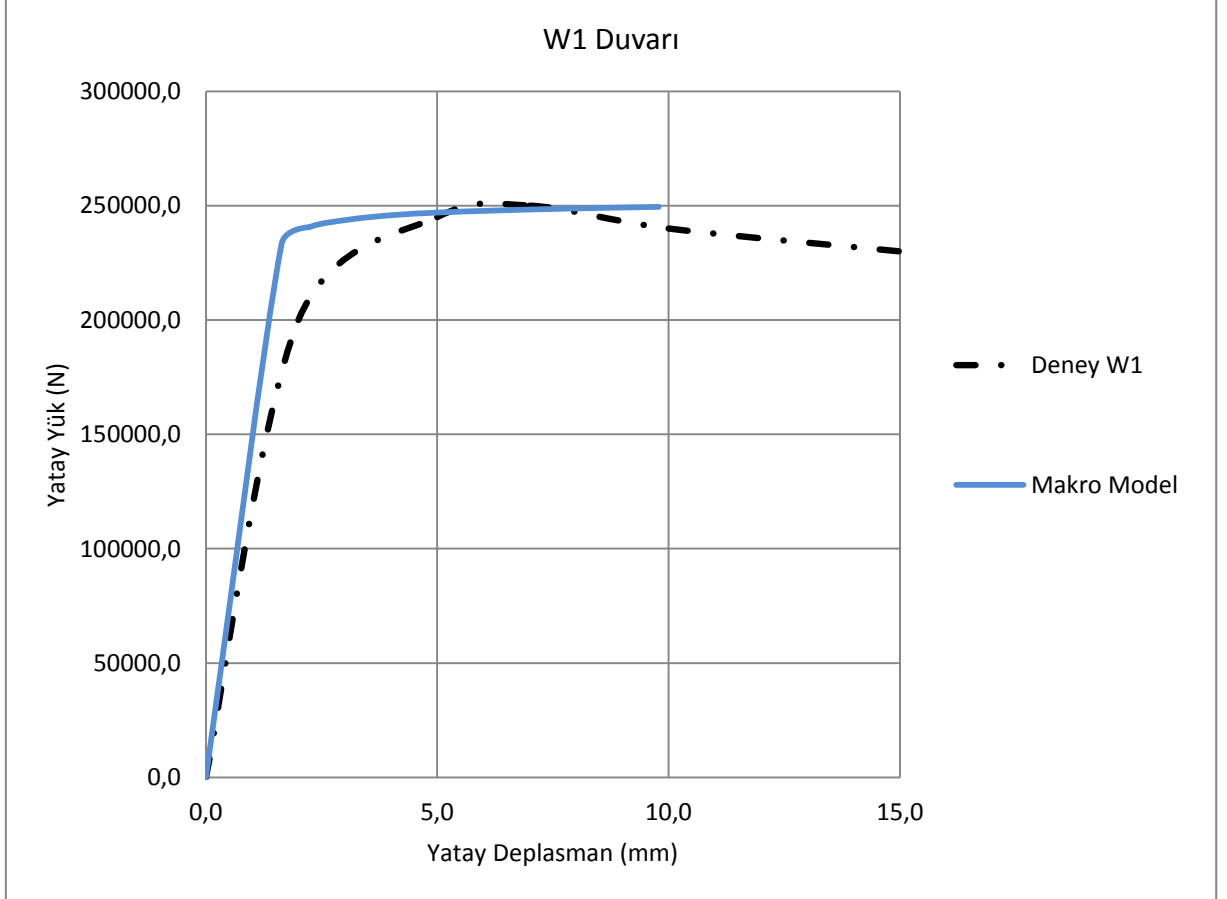
(a)



(b)

Şekil 4.76 W2 duvarı göçme fotoğrafları[103]

Deneyde elde edilen şekil değiştirme eğrileri ile nümerik model karşılaştırılmış elde edilen veriler şekil 4.77ve şekil 4.81’de gösterilmiştir. Nümerik modelin deney ile olan uyumu, modelin gerçeğliliğini göstermektedir. Ayrıca şekil 4.78-84’de gösterilen gerilme dağılımları ile göçme şekliini gösteren fotoğraflar ile karşılaştırıldığında, gerçeğçi sonuçlar elde edilmiştir.



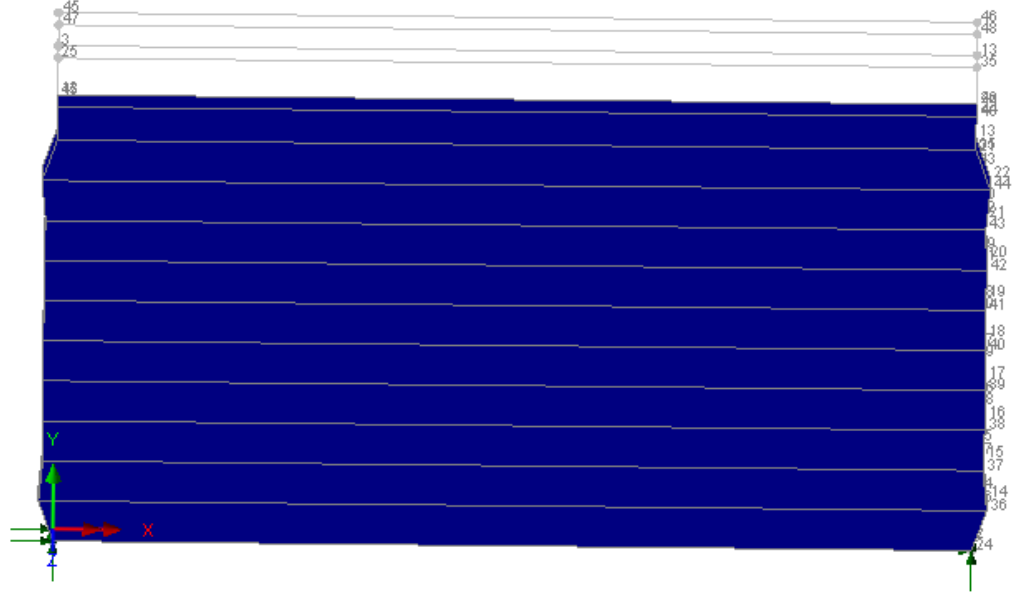
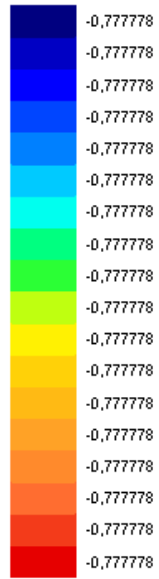
şekil 4.77 W1 duvarı şekil değiştirme eğrileri

Loadcase: 1:Increment 1

Results file: ETHZ W1 Makro V145.mys

Entity: Stress - Solids

Component: S3



Maximum -0,777778 at node 47

Minimum -0,777778 at node 46

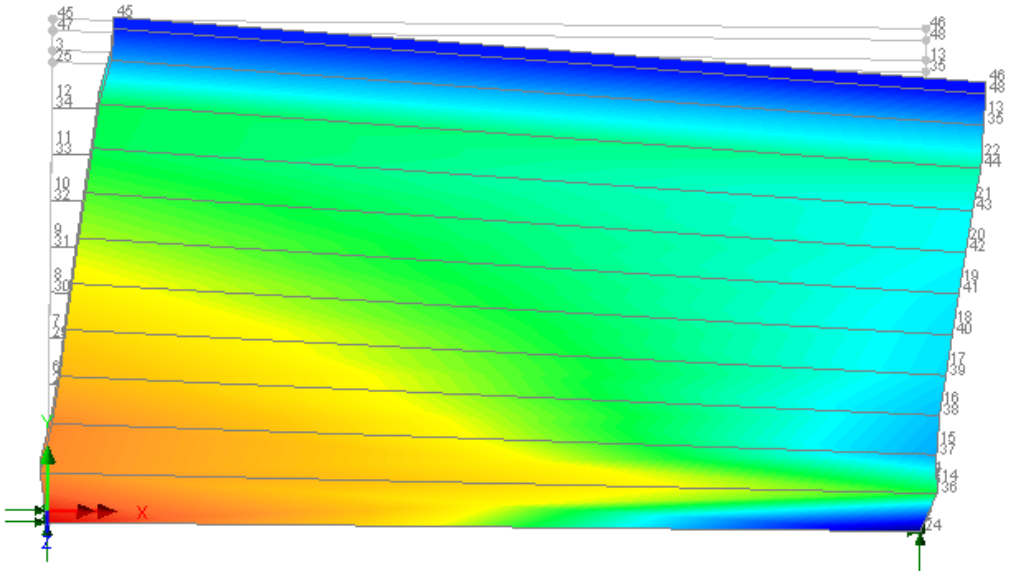
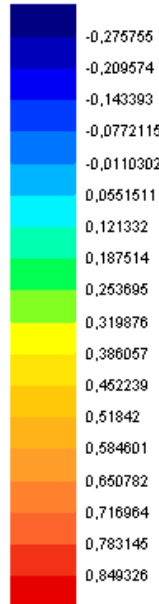
Şekil 4.78 W1 duvarını için 415kN düşey yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı

Loadcase: 2:Increment 2 Load Factor = 0,582671E-02

Results file: ETHZ W1 Makro V145.mys

Entity: Stress - Solids

Component: S1

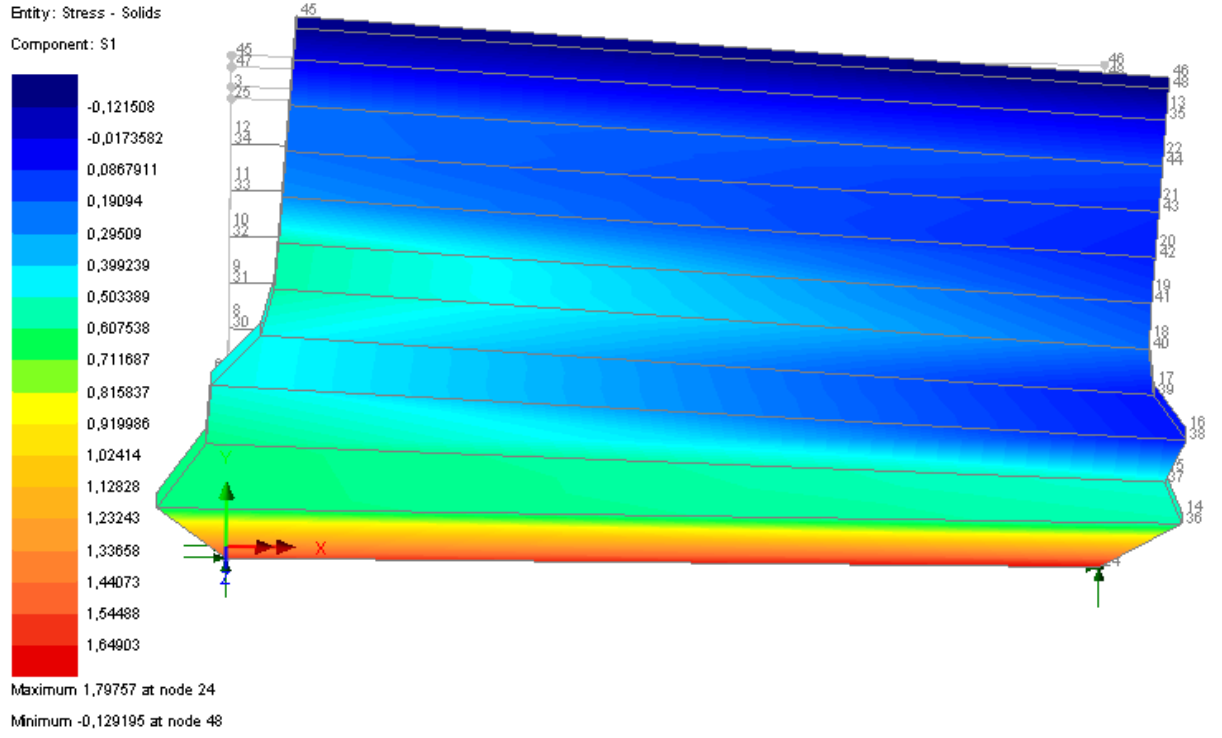


Maximum 0,94512 at node 23

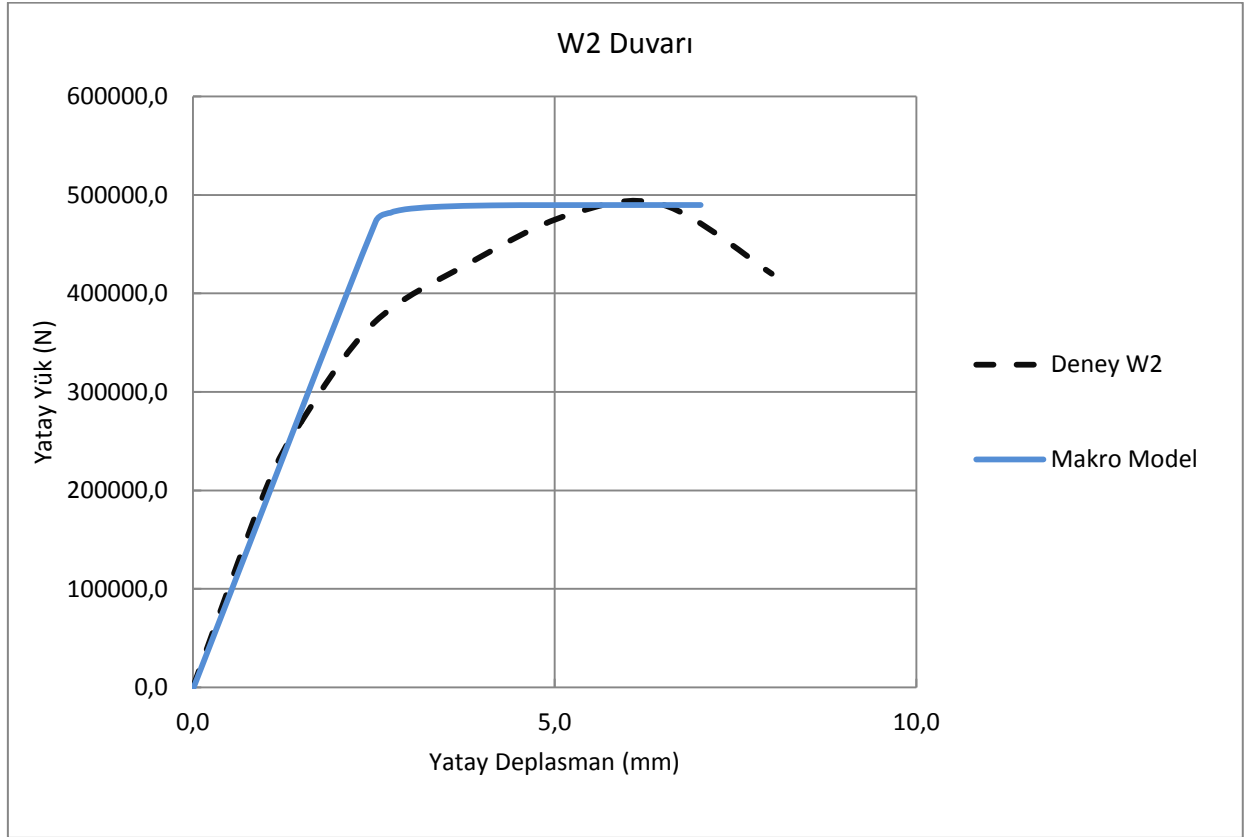
Minimum -0,279233 at node 2

Şekil 4.79 W1 duvarını için yatay yükleme durumunda gerilme dağılımı

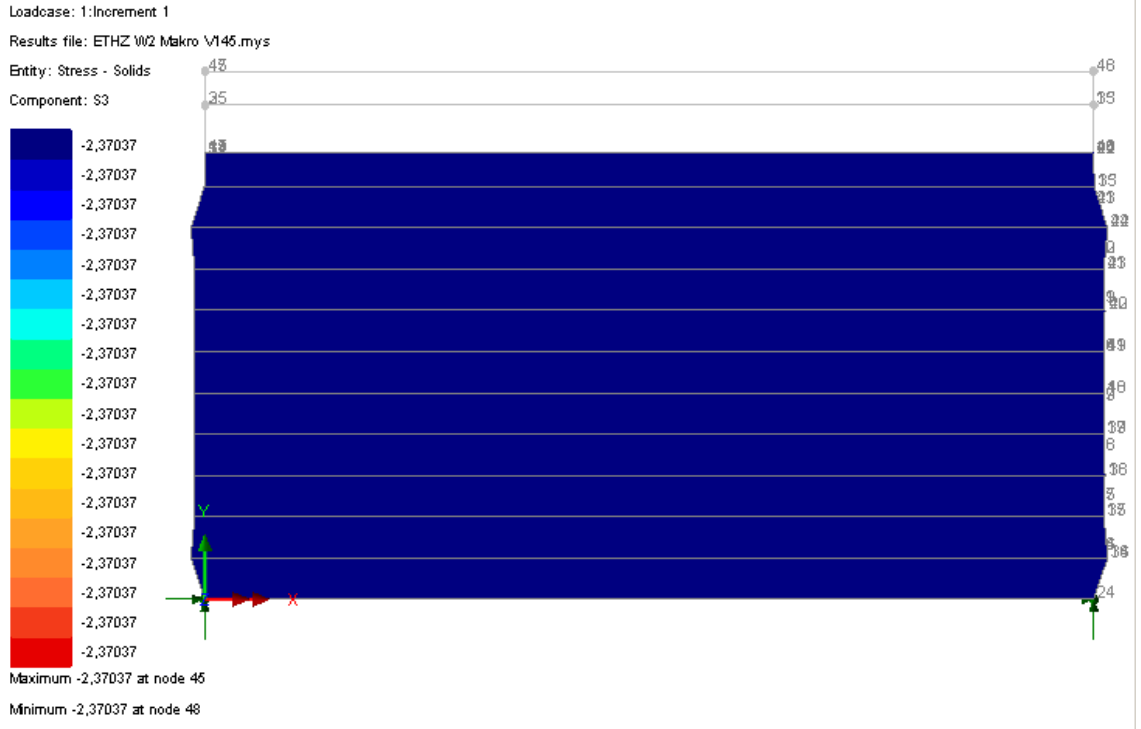
Loadcase: 50: Increment 50 Load Factor = 0.625811E-02
Results file: ETHZ W1 Makro V146.mys
Entity: Stress - Solids
Component: S1



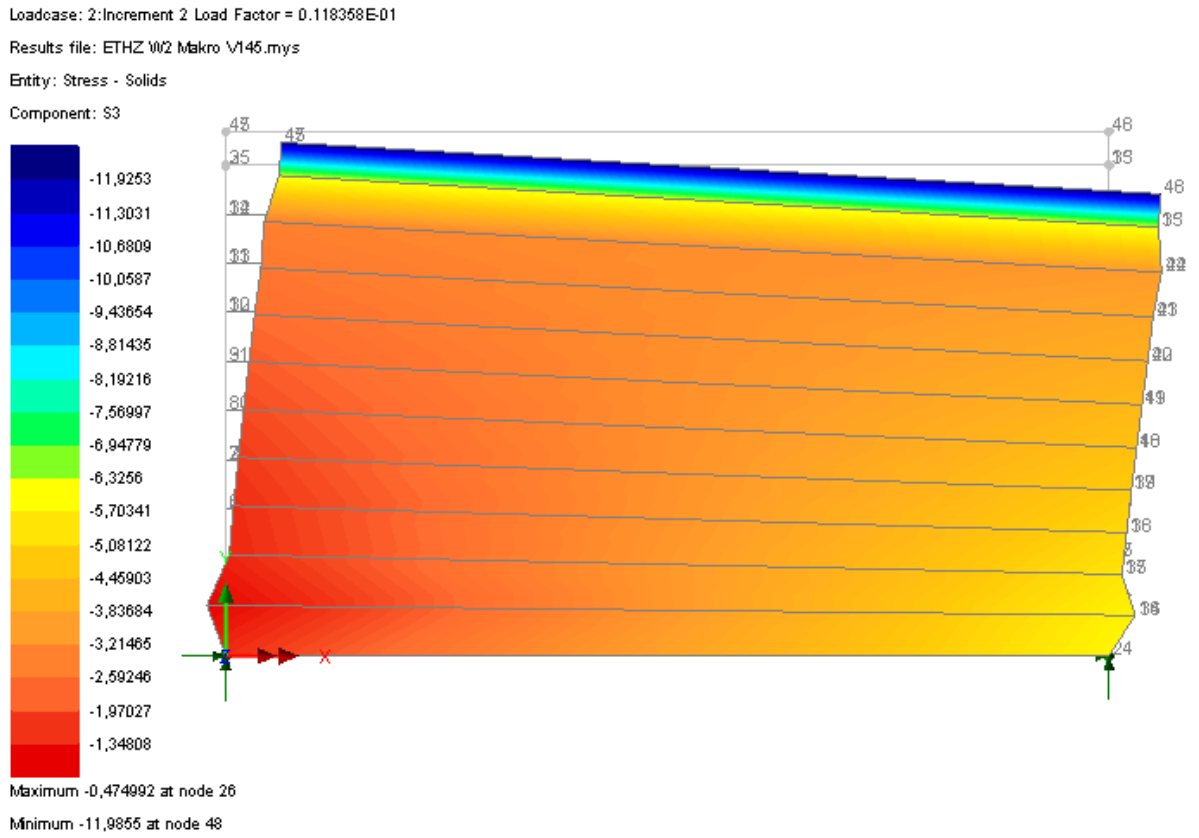
Şekil 4.80 W1 duvarını için göçme durumunda gerilme dağılımı



Şekil 4.81 W2 duvarı şekil değiştirme eğrileri

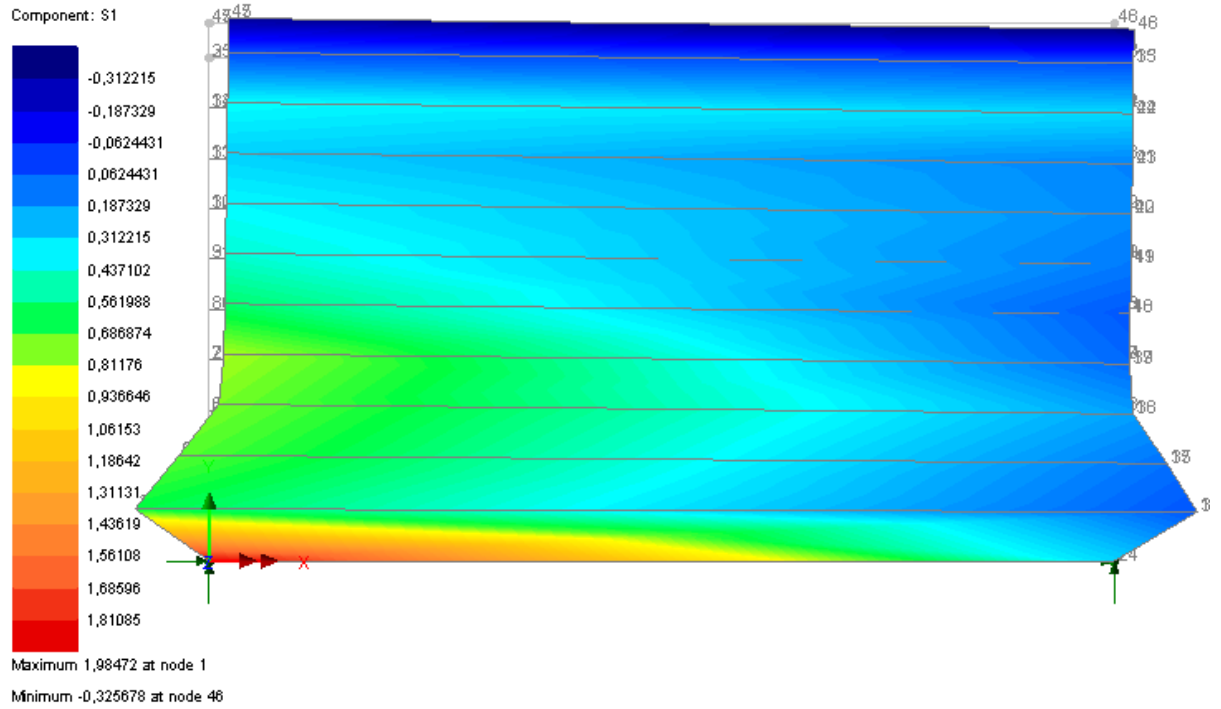


Şekil 4.82 W2 duvarını için 1287kN düşey yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı



Şekil 4.83 W2 duvarını için yatay yükleme durumunda gerilme dağılımı

Loadcase: 16: Increment 16 Load Factor = 0.122460E-01
Results file: ETHZ W2 Makro V146.mys
Entity: Stress - Solids
Component: S1



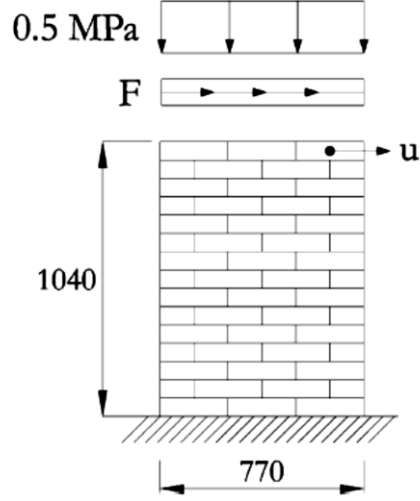
Şekil 4.84 W2 duvarını için göçme durumunda gerilme dağılımı

Nümerik modelden elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışmadan bulunmuş olan yatay yük-
yer değiştirme değerleri arasındaki uyum oldukça tatminkâr bulunmuştur.

4.1.2.5 Formica Duvarı

2002 yılında Formica vd.[4] tarafından yapılan çalışmalarda, yığma duvarlar için çeşitli hesaplar yapmış ve 120x770x1040mm boyutlarında duvar modeli üzerinde 0,5MPa gerilme uygulamıştır (Şekil 4.85).

Ardından duvarın üzerine yayılı yük şeklinde yatay yük etkilmiş ve duvarın üst kenar noktasından şekil değiştirme ölçümleri yapılmıştır(Şekil 4.86).



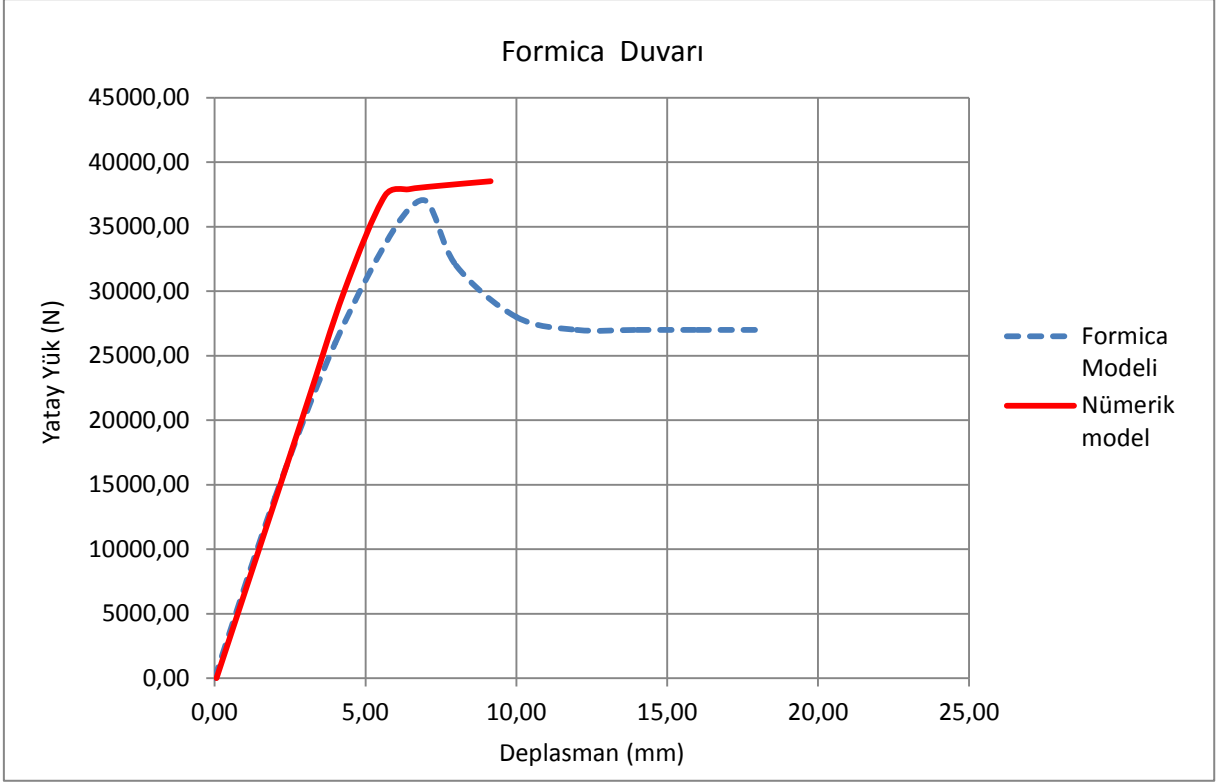
Şekil 4.85 Formica model duvarı [4]

Formica vd. [4] tarafından kullanılan duvar örneği kullanılarak yeni Lusas modeli oluşturulmuş ve tez kapsamında önerilen makro modelleme yaklaşımı ile çözümler alınmıştır.

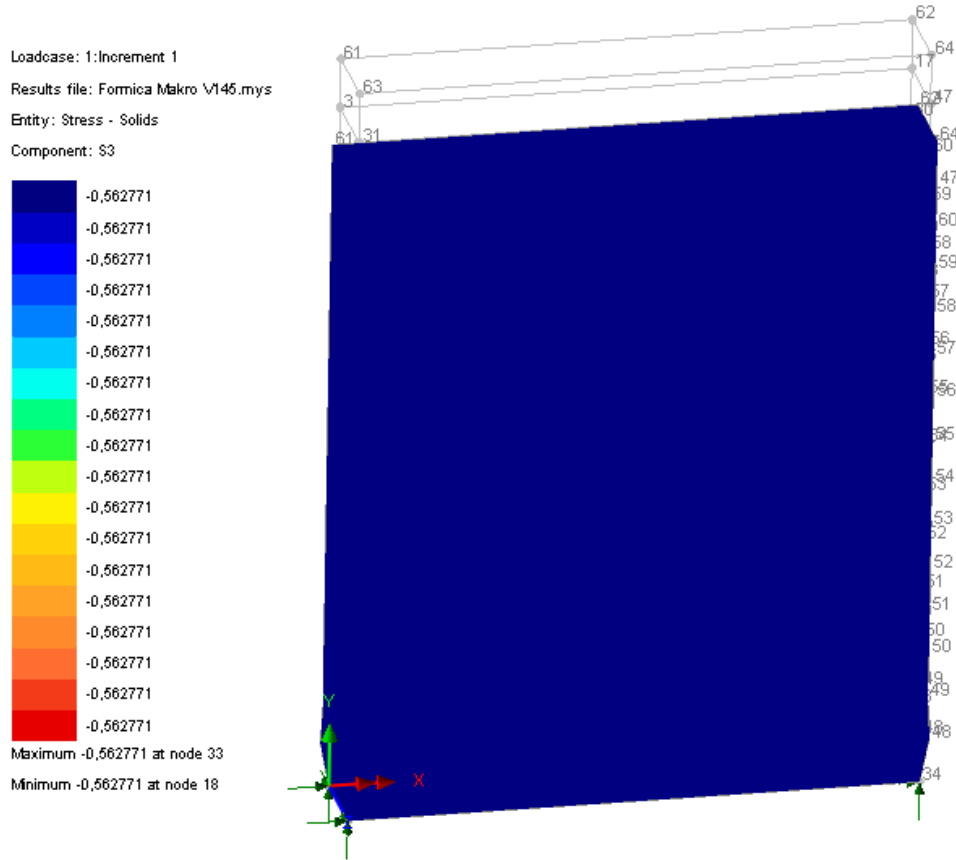
Modelde kullanılan parametreler Çizelge 4.9'da özetlenmiştir.

Çizelge 4.9 Önerilen makro modelde kullanılan parametreler

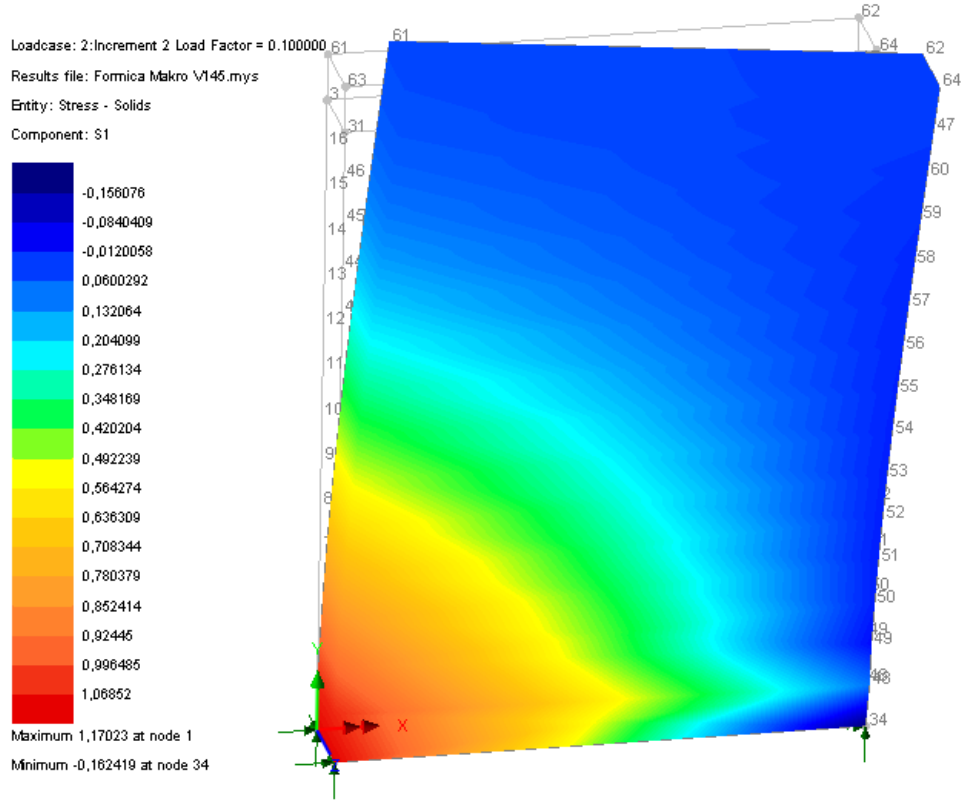
Duvar boyutları	Düşey yükle gerilme (MPa)	f_c (Mpa)	Elastisite modülü (GPa)	Poisson oranı	c (Kohezyon)	ϕ° İçsel Sürtünme Açısı
120x770x1040	0,5	12	700	0,2	1,69	60



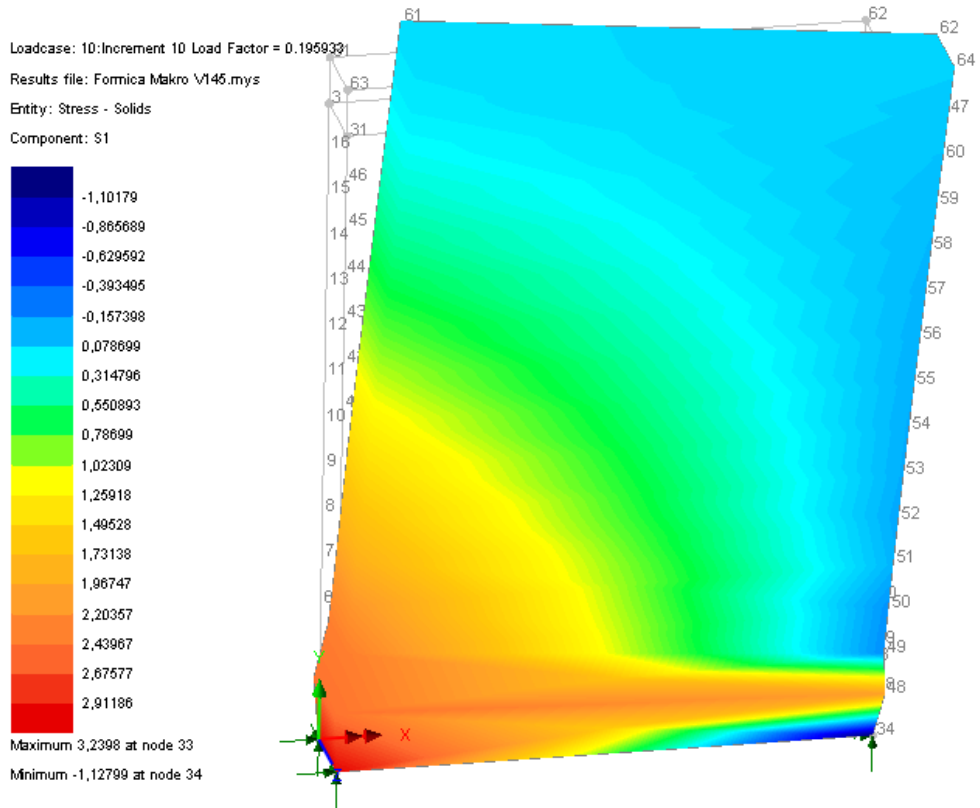
Şekil 4.86 Formica duvarı ile önerilen makro modelin karşılaştırılması



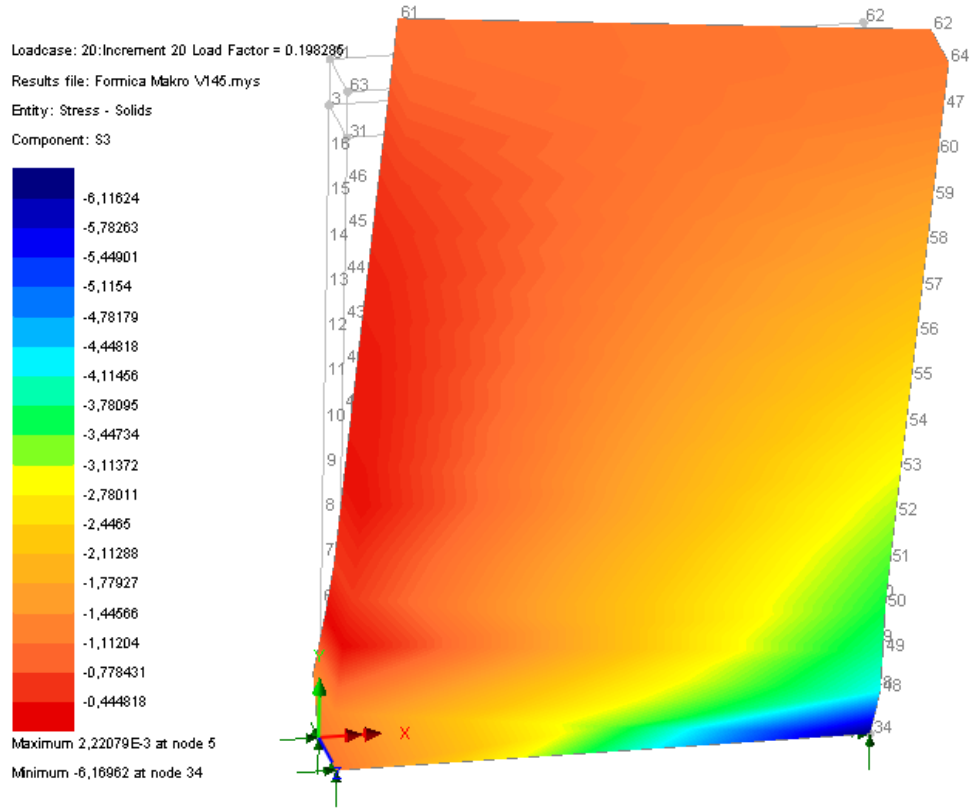
Şekil 4.87 Formica duvarı için düşey yük uygulanmış durumda gerilme dağılımı



Şekil 4.88 Formica duvarı için kayma gerilmesi dağılımı

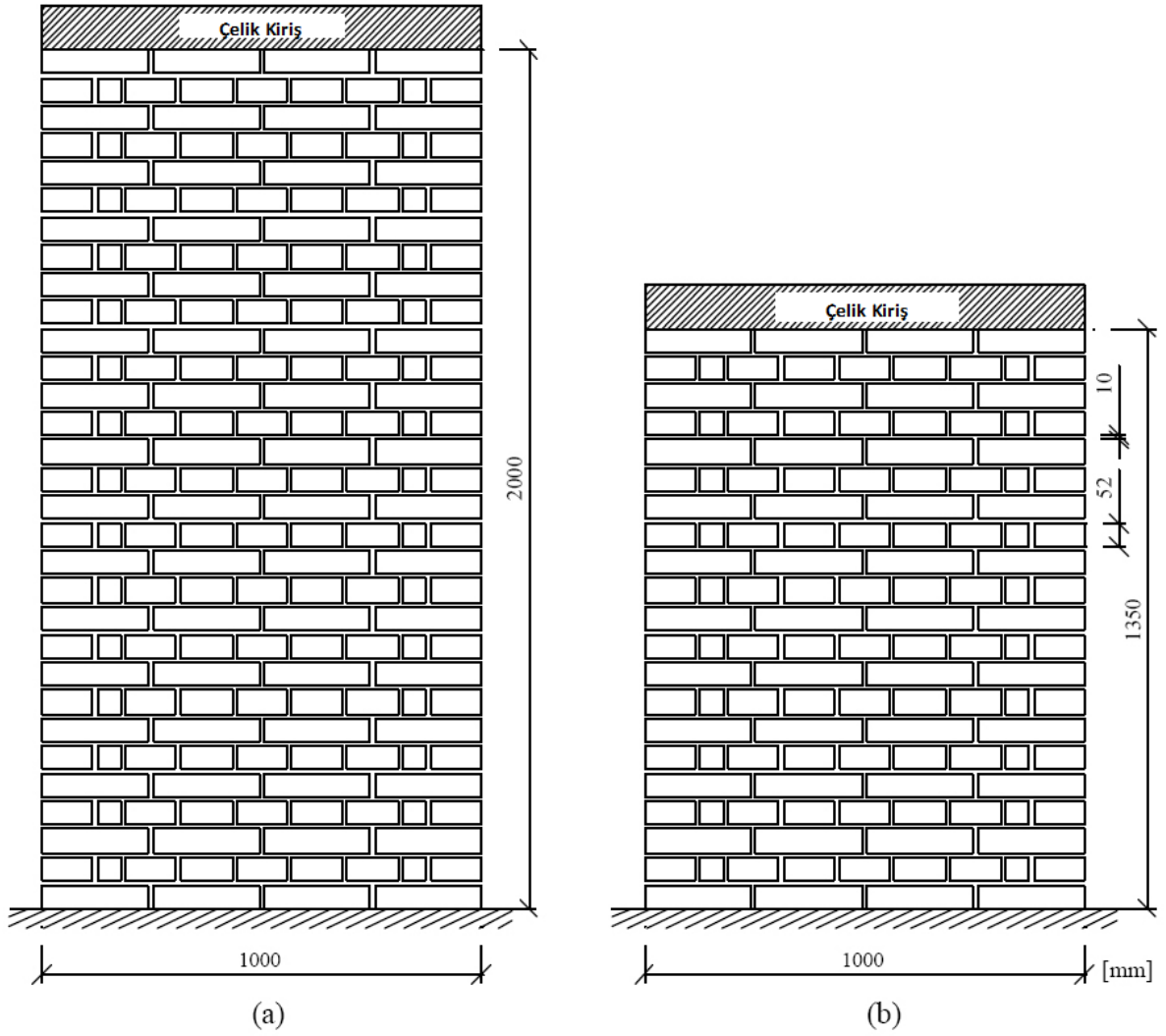


Şekil 4.89 Formica duvarı için kayma gerilmesi dağılımı



Şekil 4.90 Formica duvarı için göçme durumunda kayma gerilmesi dağılımı

4.1.2.6 JRC Duvarları



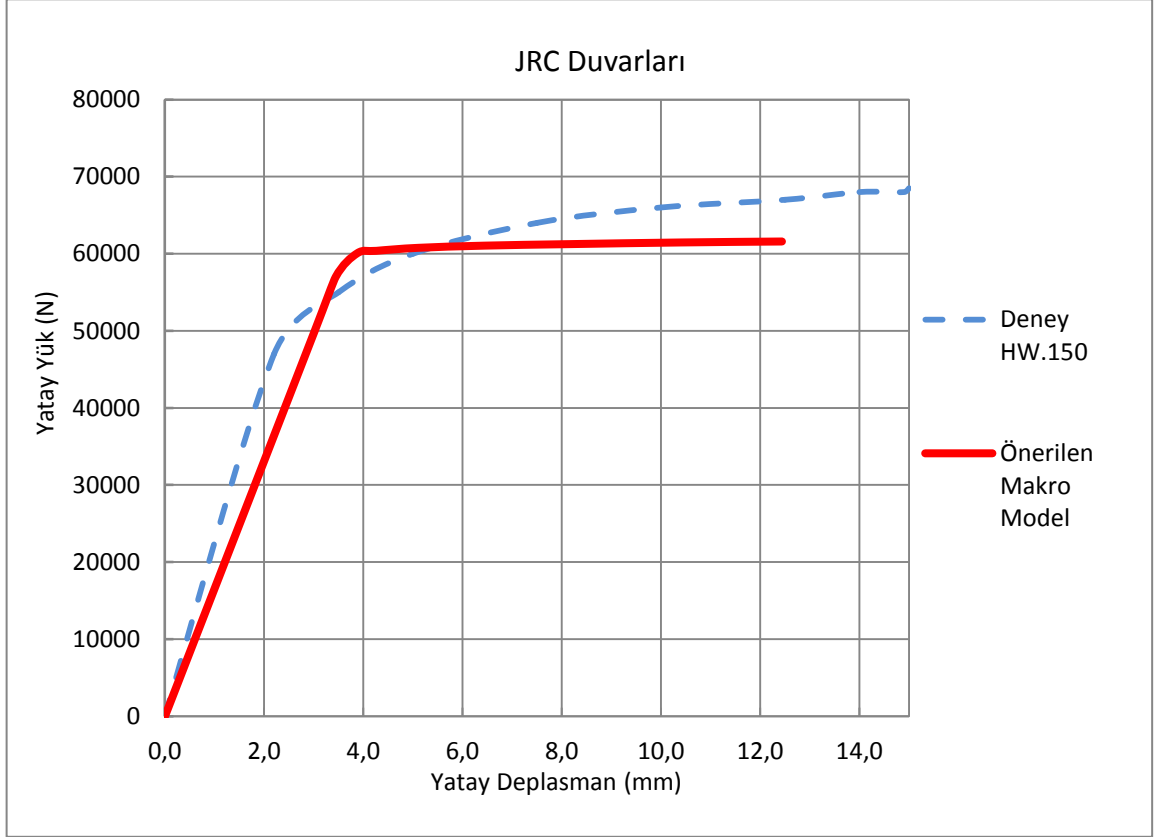
Şekil 4.91 JRC duvarlarının ölçüleri

JRC (Joint Research Center) tarafından desteklenen ve Pavia üniversitesinde Calvi vd. tarafından 1992 yılında yapılan deneylere göre ölçüleri ve örgü deseni yukarıda verilen 2 farklı duvara yükleme deneyi yapılmıştır[96]. Duvarlarda 250x150x55mm boyutlarında tuğla ve 10mm kalınlığında harç kullanılmıştır (Şekil 4.91). Duvarlara 150kN düşey yük uygulanmıştır. Duvarların üst kısımlarında düşey yükün düzgün yayılı etkimesi için çelik kiriş yerleştirilmiştir. Üst kısımda bulunan çelik kiriş aynı zamanda yatay yükün etkilendiği kısım olmaktadır. Duvarın yatay yük-şekil değiştirme eğrileri oluşturulmuştur. Bu tez kapsamında önerilen makro modelleme yaklaşımı ile duvarlar modellenmiş ve çözümler elde edilmiştir. Modelde kullanılan parametreler Çizelge 4.10'da belirtilmiştir.

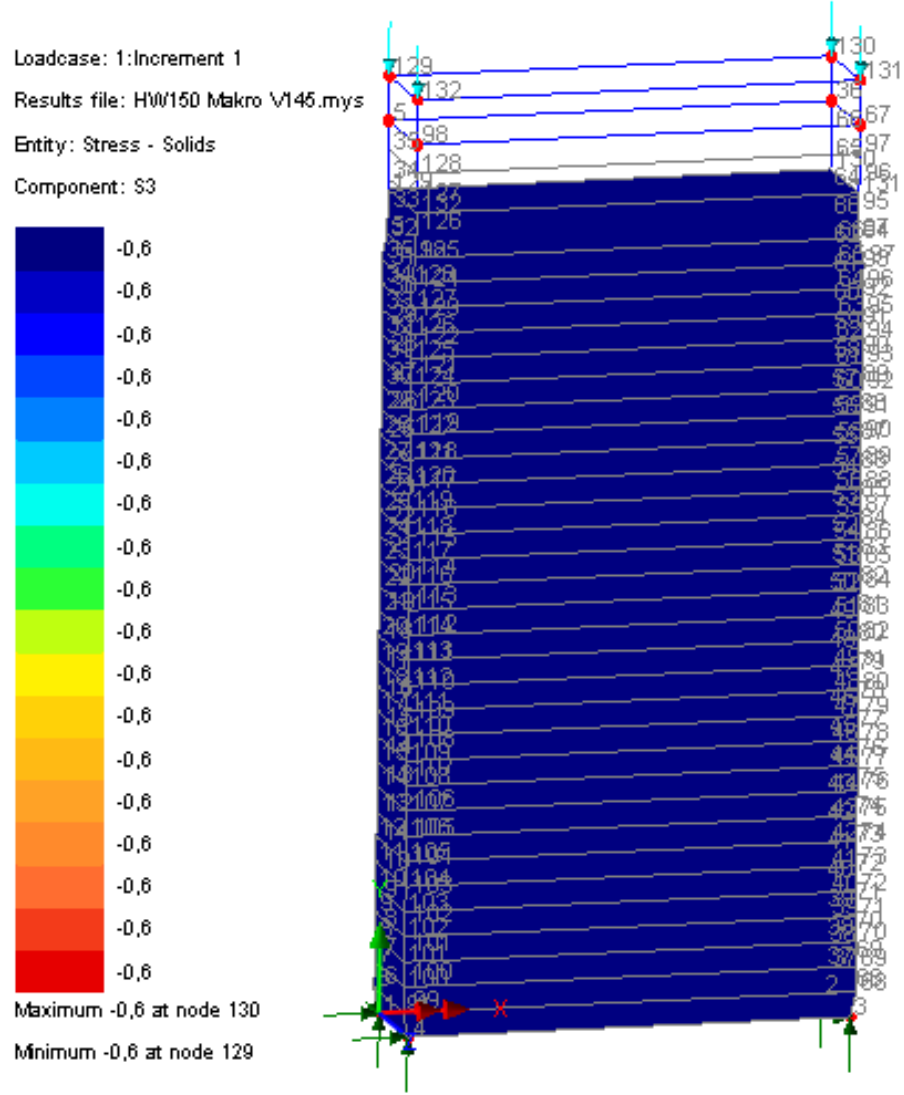
Elde edilen çözümler ile deney sonuçları Şekil 4.92ve Şekil 4.96'de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.10 JRC Duvarların özet bilgileri

Duvar isimleri	Duvar boyutları (cm)	Eleman boyutu (mm)	Uygulanan düşey yük (kN)	Düşey yükte gerilme (MPa)	f_c (MPa)	f_c (MPa)
HW.150	200x100x25	250x120x55	150	0,6	10	1,47
LW.150	135x100x25	250x120x55	150	0,6	10	1,47



Şekil 4.92 HW150 duvarı Yatay yük-Yatay Deplasman Eğrisi



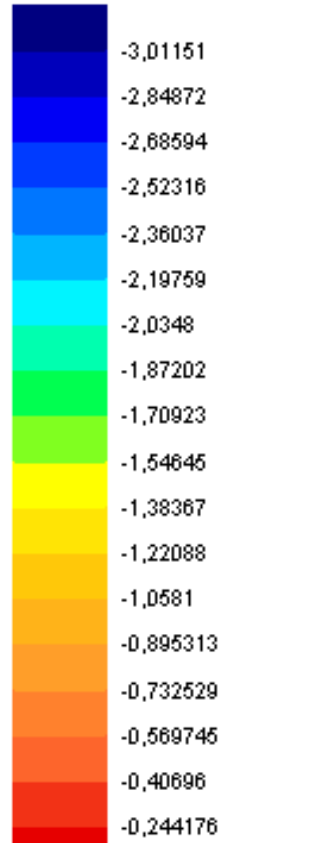
Şekil 4.93 HW150 duvarı için düşey yük gerilme durumu

Loadcase: 2: Increment 2 Load Factor = 0.250000E-01

Results file: HW150 Makro V146.mys

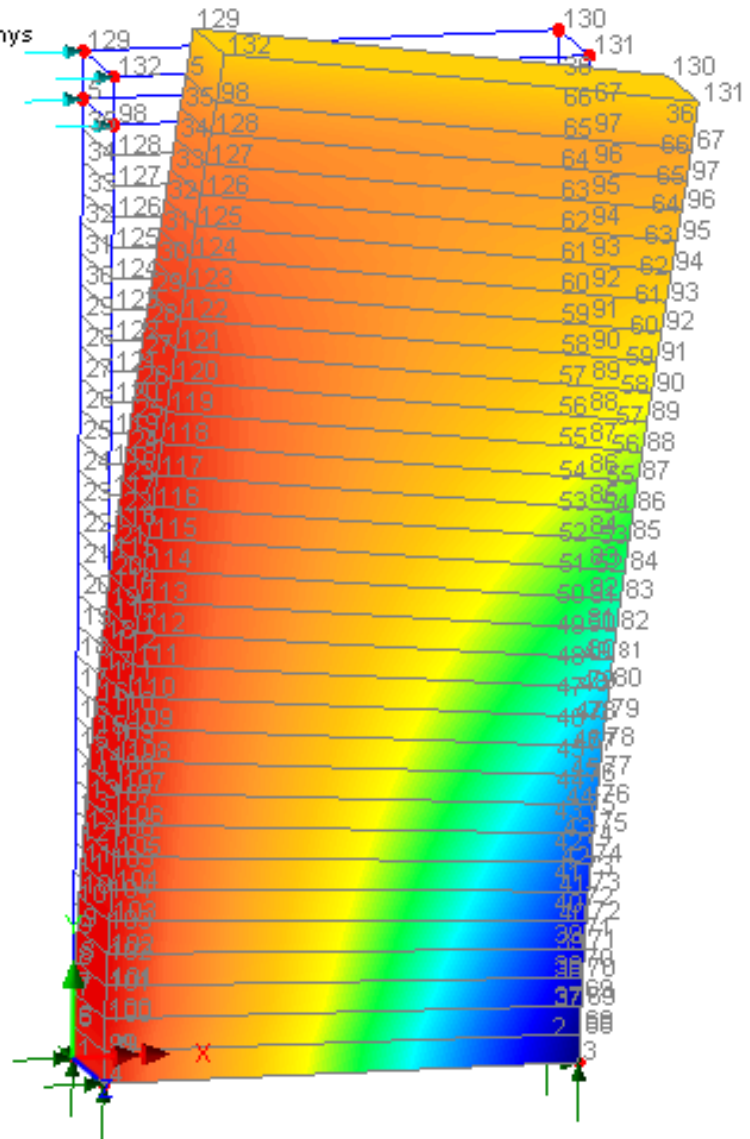
Entity: Stress - Solids

Component: S3

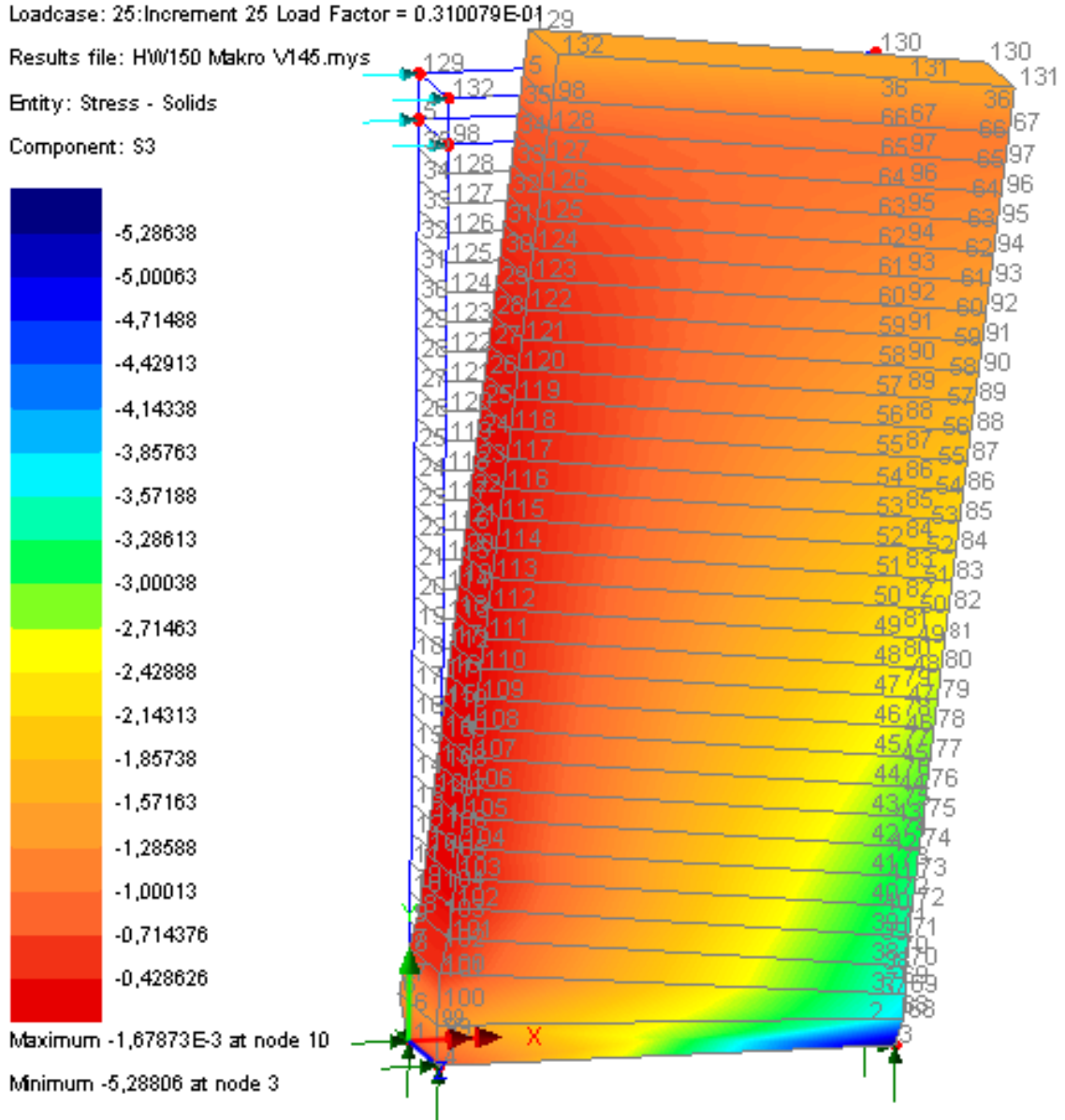


Maximum -0,0237488 at node 8

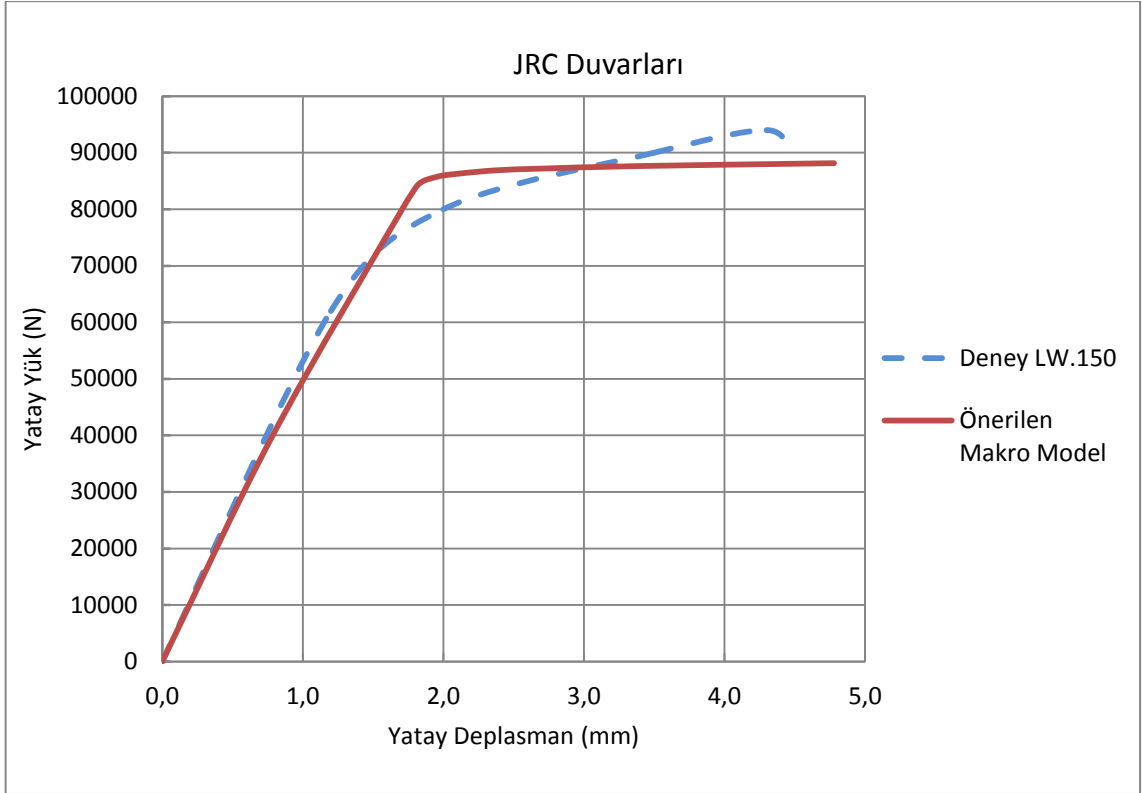
Minimum -3,03526 at node 2



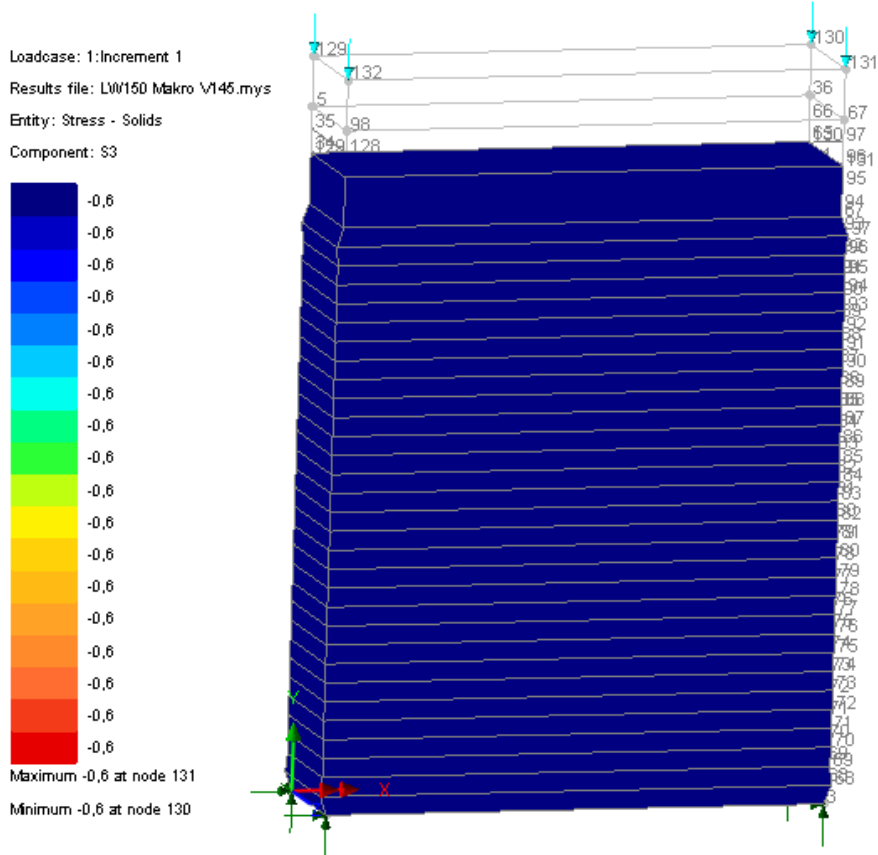
Şekil 4.94 HW150 duvarı için başlangıç seviye yatay yükleme için S3 gerilme durumu



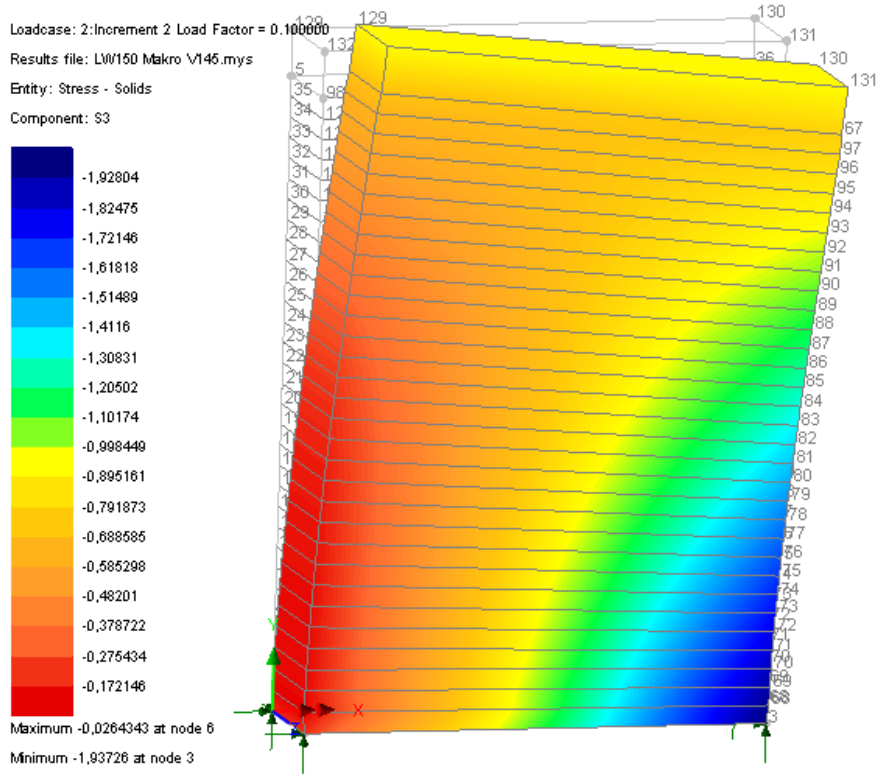
Şekil 4.95 HW150 duvarı için üst seviye yatay yükleme için S3 gerilme durumu



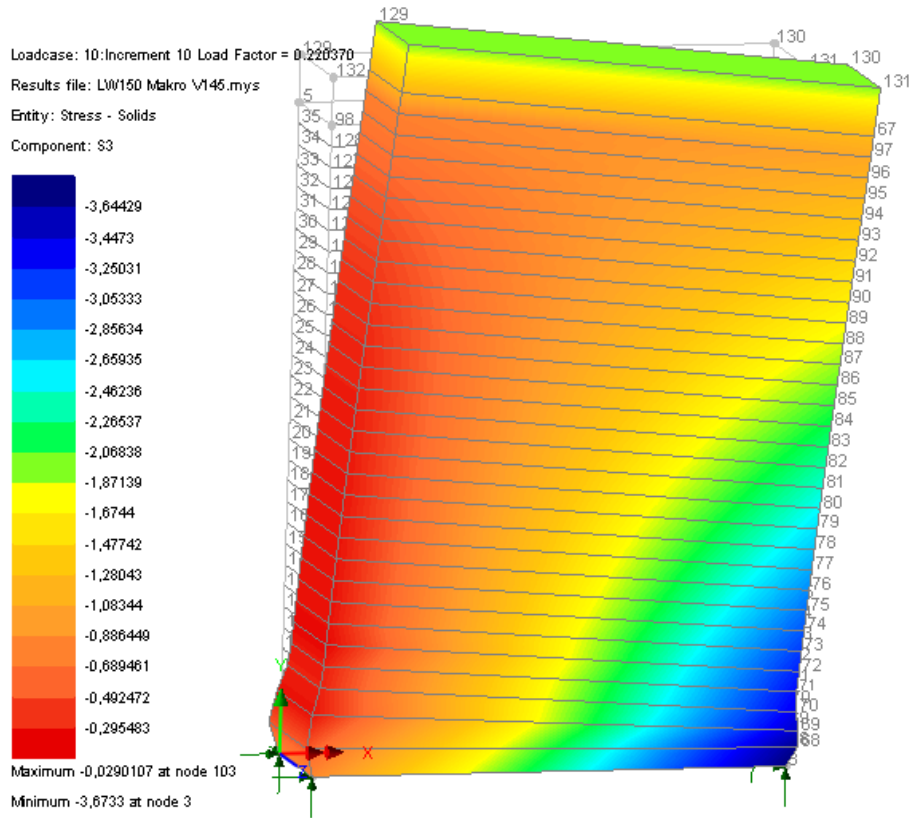
Şekil 4.96 LW150 duvarı Yatay yük-Yatay Deplasman Eğrisi



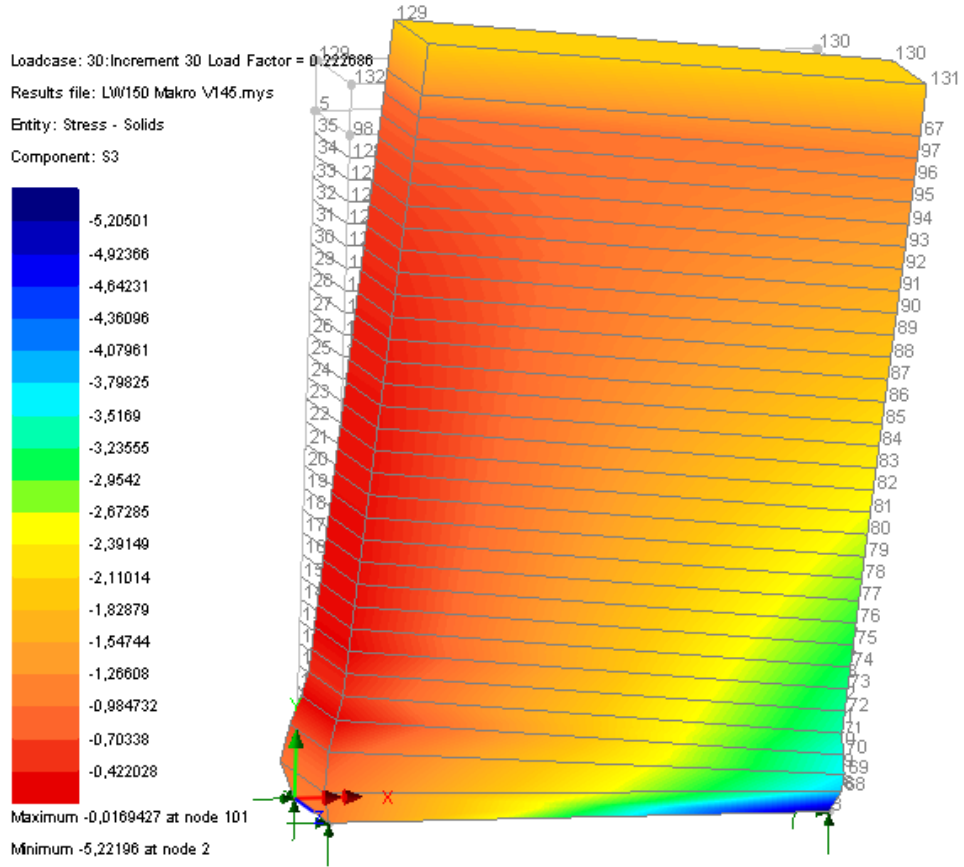
Şekil 4.97 LW150 duvarı için düşey yükleme için S3 gerilme durumu



Şekil 4.98 LW150 duvarı için başlangıç seviye yatay yükleme için S3 gerilme durumu



Şekil 4.99 LW150 duvarı için orta seviye yatay yükleme için S3 gerilme durumu



Şekil 4.100 LW150 duvarı için üst seviye yatay yükleme için S3 gerilme durumu

4.2 Mikro Model Yaklaşımı ile Plastik analiz

Bölüm 4.1’de makro modelleme tekniği ile yığma elemanlarda kırılma yükleri ve bu yük seviyelerine karşı gelen yer değiştirmelerin yeterli yaklaşıklıkla, pratik bir şekilde tahmin edildiği belirtilmiştir. Ancak gerçekte ortotropik davranış sergileyen duvarın ne şekilde ve hangi elemandaki zafiyet nedeniyle kırılma durumuna ulaşacağını anılan teknikle belirlemek mümkün değildir. Bu çalışmada daha detaylı bir modelleme tekniği ile tuğla ve harç birimlerin ayrı modellenmesi şeklinde düşünülebilecek Mikro Modelleme tekniği önerilmiştir. Mikro modelleme yaklaşımı ile harç ve tuğla ayrı ayrı modellendiği için plastik analizde gereksinim duyulan malzeme parametreleri anılan yığma birimler için ayrı ayrı belirlenmelidir.

Harç için harç basınç dayanımı ile ilişkili olarak bağıntılar (4.15) ve (4.16) önerilmektedir. Yapılan hesaplar sonucu önerilen bağıntılar ile Druger-Prager malzeme modeli için olan gerekli ϕ^0 ve c katsayıları oldukça pratik şekilde hesaplanabilmektedir.

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

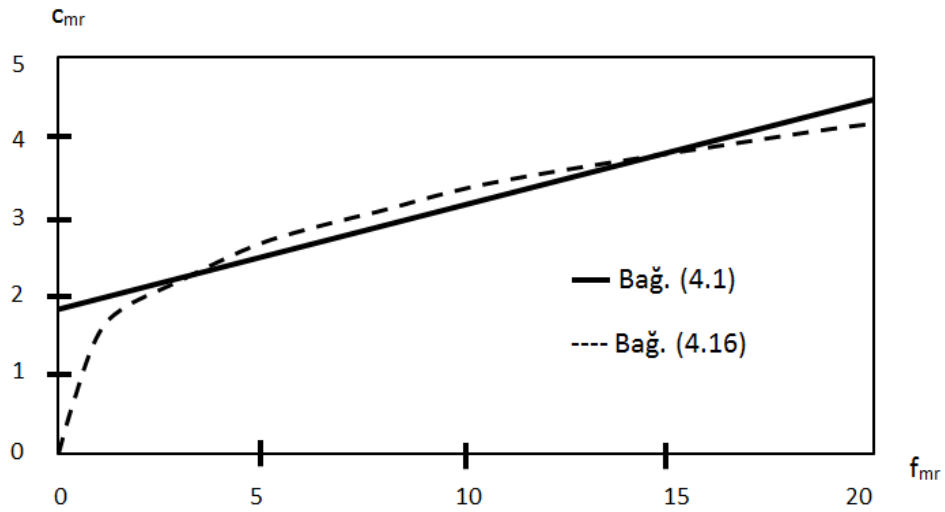
$$c_{mr} = 1.55 \sqrt[3]{f_{mr}} \quad (4.16)$$

Burada f_{mr} harç elemanının basınç dayanımını,

ϕ_{mr} harç eleman yüzeylerindeki içsel sürtünme açısını,

c_{mr} kohezyonu ifade etmektedir.

Harç için mikro model yaklaşımda önerilen bağıntı literatürdeki bağıntı ile karşılaştırılmış ve şekil 4.101'de gösterilmiştir. Önerilen bağıntı ile Druger-Prager kriterine ait malzeme parametreleri değiştirilmiş ve daha gerçekçi davranış elde edilmiştir.



Şekil 4.101 Harç için önerilen bağıntının literatürdeki bağıntı ile karşılaştırılması[104]

Yığma blok için ise parametrik çalışmalar sonucunda aşağıdaki bağıntılar (4.17) ve (4.18) önerilmiştir.

$$\frac{c_{mu}}{f_{mu}} = \frac{\tan \phi_{mu}}{3} \sqrt{\frac{\sigma_m}{f_{mu}}} \leq \frac{c_{mu}}{f_{mu}} \Big|_{\frac{\sigma_m}{f_{mu}}=1} \quad (4.17)$$

$$\phi_{mu} = \phi_i - 0.75 \frac{\sigma_m}{f_{mu}} \geq \phi_f = \phi_{mu} \Big|_{\frac{I_1}{f_{mu}}=1} \quad (4.18)$$

Burada σ_m , ortalama gerilme değeridir ve

$\sigma_m = 1/3 (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})$; ile hesaplanmaktadır.

ϕ_i ve ϕ_f ise başlangıç ve bitiş sürtünme açılarıdır.

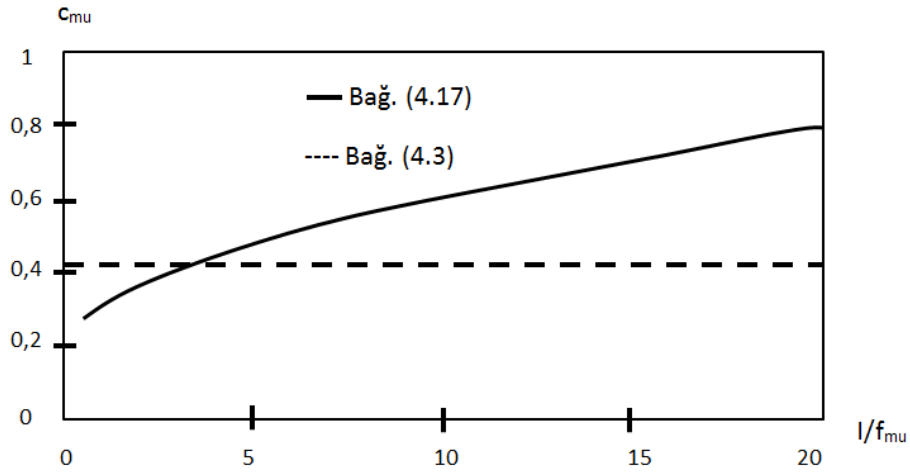
ϕ_i değeri tuğla eleman için yaklaşık olarak $\pi/3$ alınabilir.

c_{mu} Tuğla elemanlarda kohezyonu,

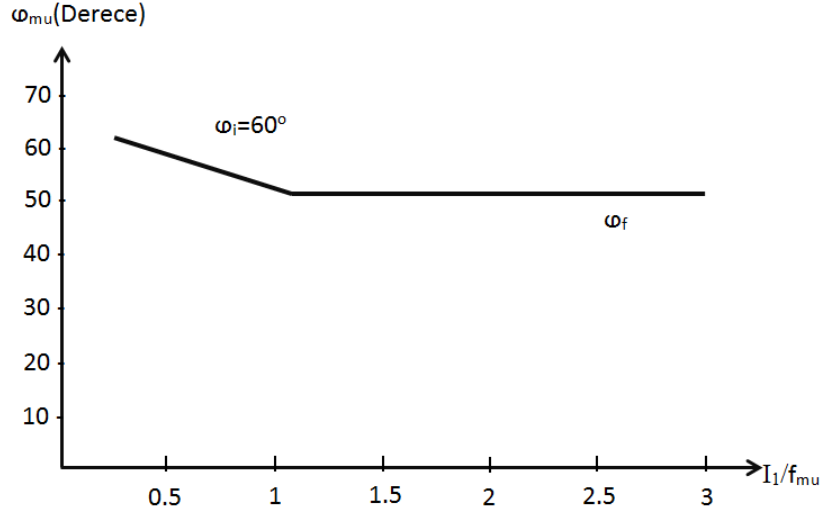
f_{mu} basınç dayanımını,

ϕ_{mu} tuğla yüzeylerdeki sürtünme açısını ifade etmektedir.

Blok için mikro model yaklaşımda önerilen bağıntı literatürdeki bağıntı ile karşılaştırılmış ve şekil 4.102’de gösterilmiştir. Önerilen bağıntıda Druger-Prager kriterine ait malzeme parametreleri değiştirilmiş ve daha gerçeği davranış elde edilmiştir. şekil 4.103’de ise içsel sürtünme açısının blok basınç dayanımı ile ilişkisi gösterilmiştir. Bu bağıntılarla Drucker-Prager kriteri hidrostatik basınca bağımlı hale getirilerek basınç meridyeni doğrusal formdan eğrisel bir biçime dönüştürülmüştür.



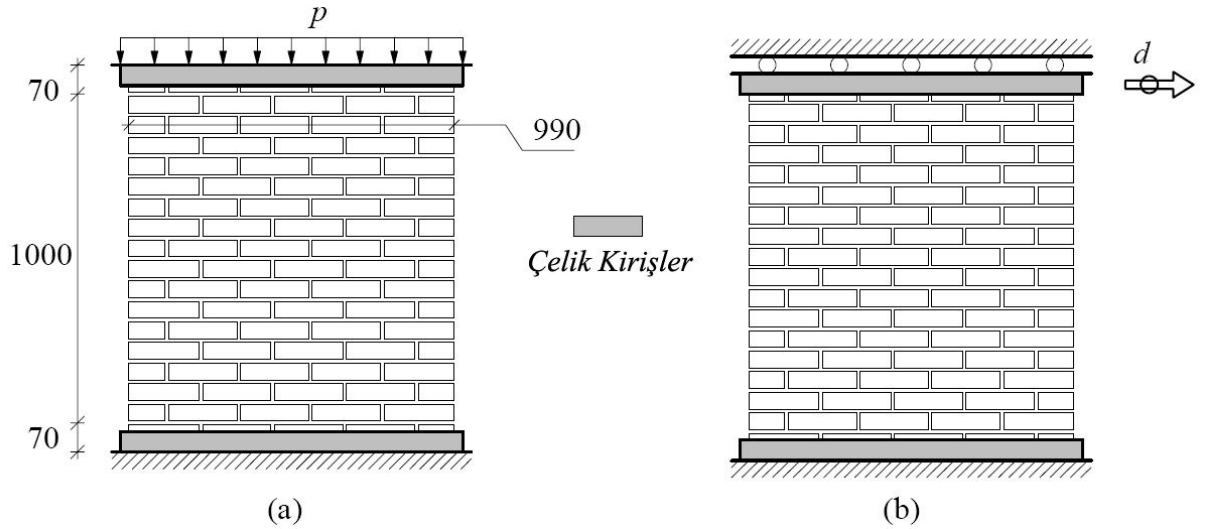
şekil 4.102 Yığma blok için önerilen kohezyon bağıntısının literatürdeki bağıntı ile karşılaştırılması[104]



Şekil 4.103 Yığma blok için önerilen içsel sürtünme açısı bağıntısının değişimi[104]

Mikro modelleme yaklaşımı için ölçüleri Şekil 4.104 ve Şekil 4.119’de gösterilen Eindhoven ve ETHZ duvarları kullanılmıştır.

4.2.1 TU Eindhoven Duvarları

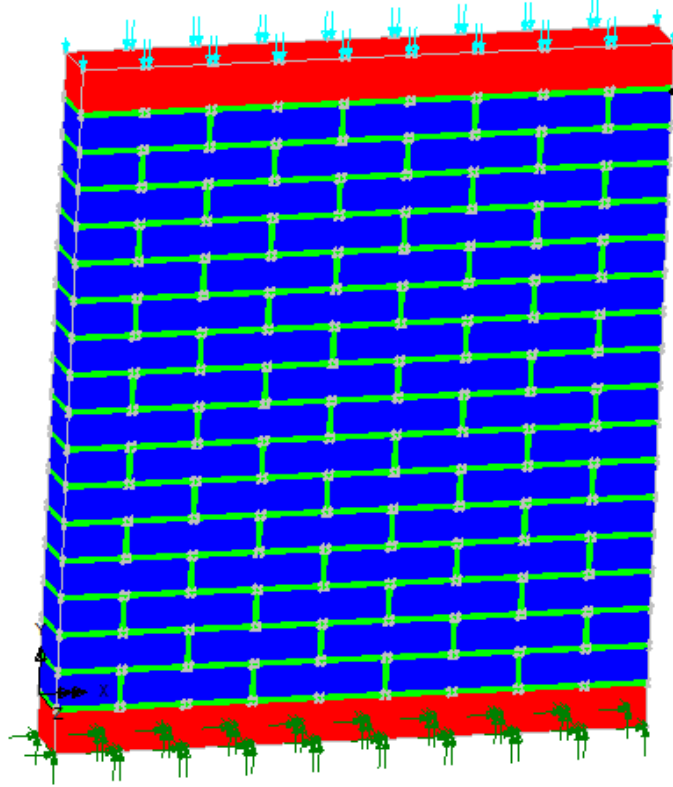


Şekil 4.104 Eindhoven Duvarı

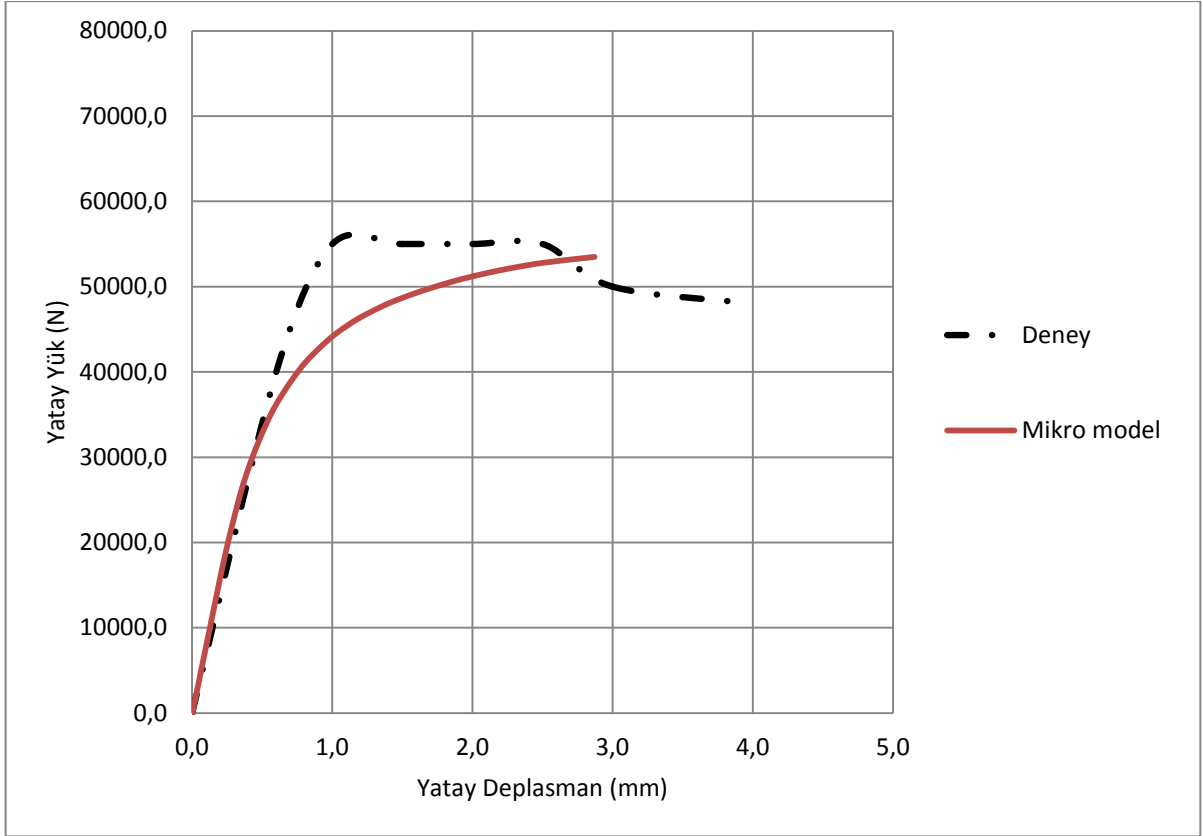
Makro modelleme yaklaşımında kullanılan Eindhoven duvarları mikro modelleme içinde kullanılmıştır. Sayısal analizde düşey yük değeri 30kN, 120kN ve 210kN olmak üzere 3 farklı yükleme durumu için kullanılan parametreler Çizelge 4.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11 Mikro modelde kullanılan yük ve parametreler

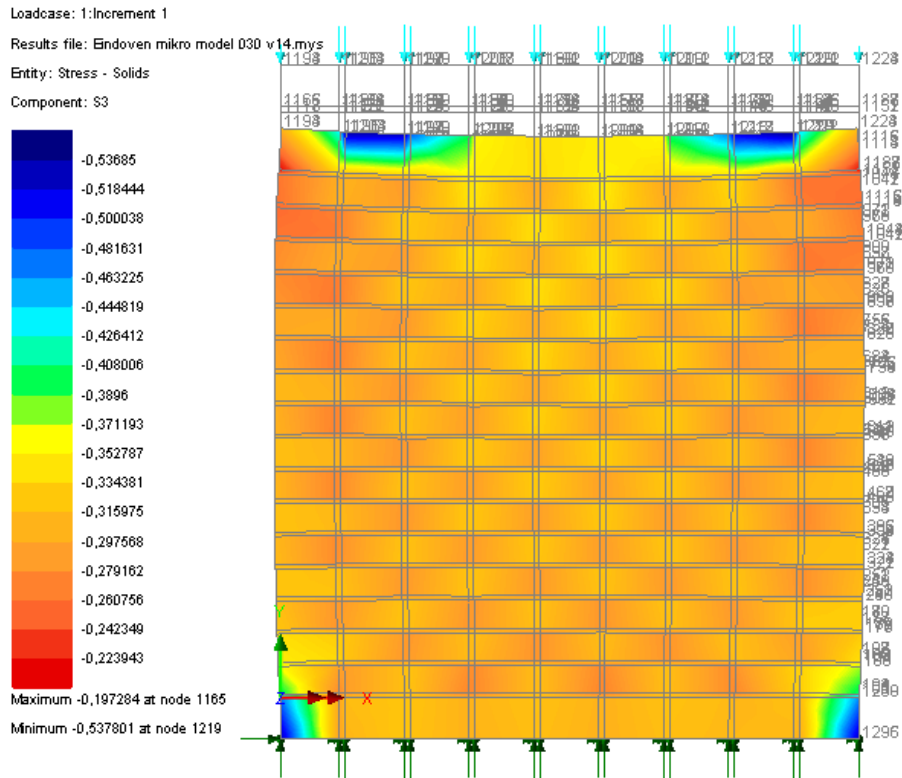
Deney	Duvar adı	Duvar Boyutları(mm)	Blok				Harç			
			E_{Blok} (MPa)	ν	ϕ	c	$E_{\text{Harç}}$ (MPa)	ν	ϕ	c
TU Eindhoven	J4D	1000x990x100	8500	0,14	59,8	1,08	2500	0,14	0,76	1,23
	J6D		8500	0,14	59,5	2,14	2500	0,14	0,76	1,23
	J7D		8500	0,14	59,1	2,81	2500	0,14	0,76	1,23



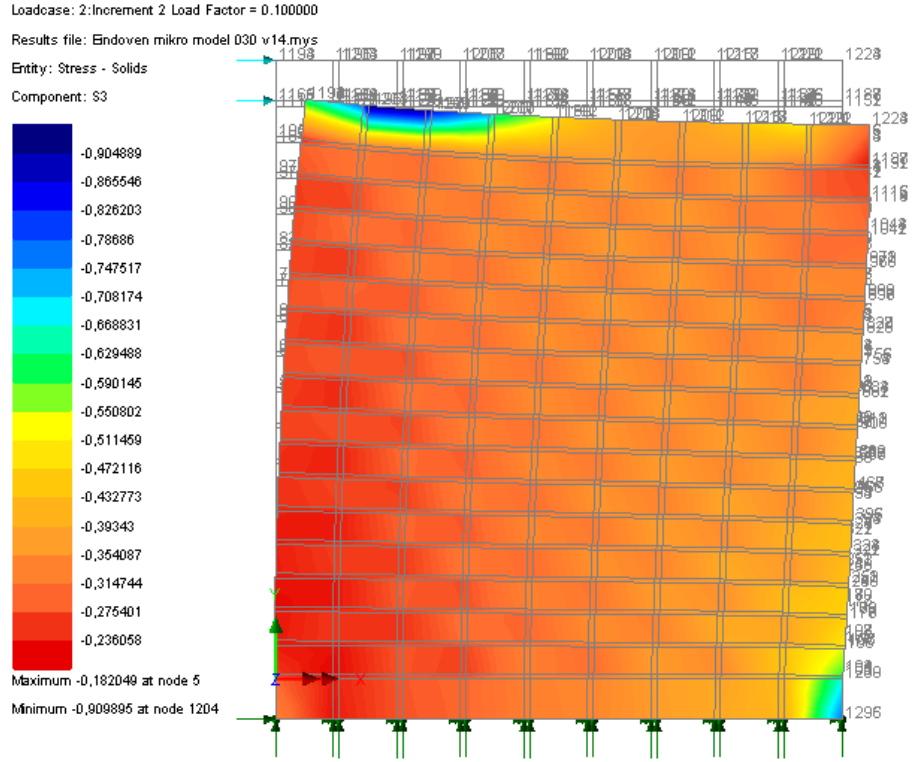
Şekil 4.105 Sonlu Eleman Modeli



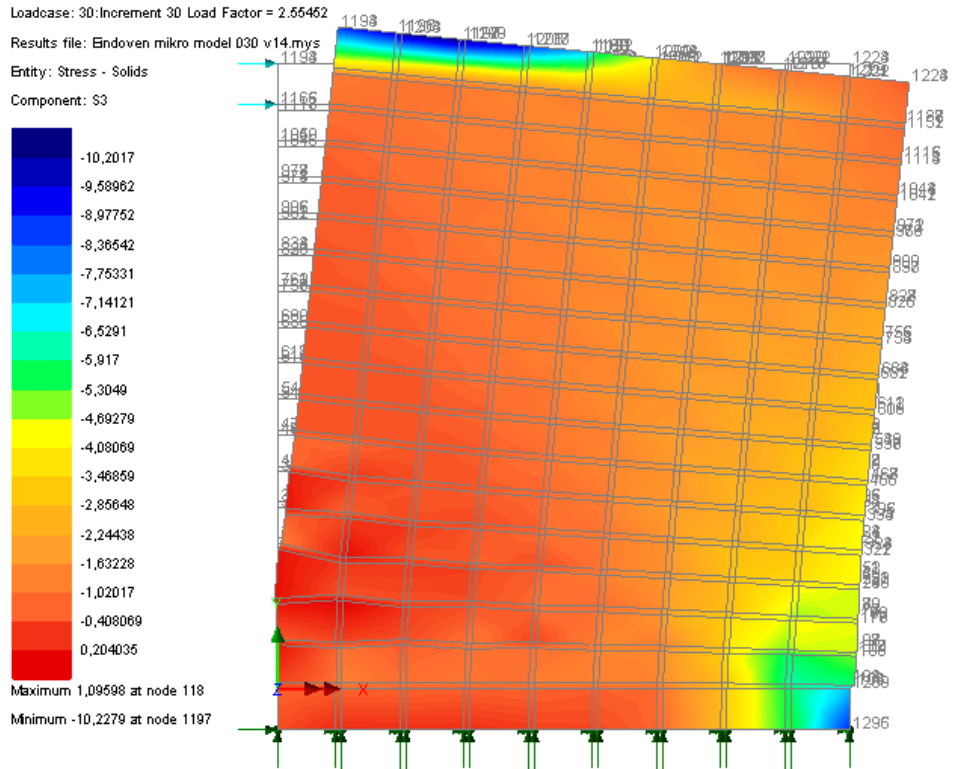
Şekil 4.106 P=30kN için yatay yük ve yatay şekil değiştirme grafiği



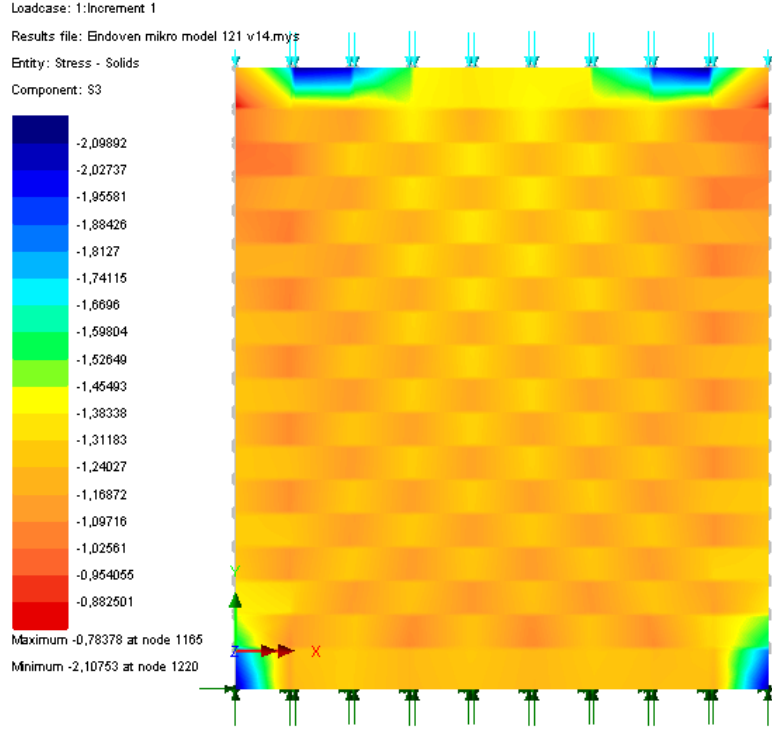
Şekil 4.107 P=30kN için düşey yükleme durumunda gerilme dağılımı



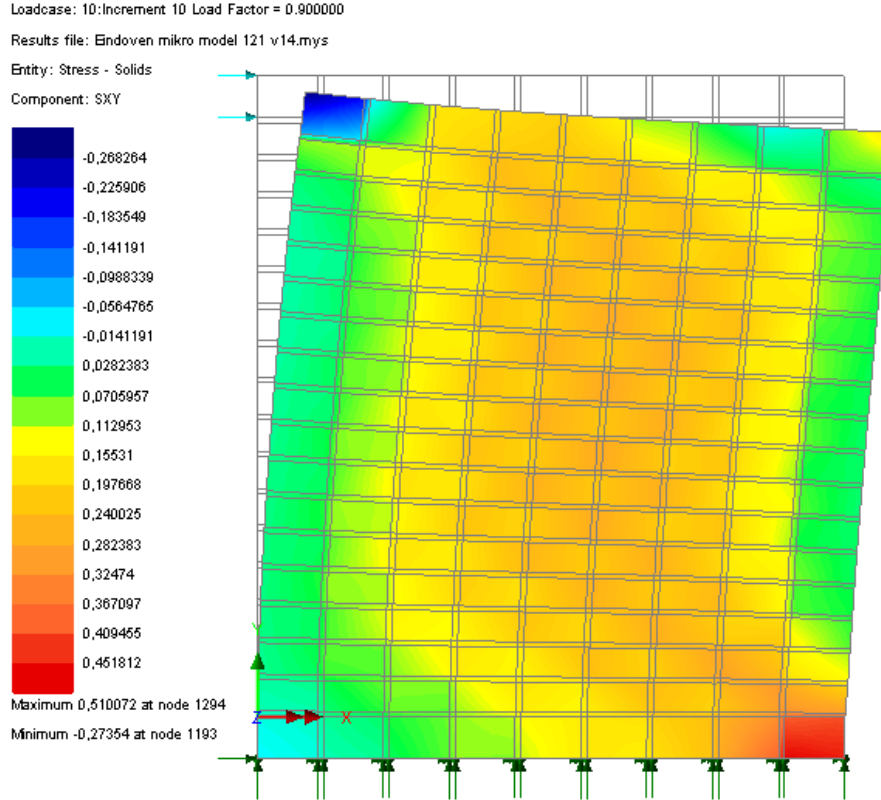
Şekil 4.108 P=30kN için yatay ve düşey yükleme durumunda S3 gerilme dağılımı



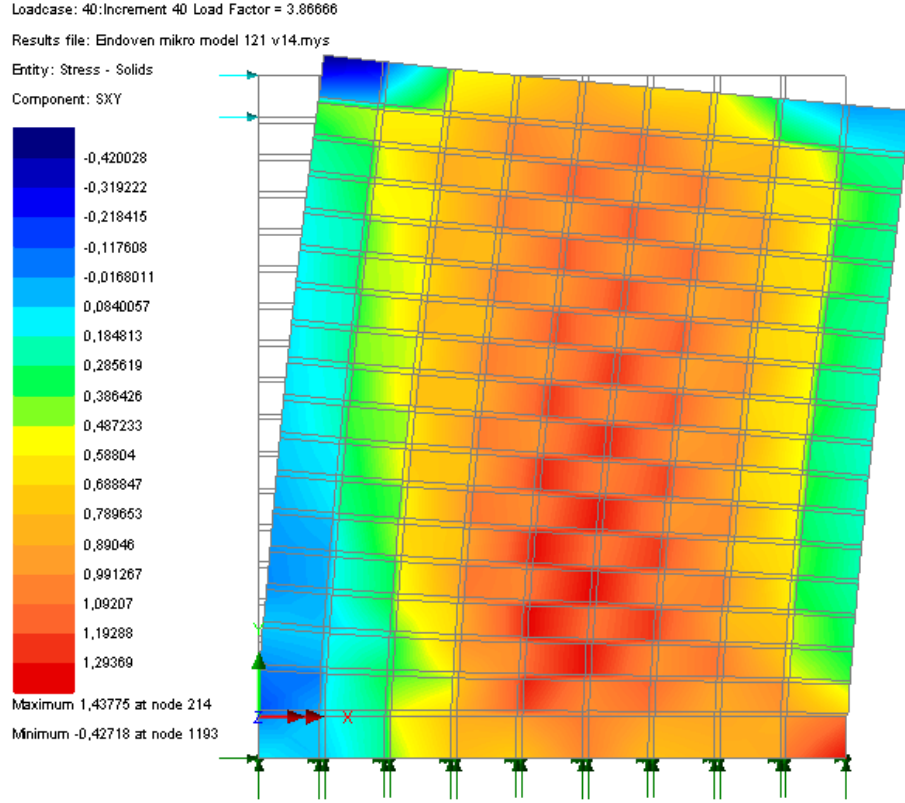
Şekil 4.109 P=30kN için yatay ve düşey yükleme durumunda S3 gerilme dağılımı



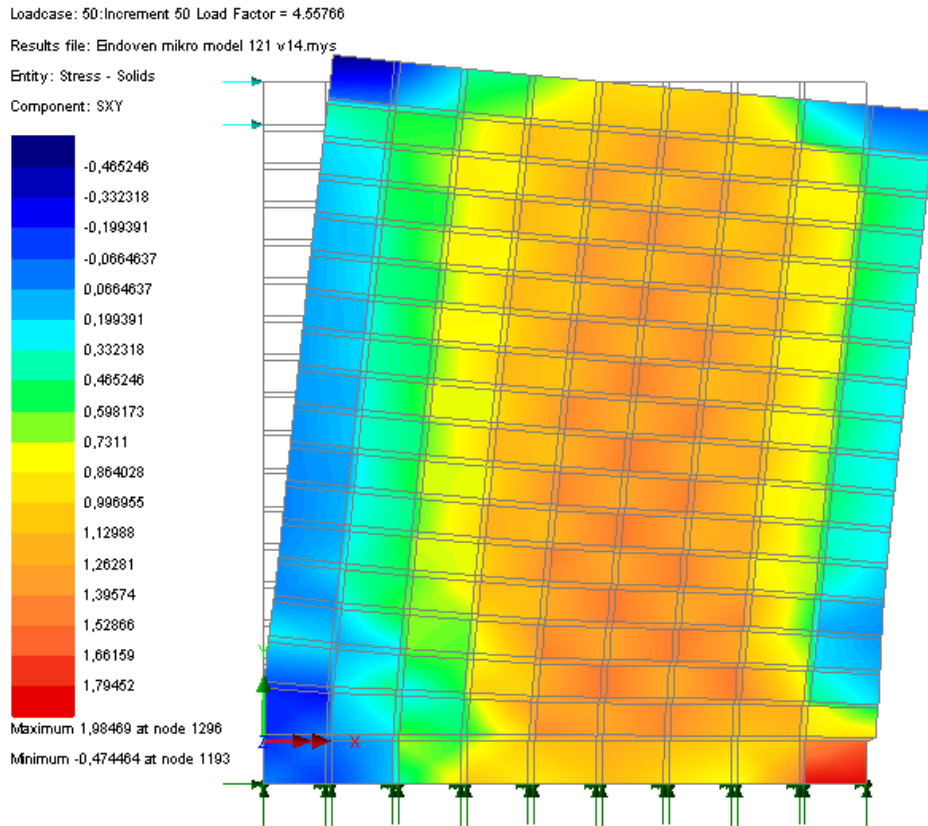
Şekil 4.112 P=120kN için düşey yükleme durumunda gerilme dağılımı



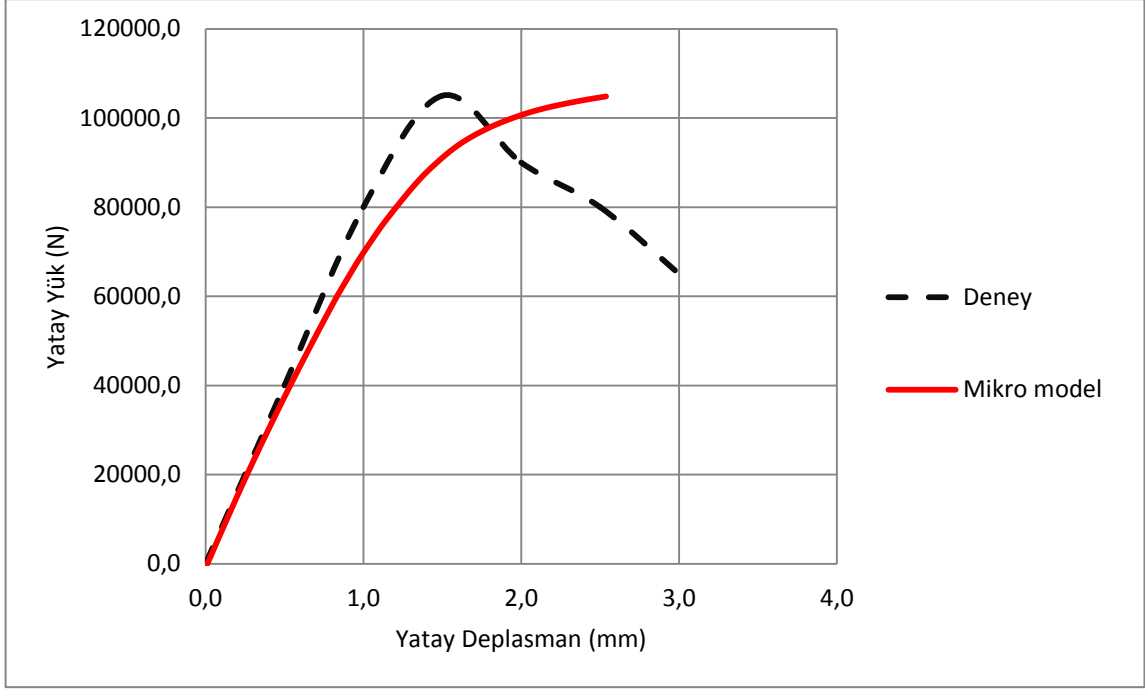
Şekil 4.113 P=120kN için yatay ve düşey yükleme durumunda Sxy gerilme dağılımı



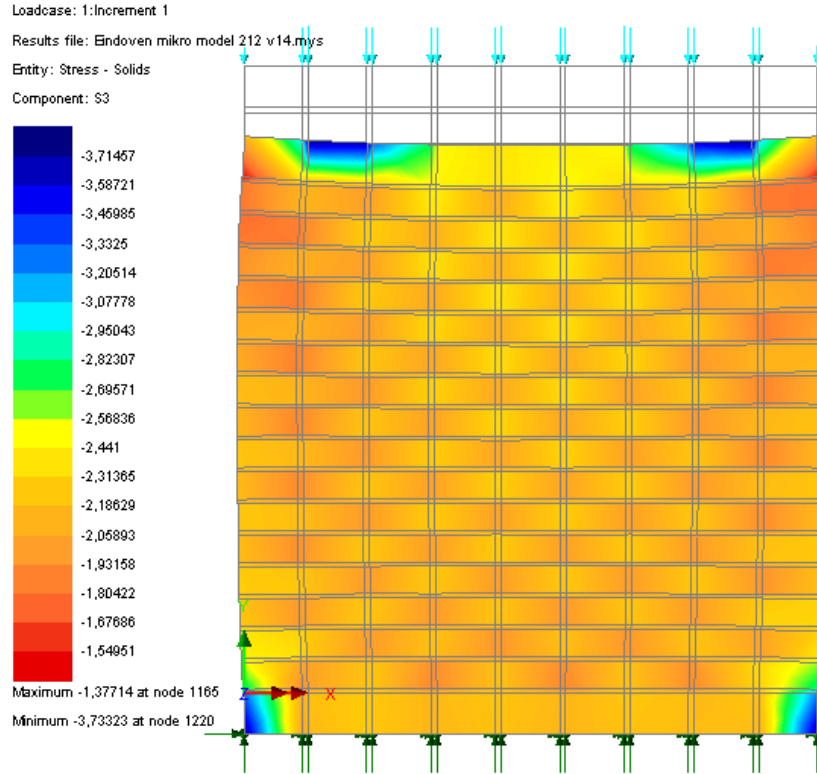
Şekil 4.114 P=120kN için yatay ve düşey yükleme durumunda Sxy gerilme dağılımı



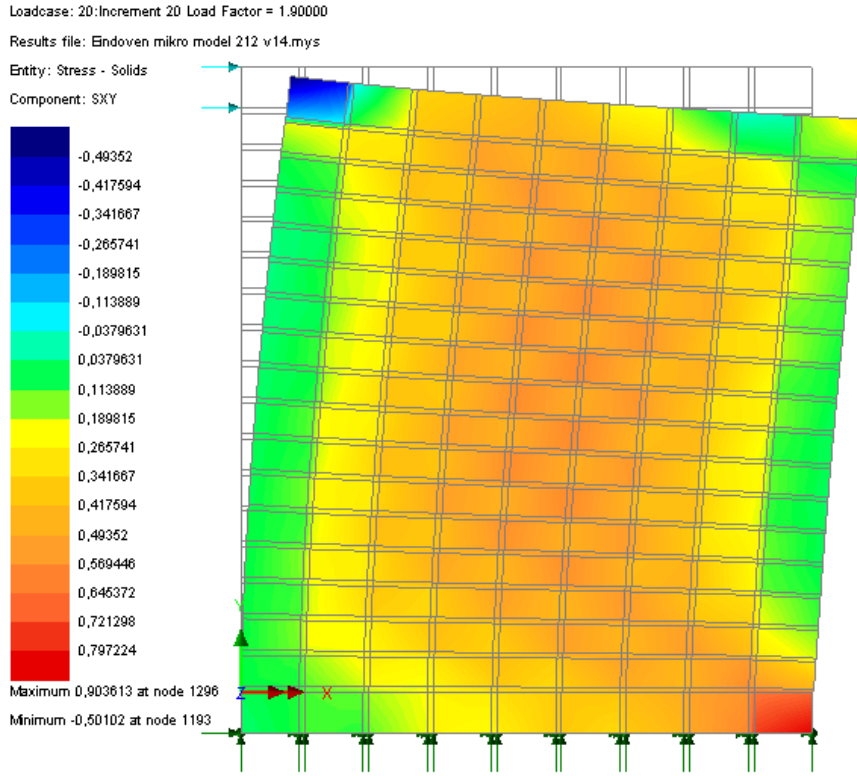
Şekil 4.115 P=120kN için göçme durumunda Sxy gerilme dağılımı



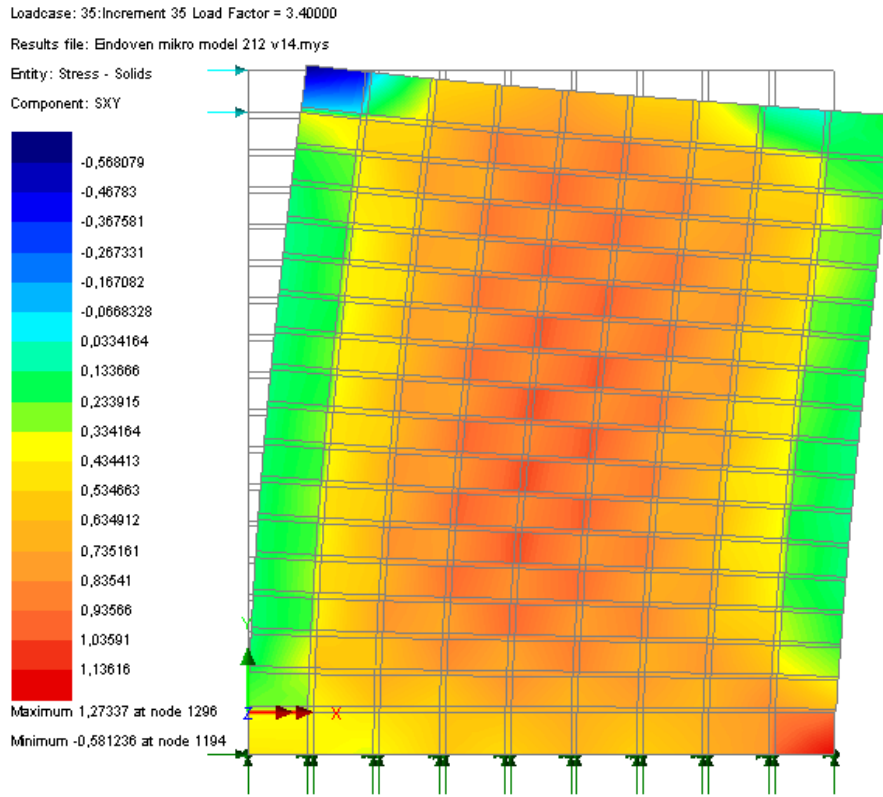
Şekil 4.116 P=210kN için yatay yük ve yatay şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.117 P=210kN için düşey yükleme durumunda gerilme dağılımı



Şekil 4.118 P=210kN için yatay ve düşey yükleme durumunda Sxy gerilme dağılımı



Şekil 4.119 P=210kN için göçme durumunda Sxy gerilme dağılımı

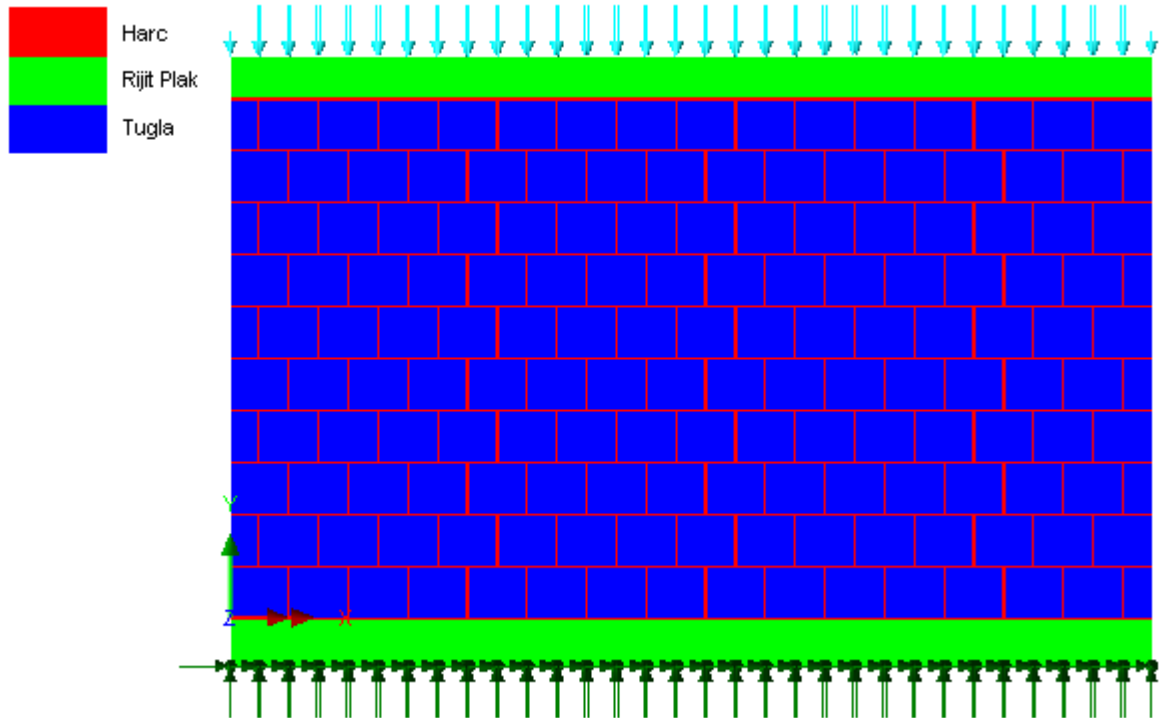
4.2.2 ETHZ Duvarları

Mikro modelleme tekniği ile blok ve harç ayrı ayrı modellenerek bağıntı (4.15-18) kullanılarak elde edilen katsayılar aşağıdaki tabloda verilmiştir.

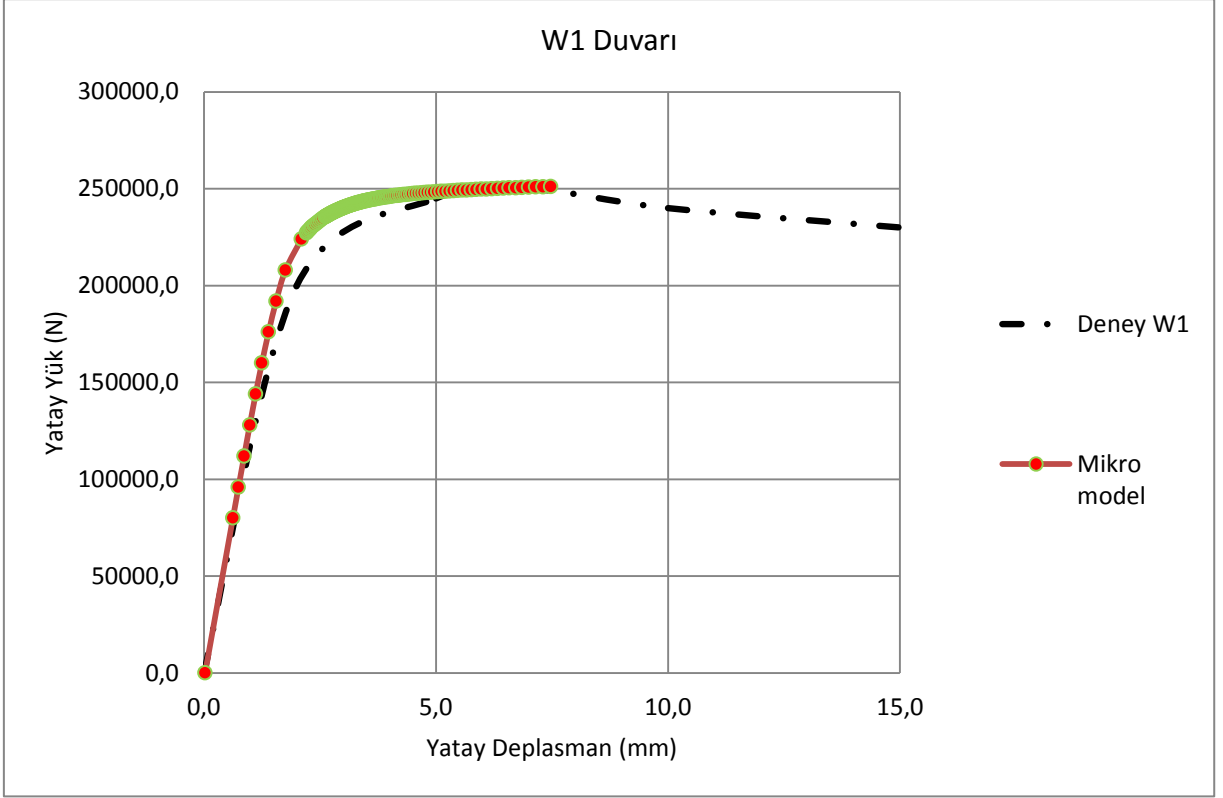
Bu veriler ile yatay yük-şekil değiştirme grafikleri ile gerilme dağılımları elde edilmiş ve deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.121-130).

Çizelge 4.12 ETHZ deneyi için Mikro modelde kullanılan yük ve parametreler

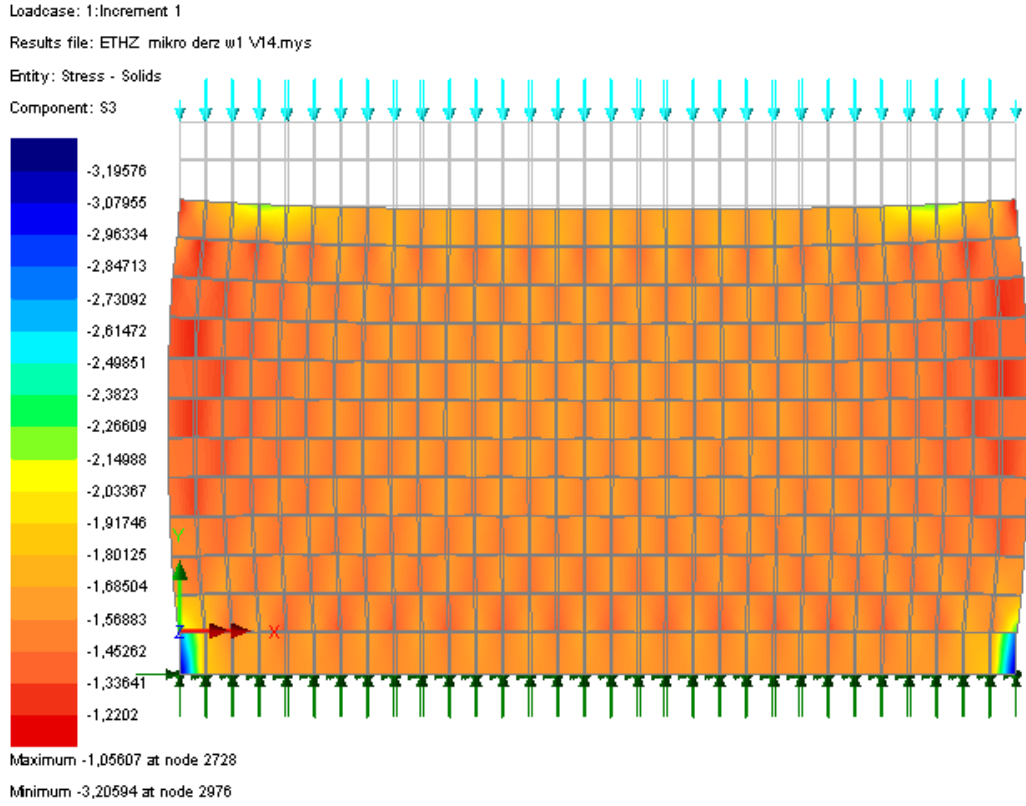
Deney	Duvar adı	Duvar Boyutları (mm)	Blok				Harç			
			E_{Blok}	ν	ϕ	c	$E_{\text{Harç}}$	ν	ϕ	c
ETHZ Deneyleri	W1	3600x2000x150	4500	0,15	59,8	0,69	1750	0,14	0,6	1,14
	W2		5500	0,15	56,4	1,1	2500	0,14	4,55	2,23



Şekil 4.120 ETHZ deneyi için kullanılan sonlu eleman modeli

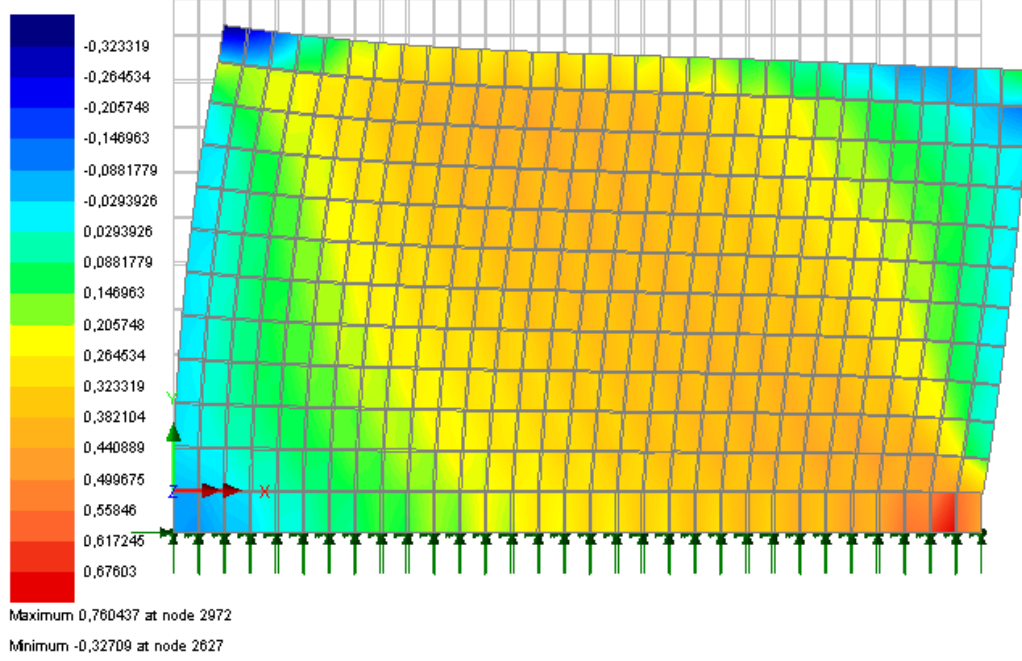


Şekil 4.121 W1 duvarı için Yatay yük – Şekil değiştirme grafiği



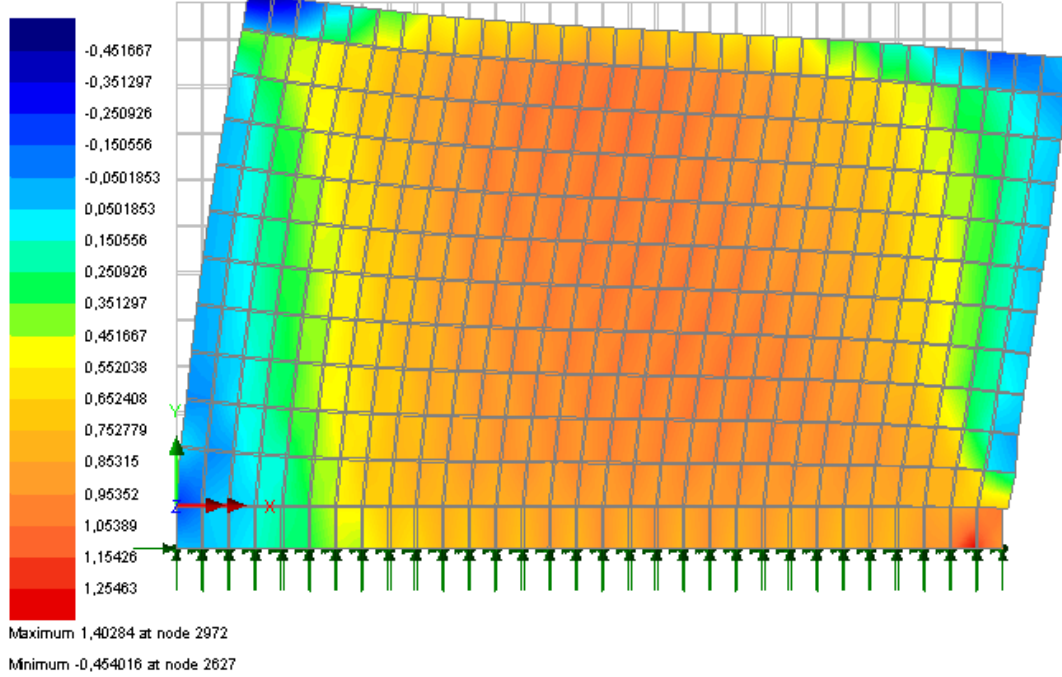
Şekil 4.122 P=415kN için düşey yükleme durumunda gerilme dağılımı

Loadcase: 2: Increment 2 Load Factor = 0.200000
Results file: ETHZ mikro derz w1 V14.mys
Entity: Stress - Solids
Component: SXY



Şekil 4.123 P=415kN için yatay ve düşey yükleme durumunda Sxy gerilme dağılımı

Loadcase: 10: Increment 10 Load Factor = 0.520000
Results file: ETHZ mikro derz w1 V14.mys
Entity: Stress - Solids
Component: SXY



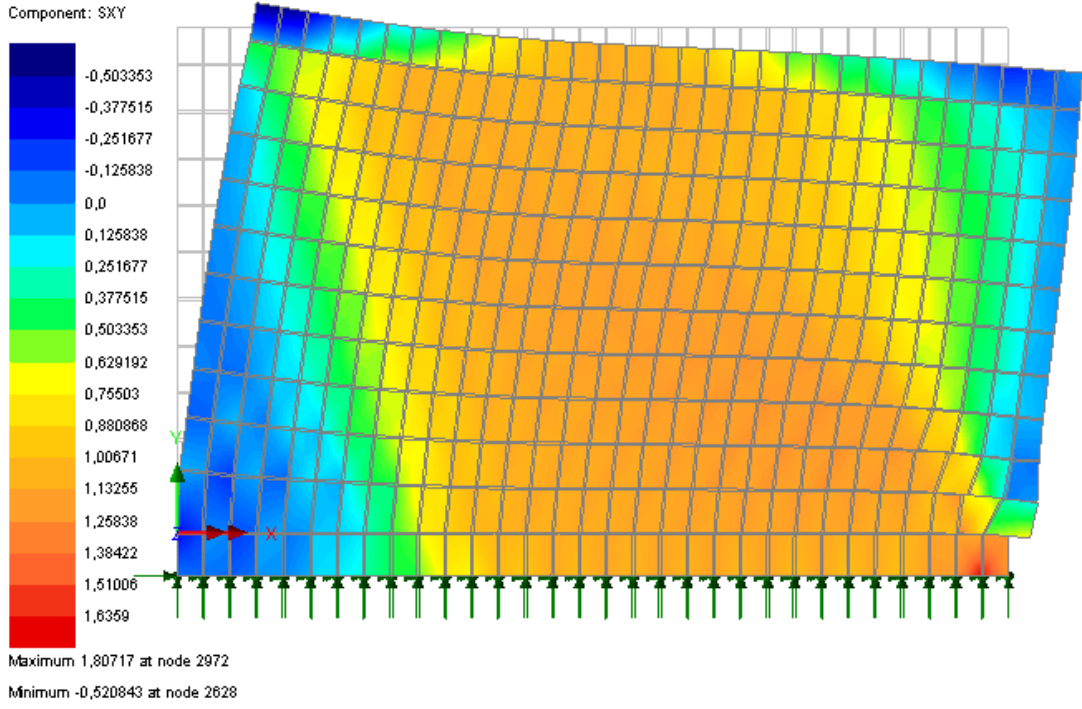
Şekil 4.124 P=415kN için yatay ve düşey yükleme durumunda Sxy gerilme dağılımı

Loadcase: 50:Increment 50 Load Factor = 0.596800

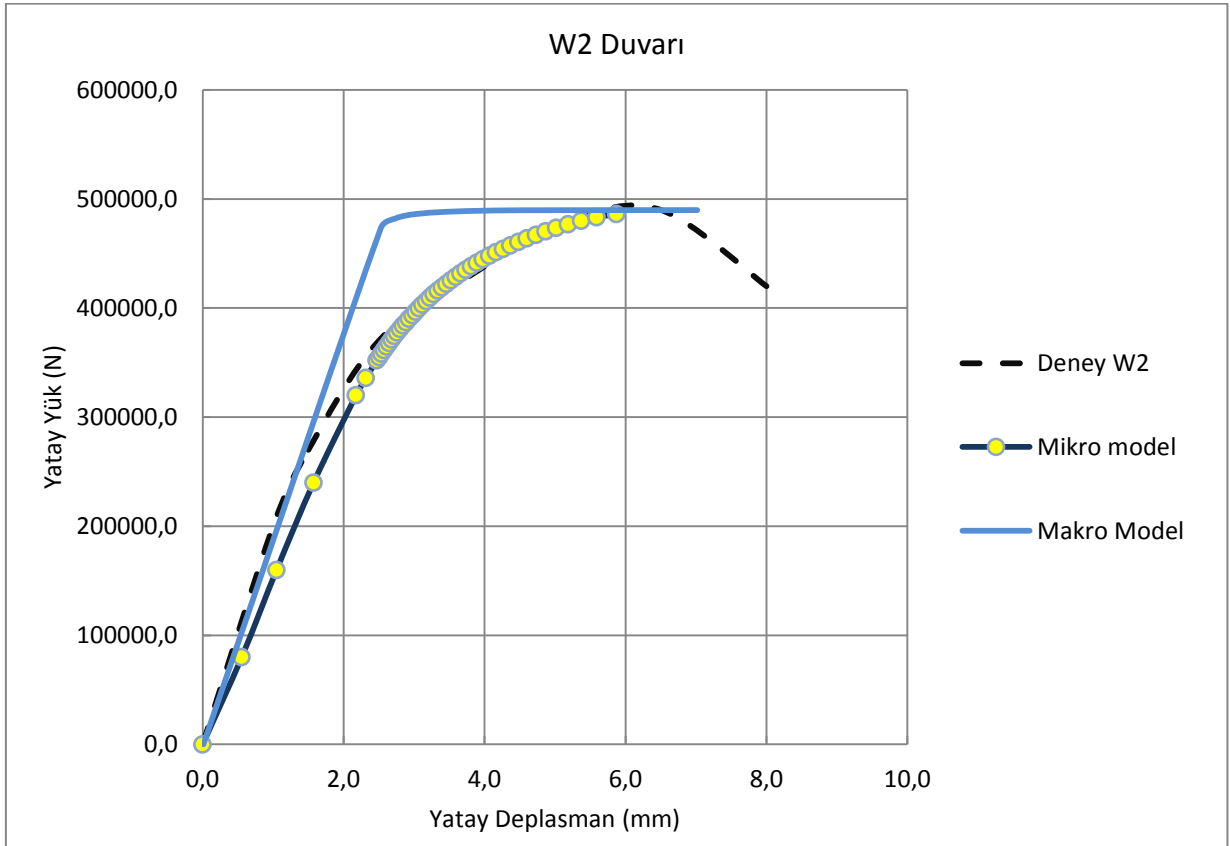
Results file: ETHZ_mikro derz w1 V14.mys

Entity: Stress - Solids

Component: SXY

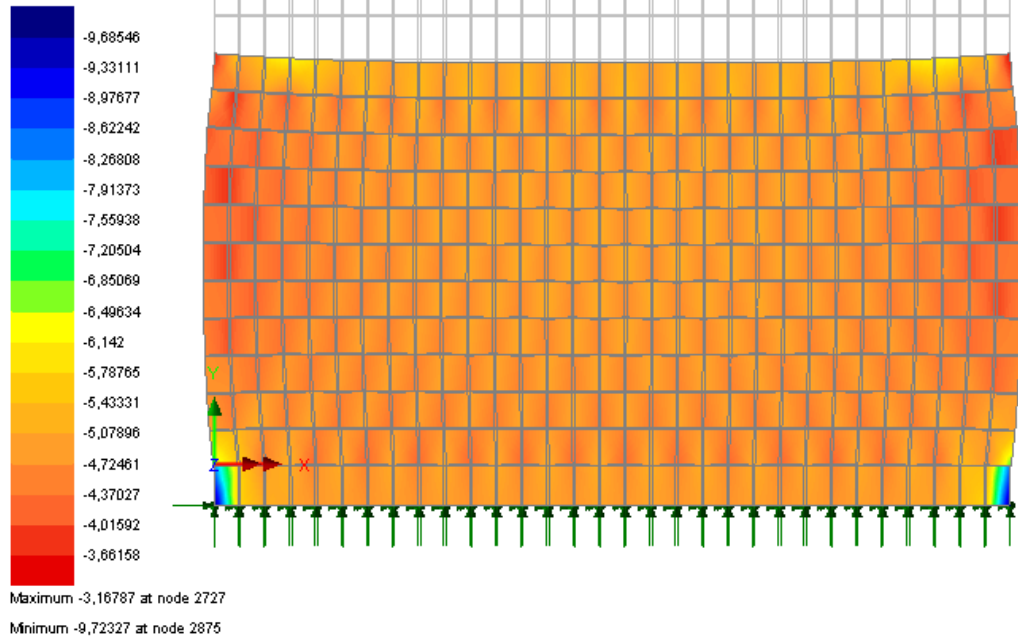


Şekil 4.125 P=415kN için göçme durumundaki Sxy gerilme dağılımı



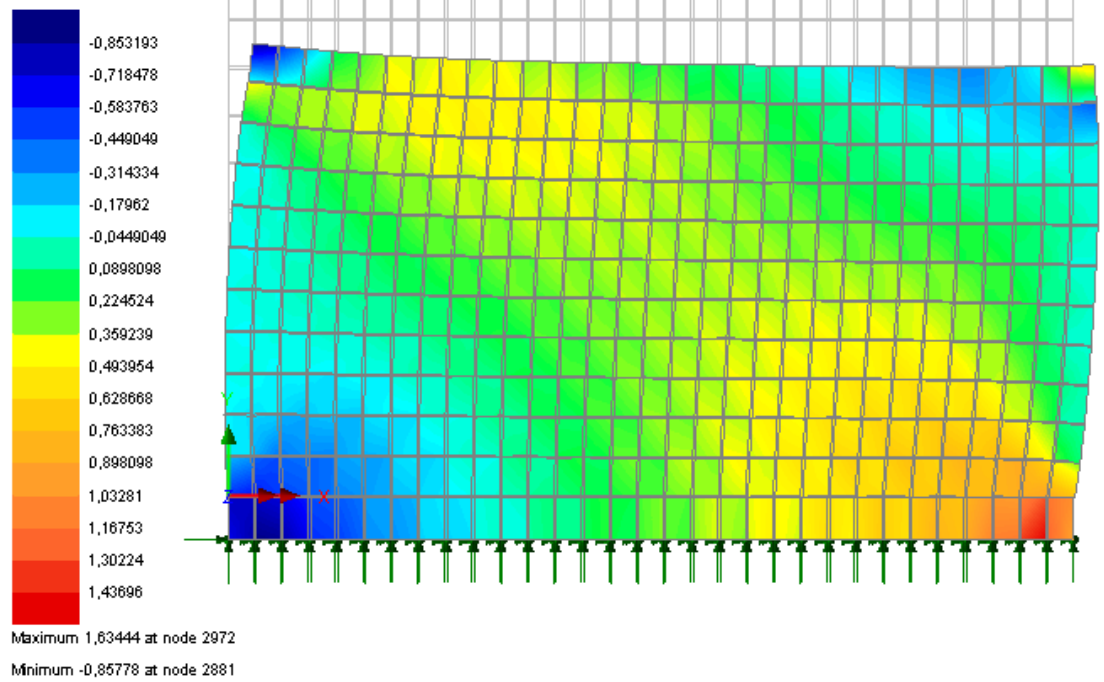
Şekil 4.126 W2 duvarı için yatay yük – şekil değiştirme grafiği

Loadcase: 1:Increment 1
Results file: ETHZ mikro derz w2 \V14.mys
Entity: Stress - Solids
Component: S3



Şekil 4.127 P=1287kN için düşey yükleme durumunda gerilme dağılımı

Loadcase: 2:Increment 2 Load Factor = 0.200000
Results file: ETHZ mikro derz w2 \V14.mys
Entity: Stress - Solids
Component: SXY



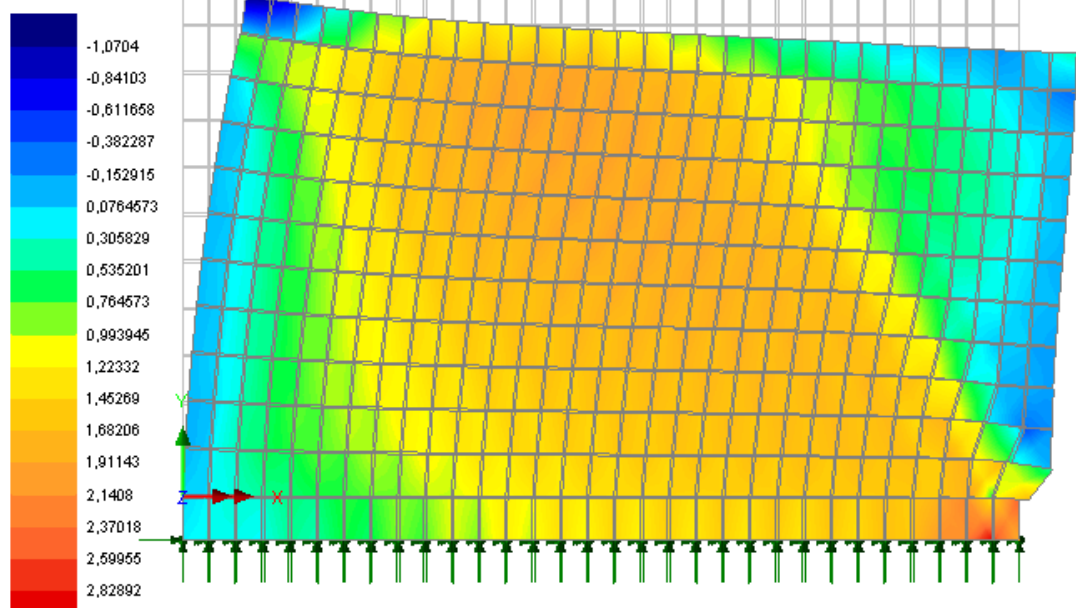
Şekil 4.128 P=1287kN için yatay ve düşey yükleme durumunda Sxy gerilme dağılımı

Loadcase: 10:Increment 10 Load Factor = 0.904000

Results file: ETHZ mikro derz w2 v14.mys

Entity: Stress - Solids

Component: SXY



Maximum 3,16742 at node 2972

Minimum -1,07596 at node 2629

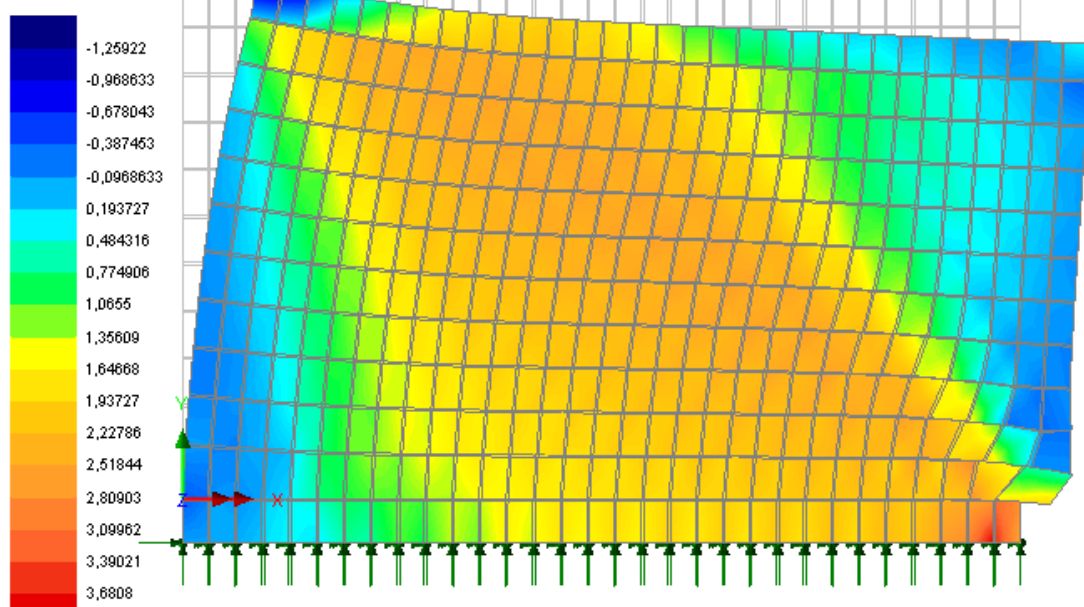
Şekil 4.129 P=1287kN için yatay ve düşey yükleme durumunda Sxy gerilme dağılımı

Loadcase: 40:Increment 40 Load Factor = 1.14400

Results file: ETHZ mikro derz w2 v14.mys

Entity: Stress - Solids

Component: SXY

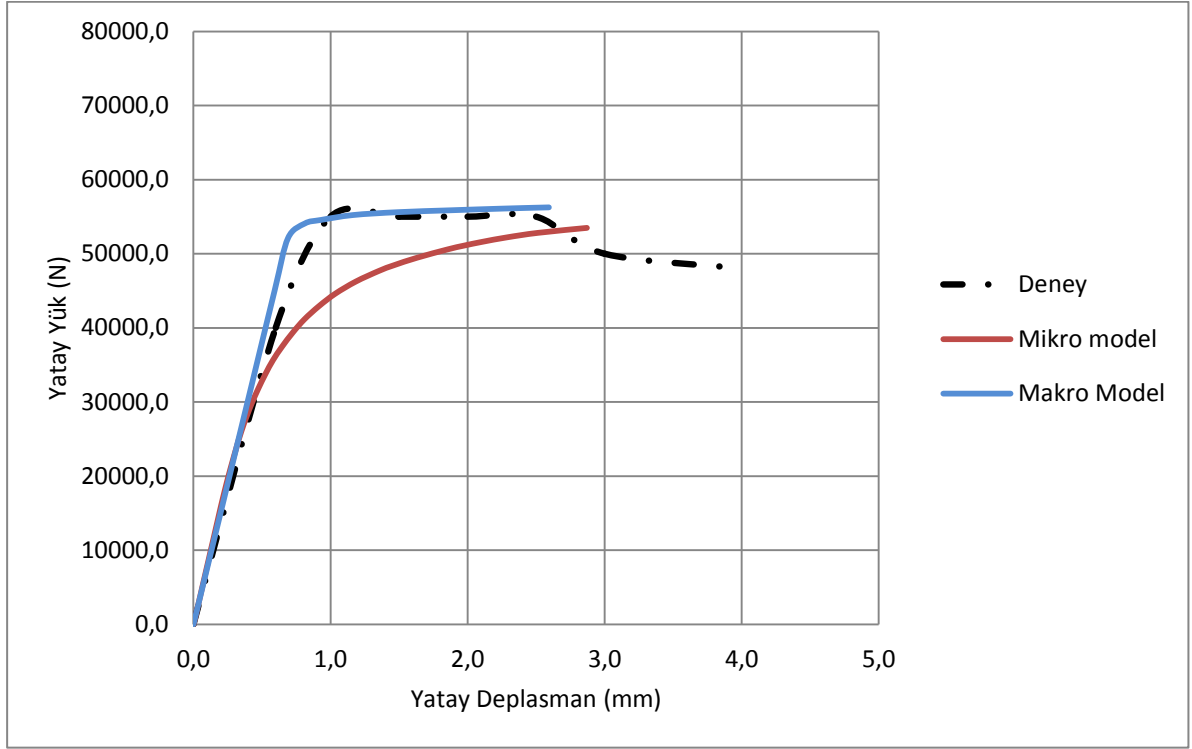


Maximum 4,10428 at node 2972

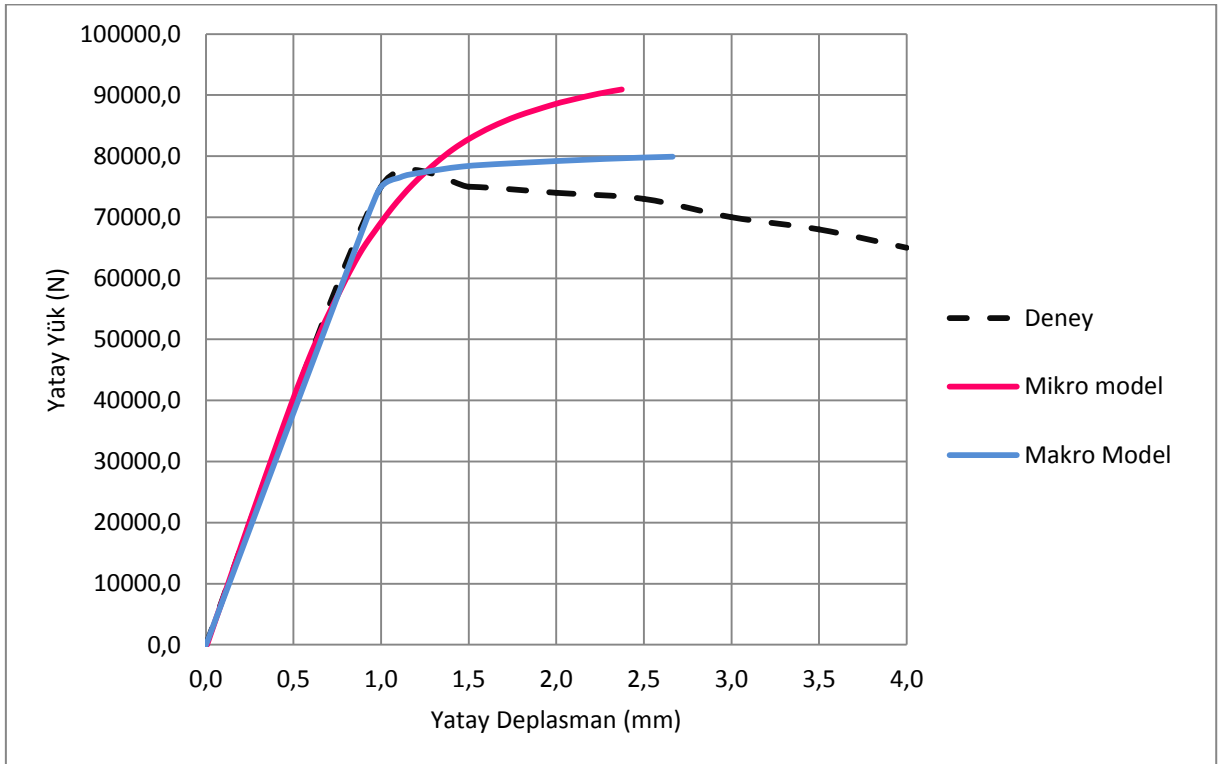
Minimum -1,27163 at node 2629

Şekil 4.130 P=1287kN için göçme durumundaki Sxy gerilme dağılımı

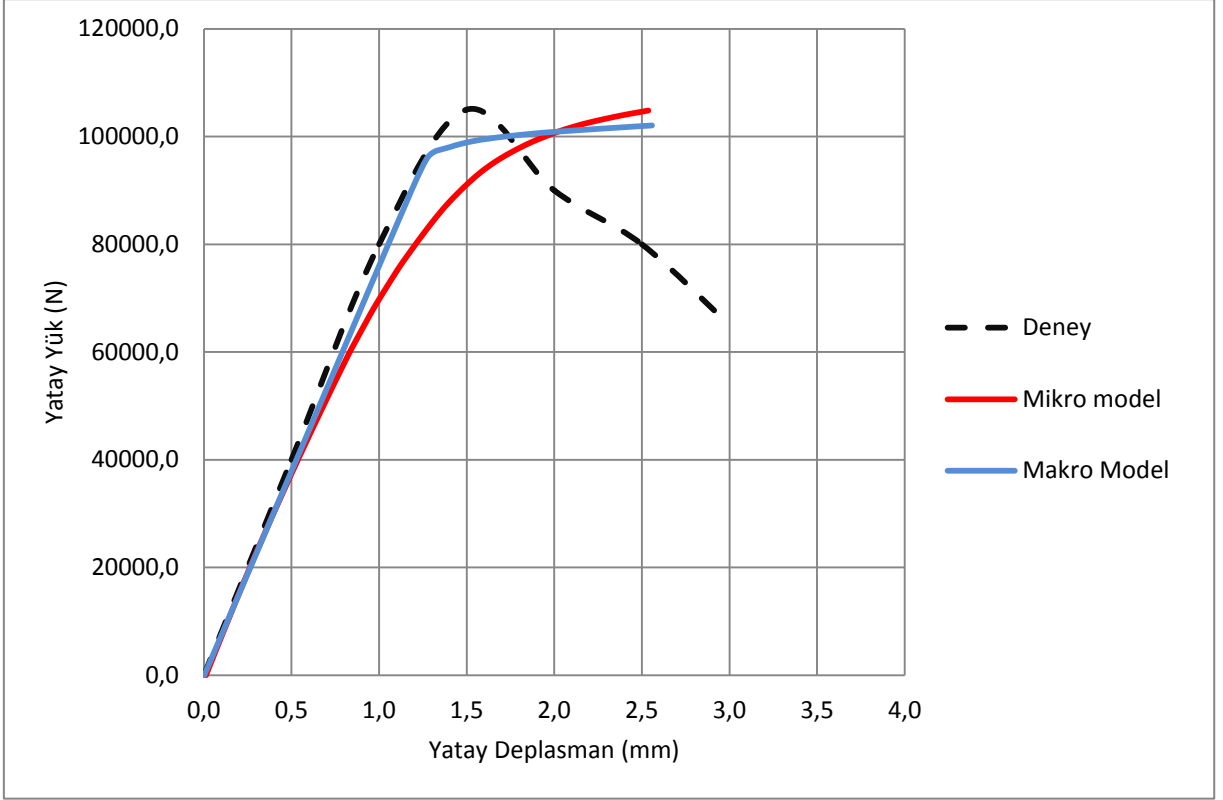
4.3 Makro ve Mikro Model Karşılaştırılması



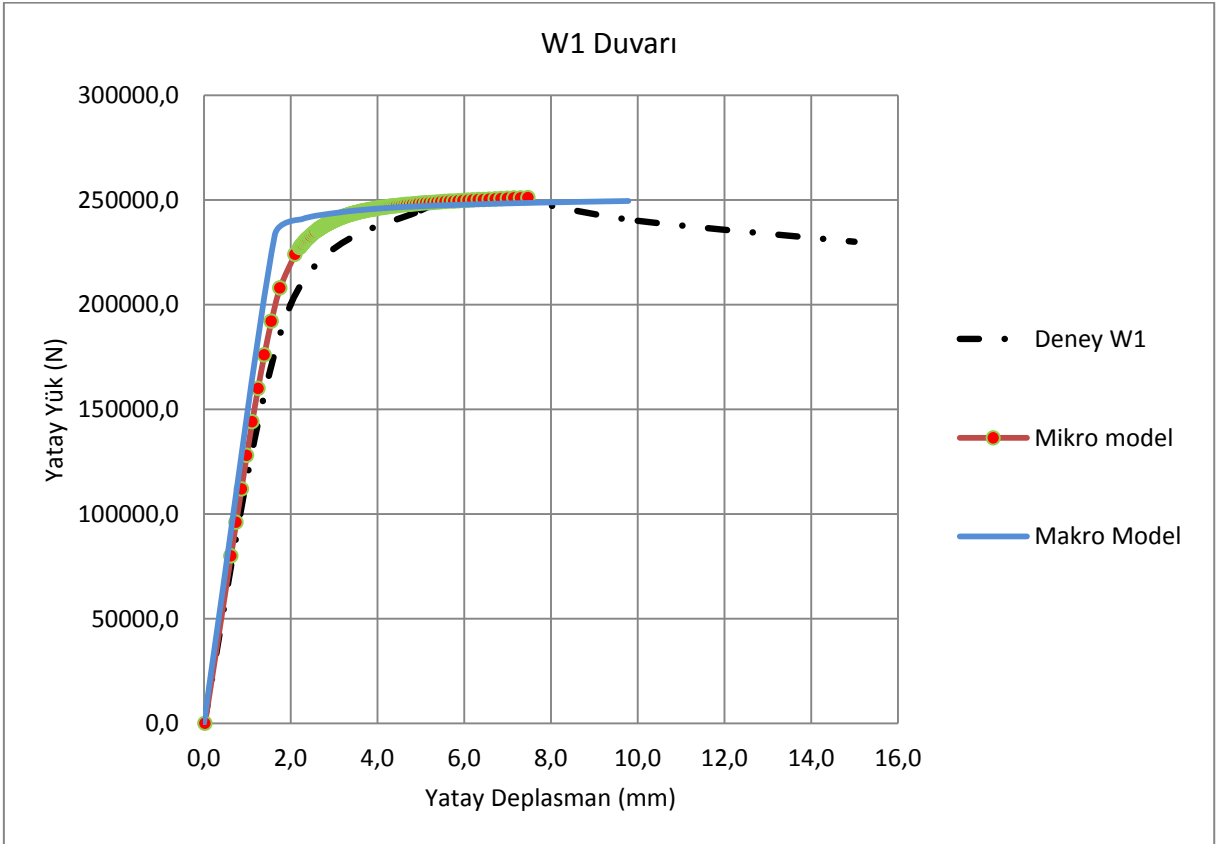
Şekil 4.131 P=30kN için yatay yük ve yatay şekil değiştirme grafiği



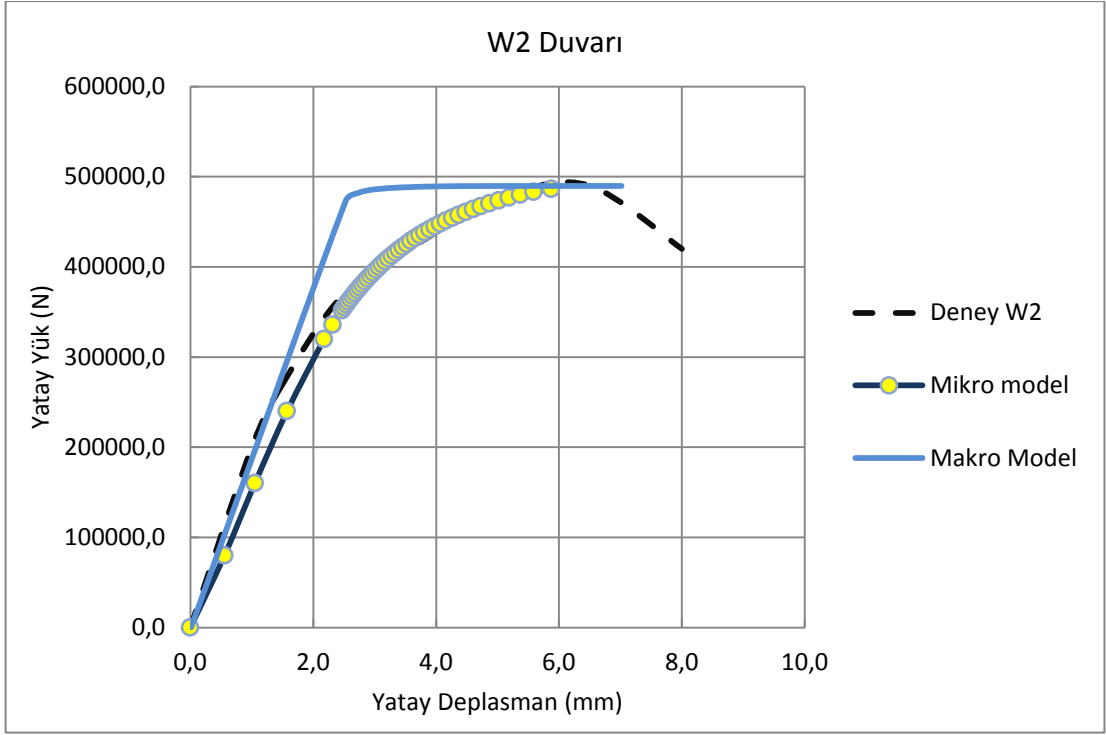
Şekil 4.132 P=120kN için yatay yük ve yatay şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.133 P=210kN için yatay yük ve yatay şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.134 W1 duvarı için Yatay yük – Şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.135 W2 duvarı için Yatay yük – Şekil değiştirme grafiği

YIĞMA YAPI TEMELLERİ

Anadolu'nun birçok yerinde özellikle İstanbul'da çok sayıda tarihi yapı bulunmaktadır. Tarihi yapılar; bugün mevcut, ama inşa edildikleri devirlerde söz konusu olmayan birçok olumsuz faktörün etkisi altındadır. İnsanoğlu tarafından tünel, metro, kanalizasyon, boru hatları, vb. gibi derin kazıların yapılması; yeraltı suyunun kullanılması, yağışların toprak tarafından emilmesini engelleyen geçirimsiz yüzeylerin (bina, kaldırım, yol kaplaması, vb.) oluşturulması; yeraltı su seviyesinin eskiye göre alçalması gibi doğaya gün geçtikçe artan müdahalesi, sonucunda tarihi yapılar üzerinde birtakım olumsuz etkiler oluşmaktadır. Bu doğrultuda yapının gerçekçi matematiksel modelinin oluşturulmasında yapıya etkileyen yükler ve mesnet koşullarının ve yapıda oluşacak zorlanmaların belirlenmesi son derece önemlidir. Mesnet koşullarının belirlenmesi zemin durumu ile yakından ilişkilidir. Çok farklı karakteristik özellikler gösteren zemin yapısı, dolayısıyla çeşitli temel sistemlerinin geliştirilmesini sağlamıştır. Çeşitli arkeolojik kazılarda ortaya çıkan kalıntılarda çok eski zamanlarda bile yapının doğa koşullarına ve depremlere karşı koyabilmesi için yapı temeklerinde farklı zeminlere göre değişik çözümler ürettikleri dikkati çekmektedir.

Bu tezin başlıca amacı, öncelikle üst yapı davranışının modellenmesi için gerçek davranışı belirlemeye yönelik yaklaşımlarından uygun birinin seçilerek geliştirilmesi ve doğruluğunu az sayıdaki deneysel ve nümerik analizlerle karşılaştırılarak doğruluk derecesinin araştırılmasıdır. Sonrasında ise geliştirilen üst yapı davranış modellerini çeşitli zemin ve temel koşulları ile birleştirerek zemin-yapı etkileşimin yapısal davranışa olan etkisinin incelenmesidir.

5.1 Tarihi Yapı Temelleri

Yüzyıllardır pek çok olumsuz etkilere karşı koyarak bugüne ulaşan tarihi yığma yapıların gerek malzeme gerekse yapım tekniğı açısından birçok üstün özelliklerinin olduğu bilinmektedir. Tarihi yığma yapıları inşa eden ustaların deprem bölgelerinde temel düzenlemeleri için ortaya koydukları çözümler, bu yapıların deprem kuvvetlerinden daha az etkilenmesini ve uzun yıllar ayakta kalmasını sağlamıştır.

Tarihi yığma yapılarda hasar mekanizmalarının incelenmesi ve arkeolojik kazılarda ortaya çıkan bulgular yeni yapım sistemlerine yol gösterebilir.

Tarihi yığma yapı temelleri genellikle taş, bazı durumlarda da tuğla ya da kerpiç bloklarla yapılmıştır. Bazı yığma temel duvarlarında ahşap hatıl ya da pabuç, yumuşak zeminde yapılan temel duvarları altında ahşap ızgaralarla bağlanmış ahşap kazıkların kullanılmasına da rastlanmaktadır. Temellerde kullanılan ahşap elemanlar, tamamen su içinde kalmışsa çok uzun ömürlü olmaktadır, ancak yer altı su seviyesi düşerse ahşap elemanlar çürüyerek üst yapıda hasar oluşturmaktadır.

Çalışmada, tarihi yapılar konusunda daha önce yapılan çalışmalarla ortaya konmuş temel örnekleri anlatılmış, deprem bölgelerinde yapılmış bazı temel çözümlerinin yapıya katkısı araştırılmıştır.

5.1.1 Tarihi Yapılardaki Temel Örnekleri

Tarihi yapıların temelleri hakkında bilgi edinmek için ya muayene çukurları açmak ya da tarihi yapının özgün projesine ulaşmak gerekmektedir. Bu nedenle bir tarihi yapı temelinde yapılmış olan düzenlemeleri tespit etmek ve belirlemek genellikle çok zordur. Ancak bina restorasyonu sırasında temel seviyelerine kadar bir inceleme yapıldığında ya da arkeolojik kazılar ile bu bilgiler elde edilebilmektedir.

5.1.1.1 Süleymaniye Cami

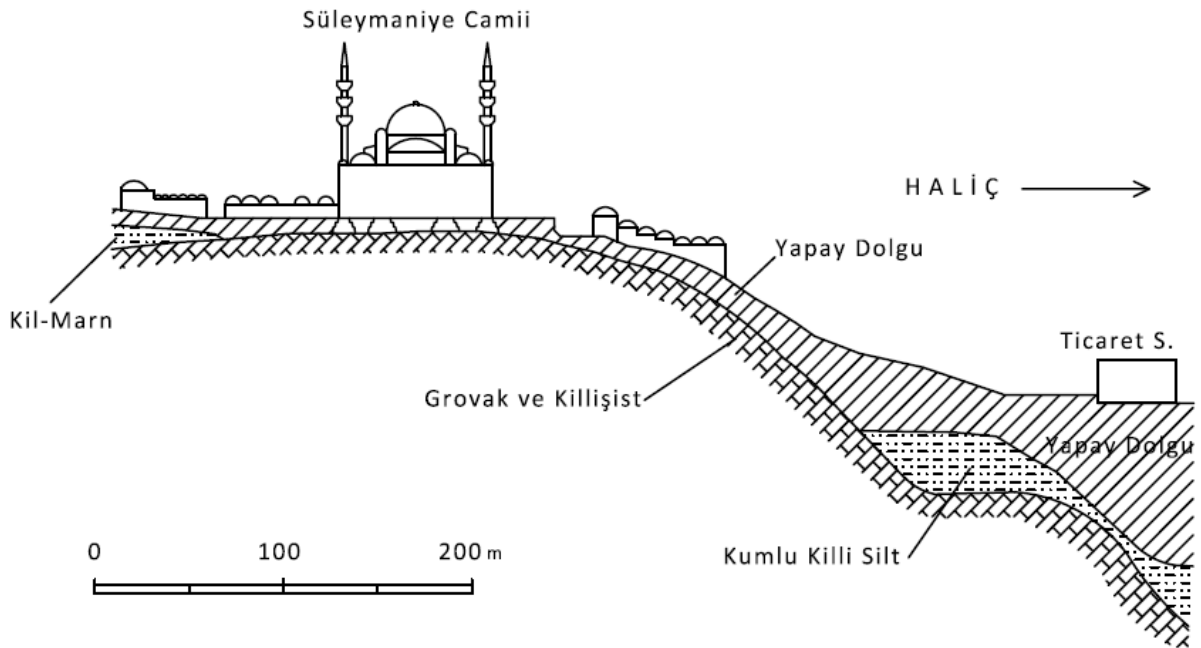
1550-1557 yılları arasında Mimar Sinan tarafından inşa edilen yapı, İstanbul'da Haliç'e hakim bir tepe üzerinde bulunmaktadır (Şekil 5.1).



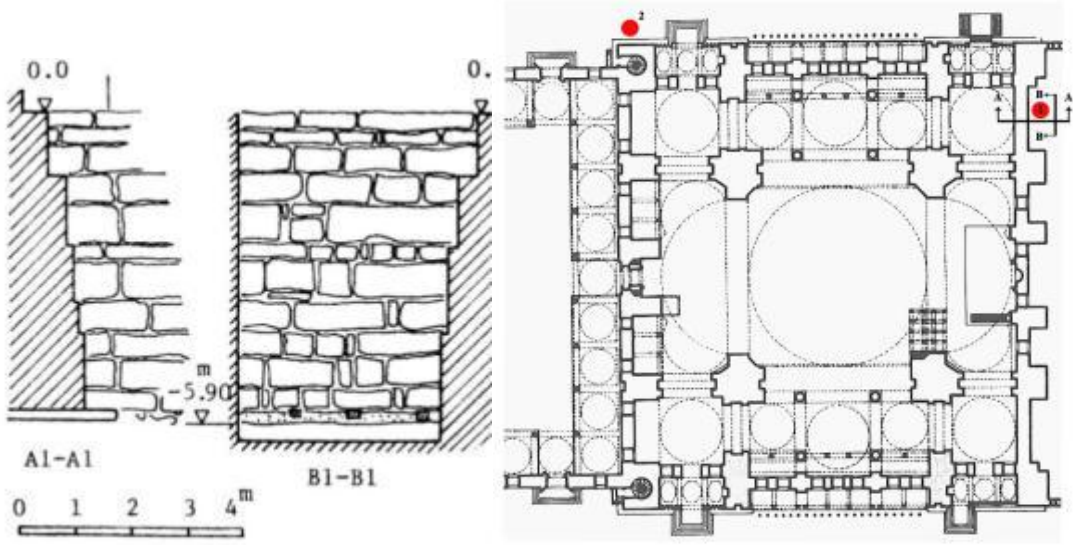
Şekil 5.1 Süleymaniye Cami [105]

Süleymaniye Camisinde 1957 yılında yapılan restorasyon sırasında, caminin dış duvarları yakınında beş farklı yerde muayene kuyusu açılmıştır. Bu incelemede ağır yük taşıyan yapı beden duvarları ve minare temellerinin, duvarın genişletilmesi ile yaklaşık 6.0m aşağıya indirildiği ve 20cm kalınlığındaki horasan harcı ve meşe ahşap ızgaralar ile kayaya oturduğu, avlu temellerinin daralarak sağlam zemine indiği belirlenmiştir. Bu bilgiler çizilen kısmi rölevelerde gösterilmiştir (Şekil 5.2).

Süleymaniye camisinde 1975 yılında yapılan 6 adet sondaj ile zemin incelemesi yapılmıştır [106]. Bu sondajların dördü bahçe içinde, yapıya yakın, diğer ikisi bahçe dışında yapılmıştır. Yapıya yakın yapılan sondajlardan, ana kayanın, grovak ve killi şist tabakasından yaklaşık 4-5m aşağıda olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.3). Araştırmada kaya tabakası üzerinin yapay dolgu olduğu tespit edilmiş ve su seviyesine rastlanmamıştır [106].



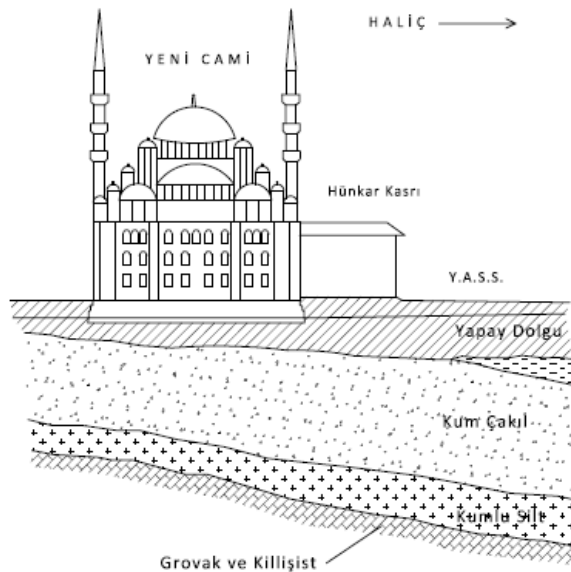
Şekil 5.2 Süleymaniye Cami Zemin kesiti [106]



Şekil 5.3 Süleymaniye Cami Temel Rölevesi ve muayene kuyularının açıldığı yerler [106]

5.1.1.2 Yeni Cami

Eminönü'nde sahilde bulunan Yeni cami 1597-1664 yılları arasında inşa edilmiştir. Temel incelemesi 1977 yılında cami dışında yapılan üç sondaj ve duvar yakınında açılan muayene kuyusu ile yapılmıştır. Yapılan araştırmalara göre giriş kotundan itibaren 10m kalınlığında yapay dolgu, onun altında ise 20m kalınlığında kum-çakıl tabakası bulunmaktadır. Ana kaya ile kum-çakıl tabakası arasında ise 8.0m kalınlığında grovak-killi şist tabakası bulunmaktadır (Şekil 5.4).



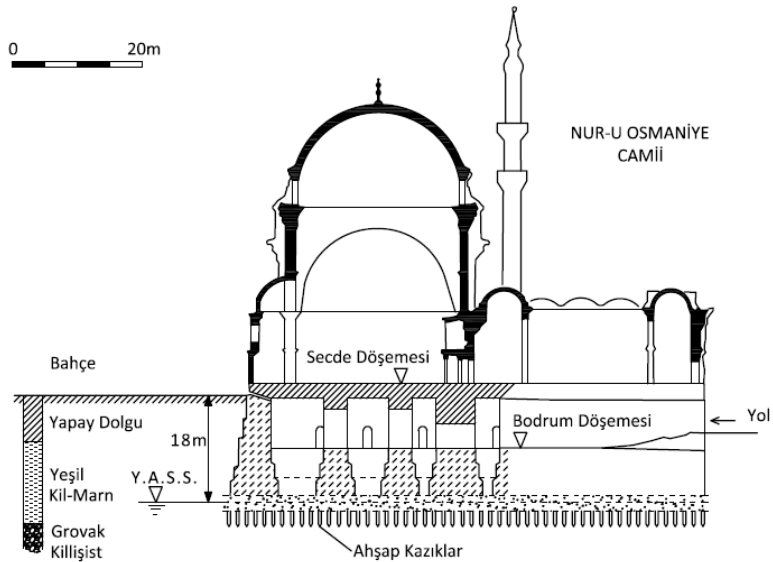
Şekil 5.4 Yeni Cami ve Jeolojik Kesiti

Temeller ampatman şeklinde genişletilerek yapılmıştır. Kesin bilinmemekle birlikte, yeni cami temellerinin ahşap kazıklar çakıldıktan sonra rijit tabaka üzerine yapılmış olabileceği A.Saim Ülgen tarafından öne sürülmektedir [106].

5.1.1.3 Nur-u Osmaniye Cami

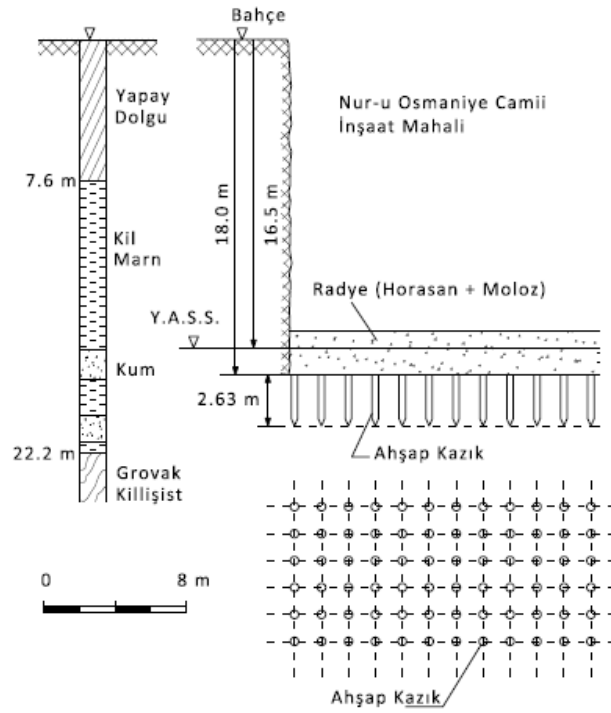
Nur-u Osmaniye Cami İstanbul tarihi yarımada sur içinde 1748-1755 yılları arasında inşa edilmiştir. Cami 8.0m kalınlığında yapay dolgu altında kum-çakıl tabakası, 20,50m de ayrılmış grovak ve 22m derinlikte ana kaya grovak ve killi şist üzerine oturmaktadır (Şekil 5.5).

Cami arsasının orta yerine kılavuz kuyu kazılarak zemin şartları hakkında bilgi edinilmiştir. İnşaat sahasında 16,5m derinliğinde hafriyat yapıldığında, yer altı su seviyesine rastlanılmış ve su seviyesinden itibaren 1,5m daha kazılmış, birkaç yere tulumbacı mikrasları kurulmuştur. Bütün inşaat sahasına uçları demirli 2,63m uzunluğunda, ahşap kazıklar çakılmıştır. Bu kazıkların üzerine moloz, horasan kireçten oluşan bir rıhtım yapılmıştır. Bu rıhtımın üzerine ayaklar ve ayakların aralarına da sarnıç gibi odalar inşa edilmiştir. [106] (Şekil 5.6-8).

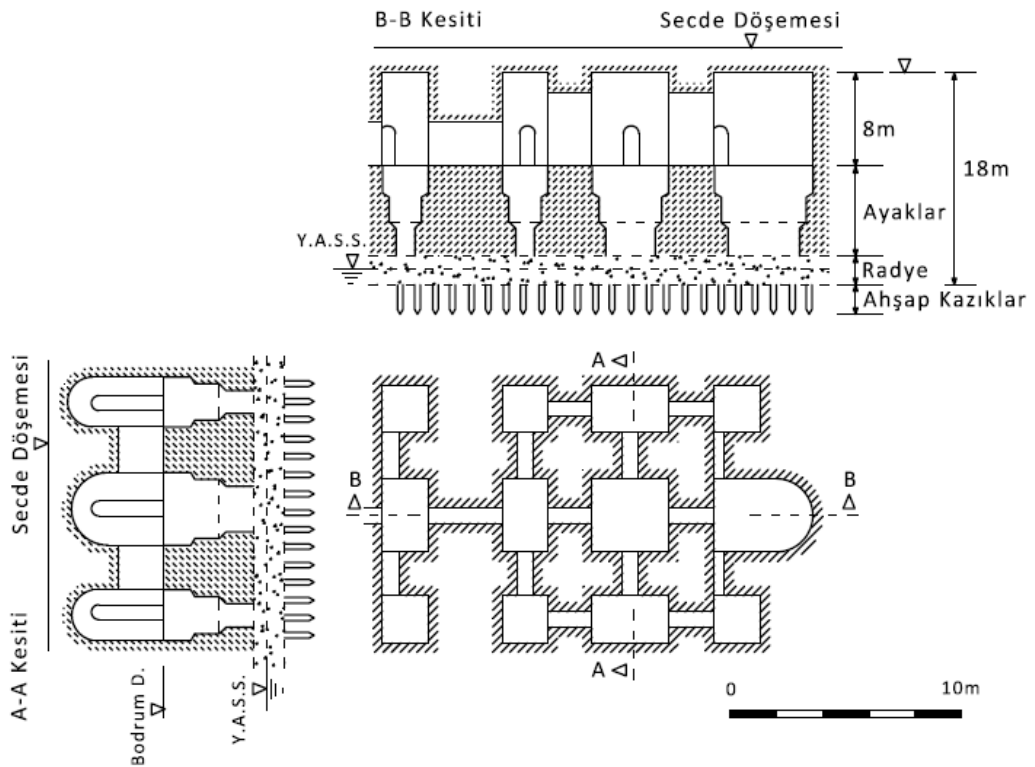


Şekil 5.5 Nur-u Osmaniye Cami Kesiti[106]

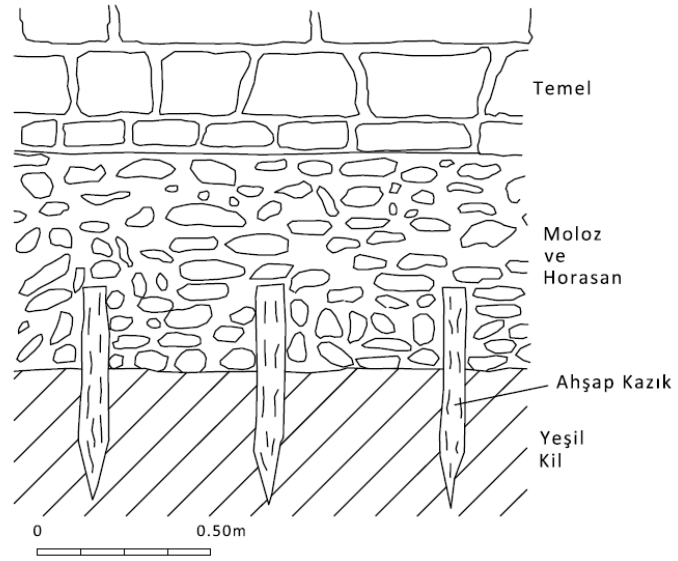
1954 Yılında Yapılan
Metro Sondajı



Şekil 5.6 Nur-u Osmaniye Cami Temel Kesiti[106]



Şekil 5.7 Nur-u Osmaniye Cami bodrum kat planı ve temel kesiti[106]



Şekil 5.8 Bizans dönemine ait temel detayı[106]

5.1.1.4 Konjiç Köprüsü

Konjic Köprüsü, 1682 yılında Bosna-Hersek Konjic şehrinde Sultan IV. Mehmet döneminde inşa edilmiştir. Ülkede yaşanan iç savaş sırasında yıkılan köprü, 2005 yılında orijinal haline uygun olarak restore edilmiştir (Şekil 5.9, 5.10).

Sivri formulu 6 adet kemeri bulunan köprüde, kemer açıklıkları 6,72m ile 13.56m arasında değişmektedir. İki kanat duvarı arasında uzunluğu 86,20m, korkulukların dışından genişliği ise 5,35m'dir [107], [108].



Şekil 5.9 Konjiç köprüsünün restorasyon öncesi durumu [107]



Şekil 5.10 Konjiç Köprüsü

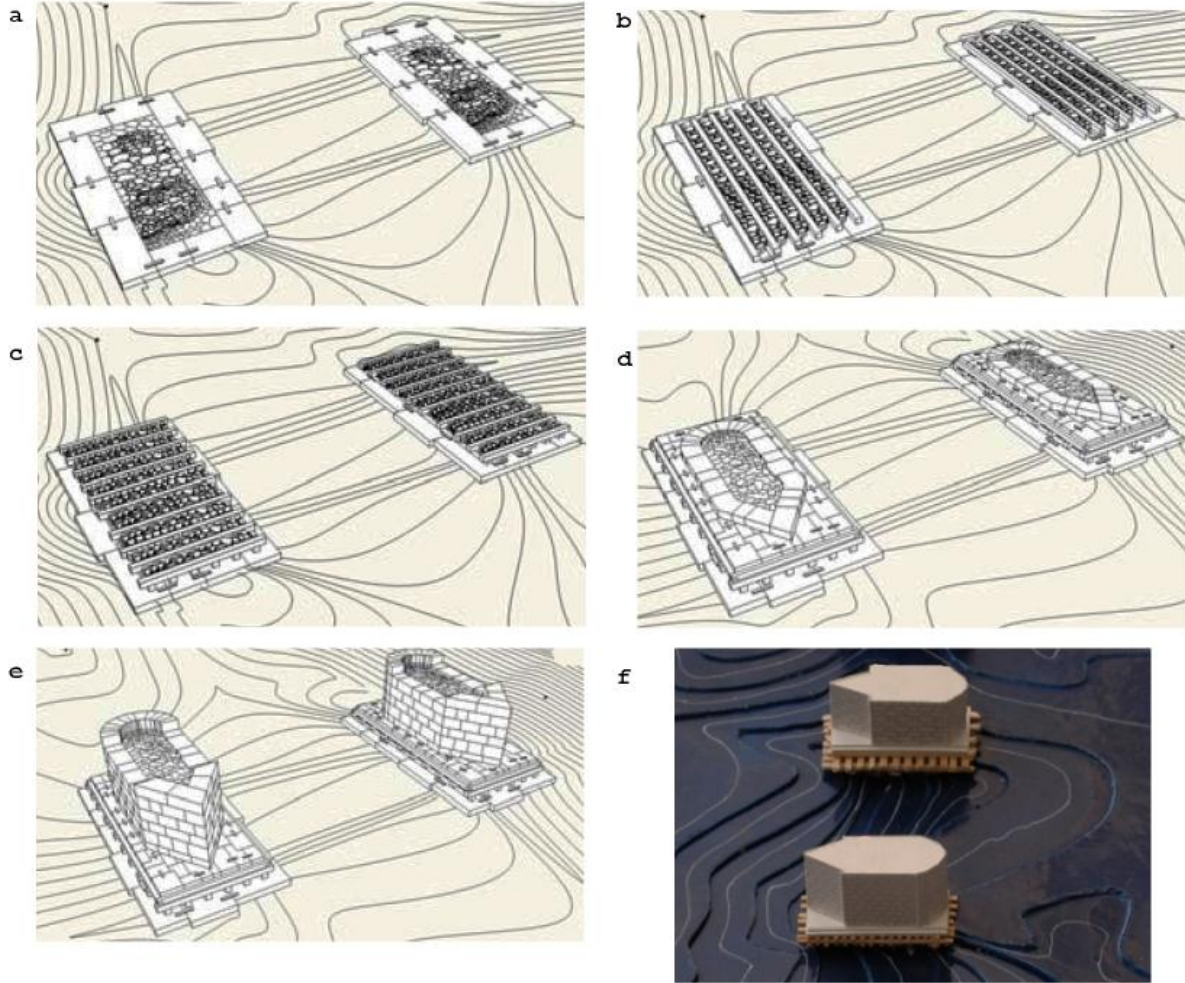
Köprü ayakları, dolomit bir tabaka üzerinde, birbirine dik iki tabaka ahşap ızgara üzerine yerleştirilen ikinci bir dolomit tabaka oturmaktadır (Şekil 5.11, 12)



Şekil 5.11 Konjiç Köprüsü ayağı temeli su altından fotoğrafı [109]

Yapılan bu mesnet düzenlemesi ile deprem sırasında, yatay yüklerin yapıya azalarak iletilmesi ve köprü'nün hasar görmemesi amaçlanmaktadır.

Temel yapılırken öncelikle içine blokaj dolgulu, kenetli taşlardan oluşan bir platform yapılmıştır. Ardından suyun akış doğrultusuna paralel olarak ahşap ızgaralar yerleştirildikten sonra diğer doğrultuda ahşap ızgara oluşturulmuş ve aralarına dolgu yapılmıştır. Oluşturulan bu tabaka üzerine yine taşların birbirine metal kenetlerle bağlanması ile köprü ayağının da başlangıcı olan tabaka yapılmıştır(Şekil 5.12a,b,c,d,e,f). Köprü ayakları oluşturulan tabaka üzerine inşa edilmiştir.



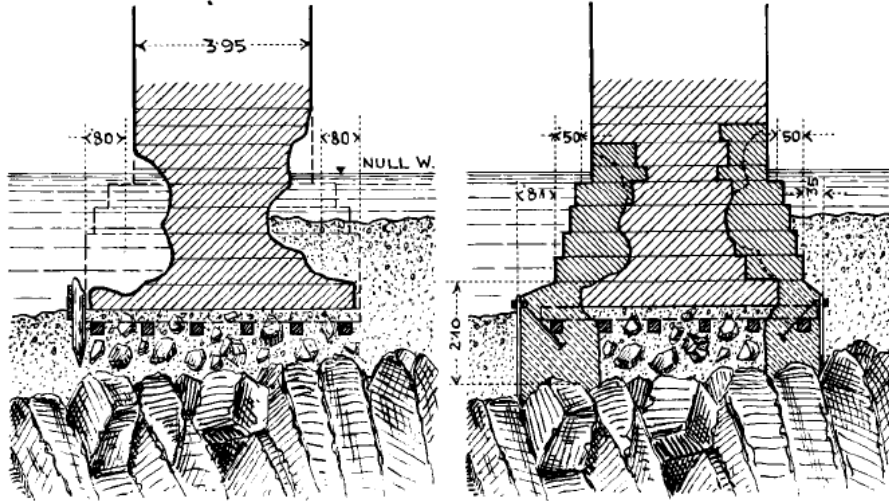
Şekil 5.12 Konjiç köprüsünün temel inşaatı [107]

5.1.1.5 Sokullu Mehmet Paşa (Drina) Köprüsü

Bosna-Hersek'in, Vişegrad şehrinde bulunan Sokullu Mehmet Paşa Köprüsü, 1571-1577 yılları arasında, Drina Nehri üzerinde, Sadrazam Sokullu Mehmet Paşa tarafından, Mimar Sinan'a yaptırılmıştır [107].

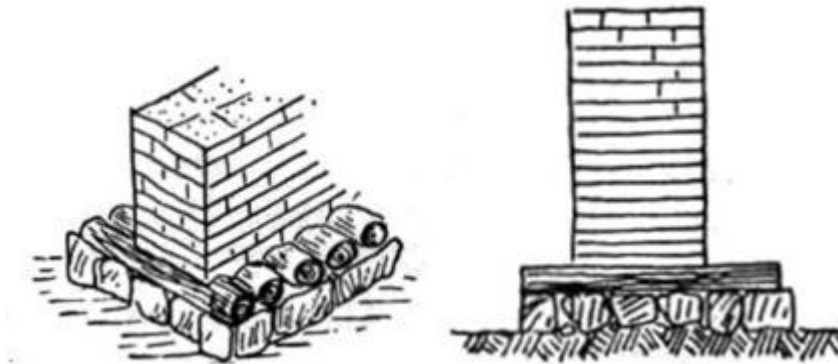
Eni 7 metreden biraz geniş, uzunluğu 180 metreye yakın olan Drina Köprüsü büyük kesme taş bloklardan yapılmıştır. Özellikle ülkede yaşanan iç savaş döneminde büyük hasar gören

köprünün, bulunduğu nehir üzerine yapılan baraj nedeni ile su rejiminin değişmesi sonucu temellerinde ve ayaklarında önemli hasarlar ortaya çıkmıştır. Drina Köprüsünün restorasyonu Cemal Bjeđić Üniversitesi ile T.C. Başbakanlık Türk İşbirliği ve Kalkınma İdaresi Başkanlığı (TİKA) işbirliği ile gerçekleştirilen restorasyon çalışmaları sırasında köprü ayakları altında iki doğrultuda yerleştirilmiş ahşap ızgaralar belirlenmiştir (Şekil 5.13).



Şekil 5.13 Mehmet Paşa Köprüsü [110]

5.1.1.6 Acemhöyük



Şekil 5.14 Duvar tabanına yerleştirilmiş kütükler [109].

Diğer bir örnek ise Acemhöyük III'de 1.5-2.0m kalınlığındaki kerpiç temel duvarları altında, iki tarafından 1.0-1.5m çıkıntı yapan kil ile sıvanmış yassı kireç taşı üzerine ahşap sıralanarak oluşturulmuş temel pabucudur [111] (Şekil 5.14).

5.1.1.7 Dikilitaş

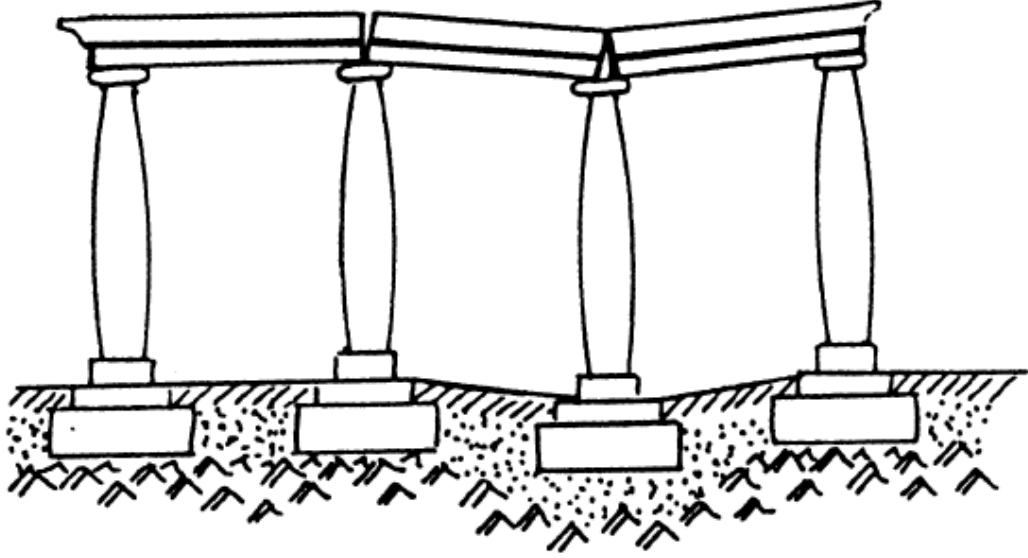


Şekil 5.15 Sultanahmet Meydanında bulunan Dikilitaş

Sultanahmet meydanında bulunan dikilitaş 19,59m yüksekliğinde, tek parça granit taştan yapılmıştır (Şekil 5.15). Milattan önce 2. Yüzyılda yontulan taş, milattan sonra 4. Yüzyılda bugünkü yerine yerleştirilmiştir. Dikilitaş, 4x4x6m boyutlarındaki mermer taban taşı üzerindeki 3x3x3m boyutlarındaki başka bir mermer taş blok üzerine yerleştirilen 4 adet bronz küp üzerine yerleştirilmiştir. Bu iki mermer blok köşelerinde 4 adet küp granit taşı bulunmaktadır. Bu küp blokların yatay yükler karşısında karmaşık bir çalışma mekanizması gösterdiği ve dikilitaşın zarar görmeden ayakta kalmasını sağladığı düşünülmektedir [112].

5.1.1.8 Diğer Örnekler

Birçok tarihi yığma yapıda, sütun ayakları tekil temelli olarak inşa edilmiştir (Şekil 5.16). Yığma yapı sistemi elemanları birbirlerine yeterince rijit bağlanmadığı için, zeminde olması muhtemel oturmalarda, yapı elemanlarında ve birleşimlerinde yeni gerilmeler oluşmaz. Bu şekilde yapılan tasarımlar sayesinde yapılar, zemin hareketlerinden en az hasar ile kurtulmaktadır.



Şekil 5.16 Yığma yapı zemininde oluşan kısmi oturma [113]

Tarihi yapılarda üst yapı yükünü zemine aktarmanın diğer bir yolu da, geniş açıklık geçmeye yarayan tonozların ters olarak düzenlenmesi ile yükün yayılması ve gerilmenin düşmesi sağlanmaktadır. Şekil 5.17’de görünen 19.yy başlarında yapılmış sarnıçta, ters tonozlar ayaklara gelen yükü ve sarnıcın su ile dolu olduğu durumda oluşacak büyük yükü zemine güvenle yaymaktadır.



Şekil 5.17 Edirnekapı sarnıcındaki ters tonoz temeller[114]

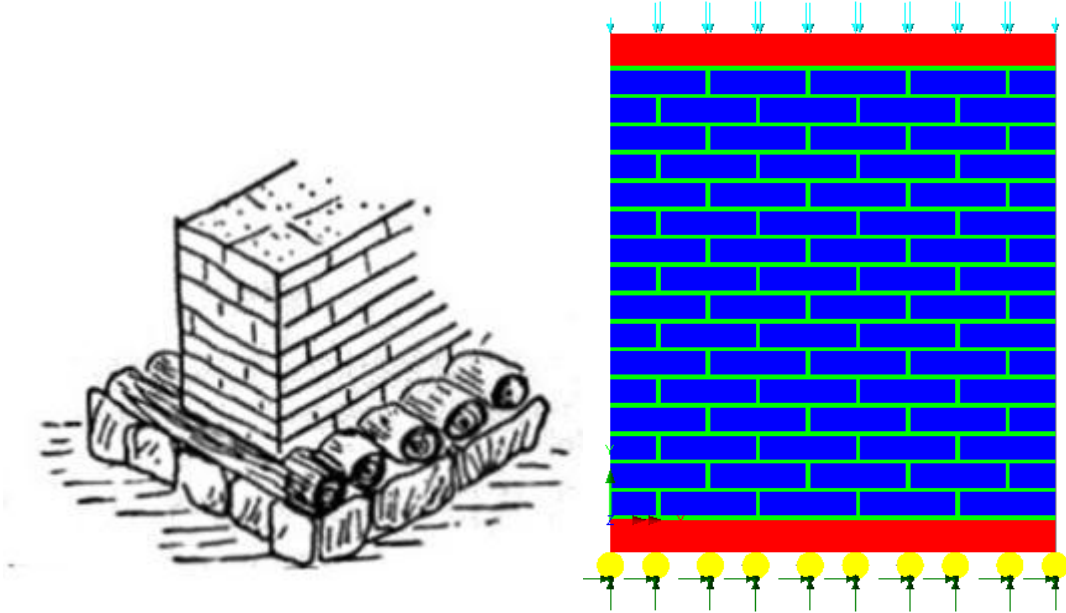
5.2 Tarihi Yapılardaki Temel Örneklerine Ait Modellerin Oluşturulması

Tarihi yapıların nümerik modellerinin oluşturulması oldukça karmaşık olduğu için çeşitli yaklaşımlarda bulunmayı gerekli kılmaktadır. Temellerde yapılan düzenlemeler için daha önceden sayısal analizlerde kullanılan Eindhoven duvarları kullanılmıştır.

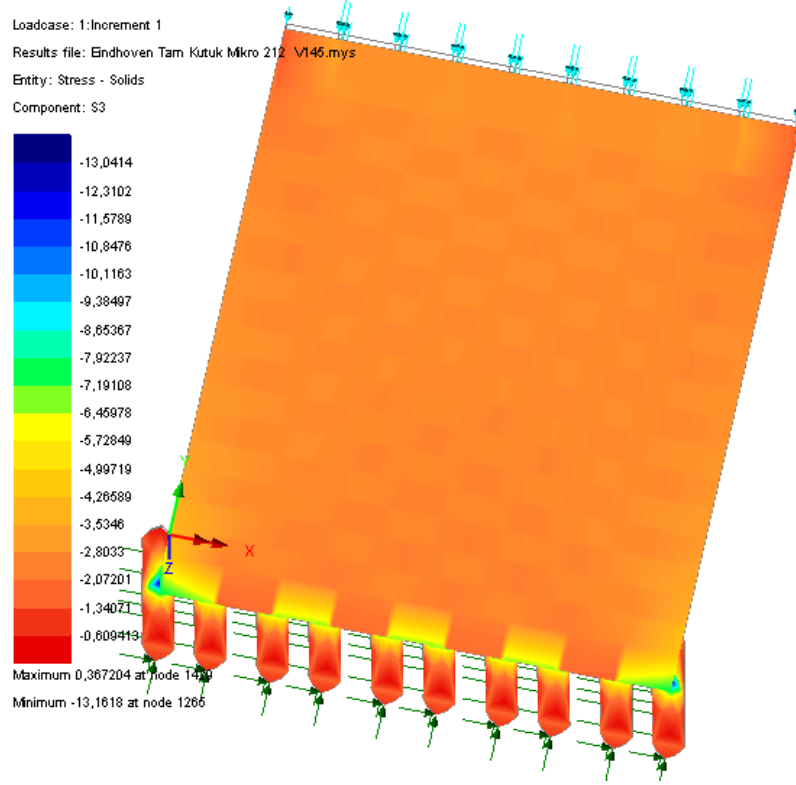
5.2.1 Temelin Yuvarlak Ahşap Elemanlar Üzerine Yerleştirilmesi Durumu

Şekil 5.18’de şematik çizimi bulunan Acemhöyük III’deki kerpiç temel duvarı, daire elemanlar ile duvarın ahşap kütükler üzerine yerleştirildiği durum modellenmiştir (Şekil 5.18). Yapılan kabuller sonunda elde edilen gerilme dağılımı Şekil 5.19-21’de olduğu gibi belirlenmiştir.

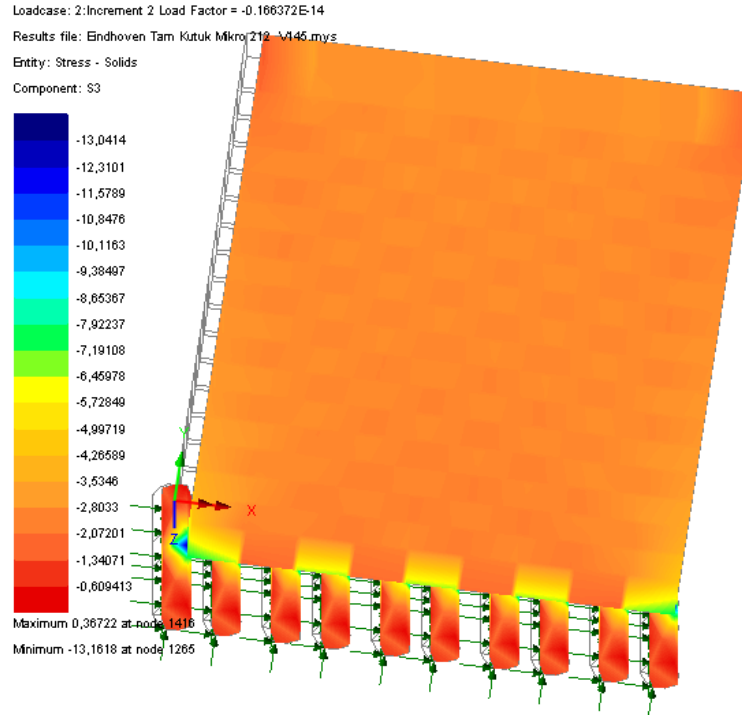
Duvara sadece dairenin üst noktalarından bağlanan ahşap elemanlar, nümerik modelde duvarın yatay ve düşey hareketini belirlemektedir. Davranışı belirleyen önemli parametre ahşap elemanların elastisite modülü olmaktadır. Elastisite modülü 300MPa kabul edilerek elde edilen sonuca göre, gerilme dağılımı değerlendirilirse, gerilmelerin tabandaki kütüklerde yoğunlaştığı ve bu yöntemle duvarın dış etkilerden daha az etkilendiği belirlenmiştir.



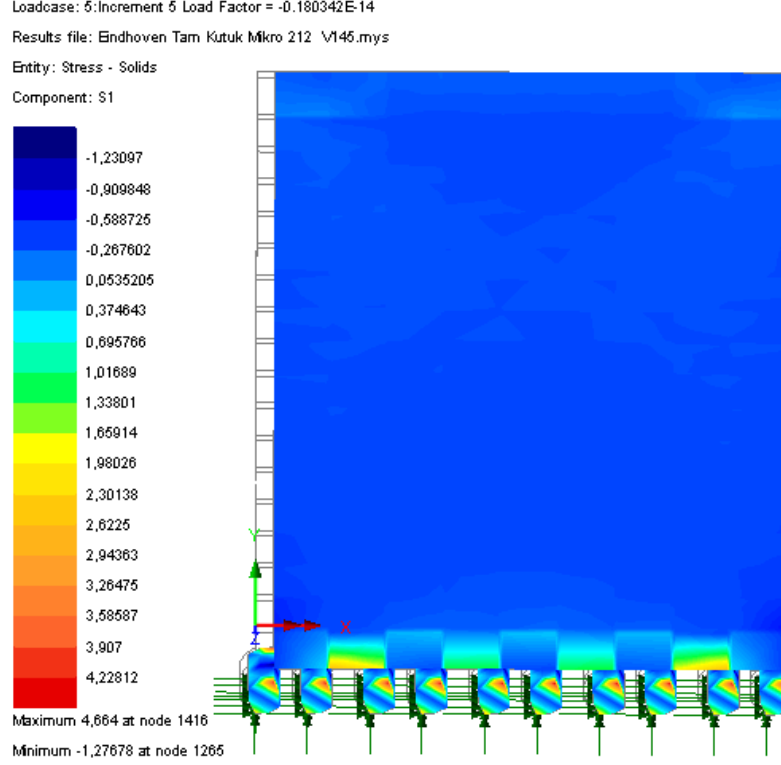
Şekil 5.18 Önerilen sonlu eleman modeli



Şekil 5.19 Duvarın ahşap kütükler üzerine oturma durumu düşey yüklemde gerilme dağılımı



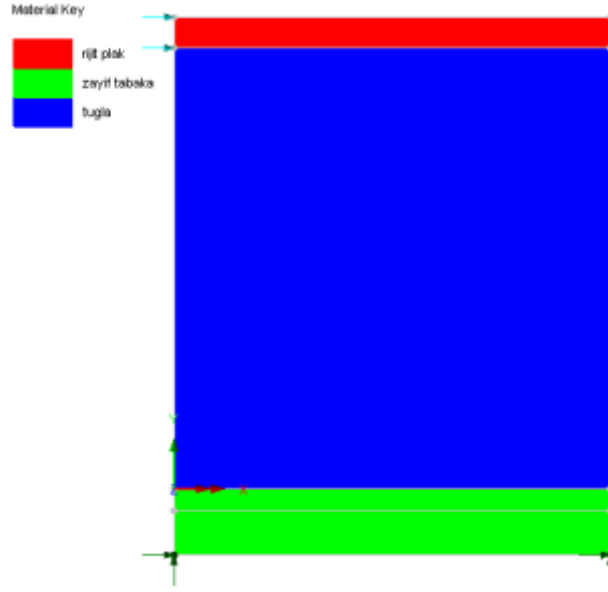
Şekil 5.20 Duvarın ahşap kütükler üzerine oturma durumu yatay yüklemde S3 gerilme dağılımı



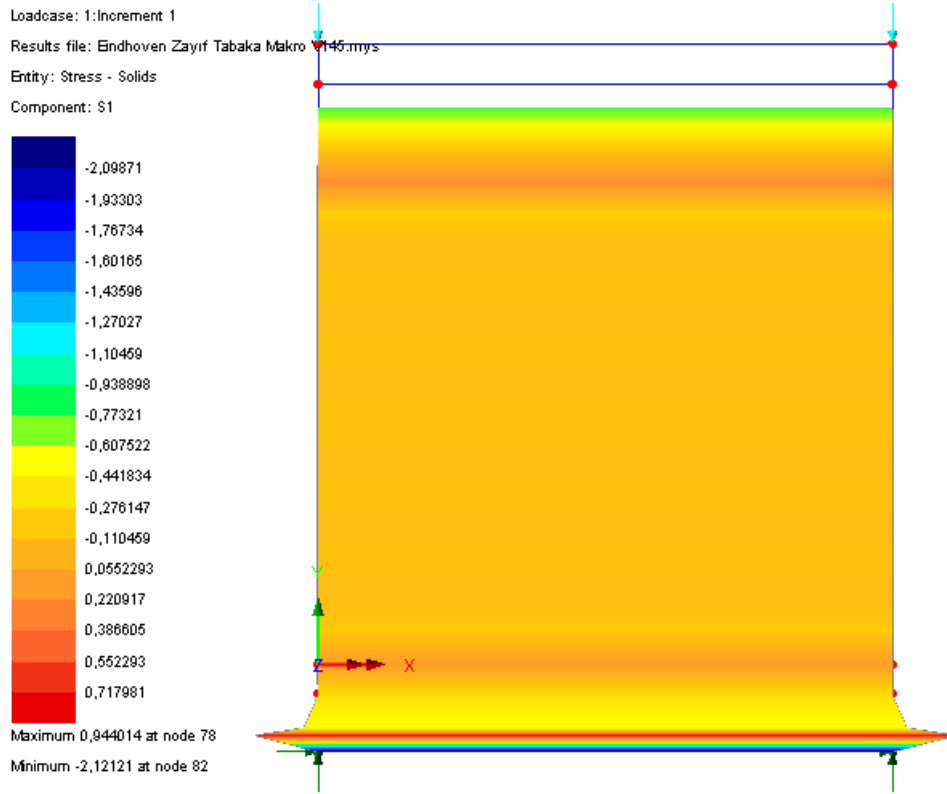
Şekil 5.21 Duvarın ahşap kütükler üzerine oturma durumu yatay yüklemde S1 gerilme dağılımı

5.2.2 Temelin Zayıf Malzeme Tabaka Üzerine Yerleştirilmesi Durumu

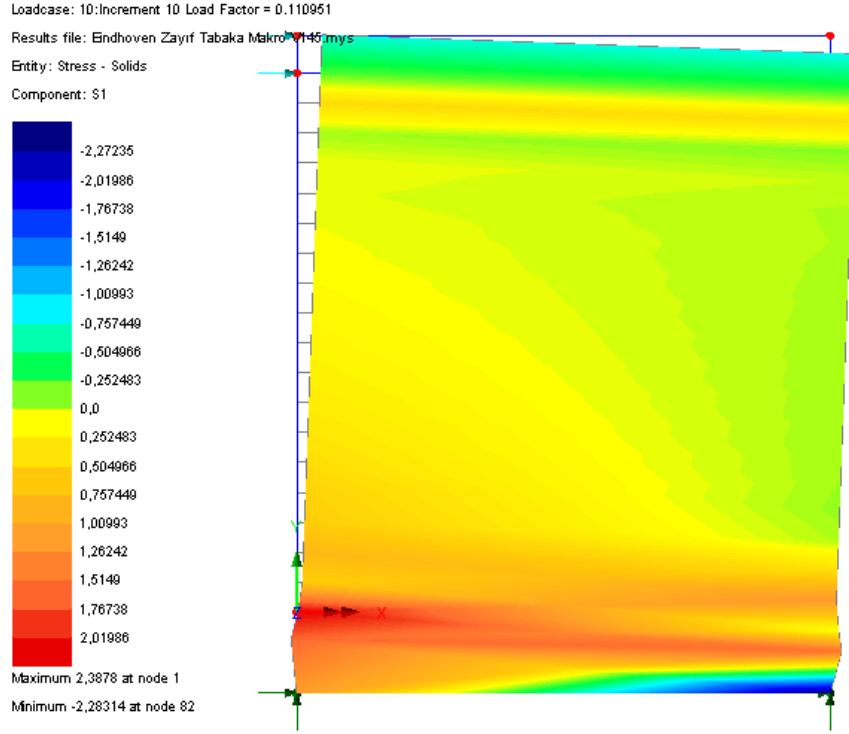
Duvarın tabanında ince bir tabaka kum olması durumu sayısal olarak modellenmiştir (Şekil 5.22). Burada, elastisite modülü çok düşük bir malzemenin duvar üzerine gelen yükleri iletmesi amaçlanmıştır. Bu durumda duvarda oluşan gerilme dağılımı Şekil 5.23-25’de gösterilmiştir. Zayıf tabaka için $E=10\text{MPa}$ elastisite modülü kabul edilerek elde edilen sonuçlarda gerilmelerin zayıf tabakada yoğunlaştığı ve duvar üzerindeki gerilmelerin kum serilmediği duruma göre azaldığı belirlenmiştir.



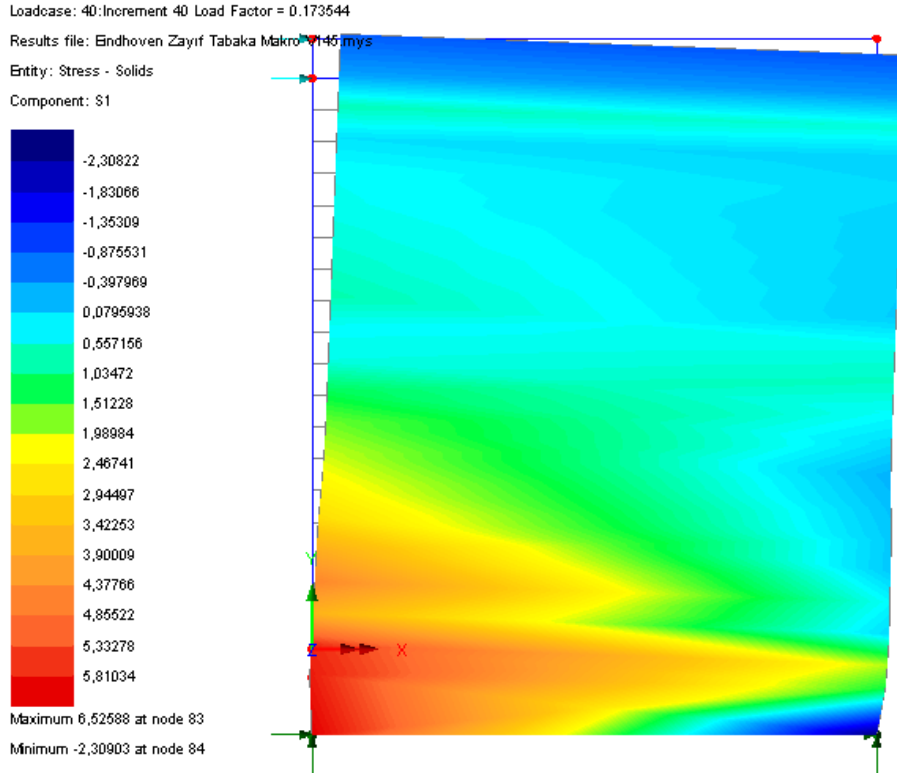
Şekil 5.22 Temel altına serilen kum tabakası ve sonlu eleman modeli



Şekil 5.23 Duvarın zayıf tabaka üzerine oturması durumunda gerilme dağılımı



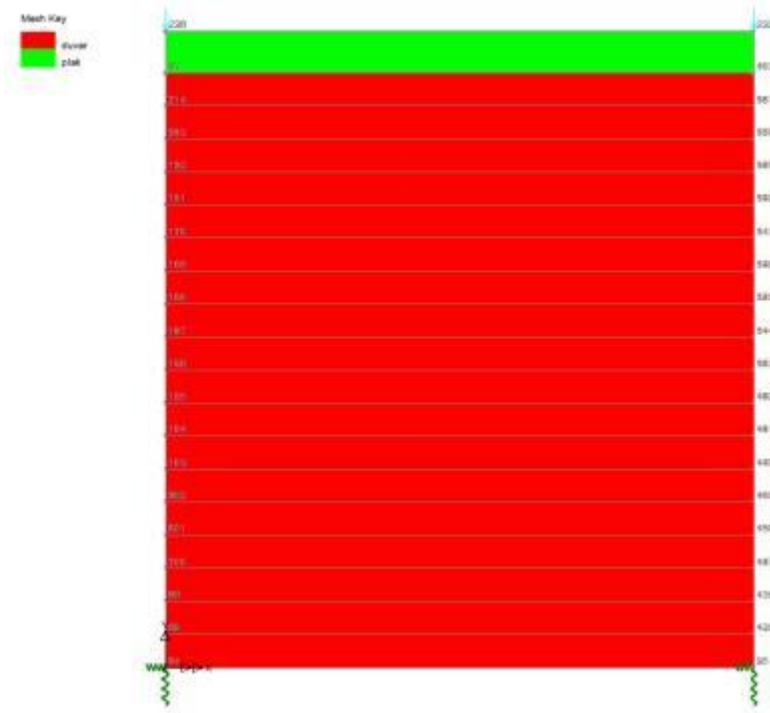
Şekil 5.24 Duvarın zayıf tabaka üzerine oturması durumunda S1 gerilme dağılımı



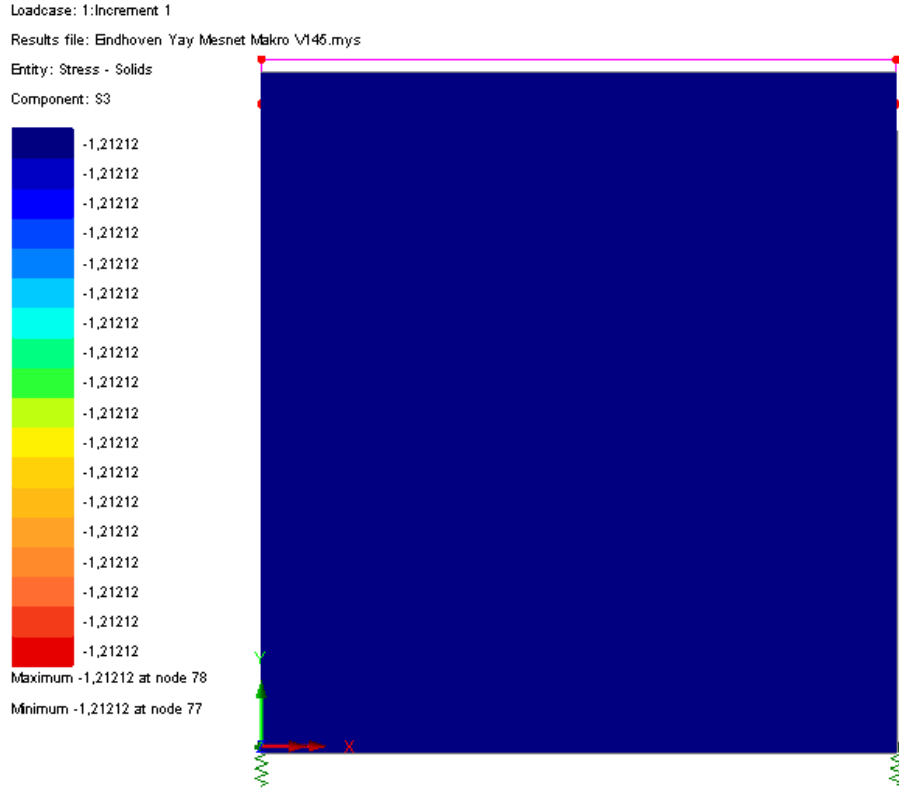
Şekil 5.25 Duvarın zayıf tabaka üzerine oturması durumunda S1 gerilme dağılımı

5.2.3 Temel-Zemin Etkileşiminin Elastik Yaylar ile Tarif Edilmesi Durumu

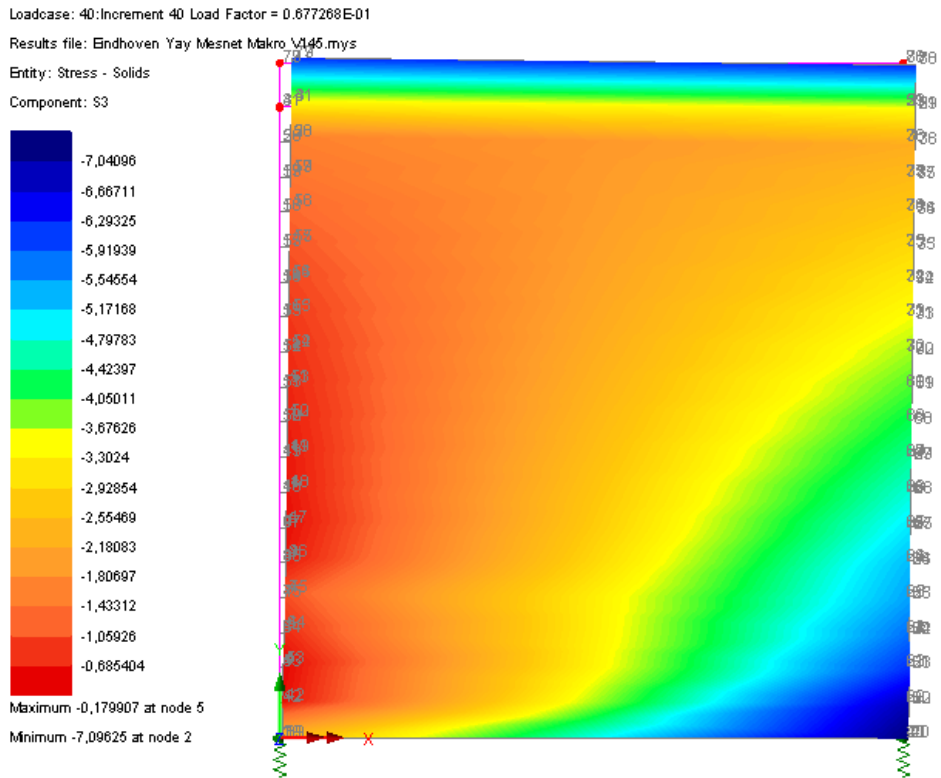
Duvarın tabanında yapılan düzenlemeleri farklı yay sabitleri kullanarak modellemek mümkündür. Duvarın altına yerleştirilen düşey yaylar, duvar altında bulunan kum, ahşap vb. tabakanın etkisini, yatay yaylar ise tabanda yatay yüklere karşı oluşacak tepkisini temsil etmektedir (Şekil 5.26). Önerilen modelde yapılan çözümler sonucunda elde edilen gerilme dağılımı şekil 5.27-29'da gösterilmiştir. Ayrıca değerini belirlemesi oldukça güç olan yatay öteleme yay katsayısı için öngörülen $K= 5000, 10000, 20000, 50000, 500000$ kN/m için çözümler yapılmıştır. Düşey çökme yayı için ise $K=100000$ kN/m kabul edilmiştir. Bu kabuller sonucu bulunan çözümler sonunda elde edilen yatay yük ve şekil değiştirme arasındaki ilişki şekil 5.29'de gösterilmiştir. Yatay yay için öngörülen farklı yay katsayısı değerleri tabandaki malzemenin dayanımına, yerleştirilme düzenine, kalınlığına, işçiliğe ve bağlantı detayının özelliklerine göre farklılık gösterebilmektedir. Duvarın, özellikle öteleme yayı için öngörülen yay sabitleri arttıkça yatay yöndeki rijitliği artmaktadır.



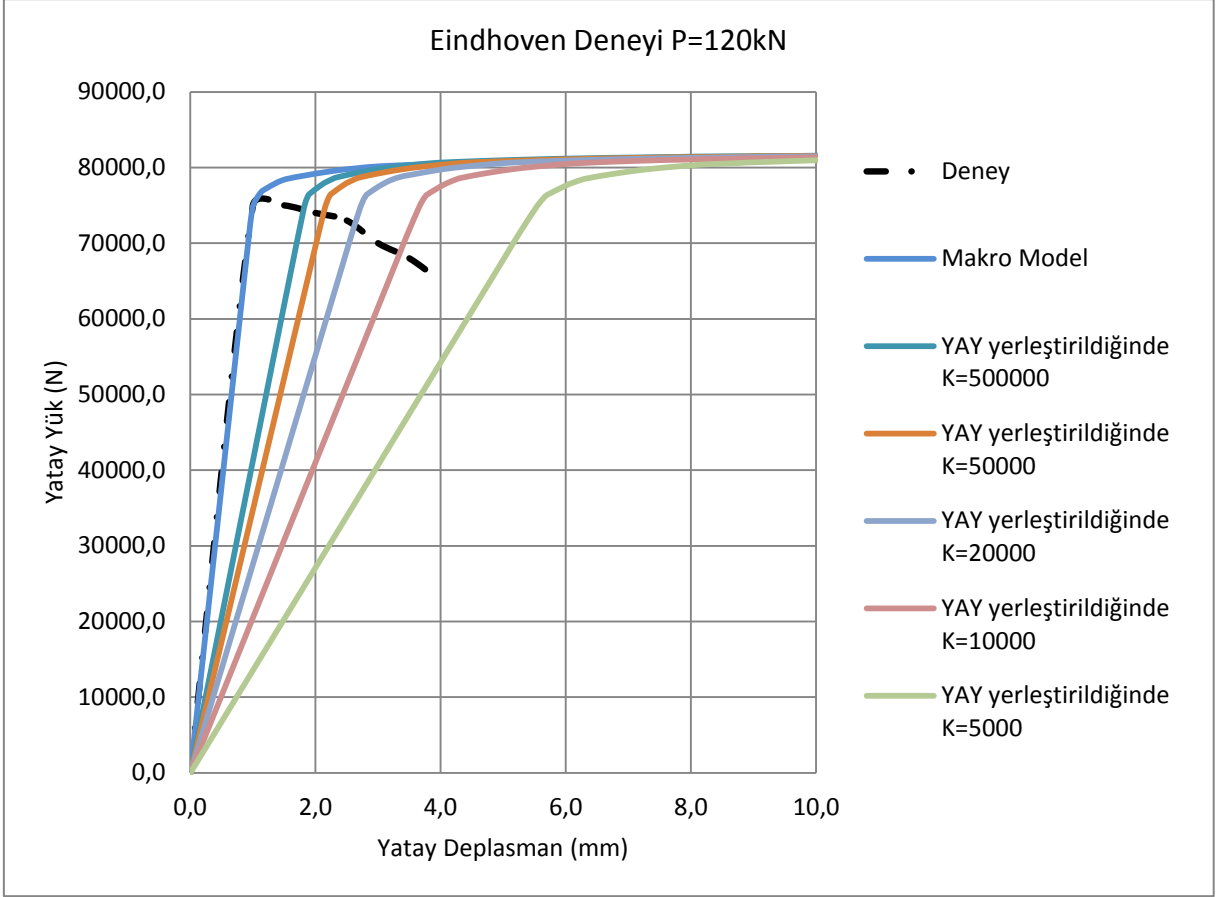
Şekil 5.26 Duvarın Yaylar Üzerine Oturması Durumu



Şekil 5.27 Duvarın yaylar üzerine oturması durumunda düşey gerilme dağılımı



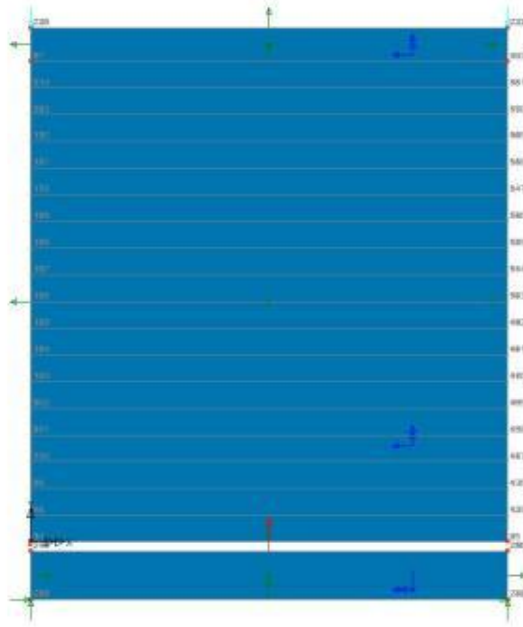
Şekil 5.28 Duvarın yaylar üzerine oturması durumunda gerilme dağılımı



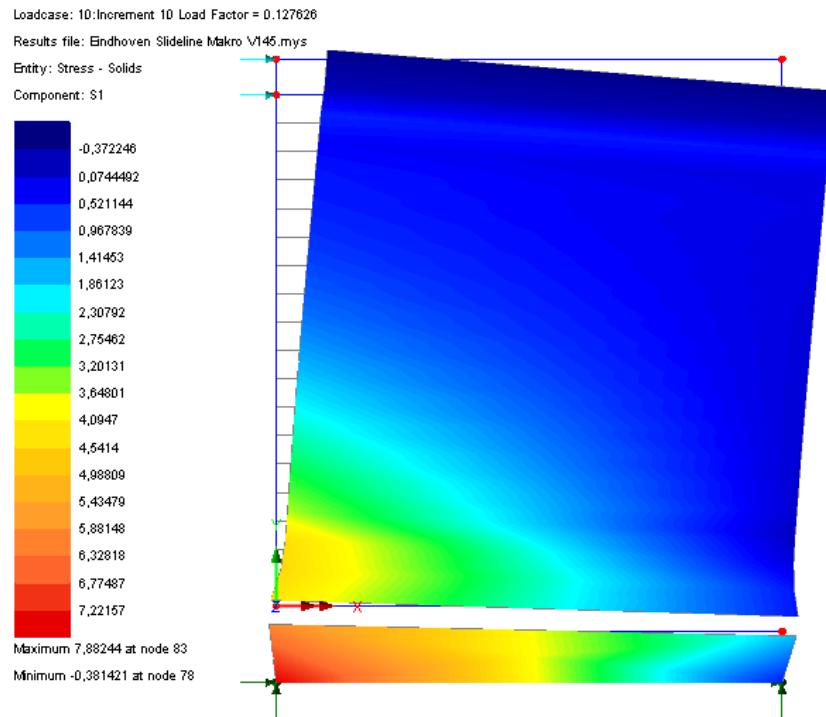
Şekil 5.29 Eindhoven deneyinde farklı yatay yay katsayısı için elde edilen yük-şekil değiştirme eğrileri

Duvar tabanındaki yay mesnetler, duvarın içinde rölatif şekil değiştirmelerin az olmasını sağlamakta ve rijit mesnetli duvara göre duvardaki gerilmeler düşük seviyede olmaktadır.

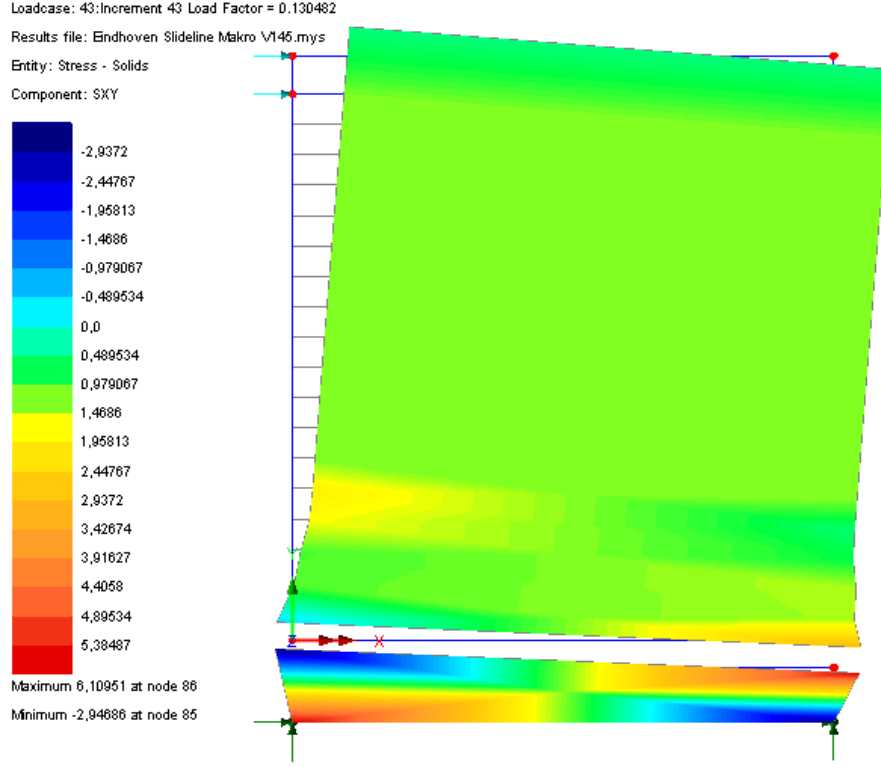
5.2.4 Temelin Sürtünlü Yüzey Üzerine Yerleştirilmesi Durumu



Şekil 5.30 Duvarın sürtünlü tabaka üzerine oturması durumu



Şekil 5.31 Duvarın sürtünlü tabaka üzerine oturması durumunda gerilme dağılımı



Şekil 5.32 Duvarın sürtülmeli tabaka üzerine oturması kayma gerilme dağılımı

Temel-zemin etkileşimini belirlemek üzere oluşturulan sayısal modelde sürtülmeli yüzey tanımından yararlanılmıştır, ancak Lusas sonlu eleman programında bulunan bazı katsayıların modele olan etkisini tespit etmekte sorunlar vardır. Çeşitli aralıklarda seçilen katsayılar ile çözümler almakta problemler oluşmaktadır. Gerilme Dağılımı ile ilgili olarak Şekil 5.31 ve Şekil 5.32'te gösterildiği üzere, duvarda düşük seviyelerde kalan gerilmeler, tabanda yoğunluk göstermektedir.

5.3 Değerlendirme

Anadolu'da özel mesnet üretilmeden inşa edilmiş sıradan yığma yapılarda dahi, temel kazısından sonra, temel altına serilen ince (20-40cm) tabaka kumun, kısmen modern sismik yalıtım görevini yapmakta olduğu görülmektedir.

Yapılan araştırmalarda ve nümerik çözümlerde farklı yaklaşımlar yapılarak, değişik temel tiplerinde, duvarın nasıl davranış gösterdiği belirlenmeye çalışılmıştır.

Önerilen modellerde, temellerde yapılan düzenlemeler için öngörülen parametreleri belirlemek oldukça güçtür. Ancak çeşitli değerler kabul edilerek, farklı özellikteki temel sistemleri için duvarın davranışı hakkında bilgi edinilmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında ilk olarak yığma yapıların en önemli taşıyıcı elemanı olan duvarların sonlu elemanlar yöntemi ile doğrusal olmayan çözümlenmeleri gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ise yığma yapılarda zaman içinde kullanılan farklı temel türlerinin yatay yükler etkisindeki duvar davranışına etkisi incelenmiştir. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmalar ve ulaşılan sonuçlar aşağıdaki sekiz ana başlıkta toplanabilir:

1. Tez kapsamında ilk olarak, farklı bir makro modelleme yaklaşımı yığma duvarlar için geliştirilmiştir. Yığmanın ortotropik davranışını yansıtabilen duvarın sadece yatay derzler boyunca sonlu elemanlara bölünmesiyle oluşan bir model önerinde bulunulmuştur.
2. Model için ayrıca yığmanın bünyesel davranışı Drucker-Prager kriterinin ihtiyaç duyduğu kohezyon ve içsel sürtünme açısı için önerilen bağıntı (4.6) ve değerlerle elasto-plastik olarak dikkate alınmıştır.
3. Bu yaklaşım yardımı ile tez kapsamında, Drucker-Prager kırılma kriterine ait parametreler için kalibrasyon çalışması yapılarak literatürde yer alan 4 (dört) adet TU Eindhoven duvarı, 7 (yedi) adet Oliveira duvarı, 35 (otuzbeş) adet Roca duvarı, 2 (iki) adet ETHZ duvarı, 1 (bir) adet Formica ve 2 (iki) adet JRC duvarları olmak üzere altı farklı çalışmadan toplam 51 (ellibir) duvar deneyi modellenmiştir. Modeller sonunda özellikle duvarın yatay yük taşıma gücü kapasiteleri başarı ile tahmin edilmiş ve deneysel olarak mevcut bulunan yük-şekil değiştirme eğrileri ile yapılan karşılaştırmalar verilmiştir. Sadece Roca'nın üçüncü seri duvarlarının modellerinde yüksek düşey yük değeri uygulanan dört farklı yüklemeye kapasite için yapılan

tahminler düşük kalmıştır. Bunun nedeni ise düşey yüklerin uygulama şeklindeki belirsiz ve modelde uç noktalardan yapılan yükleme ile olan uyumsuzluktur.

4. Duvarda yer alan malzemelerin (yığma blok ve harç) ayrı ayrı bünyesel davranışlarını açıklamak için Drucker-Prager kriterinin kohezyon ve içsel sürtünme açıları için yeni bağıntılar (4.15, 4.16, 4.17, 4.18) ileri sürülmüştür. Bu bağıntılarla Drucker-Prager kriteri hidrostatik basınca bağımlı hale getirilerek basınç meridyeni doğrusal formdan eğrisel bir biçime dönüştürülmüştür.
5. Detaylı mikro-modelleme ile TU Eindhoven ve EHTZ duvarlarının davranışları başarı ile tahmin edilmiştir. Sadece yatay yük-şekil değiştirme eğrileri değil aynı zamanda duvar içindeki çekme, kayma ve basınç gerilmesi dağılımları da detaylı bir şekilde elde edilmiştir.
6. Özellikle tarihi yapıların temellerinde uygulanmış farklı temel sistemlerinin gerek düşey gerekse yatay yükler altında yapılaraya olan katkısının belirlenmesi amacıyla temel ve zeminine ait geometri ve malzeme bilgileri irdelenmiştir. Bu çalışmanın ilk kısmında geliştirilen makro ve mikro modelleme yaklaşımları kullanılarak çözümlenen duvarların, farklı mesnetlenme durumları dikkate alınarak temel-duvar etkileşimi incelenmiştir.
7. İncelenen mesnet tiplerinde duvar altına serilen kum tabakası, zayıf elastisite modülü plastik malzeme olarak veya çeşitli yay katsayısı olan yay mesnetler veya sürtünme katsayısı ile belirtilen kayma düzlemi ile; ahşap ızgara oluşturulması ile yapılan temel tipi ise duvar altına yerleştirilen silindirik elemanlar ile simüle edilmiştir.
8. Nümerik çözümler ile elde edilen sonuçlara göre, duvarın rijit mesnetli duvarlara göre çok daha az zorlanmaya maruz kaldığı ve duvarın iç rölatif şekil değiştirmelerinin düşük kalması sonucu duvar içindeki gerilmelerin düşük seviyelerde kaldığı belirlenmiştir.

İleriki çalışmalarda, duvar kalınlığının tek bir sabit değerde alındığı modellemede farklı kalınlıklar için yapılacak çalışmalar ile duvar narinliğinin hem düşey yük hem de yatay yük taşıma gücü kapasitesine olan katkılarının araştırılması amaçlanmaktadır. Böylelikle yönetmelikte verilen ve genellikle doğrusal analizlere dayanan bağıntı ve grafiklerin geliştirilmesi de mümkün olabilecektir. Bir diğer düşünülen çalışma ise temellerin altındaki

zemin içinde gerçekçi modellemelerin yapılmasıdır. Bu geoteknik ve jeodezi mühendisliği ile beraber gerçekleştirilebilecek disiplinler arası bir çalışma olabilecektir.

Son olarak ise statik bir yatay yük yerine duvarlara çevrimsel yüklemelerin uygulanmasıdır. Bu ise, deprem davranışı hakkında daha fazla bilgi edinmeye ve mevcut tasarım yöntemlerini geliştirmeye yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

-
- [1] Roca, P., (2006). "Assessment of masonry shear-walls by simple equilibrium models", *Construction and Building Materials* 20:229–238.
 - [2] Roca, P., (2004). "Simplified Methods for Assessment of Masonry Shear-Walls", 6th National Congress of Seismology and Earthquake Engineering and International Workshop "Masonry Walls and Earthquakes" SISMICA 2004: 101-118.
 - [3] Roca, P., Oliveira, D., Lourenço, P. ve Carol, I., (2001). "Mechanical Response of Dry Joint Masonry", G. Arun and N. Seçkin (eds): 2nd International Congress on Studies in Ancient Structures, Yildiz Technical University, İstanbul, 571-579.
 - [4] Formica, vd., (2002). "A mixed solution strategy for the nonlinear analysis of brick masonry walls", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 2002;191(51-52):5847-5876.
 - [5] Ganz, H.R., Thürlimann, B., (1984). "Tests On Masonry Walls Under Normal And Shear Loading ", (in German). Report No. 7502-4. Institute of Structural Engineering, ETH Zurich.
 - [6] Berto L., Scotta R. Ve Vitaliani V. R., (2001). "An Orthotropic Damage Model for Nonlinear Masonry Walls Analysis: Irreversible Strain and Friction Effects", *Historical Constructions*, Guimares.
 - [7] Berto L.,vd., (2002). "An Orthotropic Damage Model for Masonary Structures", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 55(2):127-157.
 - [8] Orduna, A. & Lourenco, P. B., (2003). "Cap Model for Limit Analysis And Strengthening of Masonry Structures", *Journal of Structural Engineering*, 10 (129), 1367-1375.
 - [9] Orduna, A., (1996). *Seismic Assessment of Ancient Masonry Structures by Rigid Blocks Limit Analysis*, University of Minho, Guimaraes, Portugal, Doktora tezi.
 - [10] Arya, S. K., and Hegemier, G. A., (1982). "Finite Element Method for Interface Problems", *Journal of the Structural Division, Proc. ASCE*, 108(2):327-342.
 - [11] Senthivel, R., Lourenço, P. B. ve Vasconcelos, G., (2006). "Analytical Modeling of Dry Stone Masonry Wall under Monotonic and Reversed Cyclic Loading," *Proceedings to the International Conference of Structural Analysis of Historical Constructions*, Macmillan, India, 2006.

- [12] Senthivel, R., Lourenço, P. B., (2009). "Finite Element Modelling of Deformation Characteristics of Historical Stone Masonry Shear Walls". *Engineering Structures*, 31(9):1930-1943.
- [13] Pande, G.N., Liang, J.X. ve Middleton, J, (1989). "Equivalent Elastic Modul for Unit Masonry", *Computers and Geotechnics* 8: 243-265.
- [14] Pande, G. N., Middleton, J. and Kralj B. (1998). "Computer Methods in Structural Masonry", 4. Proceedings of the Fourth International Symposium on Computer Methods in Structural Masonry. E & FN SPON. London, U.K.
- [15] Khattab, M.M. and Drysdale, R.G.,(1992). "Tests of Concrete Block Masonry Under Biaxial Tension-Compression" *Canadian Masonry Symposium*, 645-656.
- [16] Lopez, J., Oller, S., Oñate, E. ve Lubliner, J.,(1999). "A Homogeneous Constitutive Model For Masonry", *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 46: 1651-1671.
- [17] Buhan, P. and G. de Felice, (1997). "A Homogenization Approach To The Ultimate Strength of Brick Masonry" *J. Mechanics and Physics of Solids* 45(7): 1085-1104.
- [18] Lourenço, P.B., (1996). *Computational Strategies for Masonry Structures*, Doktora tezi, Delft University Pres, Netherland, Delft.
- [19] Lourenço, P.B., (2002). "Computations on Historic Masonry Structures", University of Minho, Portugal, *Prog. Struct. Engng Mater.*, 4:301–319.
- [20] Lourenço, P.B.,(1995). "An Orthotropic Continuum Model for the Analysis of Masonry Structures", Report No.03-21-1-31-27. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering.
- [21] Lourenço P. B.,(1998). "Experimental and Numerical Issues in The Modelling of The Mechanical Behaviour of Masonry", *Stuructural Analysis of Historical Constructions II*, Barcelona.
- [22] Lourenço P. B.,(1996). "An Orthotropic Continuum Model for The Analysis of Masonry Structures", TNO Building and Construction Research Computational Mechanics, TU-DELFT report no. 03-21-1-31-27.
- [23] Nawrotzki, P., (2007). "Elastic Support Systems for The Preservation of Cultural Heritage", In: *Proceedings of the Int. Symposium on Studies on Historical Heritage - SHH07*, Antalya, Turkey.
- [24] Giordano, A., Mele, E., and De Luca, A., (2002). "Modelling of Historical Masonry Structures: Comparison of Different Approaches Through a Case Study", *Engineering Structures*, 24:1057-1069.
- [25] Mele E., Deluca A. and Giordano A., (2003). "Modelling and Analysis of a Basilica Under Earthquake Loading", *Journal of Cultural Heritage* 2003:4:355-367.
- [26] Şen B., (2006). *Modeling and Analysis of The Historical Masonry Structures*, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [27] İşçi, Z. P., (2006). *Betonarme Bir Yapıya Gelen Deprem Kuvvetlerinin Azaltılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [28] Chaïmoon K., Attard Mario M.(2007). " Modeling of Unreinforced Masonry Walls Under Shear and Compression", Engineering Structures 29:2056–2068.
- [29] Masia, M.,J., Kleeman, P., W ve Melchers, R. E., (2004). "Modeling Soil/Structure Interaction for Masonry Structures", Journal of Structural Engineering, 130(4):641-649.
- [30] Corrêa, M.R.S., Ramalho, M.A., (2004). "A Simple Finite Element Based Model for Evaluating theInteraction of Load Bearing Walls Subjected to Vertical Loading", Construction & BuildingMaterials, 18:77-89.
- [31] Zucchini, A., Lourenço, P.B., (2002). "A Micro-Mechanical Model For the Homogenization of Masonry", International Journal of Solids and Structures 39:3233-3255.
- [32] Shing P. B., Mehrabi A. B. (2002). "Behaviour and Analysis of Masonry-Infilled Frames", Prog. Struct. Engng. Mater., 4:320–331.
- [33] Mehrabi, A. B., Shing P.B., (1997). "Finite Element Modelling of Masonry-Infilled RC Frames", Journal of Structural Engineering, 123(5).
- [34] Mehrabi, A. B., Shing P.B., Schuller M.P., Noland J.L., (1996). "Experimental Evaluation of Masonry-Infilled RC Frames", Journal of Structural Engineering, 122(3).
- [35] Mohebkhaha A.,Tasnimia A.A. ve Moghadamb H.A., (2008). "Nonlinear Analysis Of Masonry-Infilled Steel Frames With Openings Using Discrete Element Method", Journal of Constructional Steel Research, 64:1463–1472.
- [36] Asteris P.G., Tzamtzis A.D., (2003). "On the Use of a Regular Yield Surface for the Analysis of Unreinforced Masonry Walls", Electronic Journal of Structural Engineering 3:23-42.
- [37] Asteris, P.G., Syrmakizis, C.A., (2005). "Strength of Unreinforced Masonry Walls under Concentrated Compression Loads", Practice Periodical on Structural Design and Construction, American Society of Civil Engineers (ASCE), 10(2):133-140.
- [38] Asteris, P.G., (2005). "Closure to Lateral Stiffness of Brick Masonry Infilled Plane Frames" by P.G. Asteris, Journal Of Structural Engineering; American Society of Civil Engineers (ASCE), 131(3):523-524.
- [39] Berto L., Saetta A., Scotta R. ve Vitaliani R., (2004). "Shear Behaviour of Masonry Panel: Parametric FE Analyses", International Journal of Solids and Structures, Volume: 41(16-17):4383-4405.
- [40] Köksal, H.O., Doran B., Alacalı S.N. ve Özsoy A.E., (2004). "Nonlinear Modeling of Concentrically Loaded Reinforced Blockwork Masonry Columns", Can. J. Civ. Eng. 31: 1012-1023.
- [41] 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.

- [42] Ünay, A. İ., (1997). A Method for The Evaluation of The Ultimate Safety of Historical Masonry Structures, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [43] Ünay, A. İ., (2002). Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, ODTÜ Mimarlık Fakültesi Basım İşbirliği.
- [44] Türkçü, Ç., (1997). Yapım, Mimarlar Odası İzmir Şubesi Yayınları, İzmir.
- [45] TS704, (1979). Duvarlar İçin Harman Tuğlaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [46] TS705, (1985). Duvarlar İçin Dolu ve Delikli Fabrika Tuğlaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [47] Schellbach, G., Schmidt, H., (1980). "Influence of the Raw Material and the Production Methods on the Deformation Behaviour of Clay Bricks or Blocks - Effects of These Deformations on Building Construction", ZI International, 651-663
- [48] TS 2513, (1977). Doğal Yapı Taşları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [49] Bayülke, N. (1992). Yığma Yapılar (Genişletilmiş 2nci Baskı). Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- [50] Bayülke, N.(1980). Yığma Yapılar, T.C. İmar ve İskân Bakanlığı Deprem Araştırma Enstitüsü Matbaası, Ankara.
- [51] TS 2510, (1977). Kâgir Duvarlar ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [52] TS 2515, (1985). Kerpiç Yapıların Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [53] Bayülke, N., (1990). Kerpiç Yapı Sarsma Tablası Deney Raporu. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- [54] TS 406, (1988). Beton Bloklar- Briketler- Duvarlar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [55] Çamlıbel, N.(1984). Geleneksel Yapılarda Stabilitenin İyileştirilmesi (Temellerin Takviyesi), Işık Baskı Atölyesi, İstanbul.
- [56] TS 2717 EN 13139, (2005). Agregalar - Harç yapımı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [57] TS 2848, (1977). Kâgir Duvar Harçları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [58] Aköz, F., (2005). "Yığma Kâgir Yapılarda Hasar Tespiti", YDGA2005, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, 17 Şubat 2005, Ankara.
- [59] Dymiotis C., Gutleiderer B. M., (2002). "Allowing for Uncertainties in The Modelling of Masonry Compressive Strength", Construction and Building Materials 16:443-452.
- [60] Eurocode 6, (1995). Design of Masonry Structures, ENV 1996-1-1:1995, CEN, Brussels, Belgium.

- [61] TS.ENV.1996.1-1. (2001). Kâgir Yapıların Tasarımı-Bölüm 1-1; Binalar İçin Genel Kurallar-Donatılı ve Donatısız Kâgir Kuralları (Eurocode 6), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [62] Paulay, T. and Priestley, M.J.N. (1992). Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, J. Wiley, New York.
- [63] Arun, G., (2003). Depreme dayanıklı yapı tasarımı, Y.T.Ü. Mimarlık Fakültesi Yayınlanmamış ders notları, İstanbul.
- [64] Arun, G., (2009). Yığma Yapı Davranışı, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yayınlanmamış ders notları, İstanbul.
- [65] Arun, G., (2005). "Yığma Yapı Davranışı", YDGA2005 – Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı, 17 Şubat 2005, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [66] Arun, G., (2009). "Yığma Yapı Tanımı ve Davranışı", İMO Meslek İçi Seminerleri, Bahar Dönemi.
- [67] Zamankhani, J. S., (2010). "İran'ın Deprem Bölgesi Olan "Doğu Azerbaycan" İlindeki Köy Evlerinin Biçimsel Ve Yapısal Yönlerden İrdelenmesi Ve Islahı Üzerine Bir Çalışma", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [68] Tolles, E. L., Kimbro, E. E. ve Ginell, W. S., (2002). "Planning and Engineering Guidelines for the Seismic Retrofitting of Historic Adobe Structures", GCI Scientific Program Reports, The Getty Conservation Institute, Los Angeles.
- [69] Huerta, S., (2001). "Mechanics of masonry vaults: The equilibrium approach", Historical Constructions, Guimares.
- [70] Arun, G., (2006). "Behavior of Masonry Vaults and Domes- Geometrical Considerations", SAHC2006 International Symposium on Structural Analysis of Historical Constructions bildiri kitabı, 6-8 Kasım 2006, Yeni Delhi, Hindistan, ISBN 10: 1403-93156-9, 1:299-306.
- [71] İnan M., (1988). Cisimlerin Mukavemeti, İTÜ Vakfı, İstanbul
- [72] Analiz Programı İnternet sitesi, <http://tnodiana.com/node/369>, 2.11.2011.
- [73] Chen, W.F. and Saleeb, A.F., (1982). Constitutive Equations for Engineering Material, John Wiley and Sons, New York.
- [74] Chen, W.F.,(1982). Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill, New York, N.Y.
- [75] Chen, W. F., Han, D. J. (1987). "Plasticity for Structural Engineers." Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- [76] Chen, W.F., Mizuno, E. (1990). Nonlinear Analysis in Soil Mechanics, Elsevier Science Publishers B.V.
- [77] Toker, S. ve Ünay, A. İ. (2004). "Mathematical Modeling And Finite Element Analysis of Masonry Arch Bridges", G.U. Journal of Science, 17(2):129-139
- [78] Kanit R., Işık N. S. (2007). "Tuğla Kemerlerin Deneysel Davranışı ve Bilgisayar Modeli Analizleri", Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 22(1).

- [79] Lourenço P.B., (2004). "Current Experimental and Numerical Issues in Masonry Research", SISMICA 2004 - 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica.
- [80] Lourenço P.B., Borst R., Rots J. G.(1997). "A Plane Stres Softening Plasticity Model for Orthotropic Materials", International Journal for Numerical Methods in Engineering, 40: 4033-4057.
- [81] Bazant, Z. P., and Oh, B. H., (1983). "Crack Band Theory for Fracture of Concrete", *Materiaux Construct.* 16: 155-177.
- [82] FEA Ltd, LUSAS Finite Element System, UK, 2011.
- [83] FEA Ltd. LUSAS-User Manual. Kingston-upon-Thames, U.K., 2011.
- [84] Ramamurthy, K., Sathish, V. ve Ambalavan, R., (2000). "Compressive Strength Prediction of Hollow Concrete Block Masonry Prisms", *ACI Structural Journal*, 97(1): 61- 67.
- [85] Khalaf, F. M., Hendry, A. W., and Fairbairn, D. R., (1994). "Study of the Compressive Strength of Blockwork Masonry", *ACI Structural Journal*, 91:367-375.
- [86] Colas A. S., Morel J. C. and Garnier D., (2008). "Yield Design of Dry-Stone Masonry Retaining Structures-Comparisons With Analytical, Numerical, and Experimental Data", *International Journal For Numerical And Analytical Methods in Geomechanics, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*; 32:1817–1832.
- [87] Kuruşcu A.O. ve Arun G., (2011). "Effects of Timber Footing Used in Ancient Masonry Foundations", *WCCE-ECCE-TCCE Second Joint Conference Seismic Protection of Cultural Heritage Conference*, October 31 -November 1, Antalya, Turkey.
- [88] Bayülke, N. (2011). "Yığma Yapıların Deprem Davranışı ve Güvenliği", 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-14 Ekim 2011, ODTÜ, ANKARA
- [89] Raijmakers T.M.J., Vermeltfoort A.Th., (1992). "Deformation Controlled Tests In Masonry Shear Walls", [in Dutch]. Report B-92-1156, TNO-Bouw, Delft.
- [90] 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.
- [91] Alfano G., ve Sacco E., (2006). "Combining Interface Damage and Friction in a Cohesive-zone Model", *International Journal For Numerical Methods in Engineering, Int. J. Numer. Meth. Engng*; 68:542–582.
- [92] Alfaiate.J. V., de Almeida, J. R. and Gago, A. S., (2003). "On the Numerical Analysis of Localized Damage in Masonry Structures" In 2nd International Conference on Structural Engineering and Construction (ISEC-02), Franco Bomtempo (Ed.), 769-774., Roma.
- [93] ACI-318-02, (2002). "Building Code Requirements for Reinforced Concrete Structures", American Concrete Institute (ACI), Detroit.
- [94] British Standard 5628, (1992). Part 1: Code of Practice for Use of Masonry.

- [95] Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY), (1997), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [96] Oliveira D.V., (2003). Experimental and Numerical Analysis of Block Masonry Structures Under Cyclic Loading, PhD. Dissertation Universidade do Minho Guimarães.
- [97] Oliveira D.V., Lourenço P.B., (2004). "Implementation and Validation of a Constitutive Model for The Cyclic Behaviour of Interface Elements". Computers and Structures, 82:1451–1461.
- [98] Oliveira D.V., (2000). "Mechanical Characterization of Stone and Brick Masonry", Rep. No. 00-DEC/E-4, Univ. do Minho, Guimaraes.
- [99] Oliveira, D.V., Lourenço, P.B. ve Roca, P., (2006). "Cyclic Behaviour of Stone And Brick Masonry Under Uniaxial Compressive Loading", Materials and Structures 2006; 39(2):219-227.
- [100] Ganz, H. R., Thurlimann B., (1983)."Strength of Brick Walls Under Normal Force and Shear", Proc. 8th int. Symp. on Load Bearing Brickwork, London.
- [101] Lourenço, P.B., Rots J.G., and Blaauwendraad, J., (1998). "Continuum Model For Masonry: Parameter Estimation and Validation", Journal of Structural engineering 1998; 124(6):642-652.
- [102] Zucchini A, Lourenço P.B. (2004). "A Coupled Homogenisation-Damage Model For Masonry Cracking". Computer and Structures 82: 917-929.
- [103] Zucchini A, Lourenço P.B.,(2006). "Mechanics of Masonry in Compression: Results From a Homogenisation Approach", Computer and Structures.
- [104] Köksal H.O., Aktan S., Kuruşçu A.O., (2011). "Elasto-Plastic FE Analysis of FRP-Confining Masonry Columns", ASCE's Journal of Composites for Construction, 2011 (17.11.2011 Tarihinde Kabul Edildi, Basım Bekleniyor, DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000268)
- [105] Tarihi Yapı Resimleri, <http://girgin.org/yazilarim/images/sul.jpg>, 15.11.2011.
- [106] Aksoy İ. H.,(1982), "İstanbul'da Tarihi Yapılarda Uygulanan Temel Sistemleri", İstanbul Teknik Üniversitesinde hazırlanan Doktora Tezi, 1982.
- [107] Karayolları Genel Müdürlüğü, (2010). "Tarihi Köprüler Şubesi Müdürlüğü Çalışmaları" Teknik Rapor, 2010.
- [108] Sert, H., (2007). "Konjic Bridge / Bosnia and Herzegovina", In: Proceedings of the Int. Symposium on Studies on Historical Heritage - SHH07, Antalya, Turkey.
- [109] Arun, G.,(2008). "Assessment of Ancient Building Foundations", SACoMaTIS 2008 - On Site Assessment of Concrete, Masonry and Timber Structures Symposium bildiri kitabı, 2.cilt s:935 Varenna, İtalya ISBN: 978-2-35158-063-9
- [110] Kulucija, S., Humo, M., Mandzic, E., Mandzic K. ve Selimovic M., (2009). "Existing Historical Foundation System of Two Old Bridges from the Ottoman Period in Bosnia and Herzegovina", Proceedings of The Third International Congress on Construction History, Cottbus.

- [111] Naumann, R.,(1991). Old Anatolian Architecture, (in Turkish), Third Edition, Publication of Turk History Association, Ankara.
- [112] Bayraktar, A., Keypour, H., Fahjan, Y. Ve Arun, G., (2007). "Historical Monuments and Their Foundations", SHH07 International Symposium on Studies on Historical Heritage bildiri kitabı, s: 19-26, 17-21 Eylül 2007, Antalya, ISBN 978-975-461-433-6.
- [113] Beckman P. ve Bowles R., (2004). Structural Aspects of Building Conservation, Publisher: Butterworth-Heineman, ISBN 750657332
- [114] İlsever, C., (2011). Edirnekapı Sarnıcı Koruma Sorunları, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Ali Osman KURUŞCU
Doğum Tarihi ve Yeri :28.06.1977, Kayseri
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :aliosmankuruscu@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İnşaat Mühendisliği-Yapı Programı	-Yıldız Teknik Üniversitesi	2005
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2000
Lise	Fen Bilimleri	Nuh Mehmet Baldöktü Anadolu lisesi	1996

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2002-2012	Yıldız Teknik Üniversitesi- Mimarlık Fakültesi	Araştırma Görevlisi