

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

**TARİHİ DAVUTPAŞA KIŞLASI'NIN DİNAMİK ÖLÇÜM DESTEKLİ, YATAY VE
DÜŞEY YÜKLER ALTINDA ANALİZİ**

EMRE GANİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YAPI PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. ALİ KOÇAK**

İSTANBUL, 2017

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TARİHİ DAVUTPAŞA KIŞLASI’NIN DİNAMİK ÖLÇÜM DESTEKLİ, YATAY VE
DÜŞEY YÜKLER ALTINDA ANALİZİ**

Emre GANI tarafından hazırlanan tez çalışması 07.06.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Ali KOÇAK
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ali KOÇAK
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç.Dr. Bilge DORAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd.Doç. Dr. Barlas ÇAĞLAYAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışma sürecindeki her aşamada akademik bilgilerini ve deneyimlerini aktararak bana yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Ali KOÇAK'a saygılarımı sunar, teşekkürü bir borç bilirim. Bütün geometrik arazi ölçümlerini birlikte tamamladığım, çalışmalarına önemli katkılar sağlayan Sayın Dr. Mehmet Gür hocama, arazide yapılan deneysel çalışmalarda hiçbir fedakârlıktan kaçınmadan bana destek olan Burak TOYDEMİR ve Başak ZENGİN başta olmak üzere diğer tüm çalışma arkadaşlarıma ayrı ayrı teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca, maddi ve manevi anlamda ve her alanda desteklerini sonuna kadar hissettiğim, tez çalışmam süresince de ilgi ve alakalarını hiçbir zaman esirgemeyen aileme, sabırları, anlayışları ve destekleri için şükranlarımı sunarım.

Mayıs, 2017

Emre GANİ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT.....	xvi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı	5
1.3 Hipotez.....	6
BÖLÜM 2	
YIĞMA YAPI DAVRANIŞI VE YÜK AKTARIMI	8
2.1 Statik Yükler Altındaki Davranış	10
2.1.1 Eksenel Basınç ve Duvar Davranışı	10
2.1.2 Eksenel Çekme ve Duvar Davranışı.....	12
2.1.3 Kesme Etkisi ve Duvar Davranışı.....	14
2.2 Dinamik Yükler Altındaki Davranış.....	15
2.3 Temel-Zemin Oturmaları ve Yapı Davranışı	23
2.4 Yük Eksantritesi ve Burkulma Davranışı	26
BÖLÜM 3	
TARİHİ YAPI MALZEMELERİ	29
3.1 Tarihi Yapı Malzemeleri	29
3.1.1 Doğal Taşlar	31
3.1.2 Tuğla ve Kerpiç.....	37

3.2 Tarihi Yapılarda Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi	41
BÖLÜM 4	
ANALİZ VE MODELLEME YÖNTEMLERİ	44
4.1 Yapısal Analiz Yöntemleri.....	45
4.1.1 Doğrusal Analiz	45
4.1.2 Doğrusal Olmayan Analiz.....	46
4.1.3 Limit Analiz	47
4.2 Modelleme Yöntemleri	48
4.2.1 Eşdeğer Çerçeve Yöntemi	49
4.2.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi	54
4.2.3 Detaylı Mikro Modelleme.....	56
4.2.4 Basitleştirilmiş Mikro Modelleme	58
4.2.5 Makro Modelleme	59
4.2.6 Ayrık Elemanlar Yöntemi	61
4.2.7 Kafes Sistem Benzeşimi Yöntemi.....	64
BÖLÜM 5	
DİNAMİK PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ.....	66
5.1 Teorik Modal Analiz	66
5.2 Deneysel Yöntemler.....	67
BÖLÜM 6	
ÖRNEK ÇALIŞMA : DAVUTPAŞA KIŞLASI’NIN YAPISAL ANALİZİ.....	70
6.1 Davutpaşa Kışlası.....	71
6.1.1 Kışlanın Tarihçesi	71
6.1.2 Kışlanın Geometri ve Malzeme Özellikleri.....	74
6.1.3 Kışlanın Zemin Özellikleri.....	82
6.2 Kışlanın Nümerik Analizi	88
6.3 Kışla Üzerinde Yapılan Deneysel Çalışma.....	103
6.4 Nümerik ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması.....	115
6.5 Kışlanın Yatay ve Düşey Yükler Altındaki Yapısal Davranışı	121
BÖLÜM 7	
SONUÇ VE ÖNERİLER	138
KAYNAKLAR.....	140
ÖZGEÇMİŞ.....	150

SİMGE LİSTESİ

$A_o(g)$	Deprem yer ivmesi
B	Duvar elemanının kalınlığı
$[C]$	Sönüm matrisi
E_b	Yığma birimin elastisite modülü
E_k	Kompozit malzemenin elastisite modülü
E_{mr}	Harcın elastisite modülü
E_t	Birim elastisite modülü
f_c	Yığma duvarın yüklendiği doğrultudaki eksenel olmayan basınç dayanımı
$\{F(t)\}$	Zamana bağlı kuvvet vektörü
G_b	Yığma birimin kayma modülü
G	Ölü yük
h'	Dolce etkin yüksekliği
I	Yapı önem katsayısı
$[K]$	Rijitlik matrisi
k_n	Normal rijitlik parametresi
k_s	Kayma rijitliği parametresi
L	Duvar elemanının plandaki uzunluğu
$[M]$	Kütle matrisi
n	Hareketli yük katılım katsayısı
Q	Hareketli yük
q_u	Zemin serbest basınç direnci
R	Deprem yükü azaltma katsayısı
$S(T)$	Spektrum katsayısı
t_{mr}	Harç kalınlığı
t_t	Birim kalınlığı
$V2EX$	2 Eksenindeki x yönü kesme kuvveti
$V3EY$	3 Eksenindeki x yönü kesme kuvveti
$V2EY$	2 Eksenindeki y yönü kesme kuvveti
$V3EY$	3 Eksenindeki y yönü kesme kuvveti
$\{\ddot{x}(t)\}$	Zamana bağlı ivme vektörü
$\{\dot{x}(t)\}$	Zamana bağlı hız vektörü
$\{x(t)\}$	Zamana bağlı yer değiştirme vektörü
ρ_k	Birim ile harç arasındaki aderans katsayısı

σ	Düşey gerilme
τ	Kesme gerilmesi
τ_{em}	Duvar kayma emniyet gerilmesi
τ_0	Çatlama emniyet gerilmesi
μ	Sürtünme katsayısı



KISALTMA LİSTESİ

BOA	Başbakanlık Osmanlı Arşivi
FOA	Frekans Ortamında Ayırıştırma
FRF	Frekans Tepki Fonksiyonu
EDX	X-Ray ile Enerji Dağılımı
GFOA	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma
OMA	Operasyonel Modal Analiz
RBSM	Rigid Body Spring Model
SAB	Stokastik Alttan Belirleme
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TDY	Türkiye Deprem Yönetmeliği
XRD	X Işını Kırınımı

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Yığma yapı hasar şekilleri [25]	8
Şekil 2. 2 Eksenel basınç altındaki yığma numunenin davranışı [35], [36]	10
Şekil 2. 3 Düşey yükler altında oluşan hasar örnekleri [39]	11
Şekil 2. 4 Taş ayakta oluşan örnek bir ezilme hasarı [40], [41]	12
Şekil 2. 5 Eksenel çekmede gerilme-şekil değiştirme diyagramları, (a)Harç boyunca kademeli çatlaklar, (b) Düşey çatlaklar [35], [42]	13
Şekil 2. 6 (a) Harç boyunca ilerleyen kademeli çatlaklar, (b) Düşey yönde gelişen çatlaklar	14
Şekil 2. 7 Kesme etkisinde yığmaprizma davranışı [35]	15
Şekil 2. 8 Diyagonal şekilli çatlak oluşumu	15
Şekil 2. 9 Yığma binanın dinamik davranışı [43]	16
Şekil 2. 10 A Duvarı üzerinde oluşan deprem kuvvetleri ve kesme kuvvet diyagramı [43]	17
Şekil 2. 11 Düzlem içi deprem zorlamaları ve etkileri [43]	17
Şekil 2. 12 Depreme maruz yığma duvarların düzlem içi ve dışı yüklenmesi [43]	18
Şekil 2. 13 Yığma yapı duvarlarında çatlak oluşumu [44]	18
Şekil 2. 14 Depremde oluşan kesme çatlakları [40], [45]	19
Şekil 2. 15 Düzlem içi yüklemde hasar şekilleri [25]	20
Şekil 2. 16 Duvarlarda çatlak oluşumu [46]	21
Şekil 2. 17 Değişen narinlik(a) ve en-boy oranlarında(b) önceki çalışmalarla yapılan düzlem dışı davranış karşılaştırması [33]	21
Şekil 2. 18 Yatay kuvvetlere maruz yığma yapılarda görülen göçme mekanizmaları [38]	22
Şekil 2. 19 Duvarlarda oluşan köşe hasarları [44]	23
Şekil 2. 20 Oturmalarından oluşan duvar hasarları [50]	24
Şekil 2. 21 Oturma biçimine göre çatlaklar [51]	24
Şekil 2. 22 Örnek oturma çatlakları [40], [52]	25
Şekil 2. 23 Örnek oturma çatlakları [40], [53]	25
Şekil 2. 24 Farklı yazarların farklı koşullarda incelediği burkulma davranışları [54]	27
Şekil 2. 25 Duvar basınç gerilmesi(σ)-narinlik oranı ilişkisi [67]	28
Şekil 3. 1 Tarihi granit(a) yapı ve trakit(b) yapı [38]	31
Şekil 3. 2 Tarihi kumtaşı(a) yapı, kireçtaşı(b) yapı ve tüf(c) yapı [38]	32
Şekil 3. 3 Taş duvarların sınıflandırılması [38]	34

Şekil 3. 4 Harçsız taş duvar örnekleri [38]	34
Şekil 3. 5 Düzensiz moloz taş duvarlar [38]	35
Şekil 3. 6 Sıralı(a) ve sırasız(b,c) düzenli moloz taş duvarlar [38]	36
Şekil 3. 7 Kesme taş duvarlar [38]	37
Şekil 3. 8 Silindirik tuğlanın çevrimli basınç deneyi ve tipik gerilme-şekil değiştirme eğrisi [69], [75]	38
Şekil 3. 9 Kerpiç basınç testi ve getirme-şekil değiştirme grafiği [84]	39
Şekil 4. 1 Boşluklu donatısız yığma duvarların limit analizi, (a)Duvar, (b)Hasar mekanizması [90], [91]	47
Şekil 4. 2 Düzenli boşluklu yapıda eşdeğer çerçeve idealleştirilmesi örneği [94]	49
Şekil 4. 3 Düzensiz boşluklu yapıda eşdeğer çerçeve idealleştirilmesi örneği [94]	50
Şekil 4. 4 Yığma yapıların çubuk elemanlar ve yığılı kesme mafsallarıyla modellenmesi [96]	51
Şekil 4. 5 Dolce(1989) tarafından önerilen etkin yükseklik (h') saptaması [96]	51
Şekil 4. 6 Eşdeğer çerçeve modelleri, (a)Uç rijitliği yok, (b)Dolçe uç rijitliği, (c)Tam uç rijitliği, (d)Sonlu elemanlar modeli [96]	52
Şekil 4. 7 Üç mafsallı çubuk eleman modellemesi [97], [98]	52
Şekil 4. 8 Eşdeğer çerçeve yöntemi ve plastik mafsal yerleşimi [94]	53
Şekil 4. 9 Eşdeğer çerçeve sonuçlarındaki hasar şekilleri [99]	54
Şekil 4. 10 Sonlu eleman sayısı ile yaklaşık sonuçların yakınsaklık ilişkisi [69], [100]	55
Şekil 4. 11 Yığma yapıların sonlu elemanlar ile modellenmesi : (a) Tipik yığma yapı modeli, (b) Detaylı mikro modelleme, (c) Basitleştirilmiş mikro modelleme [42]	56
Şekil 4. 12 Basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi [35]	59
Şekil 4. 13 Homojenleştirme ve makro modelleme yöntemi [5]	60
Şekil 4. 14 Bağlantı elemanlarının davranışı [112]	62
Şekil 4. 15 Tipik yığma duvar elemanı, (b) Yaylar ile bağlanmış rijit elemanlardan oluşturulan "Birim Hücre" [113]	63
Şekil 4. 16 Deforme olmamış(a) ve deforme olmuş(b) Temel makro eleman [114]	63
Şekil 4. 17 Düzlem içi hasar mekanizmaları, (a) Eğilme, (b)Diyagonal kesme, (c) Kesme kayması ve (d)Ayrık elemanlar modeli [114]	64
Şekil 4. 18 Kafes sistem benzeşimi modeli [117]	64
Şekil 4. 19 Gelişmiş kafes sistem benzeşiminin geometrik yapısı, (a)Kafes kirişleri, (b)Kiriş açıları [118]	65
Şekil 5. 1 Deneysel modal analiz [89]	68
Şekil 5. 2 Operasyonel modal analiz [89]	68
Şekil 6. 1 Osmanlı süvarilerinin kışla önündeki talimleri [126]	72
Şekil 6. 2 Molkte Haritası (1268/1851-1852) [123]	72
Şekil 6. 3 Davutpaşa Kışlası'nın planı	74
Şekil 6. 4 Batı cephesi dışarıdan görünüş	75
Şekil 6. 5 Güney cephesi dışarıdan görünüş	75
Şekil 6. 6 Bodrum kat giriş planı	76
Şekil 6. 7 Bodrum katın dışarıdan ve içeriden görünüşü	76
Şekil 6. 8 Ana giriş haricindeki betonarme kiriş sistemi	77
Şekil 6. 9 Zemin kat kirişleri ve tonoz örtülü koridor	78
Şekil 6. 10 Ters kirişli birinci kat döşemelerinin düz tavan görünüşü	78

Şekil 6. 11 Kışlanın iç avludan görünüşü	79
Şekil 6. 12 Kışlanın dış duvarlarının görünüşü	80
Şekil 6. 13 Kışlanın ana girişi	80
Şekil 6. 14 Kışlanın ana girişine ait kirişli döşeme sistemi.....	81
Şekil 6. 15 Kışlanın kuzey cephesi(a) ve batı cephesi(b) dışarıdan görünüşü	81
Şekil 6. 16 Davutpaşa Kışlası'nın günümüzdeki görünüşü [126].....	82
Şekil 6. 17 Kışlanın kuzey kesiminde açılan araştırma çukuru [128].....	83
Şekil 6. 18 Kışlanın kuzey kesiminde açılmakta olan 1. Kademe araştırma çukuru [128]	83
Şekil 6. 19 Kışlanın kuzey kesiminde 4.10m derinlikteki 1.Kademe araştırma çukuru [128]	84
Şekil 6. 20 Kışlanın kuzey kesiminde açılmakta olan 2. Kademe araştırma çukuru [128]	84
Şekil 6. 21 Kışlanın kuzey kesiminde açılmakta olan 2.Kademe araştırma çukuru [128]	85
Şekil 6. 22 Araştırma çukuru 2.Kademedebina temeli ve temel altındaki yapay dolgu [128]	86
Şekil 6. 23 Araştırma çukurunun 1. ve 2.Kademe genel görünüşü [128]	87
Şekil 6. 24 Araştırma çukuru zemin kesiti [128]	88
Şekil 6. 25 Shell ve frame elemanlar	89
Şekil 6. 26 Duvarların modellenmesi	90
Şekil 6. 27 Tonoz örtülü koridorların modellenmesi.....	91
Şekil 6. 28 Döşeme ve kiriş elemanlarının modellenmesi	91
Şekil 6. 29 Bodrum katın modellenmesi	92
Şekil 6. 30 Tarihi kışlanın ana girişi (Zemin kat)	93
Şekil 6. 31 Tarihi kışlanın ana girişi (Birinci kat)	94
Şekil 6. 32 Tarihi kışla binasının nümerik modeli.....	95
Şekil 6. 33 Tarihi binaya ait nümerik mod şekilleri	97
Şekil 6. 34 Kışlada yapılan OMA çalışmaları.....	103
Şekil 6. 35 İvme ölçerlerinyerleşim planı	104
Şekil 6. 36 Veri toplama cihazı	104
Şekil 6. 37 Analiz dosyalarının frekans seçimleri (M1-M2).....	106
Şekil 6. 38 Analiz dosyalarının frekans seçimleri (M3-M4).....	107
Şekil 6. 39 Analiz dosyalarının frekans seçimleri (M5-M6).....	108
Şekil 6. 40 Artemis Modal grafiksel mod şekli (13.92 Hz).....	109
Şekil 6. 41 Artemis Modal grafiksel mod şekli (14.21 Hz).....	110
Şekil 6. 42 Artemis Modal grafiksel mod şekli (14.84 Hz).....	111
Şekil 6. 43 Artemis Modal grafiksel mod şekli (15.67 Hz).....	112
Şekil 6. 44 Artemis Modal grafiksel mod şekli (16.55 Hz).....	113
Şekil 6. 45 Artemis Modal grafiksel mod şekli (17.29 Hz).....	114
Şekil 6. 46 Artemis-Etabs mod şekillerinin karşılaştırılması (5.mod).....	115
Şekil 6. 47 Artemis-Etabs mod şekillerinin karşılaştırılması (6.mod).....	116
Şekil 6. 48 Artemis-Etabs mod şekillerinin karşılaştırılması (8.mod).....	117
Şekil 6. 49 Artemis-Etabs mod şekillerinin karşılaştırılması (9.mod).....	118
Şekil 6. 50 Artemis-Etabs mod şekillerinin karşılaştırılması (10.mod).....	119
Şekil 6. 51 Artemis-Etabs mod şekillerinin karşılaştırılması (11.mod).....	120
Şekil 6. 52 Duvarlarda oluşan maksimum kesme kuvvetleri	123

Şekil 6. 53 Dikdörtgen ve kemerli pencere modelleri.....	123
Şekil 6. 54 Bina köşesinde oluşan örnek bir gerilme yığılması.....	124
Şekil 6. 55 Binaköşesindeki çelik gergiler.....	124
Şekil 6. 56 Tarihi kışlaya ait mevcut bir köşe hasarı.....	125
Şekil 6. 57 Dolu duvarlarda oluşan gerilme dağılımları	125
Şekil 6. 58 Bölme duvarların yük aktarımı	126
Şekil 6. 59 Tarihi kışlada mevcut spandrel hasarları	133
Şekil 6. 60 Düşey yüklerden oluşan gerilme dağılımı.....	134
Şekil 6. 61 Tarihi kışlanın zemin çatlakları	135
Şekil 6. 62 A koluna ait koridor ortası boykesiti (metre)	135
Şekil 6. 63 B koluna ait koridor ortası boykesiti (metre)	136
Şekil 6. 64 C koluna ait koridor ortası boykesiti (metre)	137



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1 Bazı taşların mekanik özellikleri [69], [70]	33
Çizelge 3. 2 Tuğlanın mekanik özellikleri [76], [77].....	38
Çizelge 3. 3 Malzeme parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler	43
Çizelge 4. 1 Analiz yöntemlerinin karşılaştırılması [69], [92]	48
Çizelge 6. 1 Döşemelere verilen ölü ve hareketli yükler	96
Çizelge 6. 2 Yapı malzeme özellikleri	96
Çizelge 6. 3 Periyot değerleri ve kütle katılım oranları	103
Çizelge 6. 4 Artemis-Etabs mod şekillerinin karşılaştırılması.....	121
Çizelge 6. 5 Deprem parametreleri	121
Çizelge 6. 6 Duvar elemanlarının kayma gerilme kontrolleri.....	127

TARİHİ DAVUTPAŞA KİŞLASI'NIN DİNAMİK ÖLÇÜM DESTEKLİ, YATAY VE DÜŞEY YÜKLER ALTINDA ANALİZİ

Emre GANİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Ali KOÇAK

Tarihi yapıların yapısal davranışlarının belirlenmesi, yapıların korunması, güçlendirilmesi, restorasyon çalışmaları ve mühendislik açısından oldukça önemlidir. Yapı davranışının ortaya konması, mevcut hasar nedenlerinin açıklanabilmesini sağlayabilir veya yapının ileride karşılaşılabileceği herhangi bir depremde oluşacak muhtemel hasarların tahmin edilip gerekli önlemlerin alınmasına imkan verebilir. Ayrıca bu sayede, benzer özelliklere sahip farklı yapılar için de bazı tahminlerde bulunulabilir. Bu nedenle, tarihi yapıların ele alınarak statik ve dinamik yükler altında analizlerinin yapılması gerekmektedir. Tez çalışmasında, inşası 1831-1832 yıllarında tamamlanmış olan, günümüzde Yıldız Teknik Üniversitesi bünyesinde Fen-Edebiyat Fakültesi olarak kullanılan ancak yakın zamana kadar askeri kışla olarak hizmet vermiş tarihi bir yığma binanın statik ve dinamik yükler altındaki yapısal analizi konu alınmıştır. Öncelikle, alanda yapılan geometrik ölçümler sonrası rölemler hazırlanmıştır. Ardından, sonlu elemanlar programı ile tarihi binanın üç boyutlu-3D başlangıç analitik modeli oluşturularak mod şekilleri ve yapısal davranışı elde edilmiştir. Modellemede, bina duvarlarının homojen malzeme özelliklerine sahip olduğu kabulü yapılarak makro modelleme tekniği kullanılmıştır. Malzeme parametreleri, ilgili standartlarla belirtilmiş değerlere göre seçilmiştir. Yapılan ilk nümerik analiz sonuçlarına göre yerleştirilen tek ve çift eksenli ivmeölçerlerle toplanan titreşim kayıtları ile operasyonel modal analiz (OMA) uygulanarak tarihi binanın dinamik parametreleri elde edilmiştir. Başlangıçta oluşturulan nümerik model, OMA verileri ile doğrulanarak tarihi kışla binasının

doğrusal elastik analizi yapılmıştır. Tarihi binada, gerilmelerin fazla olduğu bölgelerde TDY2007 yönetmeliğine göre kesme hesabı yapılarak, analiz sonuçlarına göre hasar öngörülen bina kısımları belirlenmiştir. Nümerik analiz sonuçlarının gösterdiği hasarlar ile binanın mevcut hasar durumları arasında yapılan karşılaştırmalarda oldukça uyumlu sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Tarihi binanın analitik modeli doğrulanarak, binanın düşey ve yatay yükler altındaki davranışı incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yığma yapılar, tarihi binalar, sonlu elemanlar analizi, deprem davranışı, operasyonel modal analiz



ABSTRACT

ANALYSIS OF HISTORICAL DAVUTPASA BARRACKS SUPPORTED BY DYNAMIC MEASUREMENT UNDER HORIZONTAL AND VERTICAL LOADS

Emre GANI

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Ali KOÇAK

Determining the structural behavior of historical structures has great importance in terms of protection, strengthening, restoration actions and engineering perspective. Revealing of the structure behavior may allow explanations of the causes of existing damages or may allow to provide necessary precautions by estimating the possible damages in case of future earthquakes. Besides, general estimations can be derived for different buildings with similar characteristics. Therefore, it is necessary to analyze historical structures under static and dynamic loads. In the thesis study, structural analysis under static and dynamic loads of a historical masonry building constructed in 1831-1832 and used as military barracks until a few decades ago which is used as Faculty of Science and Letters in Yıldız Technical University at the present time. At first, the relieves were prepared after the geometric measurements in the field. Afterwards, three dimensional-3D model of historical building was created by finite element program and mode shapes and structural behavior were obtained. In the modeling, a macro modeling technique is used by assuming that the walls of the building have homogeneous material properties. The material parameters are selected according to the values specified in the relevant standards. The dynamic parameters of the historical building were obtained by applying operational modal analysis (OMA) with the vibration records collected by uniaxial and biaxial axis accelerometers placed according to results of the first numerical analysis. The initial numerical model was

verified by OMA results and a linear elastic analysis of the historic barrack building was performed. In the historical buildings, shear controls is performed according to Turkish Earthquake Regulation (2007) and the wall elements foreseen to be damaged (exceeding the allowable stresses) with regard to the analysis results are determined. In the comparison between the damage of the numerical analysis and the existing damage cases of the building, quite consistent results were obtained. The behavior of the building under seismic and vertical loads was investigated by way of the experimentally and numerically validation of the model and results were interpreted.

Keywords: Masonry structures, historical buildings, finite element analysis, earthquake behavior, operational modal analysis



GİRİŞ

Yığma yapılar, ülkemizdeki yapı stoğunda en büyük orana sahip olan yapı türüdür ve bu yapılardan bazıları kültürel mirasımızda büyük önem taşıyan tarihi nitelikli yapılardır. Mevcut yığma yapıların dışında yeni yığma yapıların inşası, maliyetlerinin düşük olması nedeniyle günümüzde de, özellikle kırsal kesimlerde devam etmektedir. Bu nedenle, hem yeni tasarımlarda en doğru yöntemlerin kullanılabilmesi hem de mevcut yapılarımızın korunabilmesi amacıyla yığma yapı davranışlarının ortaya konması büyük önem taşımaktadır. Ağır yapılar olmaları ve yatay kuvvetler altında sünek davranış sergileyememeleri nedeniyle yığma yapıların deprem dayanımlarının zayıf olduğu bilinmektedir. Zayıf deprem dayanımlarının yanında, bu tip yığma kâgir yapıların içerdiği süreksizliklerden dolayı özelliklerinin farklı yönlerde değişiklik göstermesi ve malzeme karakteristiklerinin standartlarla belirlenmiş olmaması nedeniyle yapısal davranışlarının yorumlanması da zordur. Kültürel mirasımızın yapı taşlarından olan tarihi yapılar, yığma yapı stoğunun en önemli parçalarıdır ancak tarihi yapılar uzun seneler boyunca ayakta kalırken, düşey ve yatay yüklerden veya dış etkilere kaynaklanan hasarlar alırlar. Hasarlar, yapıda öngörülen veya hasarsız durumda gerçekleşmesi beklenen yük akışında farklılıklar oluşturur ve taşıyıcı eleman davranışlarını da değiştirir. Bu değişimler sonucunda ise yapının sınır koşulları ve dinamik özellikleri değişir. Tarihi bir yapının doğru yapısal analizindeki en temel gerekliliklerin, yapı malzemelerinin mekanik ve fiziksel özelliklerinin bilinmesinin yanı sıra, yapının mevcut dinamik davranışını yansıtan doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı olarak adlandırılan dinamik özelliklerinin de bilinmesi olduğu söylenebilir. Literatürde, yapı davranışı ve malzeme parametrelerini belirlemek için çeşitli

yöntemler bulunmaktadır. Yapısal analiz için en yaygın olarak kullanılan teorik yöntem sonlu elemanlar yöntemidir. Gelişen bilgisayar teknolojileri, sonlu elemanlar yönteminin kullanılmasıyla çok karmaşık denklem takımlarının çözümlerine olanak sağlamıştır ve bu çözümler analiz sonucu ile gerçek yapı davranışı arasında oldukça tutarlı sonuçlar verebilmektedir ancak sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında, malzeme özelliklerinden sınır koşullarına kadar birçok kabul yapılmaktadır. Yapılan kabuller gerçek davranıştan uzaklaşılması anlamına gelir ve bu kabuller sonucu elde edilen sonuçların deneysel olarak doğrulanması gerekmektedir. Yapıların dinamik karakteristiklerinin deneysel yöntemlerle belirlenmesinde kullanılan iki yöntem, deneysel modal analiz ve operasyonel modal analiz (OMA) yöntemleridir. Sonlu elemanlar modeli sonuçları, deneysel veriler ışığında iyileştirilerek yapının gerçeğe en yakın davranışının elde edilebileceği analizler gerçekleştirilebilir. Kalibre edilmiş veya deneysel çalışmalarla doğrulanmış bir sonlu elemanlar modeli üzerinden yapılacak statik ve dinamik analiz sonuçları ile tarihi bir yapının gerçek davranışı ortaya konarak gerekli irdelemeler yapılabilir çünkü herhangi bir sonlu elemanlar modelinin deneysel verilerle desteklenmesi, yığma binaların modellenmesi ve yapısal davranışı ile ilgili belirsizliklerin giderilmiş olduğu ve nümerik analizde yapılan kabullerin uygun olduğu anlamına gelmektedir.

1.1 Literatür Özeti

Tarihi yapıların statik ve dinamik yükler altındaki davranışları çeşitli modelleme ve analiz yöntemleri kullanılarak birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Casolo vd. [1], sismik uyarma yöntemini kullanarak 10 adet yığma kulenin sismik analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmada, aynı bölgede yer alan ve benzer malzeme parametreleri ile benzer geometrik özelliklere sahip kuleler ele alınarak narinlik, duvarların çevre uzunluğu, kalınlığı, yüksekliği ve boşluk yüzdesi gibi geometrik özelliklerin sismik davranışa etkisi incelenmiştir.

Brandonisio vd. [2], 2009 yılında gerçekleşen L'Aquila depreminde hasar alan 4 adet tarihi kilisenin analizini yaparak performanslarını değerlendirmişlerdir. Çalışmadaki amaç, ele alınan kiliselerin deprem sonrası hasar durumlarının ve performanslarının

incelenerek yapıların sismik dayanımı ve olası güçlendirme girişimleri için genel bir sonuç çıkarılması olarak belirtilmiştir.

Parisi vd. [3], tarihi yapıların depremlerde gördüğü hasarlar üzerinde durarak, yapı davranışını etkileyen eleman kalitesi, bağlantı-harç elemanları, esnek diyafram özelliği, yapısal düzensizlikler, duvarların düzlem dışı yüklenme direnci, yanlış güçlendirme girişimleri ve deprem yer hareketi karakteristikleri gibi faktörleri vurgulayarak yapısal davranışı incelemiştir.

Valente ve Milani [4], 8 adet tarihi yığma kulenin yatay yükler altındaki davranışlarını incelemiştir. Çalışmada, geometrik özellikler, narinlik, duvar kalınlıkları, açıklıklar, iç kubbeler, düzensizlikler üzerinde durularak farklı pik yer ivmelerinde gerçek değerlerle doğrusal olmayan dinamik ve statik analizler uygulanmıştır.

Bayraktar vd. [5], Ayasofya çan kulesini 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlarla modelleyerek kulenin nümerik hasar değerlendirmesini sunmuştur. Çalışmada ölü yükler ile rüzgar yükleri altında doğrusal olmayan statik ve sismik analizler yapılmıştır. Nümerik analiz sonuçlarının gösterdiği hasar durumları ile kulenin mevcut hasarları karşılaştırılmış ve oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Milani ve Valente [6] çalışmalarında, depremde hasar alan 7 adet tarihi kilisenin dinamik analizlerini gerçekleştirirken, Çakır vd. [7], Van depremine maruz kalan 2 tarihi yapıyı ele alarak yapıların sismik hasarlarını ve deprem performanslarını değerlendirmiştir. Betti ve Vignoli [8], tarihi bir bazilikanın statik ve dinamik yükler altındaki davranışını incelemiştir.

Verstryngge vd. [9], yüksek gerilmelere maruz kalan tarihi yapıların zamana bağlı davranışını incelemiştir. Çalışmada, zamana bağlı olarak ortaya çıkabilecek bozulma ve yorulma gibi faktörler ele alınarak hasar mekanizmaları irdelenmiştir.

Teknolojinin ilerlemesi ile gelişen sensörler ve yazılımlar sayesinde yapı titreşimlerinin kaydedilerek dinamik parametrelerin tahmin edilmesinin yardımıyla uygulanan yapısal analizler kullanılmaya başlanmıştır. Koçak ve Köksal [10], serbest titreşim ölçümleri ile Küçük Ayasofya Kilisesi'nin doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerini yaparak, yapının hasar durumlarını incelemişler ve hasarları nümerik olarak tanımlamışlardır. Koçak ve Köksal [11] çalışmasında ise, aynı tarihi yapı ele alınarak doğal titreşim ölçümleri ile

desteklenen solid sonlu elemanlar modeli ile düsey ve yatay yükler altındaki yapı davranışını incelenmiştir.

Sevim vd. [12], 2 adet kemerli köprüyü sonlu elemanlarla nümerik olarak modellemiş ve dinamik özellikleri tahmin etmiştir. Ardından ivmeölçerlerle toplanan titreşimlerle frekans ortamında ayırıştırma ve stokastik alttan belirleme yöntemlerini kullanarak köprülere ait frekans, mod şekli ve sönüm oranlarını elde etmişlerdir. Çalışmada, ortam titreşim testleri sonuçlarına göre sonlu eleman modeli kalibre edilerek köprülerin deprem analizi yapılmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Aras vd. [13], tarihi bir sarayın modal parametrelerinin belirlenmesinde, oluşturdukları nümerik modeli doğrulamak için ortam titreşim testlerini kullanmışlardır. Çalışmada deneysel sonuçlar ile nümerik model arasında karşılaştırma yapılmıştır.

Ramos vd. [14], 2 kompleks tarihi yapıda oluşacak hasarların önceden tanımlanması amacıyla operasyonel modal analiz uygulamışlardır.

D'Ambrisi vd. [15], sismik etkiler nedeniyle hasar almış 2 tarihi kulenin performans değerlendirmesi için dinamik parametrelerinin tahmininde operasyonel modal analiz yöntemini kullanmıştır. Çalışmada, ortam titreşim testleri ile kulelerin doğrusal olmayan statik ve dinamik analizi yapılarak sismik değerlendirmeleri sunulmuştur.

Votsis vd. [16], 2 adet tarihi anıtı ele alarak ortam titreşim testleri ile sadece tepkiye göre yapıların modal parametrelerini tanımlamışlardır. Oluşturdukları nümerik sonlu eleman modelini deneysel çalışma sonuçları ile iyileştirerek yapıların sismik değerlendirmelerini yapmışlardır.

Gentile ve Saisi [17], tarihi bir çan kulesi ve çelik kemerli köprüyü ele alarak dinamik özelliklerin tahmininde uyarılma etkisini araştırmıştır. Çan kulesinde önce rüzgar etkisi ile daha sonra da çanlar çalınarak farklı uyarma seviyeleri yaratılarak frekans ve mod şekilleri incelenmiştir.

Osmancıklı vd. [18], Ayasofya üzerinde yapılan restorasyon çalışmalarının yapının dinamik karakteristiklerine etkisini ortam titreşim testleri ile araştırmıştır. Çalışmada, restorasyon öncesi ve sonrasında uygulanan tam ölçekli ortam titreşim testleri ile dinamik parametreler karşılaştırılmıştır.

Pau ve Vestroni [19], operasyonel modal analiz yöntemiyle tarihi bir anıtın trafik kaynaklı titreşim ölçümlerini yaparak dinamik özelliklerini tahmin ettikten sonra sonlu elemanlar modelini iyileştirmiştir.

Foti vd. [20], tarihi bir kulenin dinamik parametrelerinin tanımlanmasında ortam titreşim testlerini kullanarak sonlu eleman modelini kalibre etmiştir.

Bayraktar vd. [21], 8 adet tarihi kemerli köprüyü ele alarak ortam titreşim testleri uygulamıştır. Çalışmada, söz konusu yapıların dinamik parametrelerinin teorik ve nümerik olarak elde edilmesinin zorluğuna vurgu yapılarak yapıların modal parametreleri deneysel ölçümlerle tanımlanmıştır. Sonuç olarak ise, benzer köprülerin ilk periyotları ve sönüm oranları için bir formül önerilmiştir.

Ceroni vd. [22], tarihi bir sarayı ele alarak operasyonel modal analiz uygulamışlardır. Çalışmada, yapı-temel etkileşiminin de dikkate alındığı 3 boyutlu nümerik sonlu elemanlar analizi ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak zemin altı durumların yapının dinamik davranışına etkisi incelenmiştir.

Lacanna vd. [23], tarihi bir vaftizhanenin dinamik davranışını belirlemek için rüzgar, trafik ve insan aktiviteleri gibi etkilerle ortam titreşim testleri uygulamışlardır. Çalışmada, geliştirilmiş frekans ortamında ayırıştırma yöntemi üzerinde durularak modal parametrelerin söz konusu yöntemle bulunması ele alınmıştır.

Altunışık vd. [24], deneysel ve nümerik metotlarla Zağanos kalesinin yapısal davranışını konu almıştır. Deneysel olarak, operasyonel modal analiz ile kalenin dinamik parametreleri belirlenmiştir. Kalenin nümerik sonlu elemanlar modeli ANSYS ile oluşturulmuştur. Nümerik model ile frekans ve mod şekilleri elde edilip zaman tanım alanında sismik analiz yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlar karşılaştırılarak nümerik model kalibre edilmiştir. Sonuç olarak asal gerilmeler bulunmuştur ve bazı yığma elemanlardaki çekme ve basınç gerilmelerinin yönetmeliklerce belirlenen sınır değerleri aştığı görülmüştür.

1.2 Tezin Amacı

Tarihi yapıların yapısal analizleri konusu, son zamanlarda artan bir ivme ile ilgi odağı haline gelmiştir. Tez kapsamında, ele alınan bir tarihi binanın yapısal davranışının

ortaya konması ve mevcut hasar durumlarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Öncelikli amacın yapısal çözümleme olmasının yanında, ele alınan tarihi bina çok büyük olduğundan ve çok fazla duvar elemanı içerdiğinden, kompleks hesaplamalar ve ağır modelleme işlemleri kullanılmadan göreceli olarak daha basit kabul edilen doğrusal elastik analiz yöntemi ve makro modelleme tekniği kullanılarak gerçekçi sonuçlara ulaşılması da hedeflenmiştir. Tarihi yığma yapılarda, kesin olarak hesaba yansıtılamayan mevcut hasar durumları ve malzeme karakteristikleri gibi faktörler, nümerik yapısal analizlerin gerçekten uzaklaşan sonuçlar vermesine neden olmaktadır. Bu nedenle çalışmada, nümerik analizin deneysel olarak doğrulanabilmesi adına operasyonel modal analiz yöntemi kullanılmıştır. Binanın dinamik parametrelerinin OMA yöntemi ile elde edilmesi ve elde edilen parametrelerin nümerik sonuçlarla kıyaslanarak, nümerik modelin doğrulanması ile mevcut bina belirsizliklerinin olabildiğince giderilmesi hedeflenerek gerçeğe en yakın yapısal analizin ortaya konması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

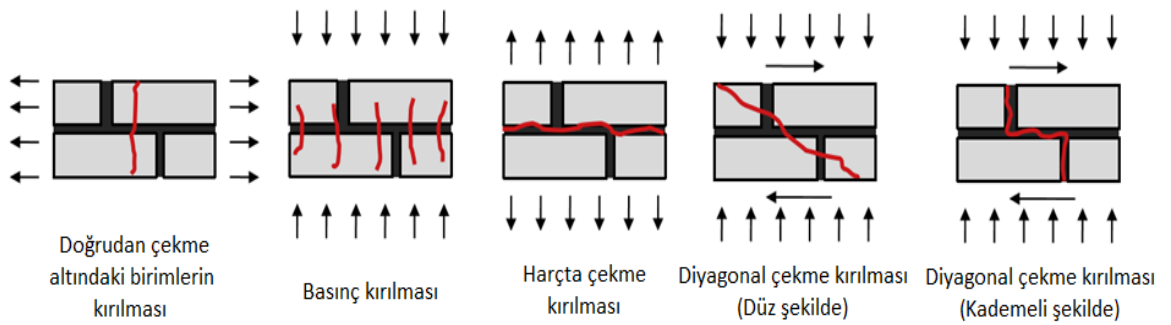
Tarihi yığma yapıların her biri kendine has özelliklere sahip olduğundan, ele alınan her yapı özgün yapısal sonuçlar vermektedir. Tarihi yapılarda, heterojen malzeme yapısı ve veri eksiklikleri nedeniyle betonarme veya çelik yapılardaki gibi sistemleşen pratik çözümlemeler birçok zaman mümkün değildir ve bu yüzden farklı modelleme ve farklı analiz yöntemleri ile farklı yollar izlenerek çözümlemeler yapılmaktadır. Gerçeğe en yakın yapısal analizler, doğrusal olmayan hesaplamalar ve mikro modelleme yöntemleri ile elde edilebilse de söz konusu yöntemler fazla maliyet ve efor gerektiğinden özellikle büyük yapıların çözümlerinde oldukça önemli zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu nedenle, özellikle büyük yapıların analizlerinde, doğrusal elastik analizler ve makro modellemeler kullanarak gerçekçi sonuçlara ulaşabilmek büyük önem arz etmektedir. Operasyonel modal analiz (OMA) konulu literatürdeki çalışmalar incelenirse, çoğunlukla kule, kemer, köprü gibi yapıların ele alındığı görülmektedir. Kompleks ve büyük tarihi yapıların dinamik parametrelerinin tahmin edilerek yapısal analizlerinin yapıldığı çalışmalara çok az rastlanmaktadır. Yapılan çalışmada, tarihi taş kışla doğrusal elastik analiz ve makro modelleme ile çözülerek deneysel OMA verileriyle desteklenmiş

ve oldukça gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen gerçekçi sonuçlar, kültürel mirasın önemli parçası olan tarihi bir binanın yapısal davranışının ortaya konmasını sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında, binanın herhangi bir depremdeki muhtemel davranışı ve kritik bölgeleri belirtilebilmiştir. Yapılan öngörüler ile söz konusu kritik kesitler güçlendirme çalışmaları için ele alınabilir veya mevcut elastik hesap ile deneysel veriler ışığında yapı daha detaylı modelleme ve analiz teknikleriyle(doğrusal olmayan analiz-mikro modelleme teknikleri vs.) tekrar ele alınarak, tez kapsamında belirtilen analiz sonuçlarının yardımıyla süre-efor maliyetinin çok fazla düşürüldüğü daha detaylı çalışmalar gerçekleştirilebilir.



YIĞMA YAPI DAVRANIŞI VE YÜK AKTARIMI

Yığma yapılar düşey ve yatay yükleri, tuğla, taş blok, kerpiç gibi çeşitli malzemelerle üst üste yığılan birimler ve birimlerinin birbirine harçlarla bağlandığı duvarlarla taşırlar. Gevrek ve sünekliği az malzemeler ile inşa edildikleri için yığma yapılar düşük periyotlu rijit yapılardır ve sünek davranıştan yoksundurlar. Yığma yapıların statik ve dinamik yükler altındaki dayanımı, duvarların geometrisine, kullanılan malzemelerin özelliklerine, yığma blokların birleştirilme şekline, yapının maruz kaldığı dış etkilere ve zemin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Yığma yapıların gerilme dağılımları ve davranışlarının açıklanmasında malzeme heterojenliği önemli rol oynamaktadır. Yüklenme şekli ve yığma elemanlarda oluşan gerilmelere bağlı olarak yığma yapılarda karşılaşılabilecek muhtemel hasar şekilleri Şekil 2.1’de özetlenmiştir [25].



Şekil 2. 1 Yığma yapı hasar şekilleri [25]

Yığma duvarların karmaşık yük aktarım mekanizmalarının ve yük aktarımına etki eden faktörlerin açıklanması amacıyla, çeşitli analiz ve modelleme yöntemleri kullanılarak

yapıların doğrusal veya doğrusal olmayan davranışları birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır.

Yığma yapılarda dayanımın önemli bir ölçüsü olan yatay yük taşıma kapasitesi, Mebarki vd. [26] tarafından, farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip 20 tip duvar imal edilerek incelenmiştir. Haach vd. [27] ise yatay dayanımı, düzlem içi yüklenme etkisini de dikkate alarak, ön sıkışma seviyesi, en-boy oranı, düşey ve yatay donatı oranları ve farklı sınır koşulları gibi parametrelere bağlı olarak da ele almıştır.

Yığma yapıların taşıma kapasitelerinin belirlenmesinde, kesme dayanımının yanı sıra normal kuvvet, basınç ve eğilme etkilerinin de önemli rol oynadığı bilinmektedir. Zimmermann vd. [28], mevcut tarihi yığma binaların taşıma kapasitelerinin önemine vurgu yaparak, kesme kuvveti ve normal kuvvetler altında nümerik çalışmalar yapmıştır. Wang vd. [29] ise, tuğla yığma duvarlarda kayma dayanımı, basınç ve eğilme davranışlarını incelemiştir. Normal kuvvetin kayma davranışına etkisini ve nemin dayanımdaki rolünü de inceleyerek deneysel çalışmalar yapmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, teorik veriler ve Eurocode ile karşılaştırılmıştır. Vasconcelos ve Lourenço [30], literatürde taş yığma yapılar ile ilgili yeterli sayıda çalışma bulunmadığını ifade ederek, taş yığma duvarlarda kesme ve basınç dayanımını ele almıştır.

Yığma yapılar, maruz kaldıkları düzlem içi ve düzlem dışı zorlanmalar sebebiyle önemli hasarlar almaktadır. Bu zorlanmalar yapı stabilitesini tehlikeye sokan mertebelere ulaşabilmekte ve en sonunda yapılar göçebilmektedir. Najafgholipour vd. [31], [32], depremde yığma yapıların maruz kaldıkları yer ivmeleri sonucunda, duvarların düzlem içi ve düzlem dışı kuvvetlerle zorlandığını belirtmiştir ancak bu zorlanmaların birbirini de etkilediğini ifade ederek, düzlem içi ve dışı yüklenmelerin birbirinden ayrı değerlendirilmesinin yanı sıra, birbiri ile etkileşim içinde olarak da değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Bu amaçla, düzlem içi ve dışı yüklemeler ile, bu yüklemelerin birbiri ile etkileşimini de hesaba katarak nümerik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Agnihotri vd. [33] ise, düzlem içi kuvvetler sebebiyle hasar görmüş duvarların stabilitesindeki belirleyici faktörün düzlem dışı dayanım olduğunu belirterek değişik en-boy oranı ve narinlikteki yığma duvarlarda düzlem içi, düzlem dışı ve kombine düzlem

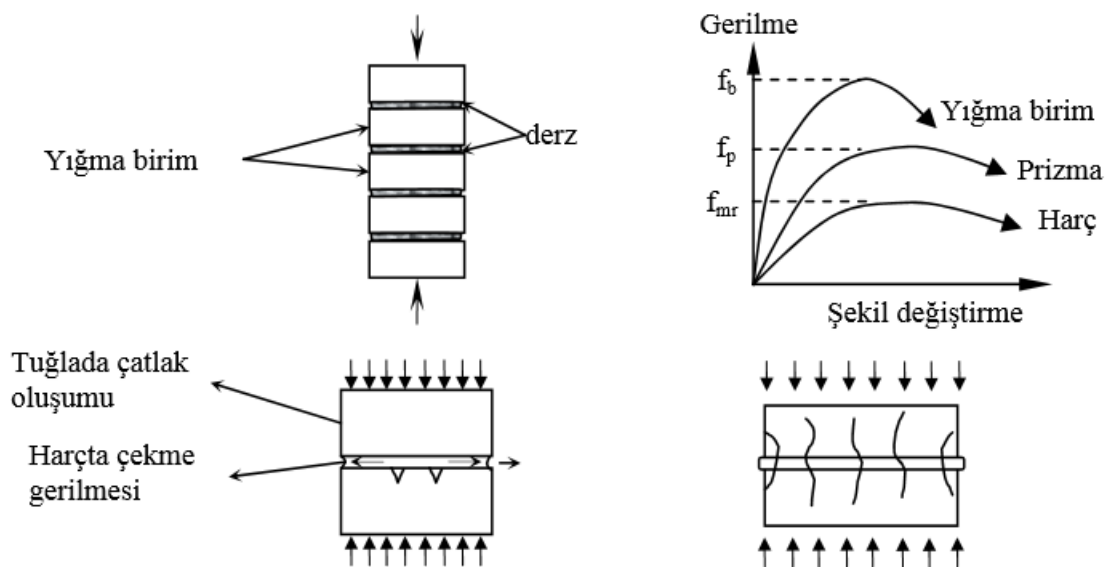
içi-dışı yüklemeler altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Dhanasekar [34] ise, yığma yapıların düzlem içi/düzlem dışı davranışları ve kesme performanslarını donatılı veya donatısız olmalarına göre incelemiştir.

2.1 Statik Yükler Altındaki Davranış

Statik yükler altındaki yapılarda basınç, çekme, eğilme ve kayma etkileri oluşur. Meydana gelen etkilere bağlı olarak yığma duvarlar farklı davranışlar sergiler ve bu davranışlar yapının kaderini belirler. Duvarların izotrop ve heterojen olmaması, çeşitli etkiler altındaki yığma elemanların davranışlarının öncelikle harç ve birim olarak ayrı şekilde, sonrasında da tüm duvarın bütün davranışı şeklinde yorumlanmasını gerektirmektedir.

2.1.1 Eksenel Basınç ve Duvar Davranışı

Yığma birimlerin maruz kaldığı eksenel basınç etkileri harçta yatay doğrultuda çekme kuvvetleri oluşturur. Harç, maruz kaldığı çekme kuvvetleri nedeniyle deformasyona uğrar ve bu deformasyon sebebiyle de yığma birimlerde düşey yönde çatlaklar oluşur. Yığma duvar numunelerine uygulanan eksenel basınç etkisi Şekil 2.2’de gösterilmiştir [35], [36].

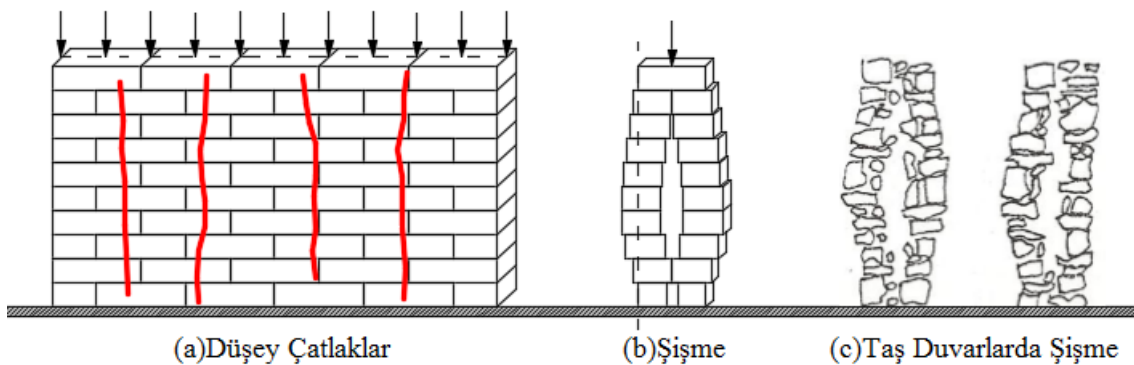


Şekil 2. 2 Eksenel basınç altındaki yığma numunenin davranışı [35], [36]

Yığma yapıların davranışlarında, taşıyıcı duvar elemanlarının basınç dayanımı oldukça önemlidir. Çünkü duvarları oluşturan blokların çekme dayanımları çok düşüktür. Yığma yapıların duvar basınç dayanımları, duvarı oluşturan blokların ve harcın basınç dayanımına bağlıdır. Harç dayanımının artırılması duvar basınç dayanımına olumlu etki etmektedir. Ancak yapılan çalışmalar, bloklardan daha yüksek dayanımlı harçların kullanılmasıyla duvar basınç dayanımında önemli artışlar olmadığını göstermiştir. Fakat aynı harç dayanımında, basınç dayanımları yüksek blokların kullanılması duvar dayanımını önemli ölçüde arttırmaktadır. Duvar basınç dayanımını arttıran diğer faktörler ise derz kalınlığı ve bloklardaki boşluk oranlarının azalmasıdır [37].

Yığma yapıların duvarları, maruz kaldığı geçici veya kalıcı düşey yükler karşısında yüksek dayanıma sahiptir ve bu durumda duvarlar oldukça iyi mekanik özellikler sergilemektedir. Yığma yapılarda tüm duvarlar taşıyıcı görev üstlendiğinden düşey yüklerin oluşturduğu gerilmeler düşük olmakta ve duvar kesitlerinde çok yüksek basınç gerilmeleri genellikle oluşmamaktadır [38].

Basınç dayanımı ve düşey yüklere bağlı olarak yığma duvarlarda çeşitli hasar şekilleri görülmektedir. Düşey yükler altındaki kırılma çatlakları Şekil 2.3(a)'da gösterildiği gibi düşey yönde oluşur ve duvar düzlemine dik şekilde ilerler. Düşey basınç altında, Şekil 2.3(b)'deki gibi duvarlarda şişme gözlemlenebilir. Deprem kuvvetleri nedeniyle çatlayan duvarlar şişmeye daha elverişlidir. Düşey yüklerden kaynaklanan şişme durumları oldukça ağır hasarlardan sayılabilir. Şişme hasarları Şekil 2.3(c)'deki gibi duvarın bir tarafında veya iki tarafında birden görülebilir [39].



Şekil 2. 3 Düşey yükler altında oluşan hasar örnekleri [39]

Şişme hasarlarının dışında düşey yükler altında yığma elemanlarda ezilmeler oluşabilir. Ezilme, malzemenin basınç kapasitesine ulaşması durumunda ortaya çıkar ve yüksek gerilmelerde görülür. Gerilmeler yükseldikçe gerilme yönüne paralel çatlaklar oluşur. Yanal baskı olmaması durumunda malzemenin şişmesine kadar olan süreçte çatlaklar ilerleyebilir ve parçalanmalar görülebilir. Ezilme hasarları uyarı vermeden ortaya çıkar ve yapının göçmesine yol açabileceği için oldukça tehlikelidir. Şekil 2.4’de örnek bir ezilme hasarı verilmiştir [40], [41].



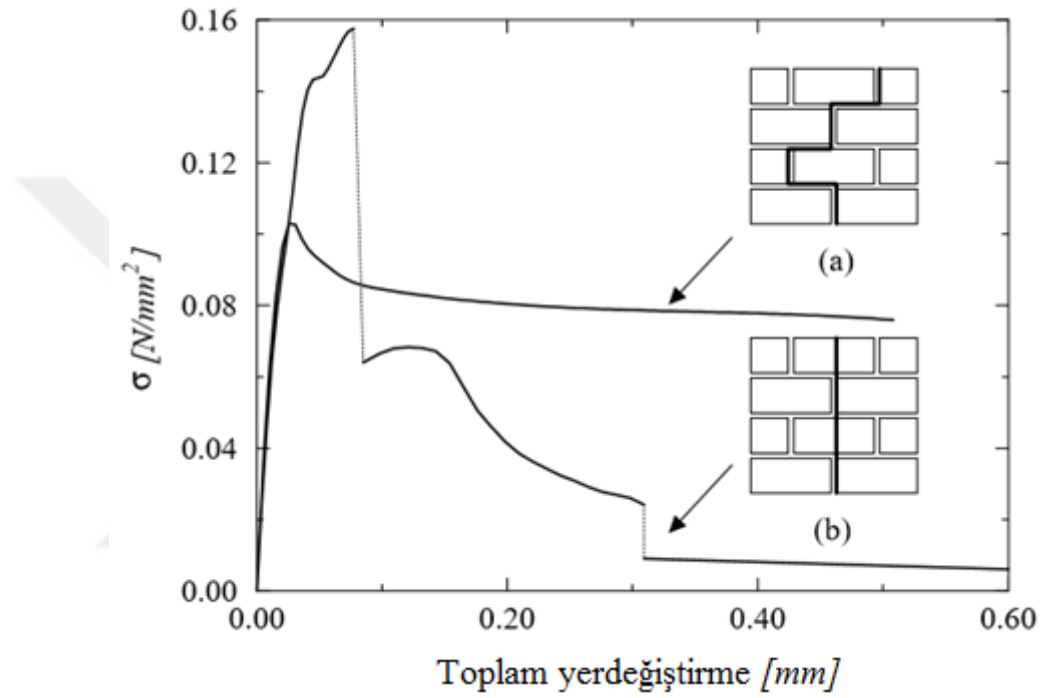
Şekil 2. 4 Taş ayakta oluşan örnek bir ezilme hasarı [40], [41]

Malzemenin basınç dayanımı ve basınç gerilmelerinden ayrı olarak, duvarlara açılan kapı ve pencere boşlukları da ezilmelere sebep olabilir. Çünkü bu durumda duvar rijitlikleri azaltılmaktadır. Nem, donma-çözülme etkileri, doğal ve yapay tahribatlar gibi dış etkiler sebebiyle yığma yapı elemanlarının dayanımlarının azalması da ezilmeye yol açabilecek nedenlerdendir.

2.1.2 Eksenel Çekme ve Duvar Davranışı

Yığma elemanların çekme dayanımı basınç dayanımına göre oldukça zayıftır. Eksenel çekmede duvarlarda iki farklı şekilde kırılma gözlemlenebilir. İlk kırılma şeklinde çatlaklar, yığma birimleri kesmeden harç boyunca zigzaglar çizerek ilerler. Bu oluşumda

birim ile harç arasındaki aderans çok düşüktür. İkinci kırılma şeklinde ise çatlak, birim ve harcı beraber keserek neredeyse dik şekilde ilerler. Lourenço çalışmasında [42], iki kırılma şekline göre hazırlanan numuneler üzerinde elde edilen gerilme değerlerine yer vermiştir (Şekil 2.5). Aşağıda Şekil 2.5a'da görülen numune, zigzag şekilli kırılmanın gözlemlendiği numunedir. Burada diğer kırılma şekline göre daha az gerilme meydana gelmiştir ancak Şekil 2.5b'de görülen gerilme değerleri daha yüksektir çünkü burada dayanımı daha yüksek olan yığma birimlerin de çatlaması söz konusudur [35], [42].

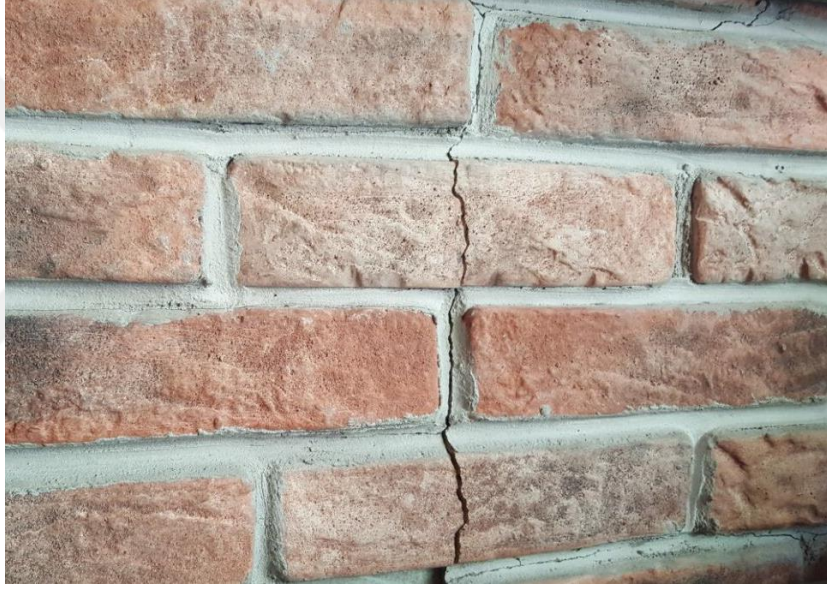


Şekil 2. 5 Eksenel çekmede gerilme-şekil değiştirme diyagramları, (a)Harç boyunca kademeli çatlaklar, (b) Düşey çatlaklar [35], [42]

Şekil 2.6a'da çatlaklar birimleri kesememiş ve harç boyunca ilerlemiştir ancak Şekil 2.6b'de daha büyük gerilmeler ile birimler de kesilerek neredeyse dik ilerleyen çatlaklar oluşmuştur.



(a)

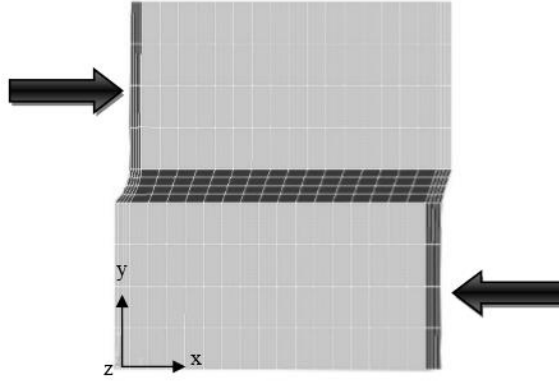


(b)

Şekil 2. 6 (a) Harç boyunca ilerleyen kademeli çatlaklar, (b) Düşey yönde gelişen çatlaklar

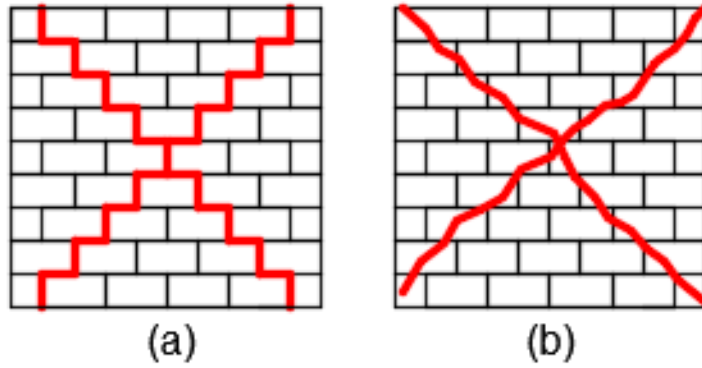
2.1.3 Kesme Etkisi ve Duvar Davranışı

Aynı ekseninde oluşan tersinir yüklemeler yığma duvarlarda kesme etkileri oluşturur. Kesme etkilerine bağlı olarak gelişen deformasyonlar yığma yapıların dayanımının ölçüsünde ana parametrelerdendir. Kesme etkileri Şekil 2.7'deki gibi oluşur ve duvarlarda çeşitli çatlak tipleri görülür [35].



Şekil 2. 7 Kesme etkisinde yığmaprizma davranışı [35]

Yığma yapılarda en çok karşılaşılan çatlak şekillerinden biri olan eğik çekme çatlaklarının oluşumunda harç dayanımı önemli rol oynamaktadır. Harç dayanımı birimlerin dayanımından daha yüksek ise çatlak birimleri de keserek ilerler ancak harç birimlerden daha düşük dayanımlıysa çatlak derzlerden geçer (Şekil2.8).



Şekil 2. 8 Diyagonal şekilli çatlak oluşumu

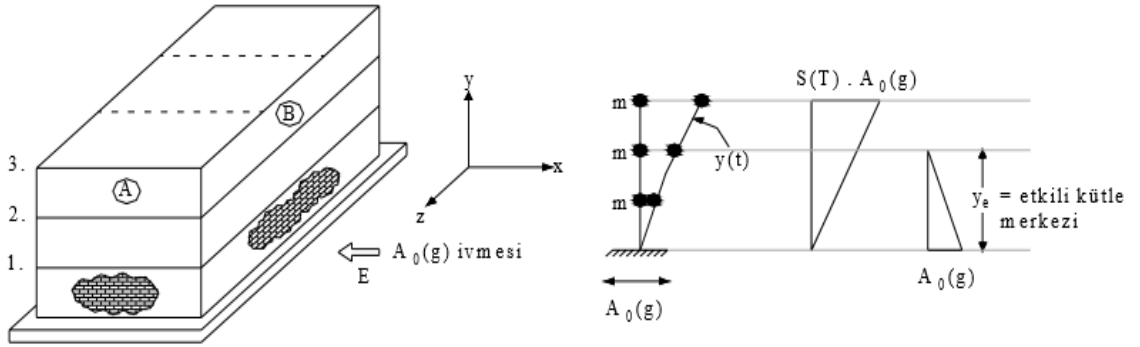
2.2 Dinamik Yükler Altındaki Davranış

Yığma yapıların maruz kaldığı yatay yükler düşünüldüğünde ilk akla gelen kuşkusuz depremlerdir. Yığma yapıların deprem davranışı, betonarme ve çelik yapılara göre çok daha karmaşıktır. Dinamik etkiler karşısında sergiledikleri mekanik özellikler, gerek malzeme özellikleri gerekse de taşıyıcılık ve yük aktarımı nedeniyle kendi içerisinde dahi farklılıklar göstermektedir.

Yığma yapıların davranışlarında en az basınç dayanımı kadar önemli olan diğer faktör kesme dayanımıdır. Yığma yapılarda çekme dayanımı çok düşük olduğundan deprem durumunda maruz kalacakları düzlemine dik ve düzlemleri doğrultusundaki yatay kuvvetler karşısındaki eğilme dayanımları çok zayıftır. Depremler duvarlarda kesme

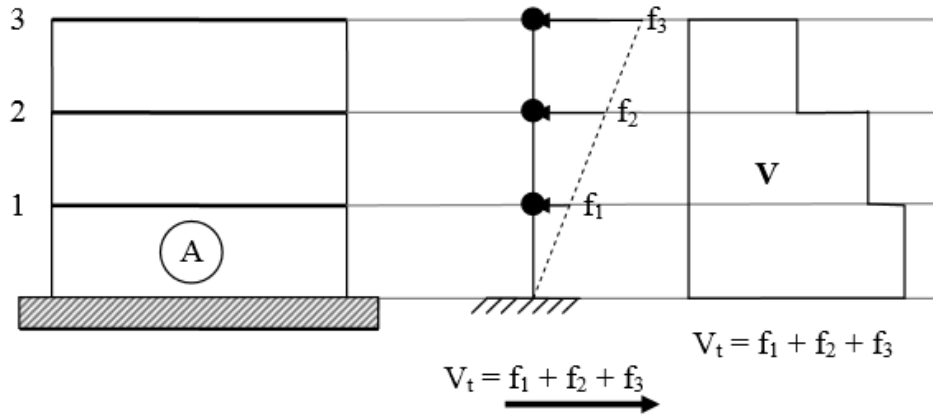
gerilmeleri oluşturur, gevrek duvar elemanları kesme kuvvetine karşı genelde daha zayıf olan harç kısımlarının dayanımı kadar direnebilir. Harç dayanımı yüksek ise birimlerin çekme dayanımı, duvarın çekme dayanımını belirleyen parametre olacaktır. Kesme kuvvetinin dayanım sınırlarını aşması ile kesme çatlakları oluşur ve yük aktarılamaz hale gelir. Dolayısıyla, yapının deprem dayanımının ölçüsü olarak duvarların kesme kuvvetine karşı dayanımı baz alınabilir.

Deprem durumunda yığma bina, 1.moduna bağlı olarak ötelenme yapar, $y(t)$. Bu ötelenme ile beraber temelden çatıya doğru bir ivme dağılımı oluşur. Deprem yönetmeliklerine göre, bu ivme dağılımı doğrusaldır, ancak temel kotunda ivme değeri sıfır değil, $A_0(g)$ olacaktır. Deprem yarattığı zemin hareketi ile, yapı ağırlığı ve yapının doğal periyoduna bağlı olarak deprem kuvvetleri oluşur. Deprem kuvvetlerinin kat düzeylerinde toplanan kat kütlelerine etkidiği kabulü yapılır ve bu kütlelere tekabül eden ivmelere bağlı olarak deprem kuvveti zeminden tepe noktasına kadar Şekil 2.9'da gösterildiği gibi ters üçgen şekilde dağılır [43].

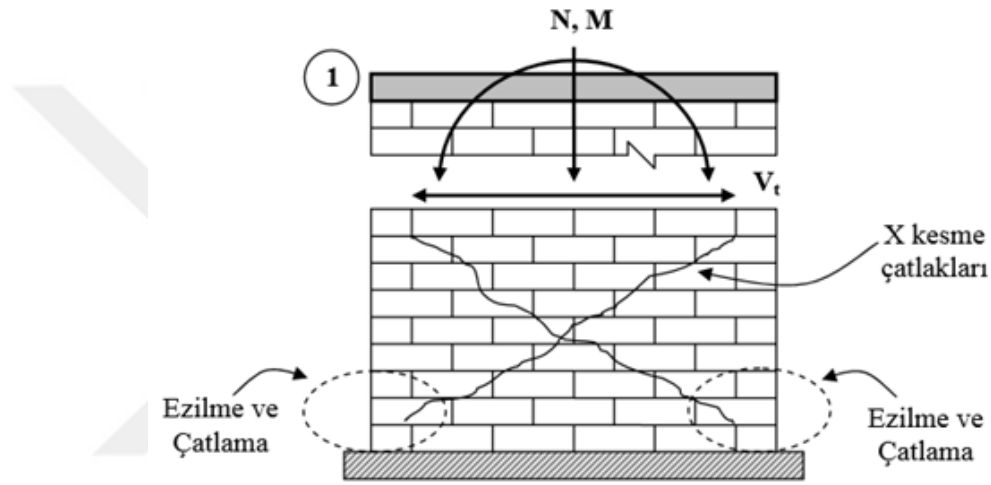


Şekil 2. 9 Yığma binanın dinamik davranışı [43]

Bu durumda A duvarı düzleminde, deprem doğrultusuna bağlı olarak Şekil 2.10'da gösterildiği gibi, f_1 , f_2 ve f_3 kat deprem kuvvetleri ve bu kuvvetlere bağlı kesme kuvvetleri oluşur. Dinamik etkiler altında A duvarının en çok zorlandığı kısım, temelin üzeri olarak tanımlayabileceğimiz en alt bölümüdür. A duvarı en alt kısımda maksimum deprem etkilerine ve kesme kuvvetlerine maruz kalır. Düzlem içi yüklenen A duvarında bu durumda oluşan etkiler Şekil 2.11'de verilmiştir [43].

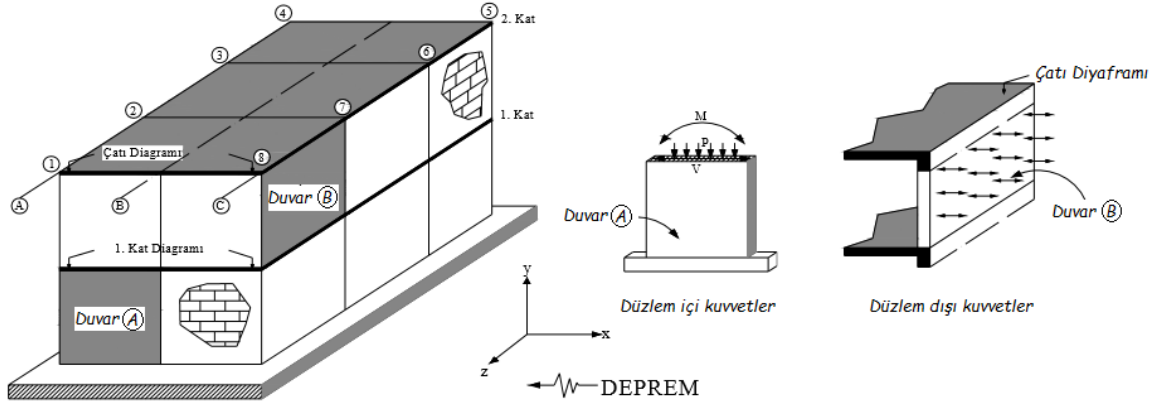


Şekil 2. 10 A Duvarı üzerinde oluşan deprem kuvvetleri ve kesme kuvvet diyagramı [43]



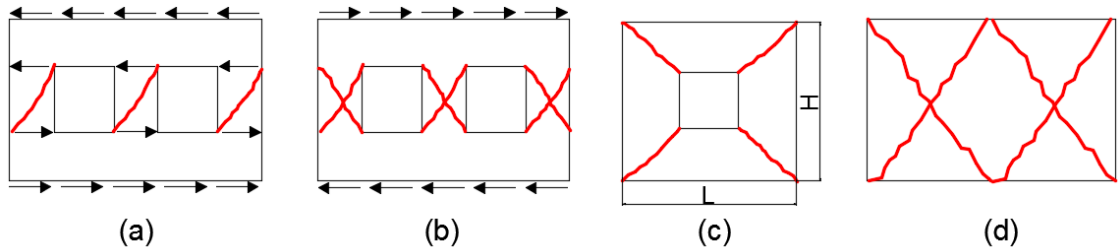
Şekil 2. 11 Düzlem içi deprem zorlamaları ve etkileri [43]

Deprem doğrultusuna bağlı olarak, X-yönü depreminde, 1. moduna göre x yönünde ötelenme yapan yığma yapıda, 2. ve 3. katlar arasında yer alan B duvarı düzlemine dik yüklemelere maruz kalır. X yönü depremi B duvarında, x yönünde ivmeler ve ivmelere bağlı olarak da x yönünde sismik kuvvetler oluşturur. Bu durumda (a) duvarı düzlem içi tersinir kesme kuvvetlerine ve momentlere maruz kalır. B duvarının davranışı Şekil 2.12'de görüldüğü üzere A duvarından farklı olacaktır çünkü B duvarı deprem etkilerine düzlemine dik doğrultuda direnmektedir. (B) duvarında düzlemine dik yönde gelen kuvvetler nedeniyle düzlem dışı sehimler oluşur. Deprem kuvvetlerinin büyüklüğü ve duvar rijitliğine bağlı olarak, dayanımın üzerindeki düzlem dışı etkilere maruz kalan duvarlarda kırılmalar meydana gelir. Çatı düzeyindeki kırılmaların sonucunda kat döşemesi taşınamaz hale gelir ve çökme gerçekleşir [43].



Şekil 2. 12 Depreme maruz yığma duvarların düzlem içi ve dışı yüklenmesi [43]

Döşemelerin rijit diyafram olarak çalıştığı sistemlerde Şekil 2.12’de görülen yük aktarımı ile yatay yükler rijitlikleri oranında duvar elemanlarına dağılır. Oluşan çekme gerilmeleri ile duvar elemanlarında çatlaklar meydana gelir (Şekil 2.13a). Deprem yüklerinin tersinir olması, ilk çatlaklara dik yönde de çatlakların oluşmasına neden olur. Sonuç olarak duvar elemanlarında, düşey gerilmeler az ise çatlaklar arasında 90 derece olan 45 derece eğimli X şeklinde eğik çekme çatlakları görülür (Şekil 2.13b). Çatlakların yeri, açısı ve miktarı, malzemelerin özellikleri, deprem etkisi, duvardaki boşluk miktarı ve yerlerine göre değişkenlik gösterir. Düzlemi kareye yakın boyutlara sahip olan duvarlarda bulunan boşluk yerine göre duvar ayrı bölümler halinde davranmadan bir bütün cephe davranışı göstererek köşegen şekilli çatlaklar oluşturabilir (Şekil 2.13c). Boşluk bulunmayan tam dolu duvarlarda ise duvar rijitliğine bağlı olarak Şekil 2.14d’deki gibi birden fazla çekme çatlağı oluştuğu gözlemlenebilir [44].



Şekil 2. 13 Yığma yapı duvarlarında çatlak oluşumu [44]

Şekil 2.14’de, Simav depreminde Halil Ağa camisinde oluşan X şekilli çatlaklar, kesme etkileriyle oluşan deprem hasarlarına örnek olarak gösterilebilir [40], [45].



Şekil 2. 14 Depremde oluşan kesme çatlakları [40], [45]

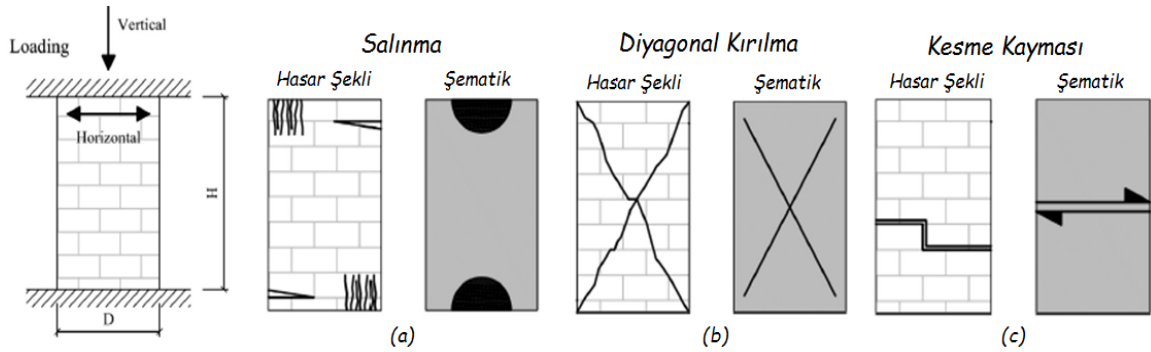
Yığma elemanların kesme davranışında ve çatlağın oluşma şeklinde en önemli rolü normal kuvvet ve kayma gerilmeleri arasındaki ilişki oynamaktadır. Belli bir seviyenin üzerindeki sıkışma gerilmelerinde kesme dayanımı azalır ve birimlerde bileşik kesme-ayırılma veya sadece ayrılma şeklinde hasarlar oluşur. Normal kuvvet gerilmelerinin artması, birimlerin kaymasıyla oluşan harç kesme kuvvetlerine karşı dayanımın artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, çok yüksek normal gerilmeler altında olmayan yığma duvarların kesme dayanımı, harcın doğrusal olmayan davranışı ihmal edilirse Coulomb kriterine göre sürtünme direncine bağlı olarak;

$$\tau = \tau_0 + \mu \sigma \quad (2.1)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Burada τ_0 , düşey gerilmelerin olmadığı genellikle kohezyon ile ifade edilen durumdaki kesme dayanımı, μ sürtünme katsayısı veya sürtünme açısının tanjantı, σ ise düşey gerilmelerdir [30].

Düzlem içi yatay yüklere maruz duvarlarda, duvar narinliği, sınır koşulları, duvar elemanlarının mekanik ve geometrik parametreleri ve düşey yüklemelere bağlı olarak üç tip hasar şekli oluşmaktadır. Salınma çatlaklarında, yatay yükler köşelerde çekme eğilme çatlakları oluşturur ve duvar parçası alt ucundan dönmeye çalışan bir rijit kütle davranışı gösterir (Şekil 2.15a). Bu durumda yığmanın çekme dayanımı genelde ihmal edilir. Düşey yüklerin fazla olması durumunda, çekme çatlakları oluşmaz ve daha fazla

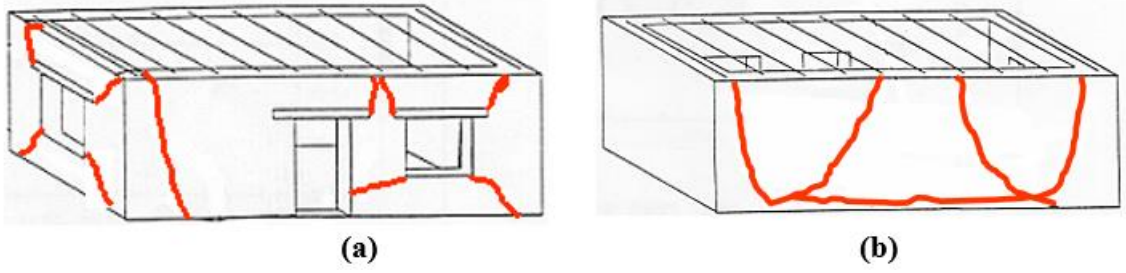
basınç altında kalan köşelerde oluşan ezilmelerle düşey şekilde ilerleyen çatlaklar oluşur. Bu hasar şekli genelde narin duvar parçalarında görülmektedir [25].



Şekil 2. 15 Düzlem içi yüklemde hasar şekilleri [25]

Diyagonal çatlakların oluşumunda malzeme heterojenliğinin rolü büyüktür. Bu çatlak tipinin oluşmasında birden fazla parametre etkin olmaktadır. Çatlak genelde ortada oluşup köşelere yayılır ve hem harç hem yığma birimi keserek ilerleyebilir (Şekil 2.15b). Kesme kayması çatlağının oluşumu genelde yüksekliği az olan duvar elemanlarında görülür. Oluşan çatlak bir harç yatağı boyunca sürekli şekilde görülebilir veya hem düşey derzler hem de yatay derzlerde olacak şekilde kademeli olarak ilerleyebilir (Şekil 2.15c). Bu durumda yatay dayanım, eğilme nedeniyle oluşan çatlaklar da dikkate alınarak Mohr-Coulomb sürtünme kanununa dayanmaktadır [25].

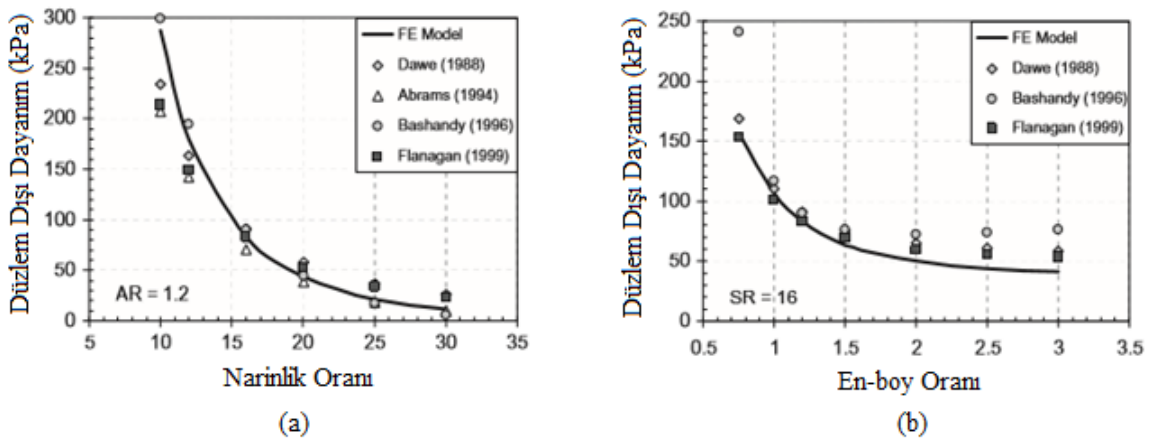
Duvarın düzlemi doğrultusunda etki eden yükler ve oluşan yer değiştirmeler genellikle yapı stabilitesini tehdit etmez. Duvar düzlemi doğrultusundaki sürtünme ve düşey yükler çatlakları sınırlar ancak etkiyen kuvvetler arttıkça çatlaklar büyür. Çatlakların oluşumu periyot ve yer değiştirmelerin artması yapının dinamik karakterlerinin değişmesine neden olur. Tersinir yatay kuvvetler ve yanal hareket devam ettikçe oluşan X şekilli çatlaklar duvar yüzeyindeki rijitliğe etki ederek bağımsız duvar blokları oluşturur ve çatlaklar doğrultusundaki hareket artar. Çatlaklar nedeniyle yapının rijitliği azalır. Çatlaklar gerilme yığılmaları olan bölümlerde meydana gelir. Kapı ve pencere kenarlarında görülen çatlaklar duvar düzlemi doğrultusundaki kayma gerilmeleri veya düzlemine dik eğilme etkileri nedeniyle oluşur. Duvarların düzlemine dik ve düzlemleri doğrultusundaki kuvvetlerin birleşik bir fonksiyonu olarak birleşim bölgelerinde Şekil 2.16a’da gösterildiği gibi diyagonal veya düşey çatlaklar ile ayrılmalar oluşur [46].



Şekil 2. 16 Duvarlarda çatlak oluşumu [46]

Rijit kat döşemesi bulunmayan yığma yapılarda duvarlar zemine ankastre bağlı kirişler gibi davranmaktadır. Bu durumda duvarlar düzlemlerine dik doğrultuda salınır ve yapı köşelerinde hasarlar oluşur. Düzlemine dik kuvvetlere maruz kalan boşluksuz uzun duvarların alt kısımlarında yatay çatlaklar oluşurken, duvar birleşimlerinde ise Şekil 2.16b’de görüldüğü gibi dikey veya diyagonal çatlaklar oluşur. Yığma yapı stabilitesi için en büyük tehlike duvarların düzlem dışı davranarak yaptığı yer değiştirmelerdir. Çatlak oluşumu gözlenen duvarların düzlemine dik kuvvetlere karşı olan dayanımında duvar kalınlığı ve narinliği önemli rol oynamaktadır [2].

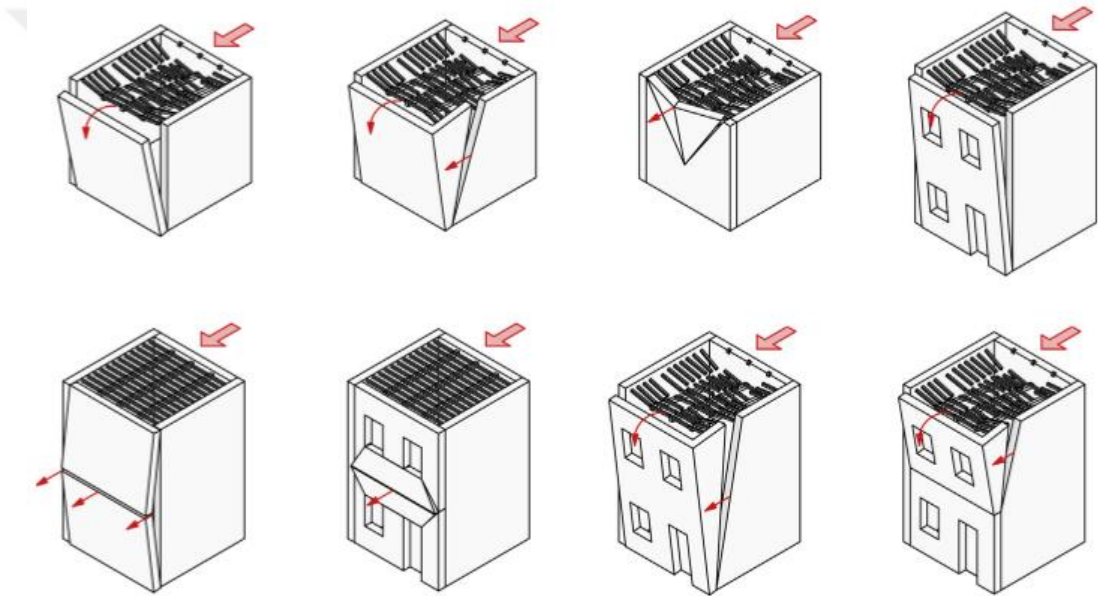
Agnihotri vd, donatısız yığma duvarların, duvar narinliği ve en-boy oranı parametrelerine bağlı düzlem dışı davranışını incelemek amacıyla yaptıkları sonlu elemanlar analizi sonuçlarını literatürdeki diğer benzer konulu çalışmalarla karşılaştırarak Şekil 2.17’de verilen grafiği oluşturmuşlardır [33].



Şekil 2. 17 Değişen narinlik(a) ve en-boy oranlarında(b) önceki çalışmalarla yapılan düzlem dışı davranış karşılaştırması [33]

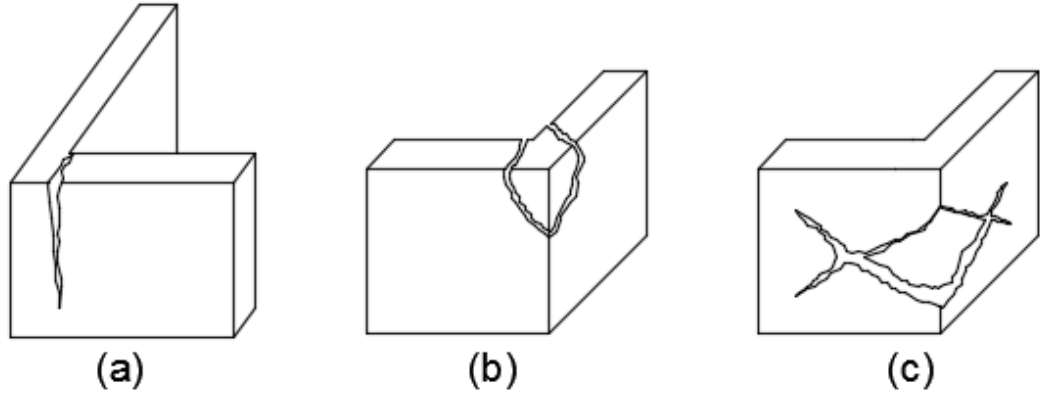
Deprem etkisinde yığma duvarların çekme dayanımlarının düşük olduğu ve bu durumun yapının kaderinin belirlenmesinde en önemli faktör olduğu bilinmektedir.

Harç ve örgü kalitesi ile harcın sağladığı adezyon düzeyi de söz konusu çekme dayanımında önemli rol oynamaktadır. Buna karşılık, harçsız imal edilen yığma yapılar da bulunmaktadır. Bu durumda çekme gerilmelerine sadece yerçekimi ve elemanlar arasındaki sürtünme kuvveti karşı koymaktadır ve yapı göçme kapasitesinde harç adezyonunun katkısı bulunmamaktadır. Yığma yapılarda, deprem durumunda alınan büyük hasarların veya görülen göçme şekillerinin nedeni, duvarların çekme gerilmelerine karşı yeterli dayanımlarının olmamasıdır. Düzlem dışı yüklemde hasar şekilleri ve göçme mekanizmaları Şekil 2.18’de görüldüğü gibi, ortogonal duvarların ayrılması, duvar düzleminde kesme etkileri nedeniyle görülen çatlaklar, ve duvarların devrilmeye başlaması şeklinde ortaya çıkmaktadır [38].



Şekil 2. 18 Yatay kuvvetlere maruz yığma yapılarda görülen göçme mekanizmaları [38]

Depremlerde, duvarlarda her iki yönde de ötelenmeler meydana gelmekte ve sismik kuvvetler etki etmektedir. Bu durum, yığma yapı köşelerinde çeşitli hasarlara yol açabilmektedir. Yığma yapılarda en sık karşılaşılan köşe hasarlarının nedenleri, Şekil 2.19a’daki gibi duvarların köşelerde yeterli örgü düzeniyle imal edilmemiş olması veya malzeme dayanımlarının düşük olması, Şekil 2.19b’deki gibi yapıda yanal yüklerin aktarımına ve yükün tüm sistemde beraber hareketine katkı sağlayacak rijit bir diyafram bulunmaması ve Şekil 2.19c’deki gibi duvarların kesiştiği yerlerde büyük deprem kuvvetlerinin oluşması şeklinde açıklanabilir [44].

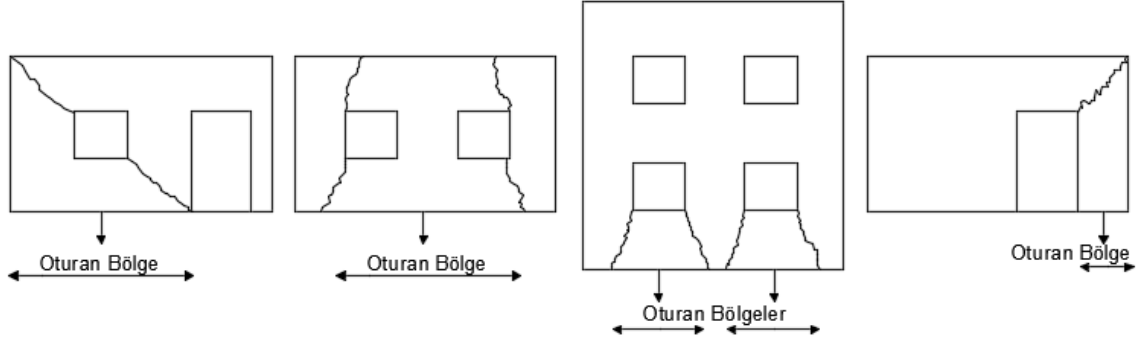


Şekil 2. 19 Duvarlarda oluşan köşe hasarları [44]

2.3 Temel-Zemin Oturmaları ve Yapı Davranışı

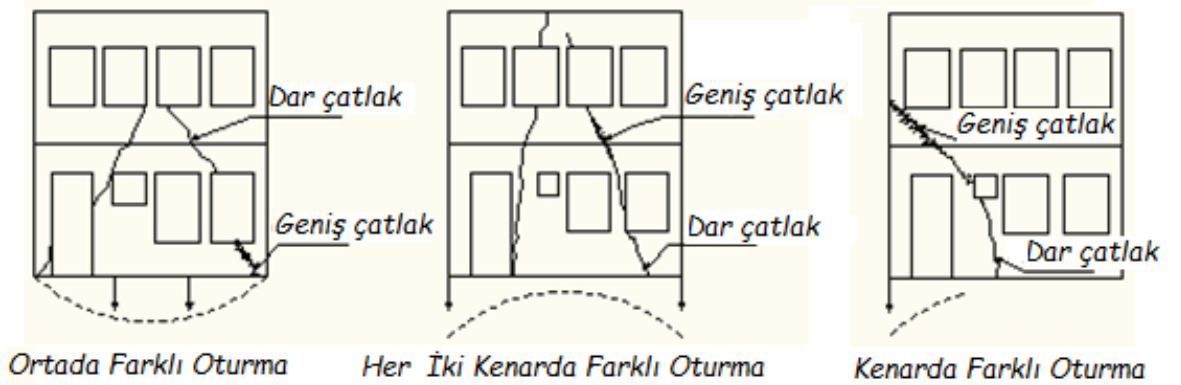
Yığma yapıların temel-zemin davranışlarının analizi ve yorumlanması oldukça zordur. Yapı-temel etkileşimi ve zemin durumu ile yapı davranışının yorumlanmasında, temel tipi ve temel üzerine yerleştirilen nesneler, kullanılan malzemeler, temel boyutları ve şekli, temelin taşıma kapasitesi ve oturmalar, jeolojik altyapı koşulları, yer altı suyunun etkinliği, temelin eğimli oturmasını, zarar görmesini ve dönmesini etkileyen diğer fiziksel ve kimyasal etkiler dikkate alınmalıdır. Literatürde, tarihi-yığma yapıların temel-zemin davranışlarını konu alan çalışmalar, mekanik özellikler ve yapısal davranış konulu çalışmalara kıyasla çok az sayıda bulunmaktadır. Kerisel [47] ve Dardzinska[48], yaptıkları çalışmalarla tarihi binaların temel-zemin analizlerinin gerekliliğini vurgulayarak konu ile alakalı çeşitli öneriler sunmuşlardır [49].

Yığma yapılar, düşey ve yatay yükler dışında zemin oturmalarından kaynaklanan dış etkilere de maruz kalırlar. Zemin oturmaları duvarlarda iç kuvvetler oluşturur ve çatlaklar meydana gelir. Çekme dayanımı çok düşük olan malzemelerle inşa edildiklerinden yığma yapı duvarları temel-zemin oturmalarına karşı çok duyarlıdır. Ağır yapılar olmaları, günümüz temel-zemin bilgileri ve teknolojisinden yoksun olarak inşa edilmeleri nedeniyle, oturmalarından kaynaklanan duvar hasarları yığma yapılarda sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Oturma çatlakları yapı temelinin daha çok oturduğu kısımlar ile diğer kısımlar arasındaki sınırları belirlemektedir. Şekil 2.20’de yığma yapılarda görülen bazı oturma çatlakları yer almaktadır [50].



Şekil 2. 20 Oturmalarından oluşan duvar hasarları [50]

Farklı tip oturmalarla ilgili olarak çatlakların genişlik ve biçimleri Şekil 2.21’de görülmektedir. Bir cephenin orta kısımlarındaki oturma köşelerden fazla ise, temele yakın kısımlarda oluşan oturma çatlakları diğer orta bölgedeki çatlaklara göre daha geniştir. Oturma köşelerinde gerçekleşiyorsa, yukarıya doğru uzanan eğik oturma çatlakları oluşur. Yapı cephesinde bir köşede oturma gerçekleşip diğer köşede oturma olmuyorsa oturmanın olduğu kısmın üst taraflarında oluşan çatlakların daha geniş olması beklenir [51].



Şekil 2. 21 Oturma biçimine göre çatlaklar [51]

Şekil 2.22 ve Şekil 2.23’de bazı oturma çatlakları örnekleri verilmiştir [40], [52], [53].



Şekil 2. 22 Örnek oturma çatlakları [40], [52]



Şekil 2. 23 Örnek oturma çatlakları [40], [53]

Yığma yapılarda oturma hasarlarına yol açan en önemli etkenlerden biri, su kaçakları nedeniyle özellikle killi zeminlerin taşıma gücünün azalmasıdır. Yapılarda kullanılan sömel boyutları ve oluşan düşey yükler karşılaştırılırsa zemine aktarılan gerilmelerin yüksek değerlerde olmadığı görülür. Bu nedenle yapı ağırlığından kaynaklanan oturma hasarları nadir görülür ancak sömellerin oturduğu zeminin taşıma gücünün azalması düşük gerilmeler oluşsa da oturmalara sebep olmaktadır. Kullanma suyu, kalorifer, tesisat suyu kaçakları gibi basınç altındaki sular ile başka yer altı suları, kaçak kanalizasyon suları gibi nedenlerden sömellerin altının boşalması veya sömel

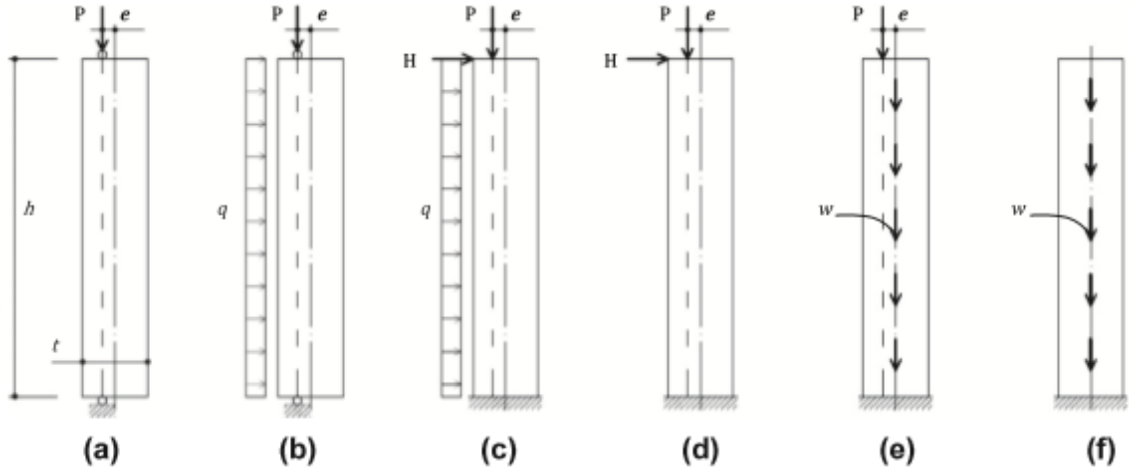
altlarındaki killi zeminlerde gerçekleşen kohezyon azalmaları oturma hasarlarının başlıca nedenlerindendir. Plastisitesi yüksek olan geçirimsiz killi zeminlerde oturma yavaş gerçekleşmektedir ve uzun süre sonra oluşabilmektedir. Oturmaya sebep olan suyun önüne geçilmesinden sonra kil kurumakta ve büzölmeye başlamaktadır. Oturmalar kilin büzölme sürecinde de bir müddet ilerlemektedir. Büzölmeler yaz mevsiminin sonuna kadar artar çünkü bu süreçte zeminin su içeriği kuraklık sebebiyle azalmaktadır. Sonbahar mevsiminin başları su içeriği nedeniyle oturma çatlaklarının en fazla olduğu süreçtir. Bu şekilde, çatlakların mevsimlere ve yağış miktarına bağlı olarak açılıp kapandığı gözlemlenebilmektedir [50].

2.4 Yük Eksantritesi ve Burkulma Davranışı

Mevcut veya yeni inşa edilecek yığma yapılarda, düşey ve yatay yükler altındaki taşıyıcı duvarların burkulma davranışları da dikkate alınmalıdır. Yığma duvarların burkulma durumundaki taşıma kapasitesi, duvarın narinlik oranı, uygulanan yükün eksantritesi, elemanın rijitliği, sınır koşulları ve birim-harç ara yüzünün çekme dayanımına bağlıdır. Narinlik oranı yüksek olan ve eksantrik kuvvetlere maruz kalan yapılarda burkulma davranışı oldukça önemli hale gelmektedir. Eksantrite ve burkulma problemlerine rijit diyaframı bulunmayan yapılarda daha da etkin hale gelmektedir. Ahşap veya çelik döşemelerle inşa edilmiş bu tip yapılarda artan yanal hareketler ve duvarların yatay etkiler karşısındaki düzlem dışı hareketleri nedeniyle burkulma davranışında önemli rol oynayan ek eksantrisiteler oluşmaktadır [54].

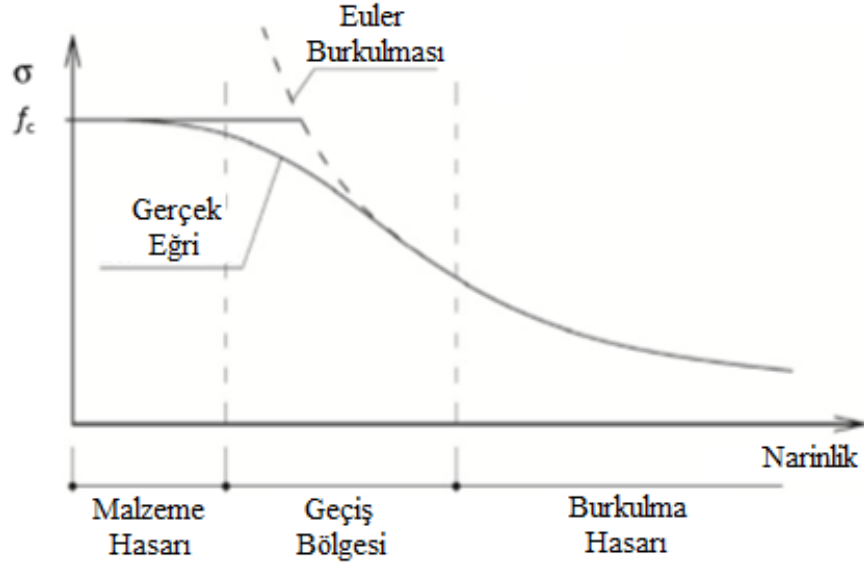
Literatürde değişik narinlik oranları ve yük eksantrisitelerine sahip yığma duvarların eksenel yük altındaki stabilitelerini konu alan çalışmalar bulunmaktadır. Şekil 2.24a'da gösterilen eksantrik düşey yükler altındaki yığma duvarların stabiliteleri Chapman ve Slatford [55] ile De Falco ve Lucchesi [56] tarafından analitik olarak incelenirken, Watstein ve Allen [57] ile Sandoval vd. [58] tarafından deneysel olarak incelenmiştir. Schultz vd. [59] ile Bean vd. [60], Şekil 2.24b'de gösterilen üniform yayılı yatay yükler altındaki burkulma davranışını incelemişlerdir. Ganduscio ve Romano [61], eksantrik düşey yük, üniform yayılı yatay yükler ve tekil yatay yüklerin birlikte etkideği durumlardaki konsol duvarı ele almışlardır (Şekil 2.24c). Romano vd. [62], eksantrik düşey yükler ve tekil yük altındaki konsol duvarların boşta olan ucunun hareketi için

analitik bir yaklaşım önermiştir (Şekil 2.24d). Şekil 2.24e’de gösterilen kendi ağırlığı ve eksantrik düşey yükler etkisindeki konsol duvarın davranışı, La Mendola ve Papia [63], La Mendola [64] ve Mura [65] tarafından incelenmiştir. Şekil 2.24f ile verilen sadece kendi ağırlığına maruz konsol duvarların stabilitesi ise Frish-Fay [66] tarafından ele alınmıştır [54].



Şekil 2. 24 Farklı yazarların farklı koşullarda incelediği burkulma davranışları [54]

Şekil 2.25’de, Morton [67]’un çalışmalarına ait basınç gerilmeleri-narinlik ilişkisini gösteren tipik bir grafik verilmiştir. Burada f_c , yığma duvarın yüklendiği doğrultudaki aksenal olmayan basınç dayanımıdır. Grafik incelenirse, duvar narinlik oranının artmasının duvar basınç dayanımını düşürdüğü görülmektedir. Narinlik oranının az olduğu kısa elemanlarda görülen hasarlar malzemenin ezilmesinden kaynaklanmaktadır ancak narinliğin fazla olduğu elemanlardaki hasarlar burkulma kırılması olarak adlandırılan yatay stabilitenin kaybolması nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Grafikte geçiş bölgesi (transition zone) olarak adlandırılan, malzeme hasarı ve burkulma etkileşimi ile karakterize edilen bir bölge bulunmaktadır. Düşey yük eksantrisitesi duvarın burkulmaya olan eğilimini arttırmaktadır ve bu durumda duvarın yük taşıma kapasitesi önemli miktarda azalmaktadır [68].



Şekil 2. 25 Duvar basınç gerilmesi(σ)-narinlik oranı ilişkisi [67]

Yığma duvarların dayanımlarının açıklanması, malzemelerin düşük çekme gerilmeleri ve doğrusal olmayan davranışları nedeniyle karmaşıktır. Bu nedenle, daha pratik çözümlere ulaşılması amacıyla yığma malzemenin çekme dayanımı Eurocode ve ACI gibi standartların çoğunda ihmal edilmektedir. Bu yaklaşım genel anlamda kabul edilebilir gözükse de, duvarın burkulma davranışındaki göçme yükünde özellikle narinliğin yüksek olduğu durumlarda duvarın çekme dayanımının dikkate alınması gerekmektedir [68].

TARİHİ YAPI MALZEMELERİ

Son yıllarda, mevcut tarihi yığma yapıların analizleri birçok yazarın ilgi odağı haline gelmiştir. Yapılan çalışmalar, herhangi bir yapının gerçeğe en yakın davranışını ortaya koyabilecek analizlerin yapılabilmesinde, yeterli geometrik verilerin elde edilmesinden sonraki ana gerekliliklerin malzeme bilgisi, uygun modelleme ve analiz yönteminin seçimi olduğunu göstermektedir. Malzeme bilgisi ve malzeme parametrelerinin seçimi, yığma yapıların analizleri için büyük önem taşımaktadır çünkü birçok tarihi yapının malzeme karakteristikleri hakkında yeterli veri bulunmamaktadır. Bu nedenle malzeme bilgisinin geliştirilmesi ve malzemelerin daha detaylı incelenmesi gerekmektedir. Bu bölümde, tarihi yapılarda kullanılan yapı malzemeleri açıklanarak, malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde durulacak ve literatürde bulunan bazı örnek çalışmalar sunulacaktır.

3.1 Tarihi Yapı Malzemeleri

Bir yapının (yığma, betonarme, çelik, ahşap...) statik ve dinamik etkiler altındaki davranışında taşıyıcı elemanlarının malzeme özelliklerinin etkisi büyüktür. Yığma yapılarda tüm duvarlar taşıyıcı görev üstlendiğinden ve beton-çelik gibi teknolojik malzemelere oranla yığma yapı duvar malzemelerinde daha karmaşık yapısal davranışlar gözlemlendiğinden malzeme seçimi ve davranışı ayrı bir önem kazanmaktadır. Seçilen malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri, yapı dayanımını ve deprem davranışını doğrudan etkilemektedir. Yapı malzemesi olarak kullanılacak bir elemenda bulunması istenen özellikler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Ağırlıkları az, basınç dayanımları yüksek olmalıdır. Tarihi yapılar ağır yapılardır ve ağır yapılar daha büyük deprem kuvvetlerine maruz kalmaktadır. Tarihi veya çelik-betonarme fark etmeksizin her çeşit yapının hafif olması dayanım ve süneklik açılarından avantaj sağlamaktadır.
- Elastisite modülü düşük olmalıdır. Elastisite modülü malzemenin rijitliği açısından önemlidir. Elastisitesi yüksek olan malzemelerin aynı yük altındaki şekil değiştirmesi daha az olacağından yığma yapıların en büyük dezavantajlarından biri olan sünek davranış özelliği elastisitesi düşük malzemelerde göreceli olarak daha iyi olacaktır.
- Farklı yönlerde farklı dayanım özelliklerine sahip olmamalıdır. Bu durum, özellikle işçilik görmemiş boşluklu doğal yapı malzemelerinde karşılaşılan bir durumdur. Farklı yönlerde farklı mekanik özellikler sergilemesi, malzemenin zayıf kesitler oluşturması anlamına gelir ve taşıyıcılık öngörüsünde de belirsizlikler oluşturur.
- Malzeme, düzgün biçimlerde ve birbirlerine uygun ebatlarda olmalıdır. Bu şekilde oluşturulacak duvarlarda, harç arayüzü birimleri elverişli şekilde bağlayarak daha fazla aderans sağlar. Bu durum, duvarların daha iyi mekanik davranışlar sergilemesine sebep olur ve aynı zamanda harç ekonomisi de sağlanır.
- Dayanıklılığı yüksek olmalıdır. Tarihi yapılar, uzun yıllar boyunca birçok etkiye maruz kalmaktadırlar. Malzemenin bozulması, dayanımın düşmesine neden olmamalıdır. Su emme oranı, geçirgenliği, boşluk oranı, donma çözülme dayanıklılığı gibi faktörler malzeme dayanımını etkilemektedir.
- Hızlı imalata imkan sağlayacak şekilde işlenebilir olmalıdır. Malzemenin kesilebilirliği ve yerleşimi imalat aşamalarında önemli rol oynamaktadır. Kolay ve düşük maliyetle elde edilebilmelidir. Ekonomik olmalıdır.

Tarihi yığma yapılarda kullanılan malzemeler doğal taşlar, tuğla, kerpiç ve bağlayıcı görevlerine ek olarak yük aktarımına da önemli ölçüde etki eden harçlardır.

3.1.1 Doğal Taşlar

Taşlar minerallerin birleşimlerinden oluşmaktadır. Mineraller, fiziksel ve kimyasal açıdan çoğunlukla katı, inorganik ve homojen olarak bulunan doğal materyallerdir. Kristalleşmiş haldeki mineraller düzenli ve sıralı olarak dizilen atom veya moleküllerden oluşur. Bu düzenli dizilim, kayacın doğal yapısındaki anizotropluk özelliklerini belirlemektedir. Taşlar genellikle sınırlı sayıdaki minerallerin birleşmesiyle oluşur. Kireçtaşı ve mermer oluşumunda sadece kalsit bulunurken, konglomeranın oluşumunda birkaç mineral türü bulunmaktadır [38].

Erimiş haldeki magmanın yeryüzüne çıkarak veya yer kabuğu içinde soğuyarak katılaşması sonucu oluşan kayalara magmatik kayalar denir. Magmanın soğumasının yerin iç kısmında belirli bir derinlikte gerçekleşmesiyle oluşan kayalar derinlik kayalarıdır. Granit, yapı malzemesi olarak en çok kullanılan derinlik kayalarındandır (Şekil 3.1a). Magma yeryüzüne çıkarak soğuyor ve katılaşma yüzeyde gerçekleşiyorsa, bu şekilde oluşan kayalara yüzey kayaları veya volkanik kayalar denir. Bazalt ve trakit, yapı malzemesi olarak kullanılmış volkanik kaya türlerindendir (Şekil 3.1b).



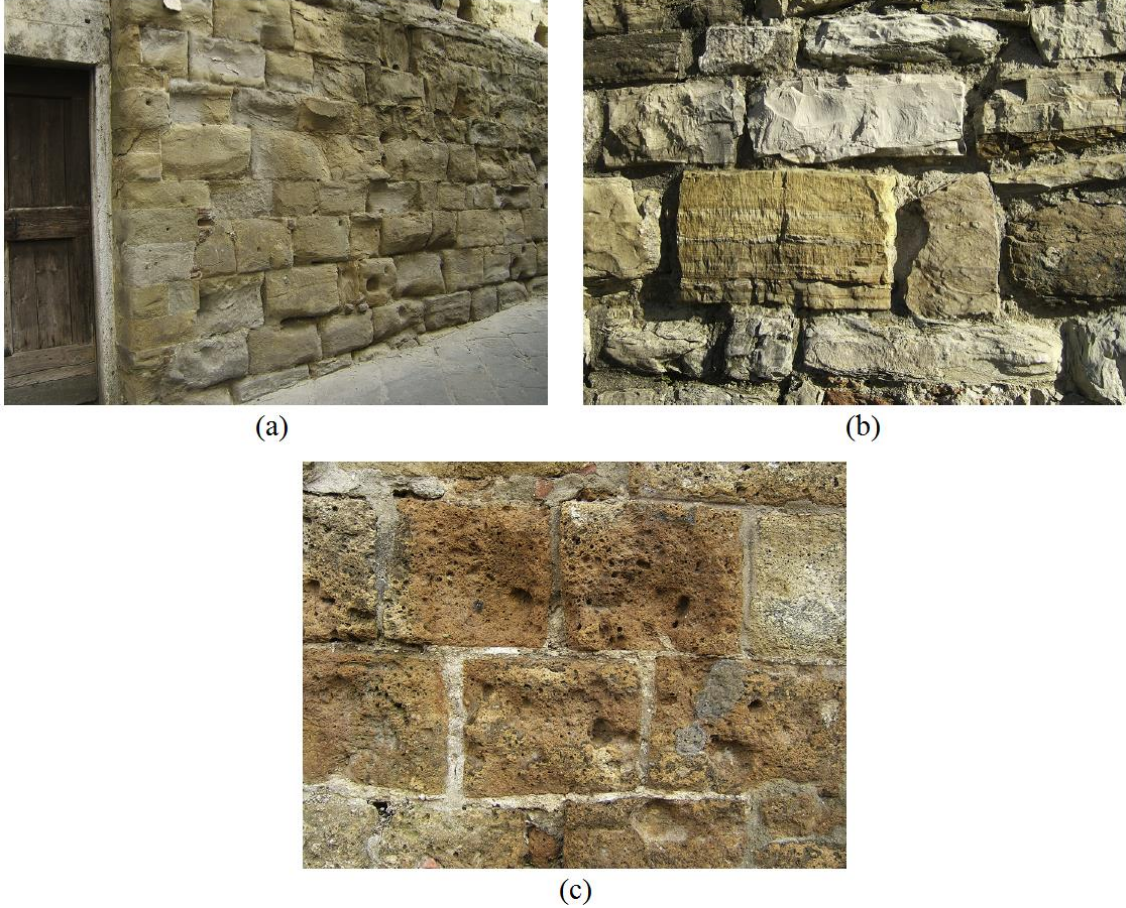
(a)

(b)

Şekil 3. 1 Tarihi granit(a) yapı ve trakit(b) yapı [38]

Püskürük (magmatik) kayalar ile diğer kayaların sıcaklık değişimi, hava (rüzgar) ve su (yağmur) gibi çevresel faktörler sayesinde aşınması, sürüklenmesi ve çökmesiyle oluşan kayalara tortul kayalar denir. Tortul kayaların oluşumu uzun yıllar sürer ve bu oluşum diğer kayaların parçalanıp birikmesiyle oluştuğu için tortul kayalar belirli bir kristal şekline sahip olmayan tabakalı bir yapıya sahiptir. Kuvars, feldispat, mika ve killerden oluşan kumtaşları (Şekil 3.2a) ve oluşumunda sadece kalsit bulunan

kireçtaşları (Şekil3.2b), yığma yapılarda yaygın olarak kullanılmış tortul kayalardandır. Şekil 3.2c ile gösterilen ve yığma yapı elemanı olarak karşılaşılabilen volkanik tüfler de tortul kayalar sınıfındadır çünkü volkanik patlamalarla açığa çıkan kayaç ve küllerin tortullaşıp dönüşüme uğraması ile oluşmaktadırlar [38].



Şekil 3. 2 Tarihi kumtaşı(a) yapı, kireçtaşı(b) yapı ve tüf(c) yapı [38]

Metamorfik kayalar, magmatik ve tortul kayaların yüksek ısı ve basınç etkisiyle başkalaşım geçirmesiyle oluşan kayalardır. Mermer, şist ve kuvarsit metamorfik kayaç türlerindendir.

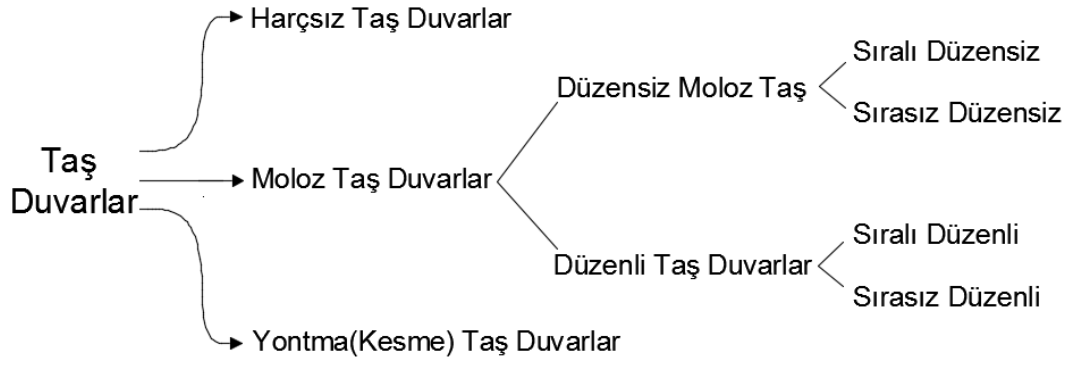
Doğal taşların estetik görünümü, erişilebilme kolaylığı ve ocaklardan rahatlıkla çıkarılabilmesi çok eski zamanlardan beri yapı malzemesi olarak kullanılma sebeplerindendir. Basınç dayanımı, çekme dayanımı, sertlik, elastisite modülü, poisson oranı gibi mekanik özellikler ve dayanıklılık, işlenebilirlik, boşluk oranı gibi fiziksel özellikler, yapı malzemesi olarak kullanılan elemanların davranışlarını karakterize eden ana parametrelerdir. Herhangi bir yapı elemanı malzemesinin mekanik özellikleri, tüm yapının davranışını ve taşıma kapasitesini etkilemektedir. Doğal taşların basınç

dayanımı oldukça yüksektir ancak çekme dayanımları düşüktür. Granit, mermer, sıkışmış kireçtaşı gibi basınç dayanımı yüksek malzemeler tarih boyunca kolon, sütun ve ana taşıyıcı destek elemanlarının inşasında kullanılmışlardır. Malzemenin atmosfer etkilerinden kaynaklanan bozulmalara karşı direnci olarak tanımlanan dayanıklılık da yapı elemanları için önemli faktörlerdendir. Taşın dayanımını belirleyen faktörler taşın strüktürel yapısı ve sertliğidir. Taş bünyesinde silis oranının artması sertliğin artmasına neden olmaktadır. İşlenebilirlik, imalat sürecinde istenen boyut ve biçimlerdeki elemanların elde edilmesinde önemlidir. Sertliği yüksek olan taşların işlenebilirliği azdır. Volkanik tüf gibi kumtaşı ve granite oranla daha yumuşak olan taşların işlenebilirliği yüksektir çünkü ayrılmaları, kesilmeleri ve şekillendirilmeleri daha kolaydır [38]. Boşluk oranı porozite olarak da adlandırılır. Boşluk oranı yüksek olan taşlar bünyesine aldıkları sular sebebiyle zarar görmektedirler çünkü donma ve erime döngüsü süreci taşın dayanımına etki etmektedir. Çizelge 3.1’de bazı taşların ortalama mekanik özellikleri verilmiştir [69], [70].

Çizelge 3. 1 Bazı taşların mekanik özellikleri [69], [70]

Taşın Cinsi	Basınç Dayanımı (Mpa)	Kayma Dayanımı (Mpa)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Elastisite Modülü (Mpa)
Granit	30 - 70	14 - 33	4 - 7	30 - 55
Mermer	25 - 65	9 - 45	1 - 15	25 - 70
Kireçtaşı	18 - 35	6 - 20	2 - 6	10 - 55
Kumtaşı	5 - 30	2 - 10	2 - 4	13 - 50
Kuvars	10 - 30	3 - 10	3 - 4	15 - 55
Serpantin	7 - 30	2 - 10	6 - 11	23 - 45

Taş yığma duvarlar, duvar elemanlarının biçimleri ve birleştirilme şekilleri açısından Şekil 3.3’ te gösterilen biçimde harçsız taş duvarlar, moloz taş duvarlar, kesme (yontma) taş duvarlar şeklinde üç başlıkta toplanabilir [38].



Şekil 3. 3 Taş duvarların sınıflandırılması [38]

Harçsız taş duvarlar, herhangi bir bağlayıcı malzeme kullanılmadan blokların üst üste dizilmesiyle oluşturulmaktadır (Şekil 3.4). Bu durumda duvarın yapısal bütünlüğü, basınç kuvvetleri ve bloklar arasındaki sürtünme kuvvetleri ile sağlanmaktadır. Harçsız taş duvarlar, herhangi bir bölgenin sınırlarını belirlemek amacıyla örülen duvarlar veya istinat duvarları olarak kullanılmışlardır. Ancak bina veya köprü olarak inşa edilen harçsız taş duvar örnekleri de bulunmaktadır [38].



Şekil 3. 4 Harçsız taş duvar örnekleri [38]

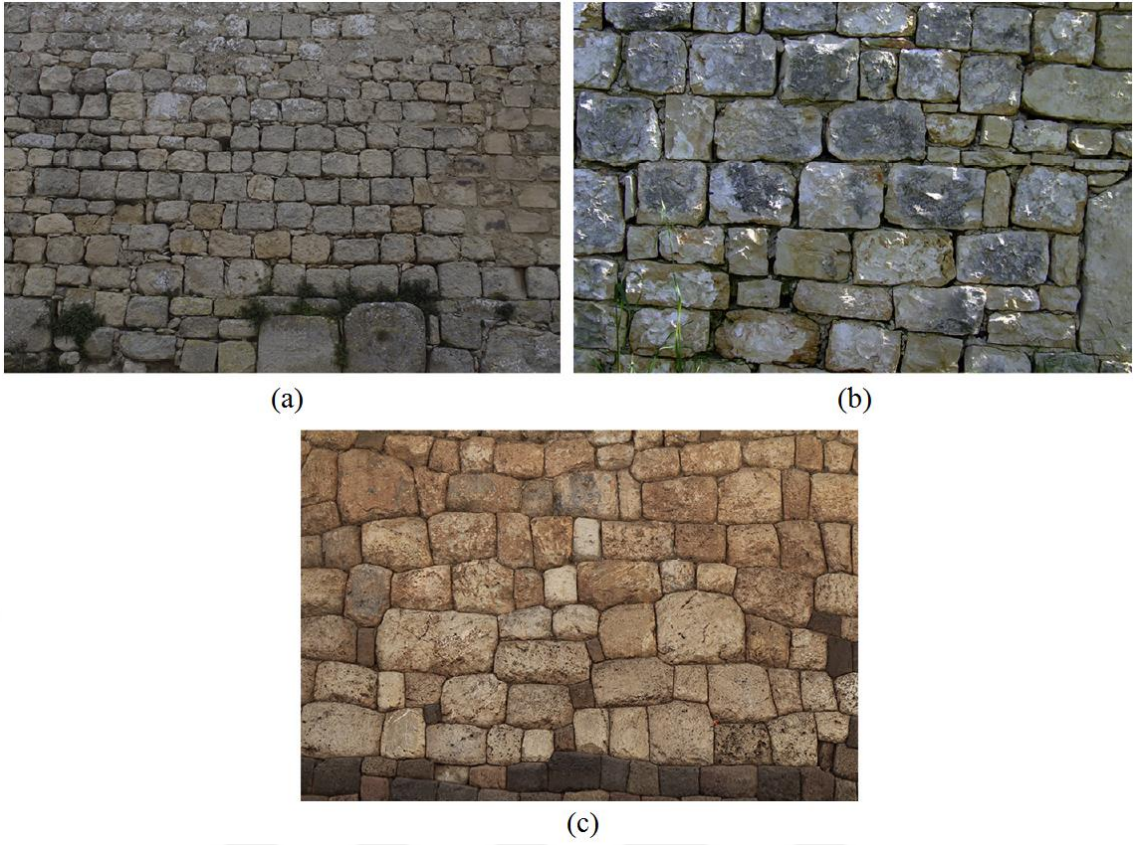
Moloz taş duvarlar, bulundukları bölgelere ait olan işlenmemiş ve doğal halinde bulunan taşların harç malzemesiyle bir araya getirilmesiyle oluşturulan duvarlardır. Moloz taş duvarlı yapılar dünyanın birçok yerinde yaygın olarak bulunmaktadır. Yerel kayaçların karakteristikleri ve boyutlarına bağlı olarak çeşitli tip moloz taş duvarlar bulunmaktadır. Düzensiz (şekillendirilmemiş) moloz taş duvarlar, değişik boyut ve şekillerdeki kare biçimli olmayan taşların rastgele bir araya getirilmesi ile oluşturulmaktadır. Düzensiz moloz taşlar da sıralı düzensiz ve sırasız düzensiz olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sıralı düzensiz yapıda eşit yükseklikli taşlar kullanılırken sırasız düzensiz yapıdaki taş boyutları farklıdır. Taşların daha iyi sıralanması

duvarların daha iyi mekanik özellikler sergilemesine neden olmaktadır. Şekil 3.5’de gösterilen yığma duvarlar, düzensiz moloz taş duvarlara örnek olarak verilebilir [38].



Şekil 3. 5 Düzensiz moloz taş duvarlar [38]

Düzenli (şekillendirilmiş) moloz taş duvarlar, birimlerin kesilip düz yüzeyli ve biçimli hale getirildikten sonra üst üste dizilmesi ile oluşturulan duvarlardır. Bu tip duvarlar da, üniform birleşim yerleriyle eşit katmanlarla oluşturulan sıralı şekillendirilmiş (Şekil 3.6a) veya farklı boyutlarda düzensiz olarak bir araya getirilmiş sırasız şekillendirilmiş (Şekil 3.6b ve Şekil 3.6c) duvarlar olarak ikiye ayrılmaktadır [38].



Şekil 3. 6 Sıralı(a) ve sırasız(b,c) düzenli moloz taş duvarlar [38]

Kesme (yontma) taş duvarlar, çeşitli aletler ile kesilmiş, şekillendirilmiş, pürüzleri alınmış, dekoratif özellikler taşıyan düzenli şekilli bloklardan oluşan duvarlardır. Blokların tüm yüzeyleri, komşu oldukları bloklarla birleşmektedir ve ince bir harç tabakası bağlayıcılık için yeterlidir. Tüm bağlantı kısımları uniformdur ve blokların oluşturduğu sıralar eşit yüksekliktedir. Kesme taş duvarlar, daha yüksek kalitenin amaçlandığı önemli yapılarda tarih boyunca kullanılmışlardır ve günümüzde de birçok kesme taşlı tarihi yapı ve anıt bulunmaktadır. Şekil 3.7’de kesme taş duvar örnekleri verilmiştir [38].



Şekil 3. 7 Kesme taş duvarlar [38]

Literatürde, çeşitli taş malzemeler ele alınarak yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Milosevic vd. [71] eski yığma yapıların davranışlarını karakterize etmek amacıyla, 4 adet moloz taş yığma panel imal ederek diyagonal basınç testleri uygulamışlardır. Deneysel sonuçlar ışığında, kayma dayanımı ve elastisite modülü elde ederek, yapılmış başka çalışmalara ait sonuçlarla karşılaştırmalar yapmışlar ve panellerin davranışlarını da incelemişlerdir.

Korkanç [72], Kapadokya'nın güney kesiminde kullanılan mermer, traverten, tuf, ignimbirit ve andezit gibi 17 adet taşı ele alarak laboratuvar testleri ile mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve taşlarda gerçekleşen bozulmalar üzerine araştırmalar yapmıştır.

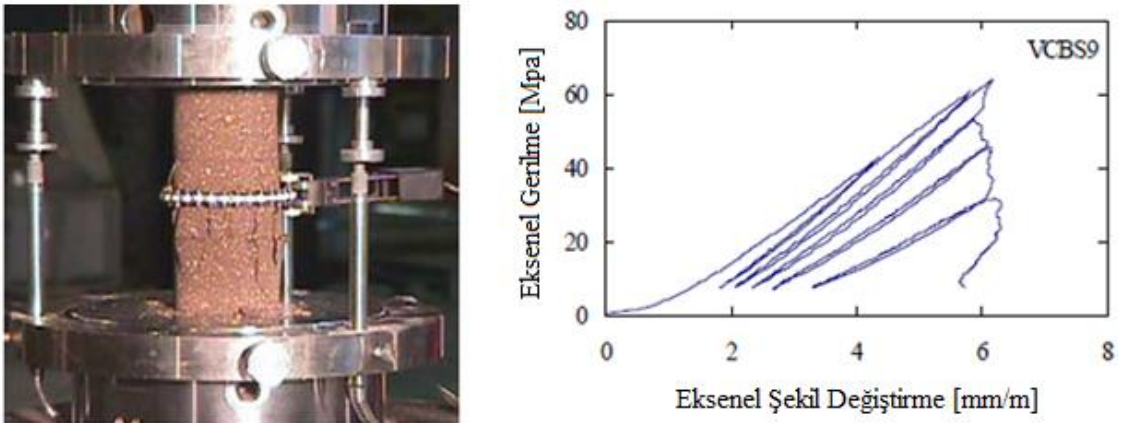
Garcia vd. [73], düşük dayanımlı kireçli çimento harçlı kumtaşını, Ludovico-Marques vd. [74], ise granit ve kumtaşını ele alarak basınç altında mekanik özellikleri incelemiştir.

3.1.2 Tuğla ve Kerpiç

İnsanoğlunun Roma dönemi öncesinde de kullandığı en eski yapı malzemelerinden biri tuğladır. Tuğlalar, kalıplara dökülüp kurutulduktan sonra, kilin fırınlarda veya harman ocaklarında yüksek sıcaklarda pişirilmesiyle elde edilmektedir. Tuğlanın tarihteki kullanımı, taş ve ahşap gibi malzemelerin bulunamaması veya maliyetlerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

Tuğla, dayanıklılığı ve basınç dayanımı yüksek bir malzemedir. Taşlar gibi tuğlalar da sadece basınca çalışmaktadırlar, çekme dayanımlarını düşüktür. Yangına karşı dayanıklı olması, estetik özellikleri, yüksek düzeyde ses ve ısı yalıtımı sağlaması tuğlanın yaygın

olarak kullanılma sebeplerindendir. Tuğla sünek davranıştan uzak bir yapı elemanıdır ve tuğla duvarlar da bu nedenle gevrek davranış sergilemektedir. Tuğlanın elastisite modülü düşüktür. Tekrarlı yükleme ve boşaltma etkisi altında tuğlanın elastik şekil değiştirme özelliğine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 3.8). Maksimum gerilmeye ulaşıldıktan sonra elastisite modülünün azaldığı görülür ve çatlakların oluşumuyla mukavemeti de azalmaya başlamaktadır. Tuğlanın basınç dayanımını, yapıldığı toprağın cinsi, porozitesi, pişirilme ısısı, üretim biçimi, delikli ise delik miktarı ve yerleri, kenarların biçimi ve yükleme yönü gibi birçok faktör etkilemektedir [69], [75].



Şekil 3. 8 Silindirik tuğlanın çevrimli basınç deneyi ve tipik gerilme-şekil değiştirme eğrisi [69], [75]

Genel bir yaklaşım ile, tuğlanın çekme dayanımının basınç dayanımının %8'i kadar, kesme dayanımının ise, basınç dayanımının %30'u kadar olduğu söylenebilir. Tuğlanın yaklaşık mekanik özellikleri Çizelge3.2'de verilmiştir [76], [77].

Çizelge 3. 2 Tuğlanın mekanik özellikleri [76], [77]

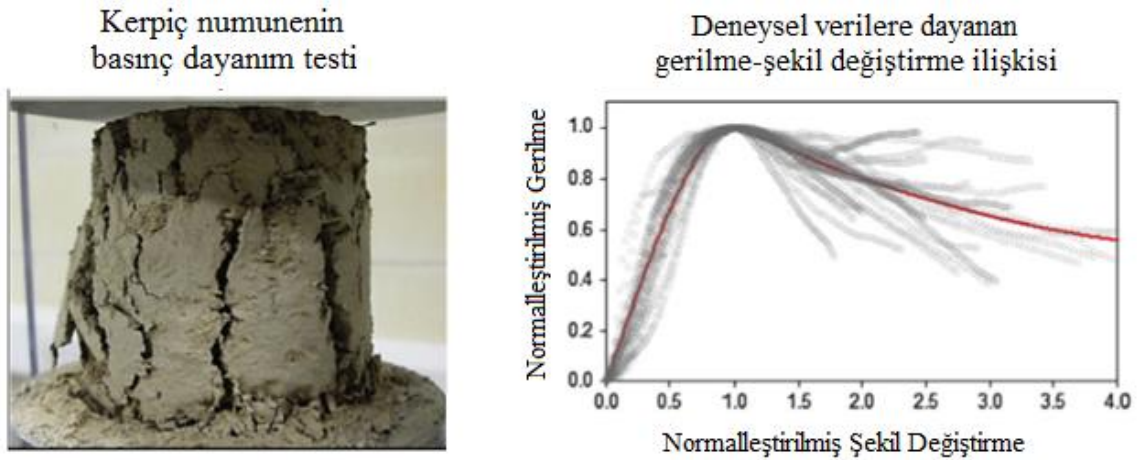
Tuğla	(Mpa)
Elastisite Modülü	150 - 300
Basınç Dayanımı	10 - 30
Çekme Dayanımı	2.7 - 5
Kayma Dayanımı	10 - 20

Barluenga vd. [78], Pineda vd. [79], Porco vd. [80] tuğla malzemeleri ele alarak fiziksel ve mekanik özelliklerin incelenmesi konulu çalışmalar yapmışlardır. Koçak ve Zengin [81], İstanbul'da bulunan farklı fiziksel ve mekanik özellikli tuğla duvarlarla farklı

şekillerde inşa edilmiş tarihi binaların düşey ve yatay yükler altındaki davranışlarını ve serbest titreşimlerini, malzeme özelliklerine bağlı olarak incelemişlerdir.

Kerpiç, bir çeşit pişirilmemiş tuğla olarak tanımlanabilecek, kum, balçık ve samanın güneşte kurutulmasıyla elde edilen yapı malzemesidir. Kerpişte tuğla gibi, ahşap ve taşın bulunamadığı bölgelerde çok eski zamanlardan beri kullanılmaktadır. Kerpiç malzemesi, sağlıklı olması, üretiminin diğer yapı elemanlarına nazaran daha kolay olması ve maliyetinin düşük olması nedeniyle avantajlı bir malzemedir. Ancak kerpicing, suya karşı dayanıksız olması, sürekli bakım ve onarım gerektirmesi ve basınç dayanımının düşük olması gibi dezavantajları da bulunmaktadır [82]. TDY2007 5.Bölümde verilen uygulama koşulları incelenecek olursa, kerpiç malzemesi için diğer yapı malzemelerine nazaran daha ağır ve güvenli tarafta kalacak şekilde sınırlamalar getirildiği görülmektedir [83].

Illampas vd. [84], kerpiç örnekleri üzerinde deneysel testler uygulayarak malzemenin basınç altındaki mekanik davranışını incelemiştir. Çalışmada, kerpiç malzemesinin gerilme-şekil değiştirme ve deformasyon karakteristikleri de vurgulanmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3. 9 Kerpiç basınç testi ve gerilme-şekil değiştirme grafiği [84]

Yığma duvarları oluşturan elemanların birbirlerine bağlanmasını sağlayan malzemeye harç denir. Harç malzemesinin yığma yapılarıdaki görevi bağlayıcılık ile sınırlı kalmamaktadır hatta yapının dayanımı çoğunlukla harç malzemesinin mukavemetine bağlıdır. Harçlar yük aktarımında önemli rol oynamaktadır ve bu yüzden duvar davranışı ve çatlama şekline de etki ederler. Harçlar, duvar malzemelerini dış etkilerden koruyan bir katman olmalarının yanı sıra, yığma birimlerin bağlantılarını

teşkil ettiklerinden taşıyıcı elemana hareket kabiliyeti sağlayarak, duvarın daha sünek davranmasına neden olmaktadır.

Harçlar, suyun bağlayıcı malzeme ve agregalar ile karışımından elde edilen katılaşma özellikli hamurlardır. Karışıma agrega eklenmesinin amacı, harç dayanımının artırılıp rötrenin azaltılmasını sağlamaktır. Harçlar, yapımında kullanılan bağlayıcılara göre kil bağlayıcı, alçı bağlayıcı ve kireç bazlı olarak sınıflandırılabilir. Kil bağlayıcılar, insanların kilin sağladığı yüksek kohezyon ile birimleri bağlama özelliklerini keşfetmeleriyle tarih sahnesinde en eski zamanlardan beri kullanılmaktadır. Topraklı kaba kil, özellikle kerpiç duvarların bağlayıcı malzemesi olarak sıklıkla kullanılmıştır. Kil hamurunun nem direncini arttırmak için karışıma kireç eklenebilmektedir. Kireç, kil mineralleri ile tepkimeye girerek minerallerin su emme miktarını azaltmaktadır ve bu azalma dayanıma etki etmektedir. Alçı bağlayıcı harçlar, hızlı düzenlenme ve sertleşme özellikleri nedeniyle tarihi binalarda oldukça sık kullanılmışlardır. Bu harç tipi, rötrenin problemi olmadığından agregasız olarak kullanılabilir. Alçı harçları günümüzde yarı sulu veya susuz alçılardan üretildikleri için fazla su emme özelliği göstermektedirler ve tozlaşmaya eğilimlidirler. Bu nedenle alçı harçları artık daha çok ince işçiliklerde ve dekorasyonda kullanılmaktadır. Kireçli harçlardan olan havada sertleşmiş kalsiyumlu kireç, saf kireçtaşının 850-900 °C'de yanmasıyla elde edilmektedir. Dolomit veya dolomit içeren kireç taşının pişirilmesiyle havada sertleşen magnezyumlu kireç elde edilir ve magnezyumlu kirecin mekanik özellikleri kalsiyumlu kireçe göre daha iyidir. Su kireci veya hidrolik kireç olarak adlandırılan bağlayıcılar, %5-%20 oranlarında kil içeren marnlı kireçtaşlarının pişirilmesiyle elde edilmektedir. Su kireçli bağlayıcılar, havada sertleşenlerin aksine nemli koşullarda kullanılabilir hatta su altında bile uygulanmaları mümkündür [38].

Çok eski zamanlarda, bağlayıcı malzeme olarak çamur kullanılmıştır. Daha sonra kireç harcı kullanımı Romalılar ile birlikte gelişmiş, ardından gelen süreçte kum-kireç karışımının içine pişmiş kil veya puzolan denilen volkanik tüfler eklenerek suyla karıştırıldığı zaman sertleşerek hamurlaşan harç malzemesi elde edilmiştir. Osmanlı ve Selçuklu mimarisinde kullanılan harçlar horosan harcı olarak adlandırılmaktadır. Sertleşmesi ve gerçek mukavemetine ulaşması uzun süre alan horosan harcında öğütülmüş kil, kireç ve su bulunmaktadır. Tarihi yapılar incelendiğinde, horosanın

mukavemetinin arttırılması amacıyla içerisine taş tozu ve kırıntıları, mermer tozu, çakıl, keçi kılı, peynir, yumurta akı gibi malzemeler eklendiği görülmüştür. Günümüzde, horosan harcının kullanıldığı tarihi yapıların restorasyonunda, yapı orijinalliğinin bozulmaması adına modern horosan harcı kullanılmaktadır [69].

19.yüzyılın başlarında, marnlı kireçtaşı veya kil ve kireçtaşı karışımının çok yüksek derecelerde (1450 °C) pişirilmesiyle, Portland çimentosu olarak adlandırılan yeni bir tür bağlayıcı elde edilmiştir. Bu yenilik önemli bir dönüm noktasıdır çünkü geleneksel harçların yerine Portland çimentosu kullanımına başlanmıştır ve zamanla tarihi harçların kullanımı terk edilmiştir. Portland çimentosu tarihi harçlar ile karşılaştırılacak olursa, yüksek dayanıma sahip olması ve kolay hazırlanabilmesi nedeniyle avantajlı bir malzemedir. Bu nedenle yapısal anlamda birçok alanda kullanılması mümkündür. Ancak yapılan çalışmalarla ispatlanmıştır ki, tarihi yapılarda kullanılan harçların dayanıklılıkları günümüz çimento harçlarının dayanıklılıklarından daha yüksektir [38].

Haach vd. [85], yığma elemanların dayanımında harç özelliklerinin önemli rol oynadığını vurgulayarak, harcın su/çimento oranı, agrega granülometrisi, işlenebilirlik ve sertleşme özelliklerini incelemişlerdir. Alecci vd. [86] ise, yığma elemanlarının kayma dayanımını farklı tipteki harçlara bağlı olarak inceleyerek sonuçları deneysel veriler ve yönetmelik koşulları ile karşılaştırmıştır.

3.2 Tarihi Yapılarda Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Günümüzde kullanılan yapı malzemelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri standartlarla belirlenmiştir. Tarihi yapılarda çoğunlukla bölgede bulunan malzemeler kullanılmıştır veya özenli bir malzeme seçimi yapılmış olsa bile bu malzemeler teknolojik imkanlardan ve mühendislik bilgisi parametrelerinden yoksundur. Bu nedenle tarihi yapılarda malzeme özellikleri çok değişkendir ve neredeyse her yapının kendine özgü değerleri bulunmaktadır. Tarihi yapılarda malzeme parametrelerinin belirlenmesi için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Tahribatlı ve tahribatsız olarak uygulanan bu yöntemler arazide veya laboratuvar ortamında kullanılabilir. Tarihi binalarda uygulanacak testlerde yapı malzemesinin tahrip edilmesi hiçbir zaman istenmez çünkü yapının dokusu zarar görmektedir. Bu nedenle, özellikle kültürel miras olarak görülen çok değerli yapılarda tahribatsız yöntemlerin kullanımı daha uygun olmaktadır.

Laboratuvar testleri yapıdan numune alarak gerçekleştirilebilir ki bu tahribatlı bir yöntemdir ancak yapıdan kopmuş elemanlar toplanarak yapıya zarar vermeden de laboratuvar testleri uygulanabilir. Lombillo vd. [87], taş yığma elemanların karakterizasyonu için tahribatsız ve düşük tahribatlı testler kullanışlardır. Çalışmada, flat-jack, hole drilling ve sonik testler yer almaktadır. Mazzotti vd. [88], ise kesme dayanımının tespit edilmesinde tahribatlı numune yöntemlerini kullanmışlardır.

Kullanılan yöntemlerden her biri irdelenecek konu ve süre-maaliyet faktörlerine göre seçilir. Farklı yöntemler, farklı malzeme parametrelerini sunmakla birlikte aynı parametrenin incelendiği farklı testlerden farklı sonuçlar alınabilir çünkü bulgular belli kabuller çerçevesinde elde edilmektedir. Yapısal analiz için kullanılacak malzeme parametrelerinin mevcut yapı malzemesi parametreleri ile birebir aynı olması mümkün değildir. Belli varsayımlarla beraber gerçek malzeme değerlerine yakın ve tutarlı parametrelerle yapılan çözümler efektif bir yapısal analiz için yeterli olmaktadır. Malzemelerin belirlenmesinde kullanılan yöntemler Çizelge 3.3’de özetlenmiştir. Söz konusu yöntemlerle alakalı daha detaylı açıklamalara Ercan [89] kaynağından ulaşılabilir.

Çizelge 3. 3 Malzeme parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler

Arazide Uygulanan Yöntemler	Tahribatlı Yöntemler	Flat Jack	Mevcut gerilme, mevcut mukavemet ve elastisite modülü belirlenebilir.
		Yerinde Kayma	Yapının kayma dayanımı belirlenebilir.
		Çekip Çıkarma	Yığmanın çekme ve kayma direnci belirlenebilir.
		Endoskopik Yöntem	Gözle görülemeyen, karotla ulaşılamayan kısımlardaki malzeme özellikleri belirlenebilir.
	Tahribatsız Yöntemler	Schmidt Çekici	Malzemenin sertliği, dayanımı ve iç yapısı hakkında veriler elde edilebilir.
		Dinamik İzleme	Yapının mod şekilleri, doğal frekansları, sönüm oranı gibi dinamik özellikleri belirlenebilir.
		Kızılötesi Termografisi	Duvarlardaki boşluklar, kullanılan farklı malzemeler, yapı içindeki su ve nem belirlenebilir.
		Radyoaktif Metotlar	Yapı içindeki boşluklar, çatlaklar ve kullanılan farklı malzemeler belirlenebilir.
		Ultrases	Malzemenin boşluk oranı, dayanımı, iç yapısındaki çatlak miktarı ve yönleri belirlenebilir.
		Darbe eko-puls eko	Çatlaklar, delaminasyonlar ve boşluklar gibi malzeme kusurları belirlenebilir.
		Georadar Yöntemi	Ortamdaki fiziksel süreksizliklere bağlı mekanik olmayan yapı karakteristikleri belirlenebilir.
Laboratuvar Yöntemleri	Fiziksel Testler	Yoğunluk/ Porozite	Elemanların hacimsel kütlesi, özgül ağırlığı, porozitesi belirlenerek dayanımları incelenebilir.
		XRD, SEM, EDX	Malzemelerin içerdiği mineral ve elementler, mikro boyuttaki yapısı belirlenebilir.
	Mekanik Testler	Schmidt Çekici	Malzeme sertliği, dayanımı ve iç yapısı laboratuvar ortamında da incelenebilir.
		Tek Eksenli Basınç	Basınç mukavemeti ve kırılma yükü belirlenebilir.
		Yarmada Çekme	Malzemenin çekme dayanımı belirlenebilir.
		Ultrases Darbe	Malzemenin elastisite modülü, poisson oranı, içinden geçen kayma ve basınç belirlenebilir.
		Nokta Yüğü Testi	Malzemenin nokta yükü indeksinden mukavemeti belirlenebilir.
	Model Testleri		Yapıyı temsil eden malzemelerle ölçekli yapı imal edilir ve statik/dinamik testler uygulanır.

ANALİZ VE MODELLEME YÖNTEMLERİ

Tarihi yağma yapıların modellenmesi ve yapısal analizleri konusu, gelişmiş yazılımlar sayesinde artan çalışmalarla araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir. Bu alanda yapılan çalışmalar incelendiğinde, farklı teorik kabuller, idealleştirmeler ve formülasyonlar ile farklı modelleme yöntemlerinin öne sürüldüğü ve çeşitli yapısal analiz yöntemleri kullanılarak yapı çözümlemelerinin yapıldığı görülmektedir. Tarihi yağma yapıların sayısal analizlerinde birçok zorlukla karşılaşılır:

- Yapının modellenebilmesi için öncelikle geometrisinin tanımlanması gerekmektedir. Gerekli ölçümler yapılarak rölemler çıkarılmalıdır ancak özellikle karmaşık ve büyük tarihi yapılarda gerekli geometrik verilerin elde edilmesi oldukça ağır çalışmalar gerektirebilmektedir.
- Analizde kullanılacak yapı malzemesi özelliklerinin tanımlanması zordur. Malzeme dayanımları ve elastisite modülü kesin olarak bilinemez. Çünkü tarihi yapılar herhangi bir standartta belirtilen kurallara göre inşa edilmemişlerdir. Bu durumda, malzeme testleri ile malzeme özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir, ancak bu maliyetli ve süre-efor gerektiren bir yoldur. Ele alınan tarihi binada kullanılan malzeme türüne uygun fiziksel ve mekanik parametreler, önceki akademik çalışmalar tarafından önerilen değerlere göre seçilerek analizler yapılabilir ancak bu kabullerin doğruluğu analiz sonuçlarındaki belirleyici faktörlerdendir ve uygun kabullerin yapılmaması durumunda yanlış bulgular elde edilecektir.
- Tarihi yapılarda, geometrik veriler ve malzeme özellikleri belirlense de, yapım tekniği ve doğal malzeme kullanımından kaynaklanan veri çeşitlilikleri ile

karşılaşılmaktadır. Yapım süresinin uzun olması nedeniyle malzeme özellikleri aynı yapı elemanı içerisinde bile değişkenlik gösterebilmektedir. Ayrıca, büyük boyutlu yapı elemanlarının dışarıdan anlaşılamayan iç kesitlerinin malzeme özellikleri de bilinmemektedir.

- Tarihi yapılarda oluşan hasarlar yapının dayanımına ve davranışına etki etmektedir. Yapısal analizde büyük öneme sahip olan yapı rijitliği, sönüm oranı, yük aktarımı gibi faktörlerin belirlenmesi, mevcut hasarlar ve yapının uzun yıllar maruz kaldığı belirsiz statik ve dinamik etkiler sebebiyle çok zordur.

Doğru bir yapısal analiz için, bahsedilen zorluklar en uygun çözümlerle olabildiğince giderilmelidir. Bu bölümde, yapısal analiz yöntemleri ve modelleme teknikleri üzerinde durularak, tarihi yapı davranışlarının ortaya konmasında uygulanan yöntemler literatürdeki örneklerle açıklanacaktır.

4.1 Yapısal Analiz Yöntemleri

Yığma yapıların analitik modelleri, gerçek yapı davranışının matematiksel olarak tanımlanması ve deneysel veri ihtiyaçlarının azaltılması açılarından büyük öneme sahiptir. Mevcut bir yapı davranışının tahmininde, analitik modelin yeterliliği ve sınırları belirleyici ana faktörlerdir. Yapısal analizler, gerilme-şekil değiştirme davranışı ve kuvvet-yer değiştirme ilişkilerine bağlı olarak doğrusal, doğrusal olmayan ve limit analiz şeklinde statik ve dinamik olarak gerçekleştirilebilmektedir [76].

4.1.1 Doğrusal Analiz

Doğrusal analizde yapı malzemesinin doğrusal elastik davrandığı varsayımı yapılır. Doğrusal hesapta yük ve şekil değiştirme arasında doğrusal bir ilişki olduğu varsayılır ve yük arttıkça birim şekil değiştirme de doğrusal olarak artar veya yük azaldıkça birim şekil değiştirme de azalır. Malzeme homojen ve süreklidir. Küçük gerilme değerlerinde özellikle basınç altında malzemenin doğrusal elastik kabul edilmesi yığma yapılarda sorun yaratmayacak bir kabuldür, ancak süreklilik kabulü yapılırken duvarın gerçekte farklı birimlerden oluşan heterojen bir yapı olduğu da dikkate alınmalıdır. Doğrusal hesap diğer hesap türlerine göre daha basit bir yöntemdir ve hata yapma riski daha

düşüktür. Ancak bu analiz yönteminde yapının genel davranışı elde edilebilmekte, eleman bazında çok detaylı sonuçlara ulaşılamamaktadır. Deformasyon şekilleri ve gerilme dağılımları ile yapının zorlanan bölümleri, çatlak beklenen zayıf kesitleri ve deprem davranışı doğrusal analiz ile belirlenebilir. Çatlak oluşumunun görüldüğü kısımlarda rijitlik azaltması yapılarak veya süreksizlikler tanımlanarak çatlakların ilerlemesi gözlemlenebilir veya limit yük durumları incelenebilir.

Doğrusal elastik malzeme özellikleri kullanılarak geometrik doğrusal olmayan hesaplar da yapılabilir. Geometrik doğrusal olmayan analizde, çatlakların da hesaba katılması gerekmektedir. Çünkü çatlak oluşan bölgeler gerilme almayacak ve yük dağılımı doğrusal değişmeyecektir. Bu nedenle, çekme gerilmeleri oluşan bölgelerde süreksizlikler tanımlanır ve ard arda tekrarlı analizler yapılarak çatlakların gözlemlendiği ve hesaba alındığı birden fazla analiz gerçekleştirilir. Bu şekilde malzemenin doğrusal olmayan davranışı dikkate alınmış olur.

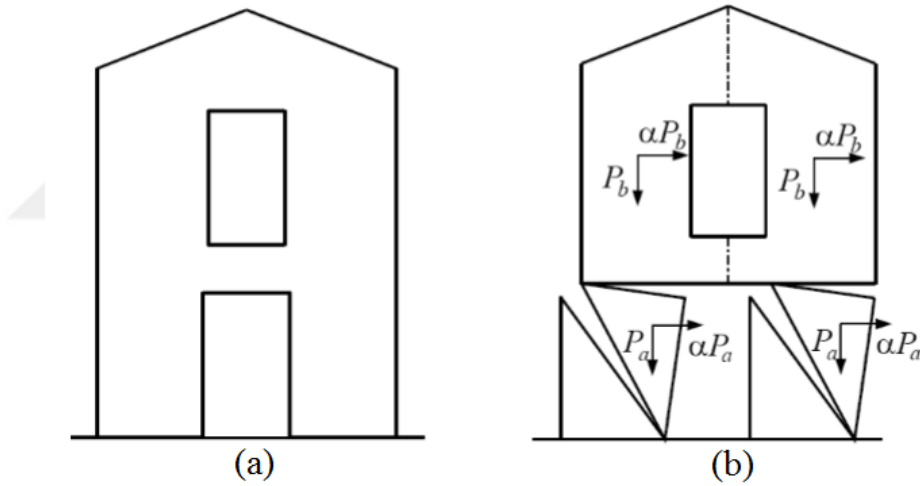
4.1.2 Doğrusal Olmayan Analiz

Doğrusal olmayan analiz ile yapıdaki tüm hasar durumları ve eleman bazındaki gerilme dağılımları incelenebilir. Yapım aşamalarındaki dış etkiler, malzeme farklılıkları gibi her türlü faktör hesaba yansıtılabilir. Yapılarda doğrusal olmayan davranışı, malzemenin doğrusal elastik olmayışı ve geometrik doğrusal olmayan durumlar oluşturmaktadır. Yığma malzemeler özellikle sismik etkiler altında çoğunlukla doğrusal olmayan davranış göstermektedir. Geometrik doğrusal olmayan durumlar, ise yükleme altındaki elemanlarda oluşan değişimlerin hesaba etkisi olan 2.mertebe etkileri olarak tanımlanabilir. Teknolojik imkanların gelişmesiyle günümüzde, doğrusal olmayan statik ve doğrusal olmayan dinamik (nonlinear time history) analizlerin yapıldığı matematiksel modeller geliştirilmiştir. Doğrusal olmayan sistemlerin dinamik davranışı, adım adım tekrarlanan zaman tanım alanında analizlerle yapılarak gerçeğe oldukça yakın sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu yöntemle, yapının dinamik karakteristikleri ve doğrusal olmayan yük akışı ortaya konabilmektedir. Pushover analizi olarak adlandırılan doğrusal olmayan statik analizler ile yapılar limit durumlarına ulaşana kadar yatay yükler ile itilmekte ve kapasiteleri incelenebilmektedir [76].

4.1.3 Limit Analiz

Limit analiz yapının göçme mekanizmasının tahmininde kullanılan limit yük analizi ile ilişkili yöntemdir. Bu yöntem yapının plastik davranış gösterdiği gerçeğine dayanır ve genelde doğrulama amaçlı kullanılmaktadır. Çekme gerilmeleri ihmal edilirse, plastik davranışın yapısal analiz için yeterli sonuçlar verdiği söylenebilir [69].

Orduna [90], rijit bloklar ve bağlantı elemanlarıyla modellenen donatısız yığma yapıda Şekil 4.1’de görülen limit analiz metodunu kullanmıştır. Önerilen model, akma yüzeyini tanımlayan tam plastik rijit bloklardan oluşturulmuştur. Akma yüzeyindeki kritik gerilme değerlerinde malzeme plastikleşmeye başlar ve akma yüzeyinin normal yönünde akar. Limit analizin uygulanmasında, malzemenin çekme gerilmeleri almadığı ve sonsuz basınç dayanımına sahip olduğu, kayma hasarları oluşmadığı ve hasarın küçük yer değiştirmeler altında gerçekleştirdiği gibi kabuller yapılmaktadır [91].



Şekil 4. 1 Boşluklu donatısız yığma duvarların limit analizi, (a)Duvar, (b)Hasar mekanizması [90], [91]

Doğrusal analiz diğer metotlara göre daha az veri girişi ve denklem takımı ile daha kısa sürede daha az eforla tamamlanabilmektedir. Bu nedenle büyük yapıların analizlerinde veya genel yapısal davranışın incelendiği durumlarda uygulanması avantaj sağlamaktadır. Daha detaylı yapısal incelemelerin amaçlandığı durumlarda doğrusal olmayan analizler kullanılmaktadır ancak bu yöntem oldukça fazla veri girişi ve efor gerektirdiği için hata yapma riski daha yüksektir. Doğrusal olmayan analiz yapılacak olsa da yapıların öncelikle doğrusal analizle çözülüp genel davranışlarının görülmesi faydalıdır. Doğrusal analiz sonuçlarına göre daha detaylı doğrusal olmayan analizler

yapmak daha uygundur. Uygun analiz yöntemi, çalışmanın amacı ve eldeki imkanların niteliğine göre seçilebilir. Birden fazla analiz yöntemi ile sonuçlar karşılaştırmalı olarak doğrulanabilmektedir veya yapılan bir analizin doğruluğu deneysel çalışmalarla ispatlanabilmektedir. Çizelge4.1’de analiz yöntemlerinde kullanılan veri girişi ve alınan sonuçlar verilmiştir [69], [92].

Çizelge 4. 1 Analiz yöntemlerinin karşılaştırılması [69], [92]

ANALİZ TÜRÜ	GİRİŞ VERİSİ	SONUÇ VERİSİ
Doğrusal Analiz	Doğrusal-elastik malzeme özellikleri Güvenlik gerilmeleri	Şekil değiştirme Gerilme dağılımı
Doğrusal Olmayan Analiz	Malzemenin elastik ve mukavemet özellikleri Malzemenin elastik olmayan özellikleri	Şekil değiştirme Gerilme dağılımı ve göçme mekanizması
Plastik Analiz	Malzeme mukavemeti	Göçme mekanizması

4.2 Modelleme Yöntemleri

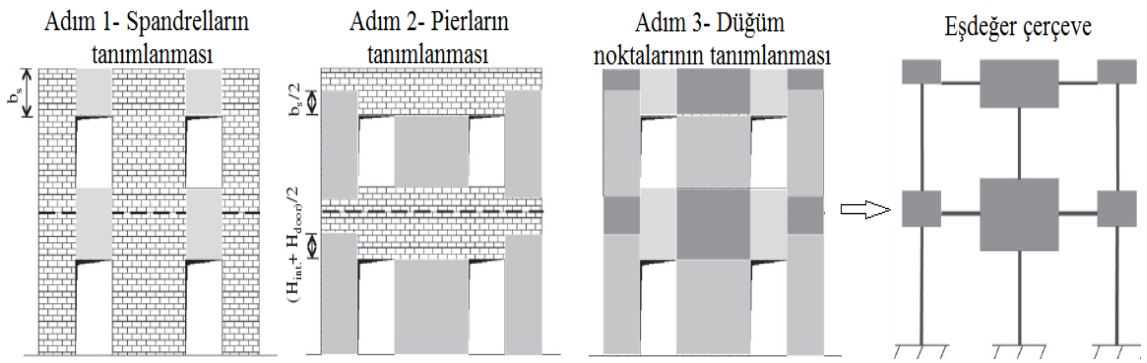
Tarihi yapı analizlerinin yapılmasındaki en önemli aşama sayısal modellemedir. Yapı elemanlarının, geometrik boyutlar, sınır şartları, birleşimlerinin hareket yetenekleri ve serbestlik dereceleri, etkisi altında olduğu yüklemeler gibi yapısal davranışı etkileyecek koşulların dikkate alınarak, mekaniğin temel kuralları çerçevesinde doğru ve uyumlu biçimde matematiksel terimlerle ifade edilmesi işlemine sayısal modelleme denir [93].

Analiz için kurulacak sayısal modelde karşılaşılan en önemli zorluk yığma malzemenin modellenmesidir. Yığma yapı duvarları elastik özellik göstermeyen anizotrop malzeme özelliklerine sahiptir ve homojen değildir. Bu nedenle duvarda oluşacak gerilme dağılımı ve çatlak şekillerinin belirlenmesinde, duvarı oluşturan birimlerin gerilme dağılımlarının yanında bu birimlerin birbiri ile olan etkileşiminin sonucu olan gerilme dağılımı da düşünülmelidir ancak yığma yapı elemanları izotropik doğrusal elastik malzeme özellikleri gösterdikleri düşünülerek de modellenebilir. Bu kabul, belli başka kabuller ile beraber kullanılarak çok karmaşık hesaplamalar ve modellemelerden kaçınılır ve bu şekilde sonuca daha rahat ulaşılabilir.

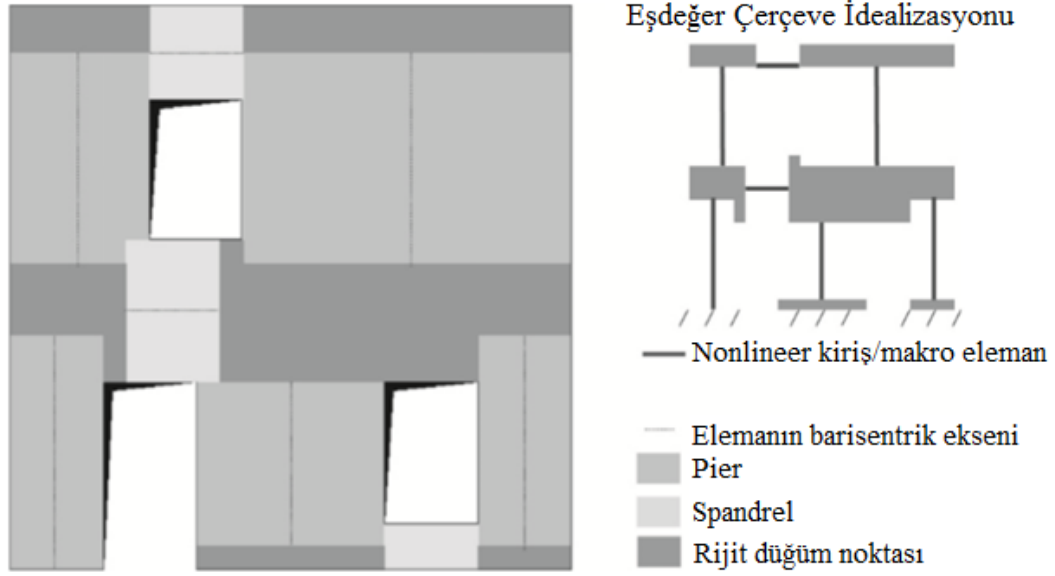
Yığma yapıların analizleri için çeşitli modelleme yöntemleri bulunmaktadır. Modelleme yöntemlerinin birbirleriyle kıyaslandığı çalışmalar, yapının bütünü düşünüldüğünde ulaşılan sonuçların birbirinden çok farklı olmadığını göstermiştir ancak farklı modelleme yöntemlerinde yapılan farklı kabullere bağlı olarak, eleman bazında elde edilen iç kuvvetlerinde farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle modelleme yönteminin seçiminde yapısal analizde amaçlanan sonuç ve irdelenecek konu önemlidir.

4.2.1 Eşdeğer Çerçeve Yöntemi

Bir boyutu diğer iki boyutuna göre daha büyük olan, elemanın eksen ve normal kesitiyle tanımlanmış elemanlara çubuk eleman adı verilir. Eşdeğer çerçeve yöntemi çubuk sonlu elemanlar metodudur. Bu yöntemde, gerilme elemanları ve kuvvetler, duvar parçalarına ait eksenlere toplanan rijitlik ve kuvvetlerle idealize edilerek sonlu elemanlara kıyasla daha basit bir hesap ile sonuca gidilmektedir. Lagomarsino vd. [94], yığma yapıların sismik analizlerinde eşdeğer çerçeve yönteminin sonlu elemanlara göre daha az efor gerektirdiğini vurgulayarak, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de görüldüğü gibi, boşlukları düzenli dağılan ve düzenli dağılmayan yapıların eşdeğer çerçeve modellemelerini yaparak doğrusal olmayan analizlerini konu almışlardır.



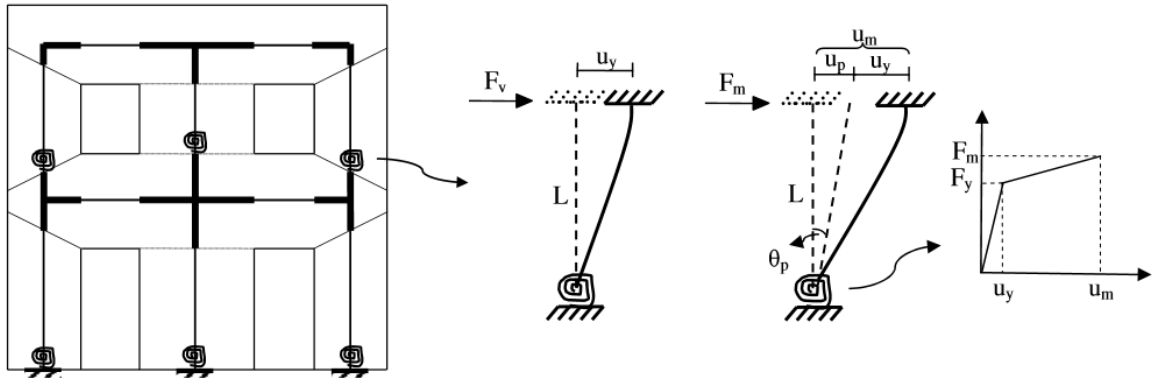
Şekil 4. 2 Düzenli boşluklu yapıda eşdeğer çerçeve idealleştirilmesi örneği [94]



Şekil 4. 3 Düzensiz boşluklu yapıda eşdeğer çerçeve idealleştirilmesi örneği [94]

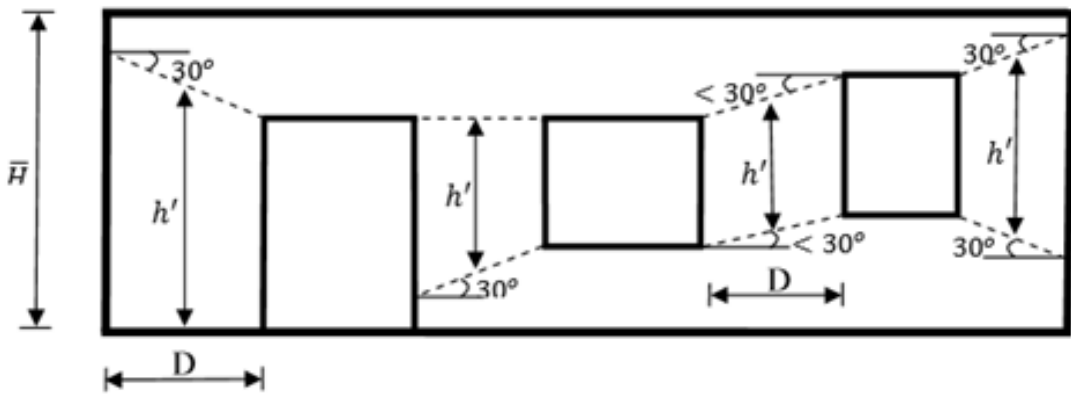
Yığma yapıların analizinde en doğru sonucu verebilecek yöntem sonlu elemanlar yöntemidir ancak eşdeğer çerçeve yönteminde yapılan izotrop ve homojen malzeme kabulleri ile, özellikle doğrusal olmayan hesaplarda daha basit çözümler yapılarak zaman tasarrufu sağlanabilmektedir. Bu nedenle, irdelenen konuya da bağlı olarak güvenilirlik ve hesap kolaylığı düşünüldüğünde bu yöntem sonlu elemanlar yerine tercih edilebilmektedir. Eşdeğer çerçeve yönteminde doğrusal olmayan duvar davranışının yansıtılabilmesi için yığılmış plastisite ve dağıtılmış plastisite olarak başlıca 2 yöntem uygulanmaktadır.

Yığılmış plastisite yönteminde duvar elemanları, birbiri ile bağlantılarının rijit veya yarı rijit olarak tanımlandığı eşdeğer kirişlerle modellenirken duvarların çatlaması durumunda gerçekleşen rijitlik kaybı yığılı mafsallar kullanılarak tanımlanır. Yığma duvarların deprem davranışındaki belirleyici faktörün kesme kuvveti olması nedeniyle duvarların alt kısımlarına Şekil 4.4’de gösterildiği gibi kesme mafsalları yerleştirilir. Bu mafsallar, kesme kuvveti-tepe yer değiştirmesi ilişkisini temsil etmektedir ve duvar çatlama dayanımına (F_y) ulaştığında devreye girerek doğrusal olmayan yer değiştirmelerin (u_y-u_m) gerçekleşmesini sağlayacaklardır. Kesme mafsallarının yük-yer değiştirme ilişkisinde belirleyici faktörler, duvarın aksenal yükü, narinliği ve basınç dayanımı parametreleridir [95]. Bu mafsallar kesitte oluşan plastik deformasyonları temsil etmemekte, sadece duvarın genel davranışının tanımlanmasını sağlamaktadır [96].



Şekil 4. 4 Yığma yapıların çubuk elemanlar ve yığılı kesme mafsallarıyla modellenmesi [96]

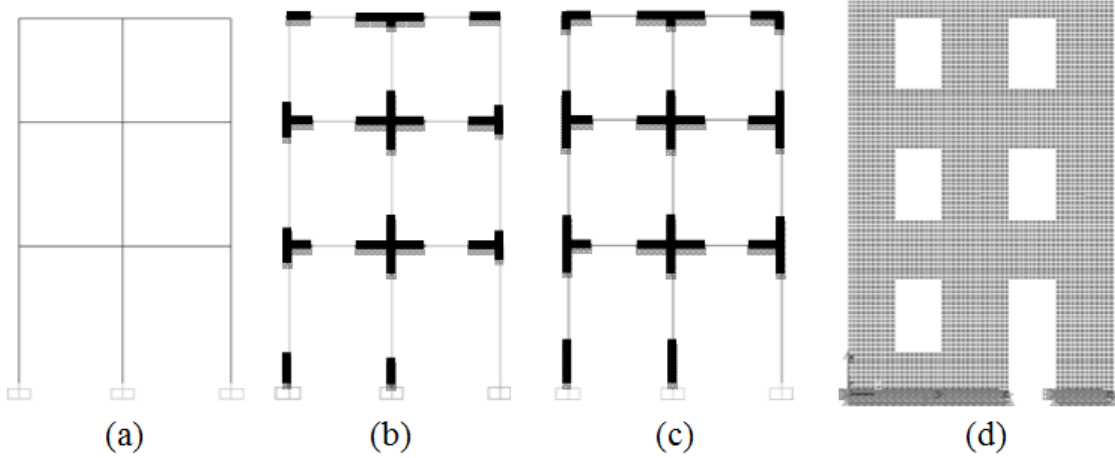
Burada, duvarın doğrusal olmayan davranışı, dayanımı ve yer değiştirmeleri yöntemin doğru sonuç vermesindeki en önemli etkenlerdir. Duvar parçalarının eşdeğer kirişlere dönüştürülmesinde duvar kesitlerinin özellikleri korunur ancak çubuk birleşim bölgelerinin bükülme direncine katılan etkin boylarının bilinmesi gerekmektedir. Yatay çubuk elemanlarının etkin boyları genelde temiz açıklıkla bulunurken düşey çubuk elemanları için öne çıkan iki yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden ilkinde yine temiz açıklıklar kullanılmaktadır. İkinci yöntem ise Dolce(1989) tarafından önerilen, temiz açıklıklara ek olarak birleşim bölgelerinin bir kısmının da bükülme direncinde rol oynadığı görüşüdür (Şekil 4.5). Yöntemde belirlenen uç rijitlikleri boyunca eşdeğer çubuk elemanları sonsuz rijit kabul edilmektedir [96].



Şekil 4. 5 Dolce(1989) tarafından önerilen etkin yükseklik (h') saptaması [96]

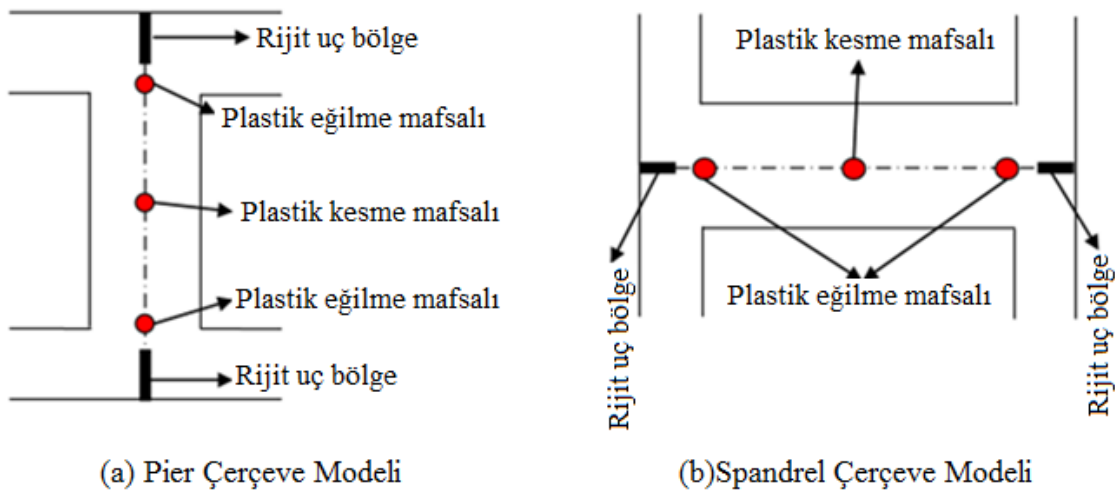
Boşluklu duvarlardaki yatay elastik direncin belirlenmesinde söz konusu yöntemlerden hangisinin daha başarılı sonuçlar verdiği düşey yükler ve kat diyaframlarına yüklenen deprem etkisinde Şekil 4.6'da gösterildiği gibi elastik analizler yapılarak incelenmiştir. Yapılan incelemelerle alakalı detaylı modelleme ve analiz adımları

Demirel [91]'de bulunabilir. Gerçekleştirilen analizlerle, kesme ve basma kuvvetleri ile kat yer değiştirmeleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalara göre sonlu eleman modeli sonuçlarına en yakın değerlerin Dolçe tarafından önerilen yöntemle elde edildiği belirlenmiştir [96].



Şekil 4. 6 Eşdeğer çerçeve modelleri, (a)Uç rijitliği yok, (b)Dolçe uç rijitliği, (c)Tam uç rijitliği, (d)Sonlu elemanlar modeli [96]

Yığılmış mafsallarla plastisite uygulamasının bir diğer yolu Şekil 4.7 ile gösterildiği gibi her eleman için üç farklı mafsal kullanmaktır. Bu yöntemde, eleman uçlarına yerleştirilen plastik mafsallar eğilme davranışını yansıtmaktadır. Bu nedenle uç mafsallar moment-dönme ilişkilerine göre tanımlanır. Moment kapasiteleri betonarme kesitlerdekine benzer şekilde bulunmaktadır. Elemanın ortasına yerleştirilen diğer plastik mafsal ise kayma davranışını yansıtmak için kullanılır [97]. Bu yöntemle ilgili daha detaylı açıklamalara Salonikios vd. [98]'dan ulaşılabilir.

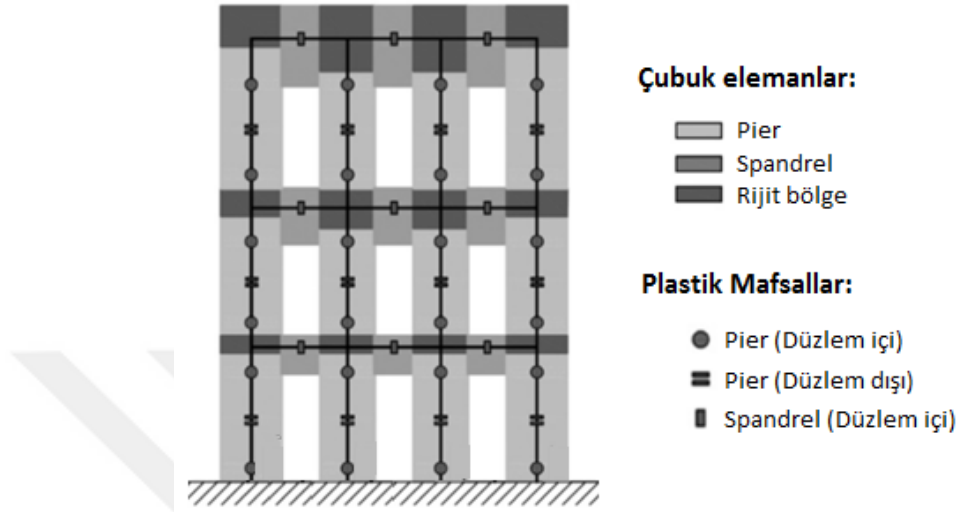


(a) Pier Çerçeve Modeli

(b) Spandrel Çerçeve Modeli

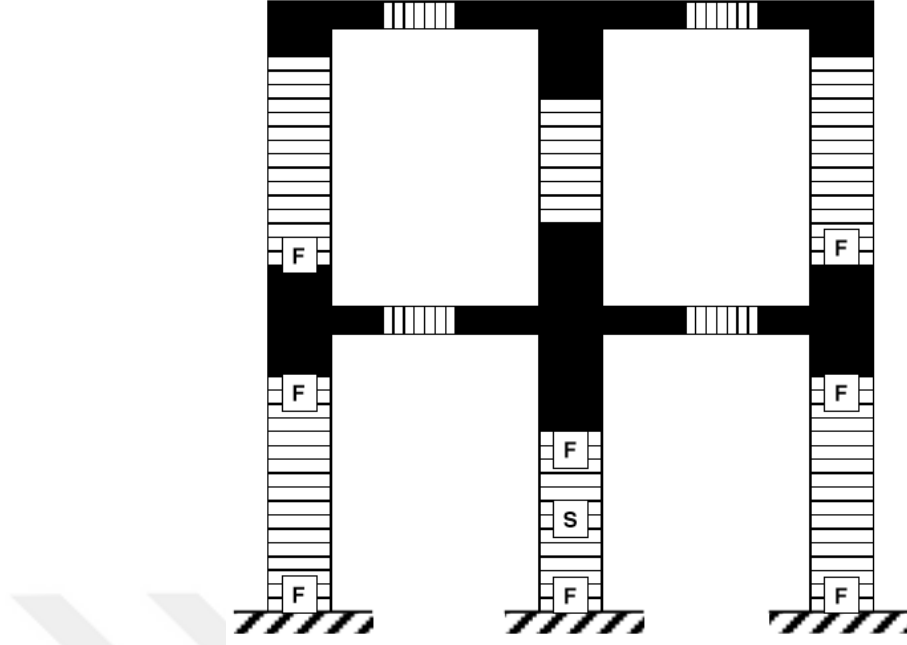
Şekil 4. 7 Üç mafsallı çubuk eleman modellemesi [97], [98]

Petrovčič ve Kilar [94], Şekil 4.8’de görülen doğrusal kiriş elemanları ve plastik mafsallar yaklaşımlarını kullanarak yaptıkları eşdeğer çerçeve yöntemine dayanan modellemeleri ile pierların değişik düşey yük ve eğilme momentleri etkilerini de dikkate alarak kompleks sismik hasar mekanizmasını daha basit bir şekilde tanımlayabilmişlerdir.



Şekil 4. 8 Eşdeğer çerçeve yöntemi ve plastik mafsal yerleşimi [94]

Dağıtılmış plastisite ile eşdeğer çerçeve yöntemi uygulamasında, yayılmış çatlaklar ve plastisite eleman boyunca dağıtılarak noktasal mafsal tayin edilmesi ile doğrusal olmayan davranışın yansıtıldığı yöntemden daha farklı bir analitik model kurgulanmıştır. Bu yöntemde, eksenel kuvvet-eğilme momenti ve eksenel kuvvet-kesme kuvveti etkileşimlerinin her ikisi de dikkate alınmaktadır. Pier ve spandrellarda elastik olmayan eğilme ve kayma deformasyonlarına izin verilmektedir. Açıklık ortasına dönüştürülebilir kayma yayları eklenmektedir ve açıklık sonlarında da eğilme mafsalları bulunmaktadır ancak pier ve spandrellar dilimler halinde ayrıştırıldığı için, doğrusal olmayan davranış açıklık boyunca dağılmıştır ve bu sayede plastisite elemanlara yayılmıştır [91].



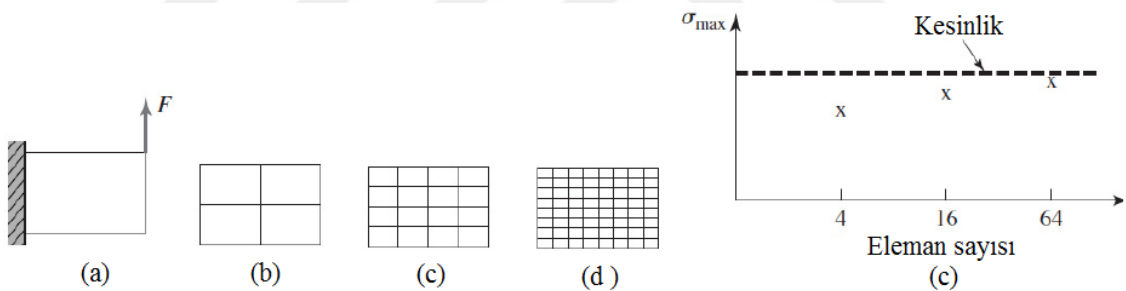
Şekil 4. 9 Eşdeğer çerçeve sonuçlarındaki hasar şekilleri [99]

Belmouden ve Lestuzzi [99], Şekil 4.9’da verilen şekilde, dağıtılmış plastisite yöntemiyle oluşturdukları doğrusal olmayan çerçeve modeli ile boşluklu bir yığma yapıda pushover analizi gerçekleştirmişlerdir. Burada F, bir dilimdeki eğilme çatlağını, S ise pier üzerindeki kesme çatlağını ifade etmektedir.

4.2.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, yığma yapıların analizinde gerçeğe en yakın sonuçları veren yöntemdir. Kullanılan yöntemlerden en popülerleri olarak karşımıza çıkan sonlu elemanlar yöntemi, teknolojinin ilerlemesi ile gelişen yazılımlar sayesinde kendi içinde de farklı yöntemler ile her türlü nümerik modellemeye ve yapısal analize imkan vermektedir. Sonlu elemanlar yönteminde, problemin tamamına ait genel denklemlerin yazılıp çözülmesi yerine ortam çok sayıda küçük parçaya bölünerek bir sonlu eleman ağı oluşturulur. Küçük parçaların her biri sonlu bir elemandır ve sonlu elemanların her biri için sistemin tamamı göz önüne alınarak kendi çözümlerini yansıtan denklemler yazılır. Sonlu elemanlar düğüm noktası adı verilen noktalarla birbirine bağlanır. Tüm sonlu elemanların ve denklemlerinin, mevcut sınır şartları dikkate alınarak birleştirilmesi ile sistemin tamamına ait denklem takımları oluşturulmuş olur. Elemanların genel eksenlere göre konumunu ve kendine ait olan koordinatlarını belirleyen eksenlere lokal

eksenler, tüm yapı sisteminin bulunduğu ortamı tanımlayan eksenlere ise global eksenler denir. Sonlu eleman bazındaki düğüm noktalarında tanımlanan temel değişkenlerin, elemanların birleştirilmesi ile oluşan bölge içerisinde sürekli bir ortamdaki değerlere dönüştürülmesinde şekil fonksiyonları kullanılır. Böylece, sonsuz sayıdaki parçalardan oluşan sürekli bir ortam, sonlu sayıda elemanlarla teşkil edilmiş bir yarı sürekli ortam olarak tanımlanmış olur. Kurulan denklem takımlarının çözülmesi ile bilinmeyenler hesaplanır. Bilinmeyen olarak yer değiştirmeler veya gerilmeler seçilebilir. Bilinmeyenler çözüldükten sonra elde edilen sonuçlardan diğer bilinmeyenler bulunabilir. Örneğin yer değiştirmeler biliniyorsa gerekli denklemler yazılarak gerilmelere ulaşılabilir. Çözümün doğruluğu ve gerçek duruma yakınlığı seçilen sonlu eleman tipine, sayısına ve yapılan kabullere bağlıdır. Sonlu eleman sayısının artması, hesabın gerçek duruma yakınlığını artırır ancak gereğinden fazla sayıda sonlu elemana bölüp çözüm yapmak da her zaman uygun değildir (Şekil 4.10). Fazla detaylı çözümler, uzun süre alan daha karmaşık hesaplamalar gerektirmektedir [69], [100].



Şekil 4. 10 Sonlu eleman sayısı ile yaklaşık sonuçların yakınsaklık ilişkisi [69], [100]

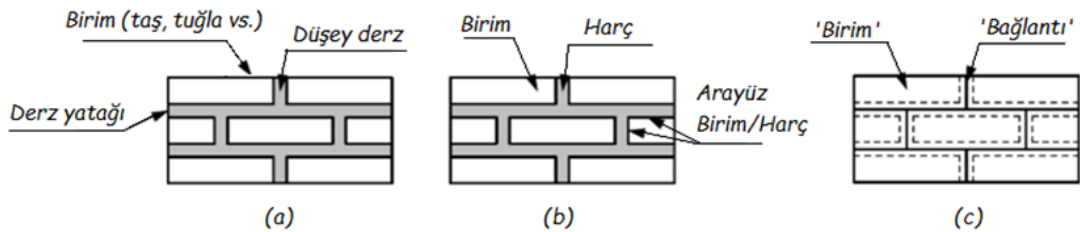
Yığma yapıların modellenmesinde en sık kullanılan yöntemin sonlu elemanlar yöntemi olması, bu tekniğin getirdiği avantajlardan kaynaklanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, düzgün olmayan geometrilere sahip elemanların modellenmesine uygundur. Özellikle tarihi yapılarda, mimari estetik amaçlı birçok yapısal detay bulunmaktadır. Ufak detayların dışında, kubbe ve tonoz, eğriliği bulunan sistemler gibi çeşitli değişik geometrili elemanlar, sonlu elemanlar sayesinde rahatlıkla modellenebilir. Hesaplamalarda yapılan kabullere ve hassasiyete bağlı olarak kritik görülen kesitler daha yakından irdelenebilir. Örneğin, gerilme yığılmalarının beklendiği bir tonoz duvar birleşimi daha fazla sayıda mesh ile modellenip o kısımlardaki gerilmelerin daha hassas

bir hesapla elde edilmesi sağlanabilir. Bölüm 3.2’de açıklanan, yığma yapıların inşasında farklı malzemelerin kullanılması problemi sonlu elemanlar yöntemi ile aşılabılır. Bu yöntemde, farklı malzeme tipleri tanımlanarak farklı elemanlar birleştirilebilir ve her malzemenin kendi özellikleriyle hesaba girmesi sağlanabilir. Yığma yapıların anizotrop ve heterojen malzeme özellikleri sonlu elemanlar yöntemi ile tanımlanabilir ve gerçek yapım tekniğine uygun modeller üretilebilir. Doğru sınır şartlarının atanması ile, her türlü dış etki veya mevcut yapısal hasar modele yansıtılarak tarihi binaların uzun seneler boyunca maruz kaldıkları statik ve dinamik yüklerin, mevcut yapısal özellikleri üzerindeki etkileri incelenebilir.

Yığma yapılarda görülen karmaşık geometriler ve malzeme çeşitlilikleri nedeniyle araştırmacılar, ağır nümerik modelleme ve hesaplamaları daha basite indirgeyecek metotlara yönelmişlerdir. Bu nedenle, yığma yapıların sonlu elemanlarla yapılan nümerik analizlerinde farklı modelleme stratejileri ve malzeme modelleri kullanılmaktadır. Detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme şeklinde adlandırılabilen bu stratejilerden her biri, eldeki veri detayına ve irdelenecek konunun kapsamına göre seçilebilmektedir.

4.2.3 Detaylı Mikro Modelleme

Yığma yapılardaki yük aktarımında ve duvarların davranışında, heterojen malzeme özellikleri nedeniyle yığma birimler, harçlar ve birim-harç etkileşimleri rol oynar. Detaylı mikro modelleme tekniğinde, birimler, derzler ve birim-derz arayüzü Şekil 4.11b’de görüldüğü gibi ayrı olarak titiz bir şekilde modellenerek duvarın gerçek heterojen yapısı dikkate alınır. Böylece birim ve harcın kendilerine ait elastisite modülü, poisson oranı ve elastik olmayan özellikleri gibi mekanik parametreleri dikkate alınır.



Şekil 4. 11 Yığma yapıların sonlu elemanlar ile modellenmesi : (a) Tipik yığma yapı modeli, (b) Detaylı mikro modelleme, (c) Basitleştirilmiş mikro modelleme [42]

Yığma yapılarda derzler zayıflığın öne çıktığı elemanlardır. Derz dayanımları yığma birimlerin dayanımlarından daha düşük olduğu için detaylı mikro modelleme tekniğinde derzlere yoğunlaşılır ve çatlakların birim-harç arayüzünde olduğu varsayımı yapılır. Bu teknikte yığma birim ve harcın mekanik özellikleri çok iyi bilinmelidir. Malzeme parametreleri hesaba doğrudan etki edeceğinden, gerçeğin dışında yapılan malzeme tanımlamaları çok yanlış sonuçlar doğurabilir. Lourenço(1996) çalışmasında, birim ve harç özellikleri, düşey ve yatay derzlerin dizilişi, birimlerin izotrop olmayışı ve boyutları, derz kalınlığı, işçilik kalitesi, duvarların bakımı ve korunma derecesi, çevresel etkiler, elemanların yaşı gibi birçok faktörün yığma duvarların özelliklerini etkilediğini belirtmiştir [91]. Bu nedenle mikro modelleme tekniğinin kullanılabilmesi için eldeki verilerin yeterli olması gerekmektedir. Yeterli olmayan durumlarda Bölüm 2’de açıklanan yöntemler kullanılarak malzeme parametreleri belirlenmelidir.

Detaylı mikro modelleme tekniğinin gerektirdiği veri detayı ve uygulama zorlukları nedeniyle yapının tamamında kullanımı zordur ancak küçük ölçekli yapılarda veya daha detaylı analizlerin yapılmak istenmesi durumunda yapının belli bir bölümünde kullanılabilir. Örneğin, farklı malzeme birimlerinin veya harçların kullanıldığı bir duvar ele alınarak malzemeler ayrı ayrı modellenenebilir ve duvar davranışı incelenebilir veya değişen harç kalınlıkları ve malzeme boyutları gibi detaylı incelemelerin amaçlandığı çalışmalarda bu yöntem kullanılabilir.

Chang Xu vd. [101], yığma duvarların çoğunlukla homojen olarak modellendiğini belirterek aslında heterojen yapıda olan duvar davranışlarının daha detaylı incelenebilmesi amacıyla, birim, harç ve arayüz olarak 3 fazlı oluşturdukları mikro modelleme ile heterojenliğin kayma ve basınç davranışlarını ve mekanik performans etkisini incelemişlerdir.

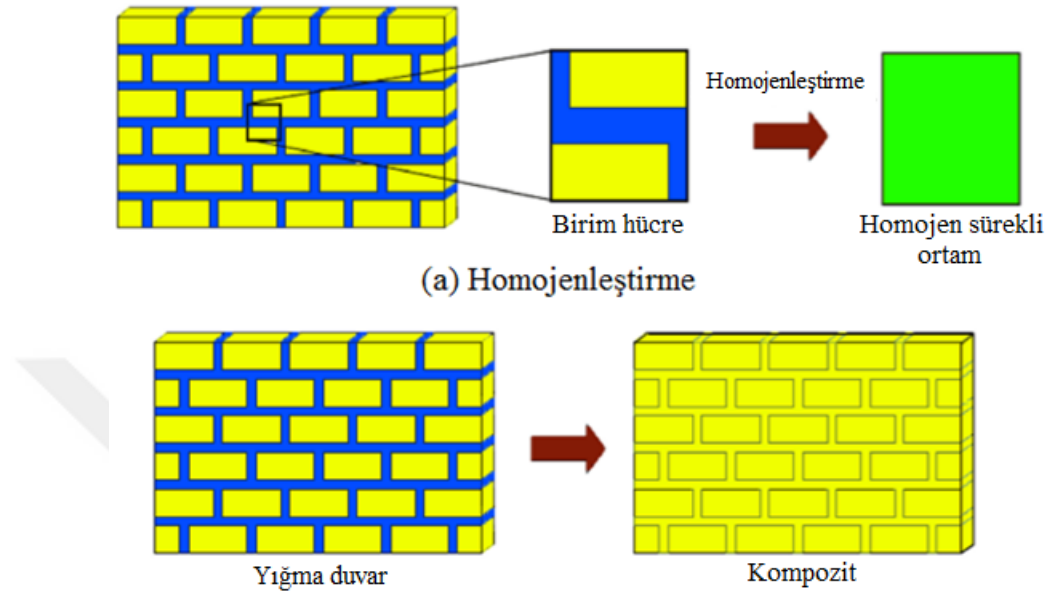
Drougkas vd. [102] çalışmalarında, özel bünye bağıntıları ile kurguladıkları nümerik detaylı mikro modelleme tekniğini kullanarak yığma elemanların basınç etkisindeki davranışları, dayanımları ve elastisitesi üzerinde çalışmışlardır.

4.2.4 Basitleştirilmiş Mikro Modelleme

Detaylı mikro modelleme ile yapılan analizlerin gerçeğe oldukça yakın sonuçlar verdiği bir çok araştırmacı tarafından doğrulanmıştır ancak yöntemin uygulama zorlukları düşünüldüğünde, kompleks ve büyük yapılarda kullanımının pek de mümkün olmadığı açıktır. Çok büyük denklem takımlarının kurulması, özellikle doğrusal olmayan analizlerde analiz süresini uzatmaktadır ve günümüz teknolojisindeki ortalama bilgisayarlar bile bu çözümleri rahatlıkla yapamamaktadır. Daha gelişmiş bilgisayarlar ile analiz süresi kısaltılabilse de modelleme ve analiz zorluklarının kalıcı çözümleri için araştırmacılar daha basit yöntemlere yönelmiştir. Bu yöntemlerden biri basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğidir. Bu teknikte, harç ve arayüz ayrı şekilde ele alınmadan Şekil x(c)'de görüldüğü gibi birim-harç bağlantısını da ifade eden ortak bir arayüz tanımlanır. Heterojen duvar yapısı, birim ve arayüzden oluşan bir eleman şeklinde idealize edilerek, detaylı mikro modellemeye göre daha basit bir yöntem izlenmiş olur.

Basitleştirilmiş mikro modelleme yönteminde yığma birimler harç kalınlığının yarısı kadar büyütülür ve harç ortadan kaldırılır. Birimlerin birbirine temas ettiği, her birimi birbirinden ayıran bağlantı noktaları arayüzeyi oluşturur. Teknikte yapılan bu kabulün getirdiği bazı dezavantajlar bulunmaktadır. Hem çekme hem de kayma parametrelerinin arayüz elemanı ile tanımlanması gerekmektedir. Bu nedenle çekme, kayma çatlakları ve tüm hasarlar arayüz elemanında meydana gelirken birimlerde öngörülen çatlakların ise birim ortasında ve düşey yönde oluşacağı varsayımı yapılır. Bunun sonucunda, yığma birimlerde oluşacak farklı hasar tipleri, birleşim ve derz hasarları gibi muhtemel göçme mekanizmalarının tümü ayrı şekillerde dikkate alınamamaktadır [35]. Basitleştirme işleminde, her bağlantı noktasında kütle yoğunlaştırılması yapılmaktadır ve harcın poisson oranı dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle Lourenco [42], çalışmasında basitleştirilmiş mikro modelleme sonuçları ile detaylı mikro modelleme sonuçları arasında bazı farklar olacağını belirtmiştir ancak bu fark ihmal edilebilecek düzeydedir [103]. Lourenço aynı çalışmasında modellemede kullanılacak normal ve kayma rijitliği parametreleri k_n ve k_s değerleri için aşağıdaki bağıntıları önermiştir.

Yapılan homojenleştirme işlemine dayanarak kurulan makro modeller ile daha az sayıda malzeme parametreleri kullanılarak diğer modelleme yöntemlerine kıyasla daha hızlı analizler yapılabilir. Rekik ve Lebon [105], Milani [106], Bertolesi vd. [107], literatürde homojenleştirme yöntemlerini konu alan çalışmalar sunmuşlardır.



Şekil 4. 13 Homojenleştirme ve makro modelleme yöntemi [5]

Makro modelleme tekniğinin, gerilmelerin uniform veya uniforma yakın olarak dağıldığı büyük ebatlı yapı elemanları içeren büyük sistemlerde kullanımı oldukça uygundur. Büyük yapılarda bu tekniğin kullanılması, analiz süresi ve efor bakımından da önemli avantajlar sağlamaktadır ancak makro modelleme tekniği, yapılan kabuller sebebiyle mikro yöntemlere kıyasla gerçek durumdan daha uzak sonuçlar verebilmektedir. Bu teknikte, kompozit malzeme için kabul edilecek değerler, duvarın gerçek değerleri ve davranışı ile uyumlu olmalıdır. Değişen derz kalınlıkları, yapı elemanı içerisinde farklı ebatlı veya farklı özellikli malzemelerin kullanımı gibi anizotropluk etkisinin fazla olduğu durumlarda, makro modeller için anizotrop malzeme tanımlarının kullanılması, gerçek hesaba daha yakın sonuçlar verebilmektedir. Literatürde makro modelleme ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Aşağıda (4.3) ifadesi ile, kompozit malzeme için kullanılacak, araştırmacılar tarafından belirlenmiş elastisite modülü bağıntısı verilmiştir [108].

$$E_k = \frac{(t_h + t_t) \times \rho_k}{(t_h/E_h) + (t_t/E_t)} \quad (4.3)$$

Burada;

E_k : Kompozit malzemenin elastisite modülü

t_h : Harç kalınlığı

t_t : Birim kalınlığı

E_h : Harç elastisite modülü

E_t : Birim elastisite modülü

ρ_k : Birim ile harç arasındaki aderans katsayısı (0-1 arasında alınmaktadır) olarak ifade edilmektedir.

Ghiassi vd. [109], donatısız yığma duvarların bileşik eksenel yükler, kesme ve eğilme yükleri altındaki kayma davranışını ele almışlardır. Çalışmada, duvarların doğrusal olmayan davranışı da dikkate alınarak makro modelleme tekniği kullanılmıştır.

Marques ve Lourenço [110], çalışmalarında donatısız ve hatıllı yığma binalar için makro modelleme tekniğine göre oluşturdukları modeli performansa dayalı doğrusal olmayan pushover analizi ile doğrulamışlardır.

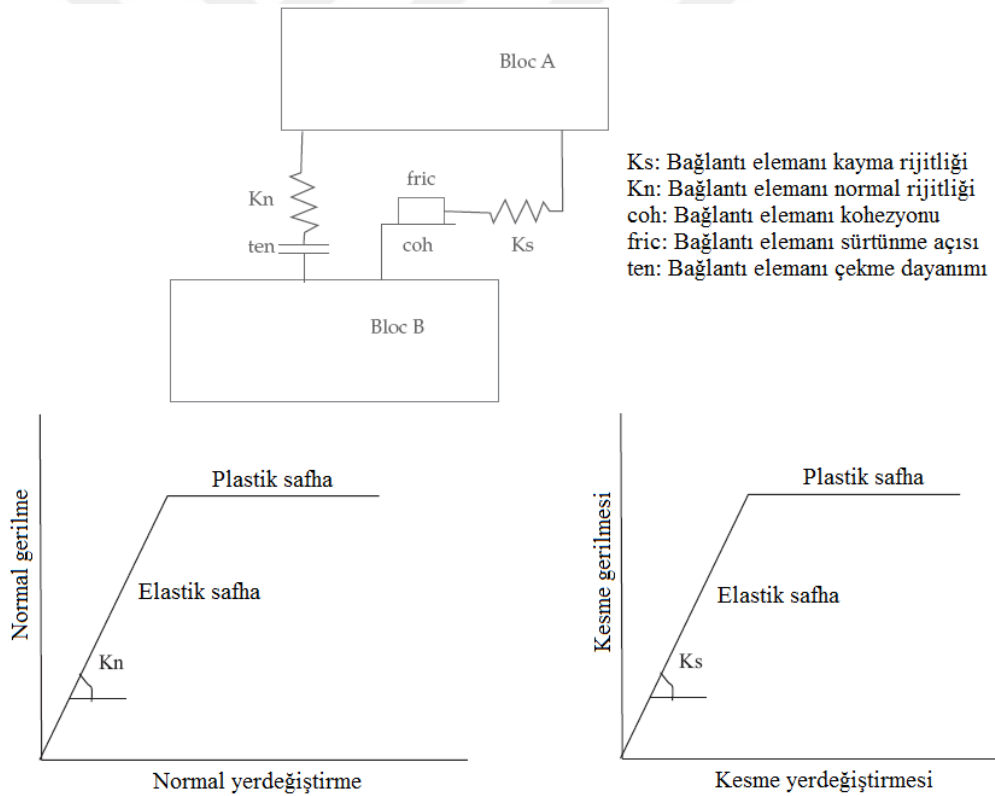
Miccoli vd. [111], makro modelleme kullanarak çatlak davranışını da yansıtabilecek doğrusal olmayan bir model ile duvar davranışını incelemiştir ve mikro modelleme de kullanarak deneysel verilere dayanan karşılaştırmalar yapmıştır. Makro modelleme tekniğinin mikro modellemeye kıyasla daha az maliyet ve sürede tutarla sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

4.2.6 Ayırık Elemanlar Yöntemi

Mikro modelleme tekniği altında uygulanabilen bu yöntemde yapı, katı veya deforme olabilen ayrı blokların birleşimi şeklinde ifade edilmektedir. Yöntem, derzlerdeki büyük, birimlerdeki küçük yer değiştirmeler üzerine kurulmaktadır. Yer değiştirmelerin fazla olduğu sistemlerde ayırık elemanların kullanılması zorlaşmaktadır. Ayırık elemanlar tekniği ile yüzeyler ve köşe noktaları arasındaki bağlantılar ve elemanların birbiri içine geçme durumları oluşturulabilir. Bağımsız hareket edebilme özelliği ve büyük yer değiştirmelerin yeterli kabullerle formülize edilebilmesi bu yöntemin avantajlarından. Dezavantajları ise, mikro modellemenin gereği olarak malzeme

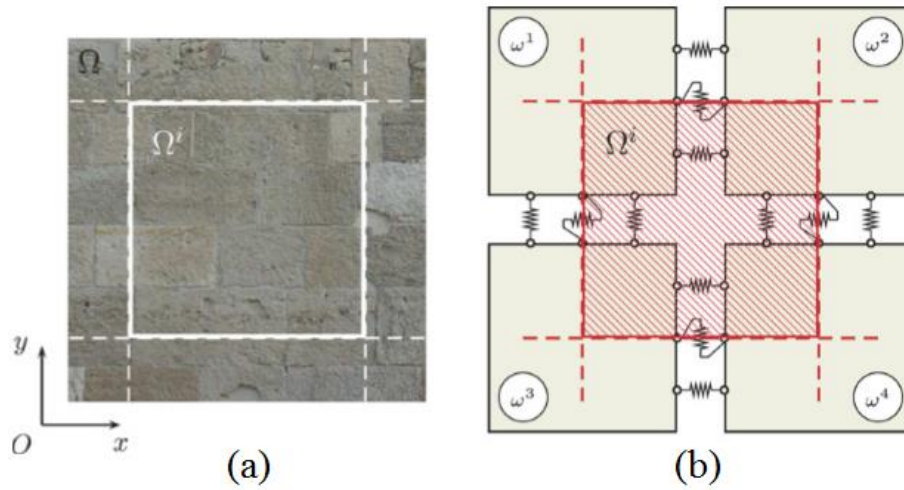
parametreleri çok iyi bilinmelidir ve çok fazla temiz yüzeyi bulunması modelleme işlemlerinin gerektirdiği süre ile eforu arttırmaktadır [69].

Ayrık elemanlar yönteminde, bağlantı elemanlarının normal ve kayma rijitliklerinin tanımlanması önemlidir. İki blok arasındaki her bağlantıda, bloklar arasındaki mekanik etkileşim, normal gerilme (σ_n), yer değiştirme bileşenleri, kayma gerilmesi (τ) ve yüzeyel yer değiştirme bileşenleri kullanılarak kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi ile ifade edilmektedir. Bağlantı yer değiştirmelerinin tanımlanmasında, bağlantı noktasında iki blok arasındaki göreceli yer değiştirmeler kullanılır. Elastik davranış bölgesinde bağlantı kuvvetleri ve yer değiştirmeler, Şekil 4.14'de görüldüğü gibi bağlantı rijitlik parametreleri (normal ve kesme) ile ilişkilidir ancak çatlak oluşması durumunda veya elasto plastik davranışta, hasar kriterleri kohezyon ve sürtünme açısının fonksiyonu olan Mohr-Coulomb kriteri ile ifade edilmektedir [112].



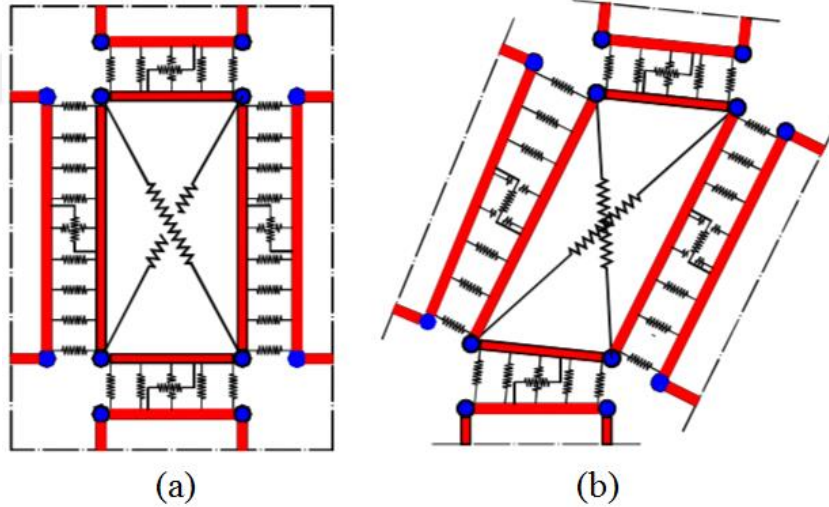
Şekil 4. 14 Bağlantı elemanlarının davranışı [112]

Literatürde Rigid Body Spring Model (RBSM) olarak adlandırılan yöntem ayrık elemanlar metodu kapsamında en yaygın yöntemlerdendir. Birçok yazar, rijit birimler ve elastik-plastik normal ve kesme yayları kullanarak Şekil 4.15'deki gibi birim hücre tanımlamaları ile heterojen duvar yapısını başarıyla yansıtmıştır [113].



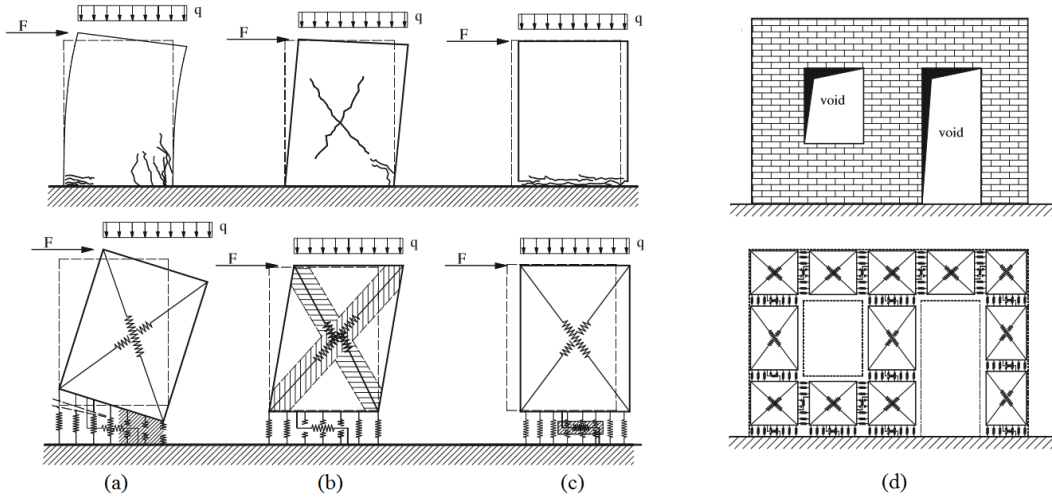
Şekil 4. 15 Tipik yığma duvar elemanı, (b) Yaylar ile bağlanmış rijit elemanlardan oluşturulan “Birim Hücre” [113]

Calio vd. [114], doğrusal olmayan sonlu elemanlar modellemelerinden daha pratik bir ayrık eleman yöntemi üzerinde çalışmışlardır. Şekil 4.16’da görüldüğü gibi 4 rijit eleman, 4 mafsal ve iki diyagonal doğrusal olmayan yay kullanarak temel bir eleman tanımlamışlardır.



Şekil 4. 16 Deforme olmamış(a) ve deforme olmuş(b) Temel makro eleman [114]

Burada her bir elemanın kenarı, diğer elemanlar ile doğrusal olmayan yaylar vasıtasıyla bağlanmıştır. Oluşturulan model, Şekil 4.16’da görüldüğü gibi eğilme çatlakları, diyagonal kesme çatlakları ve kayma çatlakları gibi yığma duvarlardaki muhtemel göçme mekanizmalarını yansıtabilmektedir. Böylece yığma duvarları Şekil 4.17’deki gibi tanımlayıp daha basit bir modelleme tekniği sunarak deprem etkisi altındaki davranışlarını incelemişlerdir [114].

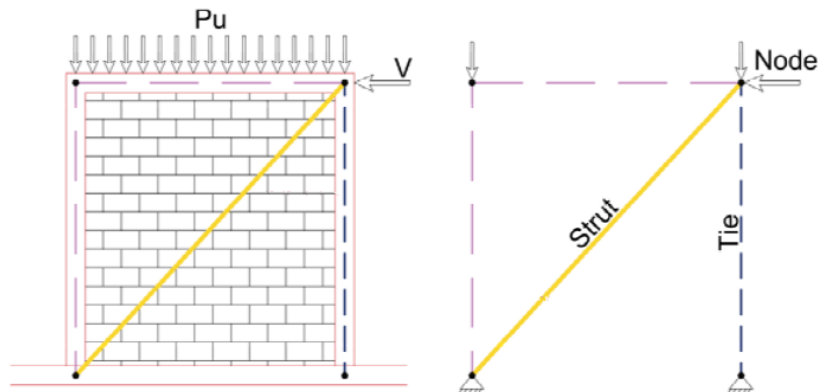


Şekil 4. 17 Düzlem içi hasar mekanizmaları, (a) Eğilme, (b)Diagonal kesme, (c) Kesme kayması ve (d)Ayrık elemanlar modeli [114]

Serhal vd. [112], Casolo ve Sanjust [113], Calio vd. [114], Dimirti vd.[115] ve Çaktı vd.[116] literatürde yer alan ayrık elemanlar yöntemi çalışmalarındandır.

4.2.7 Kafes Sistem Benzeşimi Yöntemi

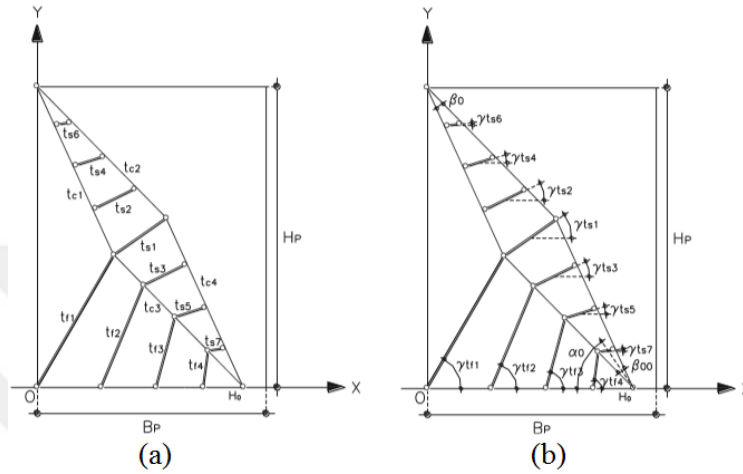
Kafes sistem benzeşimi (Strut and Tie) yöntemi aslında eğilme, kesme ve burulma etkisi altındaki çatlamış betonarme elemanlar için geliştirilen bir yöntemdir ancak son yıllarda yığma yapı modellemeleri için de kullanıldığı görülmektedir. Bu teknikte, duvar elemanlarındaki kuvvet dağılımı basitleştirilmiş bir şekilde kafes kiriş modeli ile idealize edilmektedir. Yöntemin avantajı daha basit modellemelere imkan vermesidir. Şekil 4.18’de hatıllı bir yığma duvarın kafes sistem benzeşimi modeli verilmiştir [117].



Şekil 4. 18 Kafes sistem benzeşimi modeli [117]

Kafes sistem benzeşimi yöntemi limit analizin alt sınır teoremine dayalı bir tekniktir. Alt sınır teoreminin orijinali aslında yığma elemanlara pek de uygun olmayan elasto plastik

malzeme davranışı için geçerlidir ancak bu yöntem, yığma elemanların elasto plastik veya elastik davranış gösterdiği ve çekme gerilmeleri almadığı varsayımı yapılarak yığma duvarlar için de kullanılabilir. Foraboschin ve Vanin [118], Şekil 4.19'da gösterildiği gibi kurguladıkları gelişmiş bir kafes kiriş benzeşimi ile yığma duvarların düzlem içi hasar mekanizmalarını yansıtarak doğrusal olmayan statik analizlerini yapmışlardır.



Şekil 4. 19 Gelişmiş kafes sistem benzeşiminin geometrik yapısı, (a)Kafes kirişleri, (b)Kiriş açıları [118]

Yapı modellemelerinde, herhangi bir yapıda açıklanan yöntemlerden sadece birinin kullanılması zorunlu değildir. Analizin amacı ve eldeki verilerin ölçüsüne bağlı olarak farklı modelleme teknikleri aynı yapı içerisinde kullanılabilir. Örneğin, yapının daha kritik bölümlerinde sonlu elemanlar kullanılırken, gerilme ve yük aktarımının göreceli olarak daha basite indirgenebileceği kısımlarda eşdeğer çerçeve idealizasyonu kullanılabilir. Benzer şekilde, yapının kritik kesitlerinde mikro modellemeler uygulanırken daha önemsiz yapı kısımlarında makro modellemeler kullanılabilir. Clementi vd. [119], mümerik modellemede solid elemanlar ile eşdeğer çerçeve yöntemini birlikte kullanarak tarihi yığma binanın sismik davranışını incelemişlerdir. Smoljanovic vd. [120], taş yığma binaların yapısal davranışları için, geometri ve malzemedeki doğrusal olmama durumlarını da hesaba alarak yaptıkları monolitik, tekrarlı ve sismik yükler altındaki doğrusal olmayan analizde sonlu ve ayırık eleman yöntemlerini birlikte kullanmışlardır.

DİNAMİK PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

Yapılara etkiyen dinamik yüklerin kesin olarak bilinmemesi ve yapının dinamik özelliklerini etkileyen faktörlerdeki belirsizlikler nedeniyle yapıların dinamik özelliklerinin saptanması oldukça zordur. Yapının dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi, daha gerçekçi yapısal analizlere imkan sağlamaktadır çünkü bu karakteristikler yapı hakkında önemli bilgiler verir ve bilgiler de davranışın ortaya çıkarılmasında büyük öneme sahiptir. Doğal frekans, mod şekilleri, sönüm oranları olarak adlandırılan yapı dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde teorik ve deneysel modal yöntemler kullanılmaktadır.

5.1 Teorik Modal Analiz

Teorik modal analiz, tek serbestlik dereceli veya çok serbestlik dereceli sistemler üzerinden kurulan teorik model ile yazılan denge denklemleri çözülerek yapılır. Gerçek sistemlerin birçoğu çok serbestlik derecelidir ve bu sistemlerde yapıya ait frekans ve mod şekilleri teorik modal analizde genel dinamik hareket denklemi kullanılarak aşağıda açıklanan şekilde belirlenmektedir.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (5.1)$$

Tek serbestlik dereceli sistemlerde denklem değerleri skalerdir ancak çok serbestlik dereceli sistemlerde skaler değerler yerine vektörel değerler ve matris büyüklükler kullanılır. Burada, $[M]$ kütle matrisini, $[K]$ rijitlik matrisini, $[C]$ sönüm matrisini $\{\ddot{x}(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$, $\{x(t)\}$ ve $\{F(t)\}$ ise sırasıyla zamana bağlı ivme, hız, yer değiştirme ve kuvvet

vektörlerini ifade etmektedir. Sönümsüz serbest titreşim durumunda $[C]$ ve $\{F(t)\}$ yerine 0 yazılarak (5.2) ifadesi elde edilir.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (5.2)$$

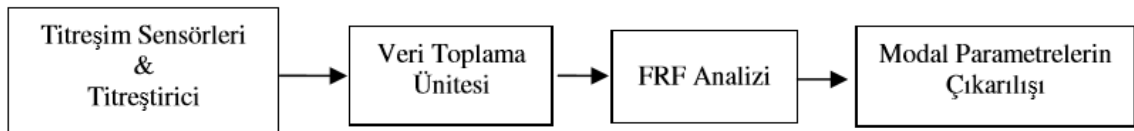
(5.2)'nin çözülmesiyle, sistemin serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal açısal frekans ($w_1, w_2, w_3, w_4 \dots w_n$) elde edilir. Her doğal frekansa karşılık olarak yapının almış olduğu şekle mod şekli denir. Doğal frekanslar küçükten büyüğe doğru sıralanır. En küçük frekansa temel frekans denir ve buna karşılık gelen en büyük periyoda sahip mod şekli de sistemin 1.modu olarak elde edilir [89], [121].

5.2 Deneysel Yöntemler

Deneysel modal analiz ve operasyonel modal analiz, yapıların dinamik karakterlerinin belirlenmesinde kullanılan deneysel yöntemlerdir. Teknolojinin ilerlemesi, yapılardaki çok düşük frekansların çok hassas ivmeölçerlerle ölçülebilmesine olanak sağlamıştır ve bu şekilde deneysel yöntemler geliştirilmiştir. Söz konusu deneysel yöntemler, titreşimlerden kaynaklanan yapıya ait tepkilerin ölçümlerle toplanması ve çeşitli yöntemlerle yapı dinamik parametrelerinin belirlenmesi suretiyle uygulanmaktadır. Deneysel yöntemlere ihtiyaç duyulmasının birçok sebebi bulunmaktadır. Teorik modal analizde yapılan sınır koşulları ve malzeme kabulleri, yapının mevcut dinamik karakteristiklerinin belirlenmesindeki zorluklardandır. Özellikle tarihi binalarda karşılaşılan malzeme ve sınır koşullarıyla ilgili veri eksiklikleri veya modelleme zorluklarının aşılması için yapılan geometrik kabullerden önceki bölümlerde bahsedilmişti. Bu noktada, bahsedilen veri eksiklikleri nedeniyle, yapılan kabuller doğrultusunda oluşturulan nümerik modellerden elde edilen teorik modal parametrelerin gerçeğe uygunluğunun irdelenmesi önemlidir. Bunun dışında, yapıların maruz kaldığı düşey ve yatay etkiler sebebiyle oluşan hasarların yapının dinamik davranışını değiştirdiği bilinmektedir veya yapının inşa aşamasından kaynaklanan faktörler de dinamik özelliklerin farklılaşmasına yol açabilmektedir. Deneysel ölçüm yöntemleri, yapının mevcut dinamik karakterlerinin görülmesine olanak sağladığından bu yöntemlerle, açıklanan belirsizliklerin yaratabileceği farklılıklar olabildiğince giderilerek yapı hakkında daha gerçekçi verilere ulaşılabilir. Ulaşılan gerçekçi veriler ile, önceden yapılan teorik modeller iyileştirilebilmektedir ve yapısal davranışın daha

gerçekçi bir şekilde incelenebileceği sonlu elemanlar modelleri ile gerçeğe daha yakın analizler yapılabilmektedir.

Deneysel modal analiz yönteminde, ölçümlerde kullanılan titreşim kuvveti bilinmekte ve alınan tepki bilinen bir titreşim kuvveti etkisine bağlı olarak bulunmaktadır. Yani bu yöntemde, yapıya etki olarak bir kuvvet uygulanır ve tepki olarak da yapının vereceği ivme ölçülür. Yapıya uygulanan etki kuvveti, sarsıcılar, darbe çekiçleri vb. kullanılarak oluşturulur. Deneysel modal analiz uygulaması Şekil 5.1’de gösterildiği gibi özetlenebilir. Öncelikle yapının belli yerlerine ivmeölçerler yerleştirilir. Daha sonra yapı titreştirilerek veriler toplanır. Ardından FRF (Frekans Tepki Fonksiyonu) analizi yapılarak, piklerin seçilmesi (Peak-Picking, PP), Kompleks Üssel Eğri Uydurma (Least Square Complex Exponential Fit), Frekans Alanlı Polinom Uydurma (Frequency Domain Polynomial Fit) ve FRF Sentezi (FRF Synthesis) gibi çeşitli algoritmalar kullanılarak modal parametreler elde edilir [89].



Şekil 5. 1 Deneysel modal analiz [89]

Operasyonel modal analiz yönteminde de ivme ölçerlerle titreşim kayıtları toplanarak modal parametreler elde edilir ancak bu yöntemde yapıya tepki niteliğinde bir kuvvet uygulanmadan yapının rüzgar, taşıt, canlı aktiviteleri gibi çevresel etkiler altında verdiği tepkiler toplanır. Sadece yapı tepkilerinin kullanıldığı bu yöntem deneysel modal analize göre daha yeni bir yöntemdir ve kullanımı sırasında yapıdaki faaliyetlerin kesilmesini gerektirmemesi, ekipman maliyetinin daha düşük olması ve kullanılan titreştiricilerle yapıya zarar verilmemesi yöntemin avantajlarındandır. Operasyonel modal analiz Şekil 5.2’de görüldüğü gibi uygulanmaktadır [89].



Şekil 5. 2 Operasyonel modal analiz [89]

Operasyonel modal analizde çevresel etkiler tam olarak bilinmediğinden, modal parametrelerin çıkarılmasında deneysel modal analizden farklı algoritmalar kullanılmaktadır [89]. En yaygın olarak kullanılan yöntemler Frekans Ortamında Ayrıştırma (FOA, Frequency Domain Decomposition, FDD) ve Stokastik Altta Belirleme (SOA, Stochastic Subspace Identification, SSI) yöntemleridir.



ÖRNEK ÇALIŞMA : DAVUTPAŞA KIŞLASI’NIN YAPISAL ANALİZİ

Tez kapsamında, Koçak vd. [122] tarafından da ele alınmış tarihi Davutpaşa Kışlası’nın düşey ve yatay yükler altında yapısal analizi konu alınmıştır. Öncelikle alanda yapılan geometrik ölçümler ile tarihi binanın kesit ve plan çizimleri hazırlanmıştır. Daha sonra bina, 3 boyutlu olarak modellenmiştir ve mod şekilleri ile periyot değerleri elde edilerek yapısal davranışı gözlemlenmiştir. Ardından deneysel ölçüm yöntemlerinden olan operasyonel modal analiz yöntemi kullanılarak, başlangıç nümerik modeli verilerine göre yerleştirilen ivmeölçerlerle titreşim kayıtları toplanmıştır. Deneysel yöntem ile elde edilen dinamik parametreler başlangıç nümerik modeliyle karşılaştırılıp sonuçlar yorumlanmıştır. Ardından, tarihi binanın düşey ve yatay yükler altında doğrusal analizi ile TDY2007 yönetmeliğine göre duvar elemanlarının kesme güvenliği kontrolleri yapılmıştır. Nümerik sonuçlara göre elde edilen hasarlar ile binanın mevcut hasarları karşılaştırılmıştır. Düşey yükler altındaki nümerik analiz sonuçları ise, alanda yapılan geometrik zemin çökmesi ölçümleri ile karşılaştırılarak sonuçlar irdelenmiştir. Bu şekilde, binanın düşey ve yatay yükler altındaki yapısal davranışı yorumlanarak gelecekte oluşabilecek hasarlar ile ilgili yorumlar yapılmıştır. Bu bölümde öncelikle, ele alınan tarihi bina tanıtılmıştır. Ardından ise, deneysel ve nümerik çalışmalar açıklanarak elde edilen sonuç ve yorumlar sunulmuştur.

6.1 Davutpaşa Kışlası

Davutpaşa Kışlası, günümüzde Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa Kampüsü bünyesinde bulunmaktadır. Esenler ilçesine bağlı Davutpaşa Semtî'nde bulunan kışla yapısı, 12 pafta, 1444 parseldedir ve 1.312.500 m² lik bir alanda yer almaktadır [123].

6.1.1 Kışlanın Tarihçesi

Davutpaşa Kışlası, 1242/1826-1827 tarihli kitabesine göre, II.Mahmut döneminde yeniçeri ocağının kaldırılmasından sonra kurulan Asakir-i Mansure-i Muhammediye (Muhammed'in galip gelmiş askerleri) ordusu için inşa edilmiştir. Kışla mimarının Krikor Amira Balyan olduğu edilmektedir. Kışlanın inşaatına 1826-1827 yıllarında başlanmıştır ve yapımı, 1831-1832 yıllarında tamamlanmıştır [123], [124].

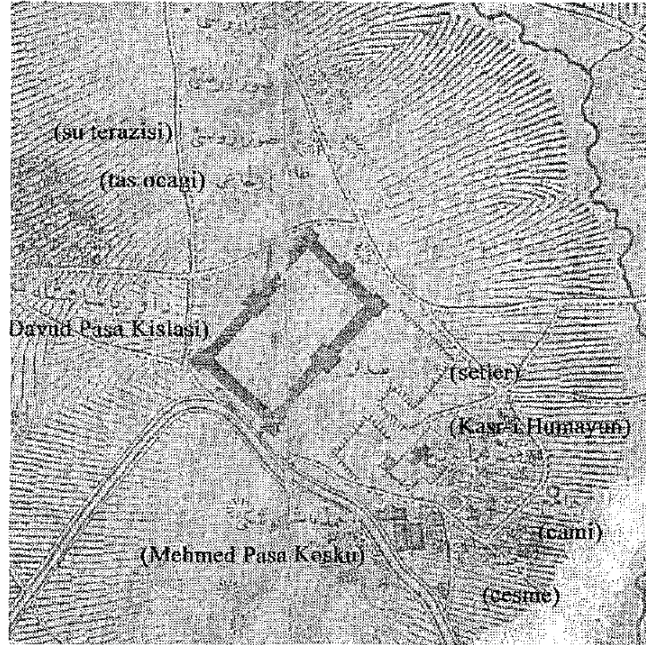
Davutpaşa Kışlasının bulunduğu yer yüksek noktalardan biridir ve bu bölge, Fatih Sultan Mehmet döneminden beri askeri alan olarak kullanılmıştır. Bölgede yer alan su yolu, sarnıç kalıntıları ve bir kargir binadan geriye kalmış tonoz parçaları, buranın Bizans döneminde de askeri faaliyetler için kullanılmış olabileceğini işaret etmektedir. Davutpaşa Sahrası olarak da adlandırılan bu bölge, Osmanlı'da önemli bir askeri role sahip olmuştur. Osmanlı döneminde, Avrupa tarafına yapılacak seferlerde ordunun son konaklama yeri olarak Davutpaşa Sahrası kullanılmıştır. Avrupa seferlerinden dönen ordu da ilk olarak, İstanbul'u Edirne'ye bağlayan yol üzerindeki Davutpaşa Sahrası'nda konaklamıştır. Padişahların da orduyla birlikte seferlere katılmaları veya sefere katılmasalar da orduyu sefere uğurlamaları sebebiyle sıklıkla Davutpaşa Sahrası'nda bulunmaları sebebiyle burada padişah köşkleri inşa edilmiştir. Padişah için ilk köşkü yaptıran kişi, Fatih Sultan Mehmet döneminde Beylerbeyi, II.Bayezid döneminde ise sadrazamlık görevlerini üstlenmiş olan Davut Paşa'dır. Bölge, ismini bu şekilde Davut Paşa'dan almıştır [123], [125].

Davutpaşa Kışlası, 19.yüzyılda, kışla binası, cami, hamam, çeşme, fırın ve karakoldan oluşmaktaydı. Başbakanlık Osmanlı Arşivi (BOA)'ndeki 1243/1827-1828 tarihli bir belgeye göre, kışlanın önü Şekil 6.1'deki gibi Talimhane Meydanı olarak düzenlenmiştir [123], [126].



Şekil 6. 1 Osmanlı süvarilerinin kışla önündeki talimleri [126]

Kışla, Moltke Haritası'nda (1268/1851-1852), dikdörtgen bir kutu şeklindedir ve ortada avlu bulunmaktadır (Şekil 6.2). Haritada kışlanın batı ve kuzey cephesinde uzanan bölümleri orta kısımlarından çıkıntılı olarak çizilmiştir. 1999 yılında, kışlanın batı kanadında yeni bir inşaat için yapılan kazılarda, kışlanın günümüze kadar ulaşmamış batı kanadına ait kalıntılara rastlanılmıştır [123].



Şekil 6. 2 Moltke Haritası (1268/1851-1852) [123]

Molke haritasında, Bizans döneminden kalma bir yer altı sarnıcı, Kasr-ı Humayun, Mehmed Paşa Köşkü ve su deposu da görülmektedir ancak bu yapılardan bazıları günümüze kadar ulaşabilmişken, bazıları ulaşamamış, bazılarının ise kalıntıları ulaşabilmiştir. Kışla binası, batı kanadında kışlaya bitişik olarak inşa edilen hamam, Kasr-ı Humayun (Otağ-ı Humayun) ve Edirne yolu asfaltı üzerinde yer alan fırın, günümüze kadar ulaşabilen kışla yapılarındandır. Molke Haritası'nda da gösterilen cami günümüze kadar ulaşamamıştır ancak Otağ-ı Humayun'un yakınlarında bulunan kesme taş duvar kalıntılarının cami yapısına ait olduğu bilinmektedir [124]. Karakol yapısı ise günümüze kadar ulaşamadığından mimari özellikleri hakkında yeterli bilgi elde edilememiştir. Kışla yapısında, su yetersizliği nedeniyle 1849'da bir çeşme yapılarak dışarıdan su getirilmiştir [125]. Şekil 6.2'deki haritada da yer alan bu çeşme daha sonra Otağ-ı Humayun'un yakınına taşınmıştır. Aynı haritada, kışlanın batı cephesinin arka tarafında 3 adet su terazisi olduğu da belirtilmiştir [123].

Tarihi kışlanın geçmişten günümüze kadar olan kullanım şekilleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1812-1813 yıllarındaki Balkan savaşlarında kışla harap haldeyken onarılmıştır ve göçmenlerin ikameti burada sağlanmıştır. Ardından gelen 1. Dünya Savaşı sırasında ise kışla 1920'lere kadar askeri hastane olarak kullanılmıştır [127].

1926-1930 yıllarında kışla tekrar onarılmıştır ve yine kışla olarak değerlendirilmiştir.

1937 yılına kadar kışlada, Piyade, Topçu, Tanksavar ve Uçaksavar birlikleri yer almıştır.

1937-1944 yılları arasında kışlada, 2. Süvari Tümeni Birlikleri yer almıştır.

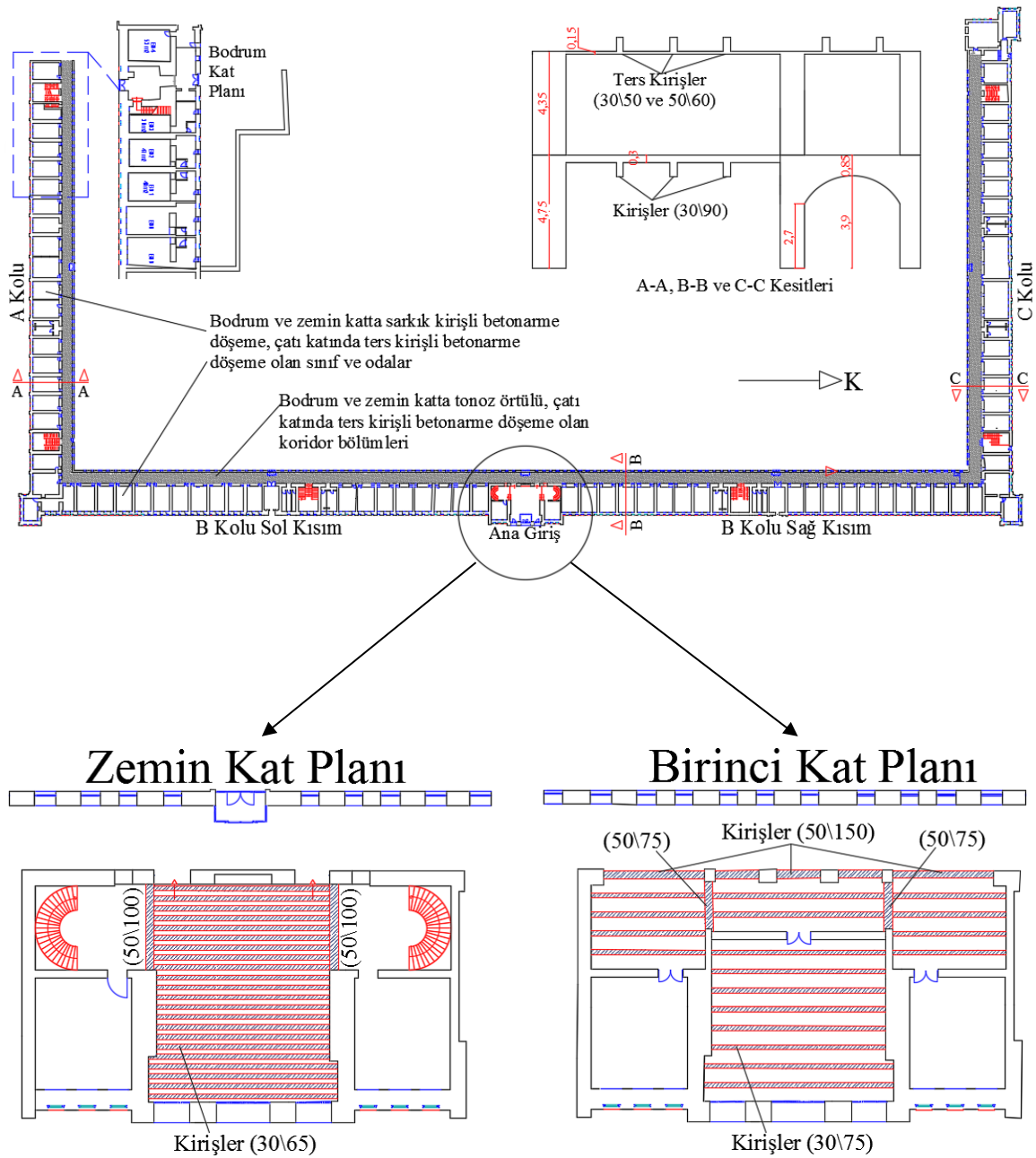
1945-1961 yılları arasında kışlada, 3. Zırhlı Muharebe Grubu Birlikleri yer almıştır.

1968-1998 yılları arasında kışlada, 66. Mekanize Tümen Karargahı bulunmuştur [123], [124].

1999 yılında kışla Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ)'ne tahsis edilmiştir ve günümüzde YTÜ'nin Fen-Edebiyat ve Eğitim Bilimleri fakülteleri kışla binasında yer almaktadır.

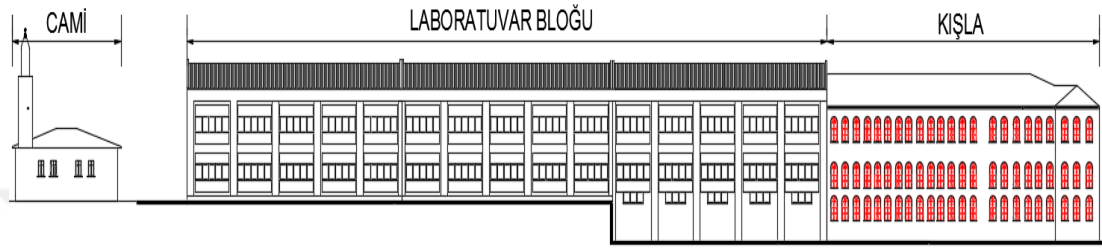
6.1.2 Kışlanın Geometri ve Malzeme Özellikleri

Kışla binası U şekilli bir geometriye sahiptir ve ana girişine göre simetrik bir binedir. Kışla yapısının geneli 2 katlı olarak inşa edilmiştir ancak Şekil 6.3’de A kolu olarak gösterilen kısmın uç bölümünde kısmi bir bodrum kat bulunmaktadır. Arazi eğimi nedeniyle inşa edilen bodrum kat sebebiyle kışlanın sadece bu bölümü 3 katlıdır. Şekil 6.3’de, A ve C bölümü olarak ifade edilen kollardan her biri yaklaşık 185 metre uzunluğunda iken, B bölümü olarak gösterilen doğu cephesi uzunluğu 364 metredir.



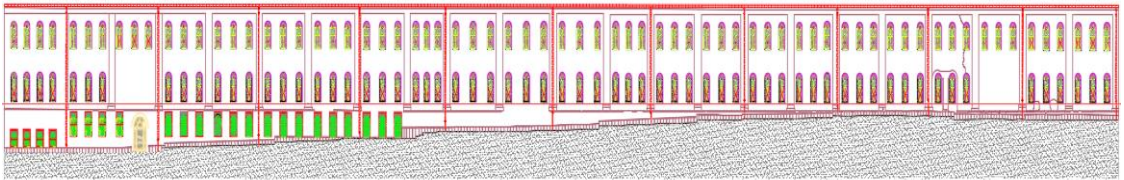
Şekil 6. 3 Davutpaşa Kışlası'nın planı

Kışlanın bodrum ve zemin katı 4.75 m, birinci katı ise 4.35 m yüksekliğindedir. Bodrum katta günümüzde Mediko-Sosyal Sağlık Birimi hizmetleri verilmektedir. Bodrum katın bulunduğu A kolunun batı cephesindeki dışarıdan görünüşü Şekil 6.4’de verilmiştir. Kışlanın Yıldız Teknik Üniversitesi’ne tahsis edilmesinden sonra, bodrumlu yapı kısmının devamına 3 katlı bir betonarme bina inşa edilmiştir. Günümüzde bu binada, fizik ve kimya laboratuvarları yer almaktadır. Laboratuvarların bitiminde, yine sonradan inşa edilen bir mescit bulunmaktadır.

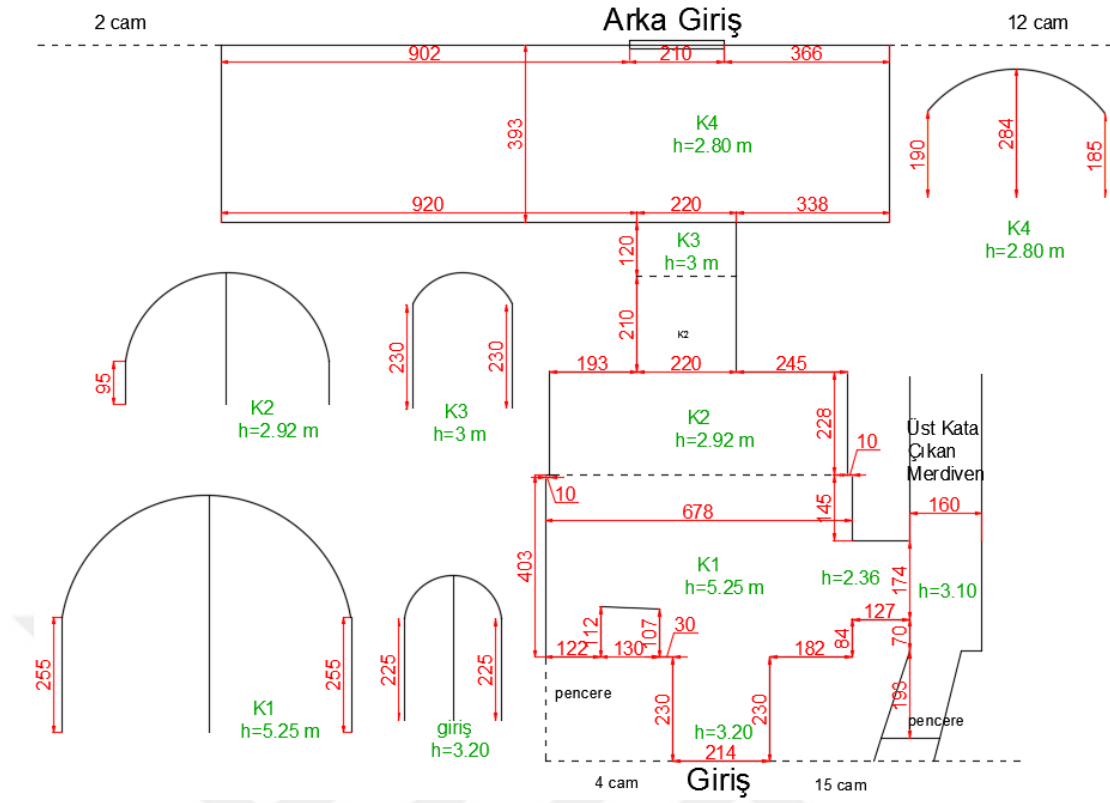


Şekil 6. 4 Batı cephesi dışarıdan görünüş

Şekil 6.5’de ise A kolunun güney cephesindeki dışarıdan görünüşü verilmiştir. Burada, 3 katlı bölümde yer alan kapı, bodrum katın ana giriş kapısıdır. Değişik yükseklik ve açıklıklardaki kemerlerden oluşan bodrum katın planı Şekil 6.6’da verilmiştir. Planda görülen tek kollu merdiven ile bodrum kat zemin kata bağlanmaktadır.



Şekil 6. 5 Güney cephesi dışarıdan görünüş



Şekil 6. 6 Bodrum kat giriş planı

Bodrum kat girişinin dışarıdan görünüşü ve değişik yükseklikteki kemerli tavan yapısı Şekil 6.7’de verilmiştir.

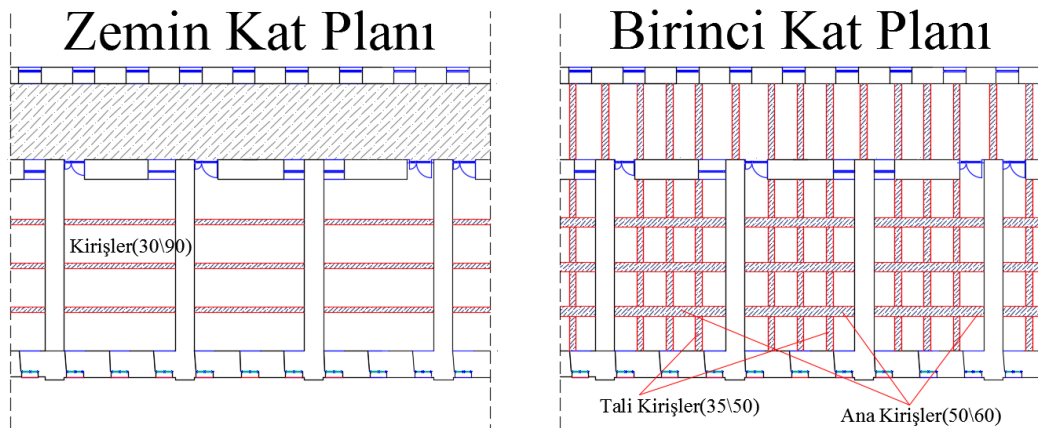


Şekil 6. 7 Bodrum katın dışarıdan ve içerden görünüşü



Şekil 6. 7 Bodrum katın dışarıdan ve içeriden görünüşü (devamı)

Zemin katta, Şekil 6.3 de taralı olarak gösterilen koridor bölümleri, A-A, B-B ve C-C kesitleri ile verilen şekilde kat boyunca tonoz örtülüdür. Bu katlarda binanın tonoz dışındaki oda ve sınıflarını oluşturan bölümlerinde ise sonradan inşa edilmiş betonarme kirişli döşeme sistemi bulunmaktadır. Binanın birinci kat tavan, yani çatı döşemeleri de zemin katta olduğu gibi sonradan inşa edilmiş betonarme döşemedir ancak buradaki kirişler ters kirişler olarak uygulanmıştır. Zemin kat döşemelerinde açıklık boyunca 3 sarkık betonarme kiriş ile 30 cm kalınlıklı döşeme kullanılırken, çatı kısımlarında ise tali ve ana kirişlerin olduğu 2 yönde ters kirişler ve ince bir plak (15cm) kullanılmıştır. Binanın ana girişi dışındaki kısımlarında kullanılan bu kiriş sistemi Şekil 6.8’de verilmiştir. Doğu cephesinin orta bölümü kışanın ana girişidir. Daha farklı bir plana sahip olan ana girişte büyük açıklıklar geçildiği için Şekil 6.3’de gösterildiği gibi diğer bölümlerden farklı olarak sık bir kiriş sistemi kullanılmıştır.



Şekil 6. 8 Ana giriş haricindeki betonarme kiriş sistemi

Zemin katın tonoz örtülü koridor bölümleri ve 30/90 ebatlı kiriş sistemiyle sonradan inşa edilmiş betonarme döşemelerin bulunduğu sınıf ve oda kısımları Şekil 6.9'da verilmiştir. Birinci kat koridor ve sınıf bölümlerinin dışarıdan görünüşü ise, ters kirişlerin uygulanması sebebiyle Şekil 6.10'daki gibi düz bir tavan şeklindedir. Ayrıca, hem zemin katta hem de birinci katta koridor duvarları Şekil 6.9 ve 6.10'da görüldüğü gibi çeşitli aralıklarla yerleştirilmiş çelik gergilerle desteklenmiştir.



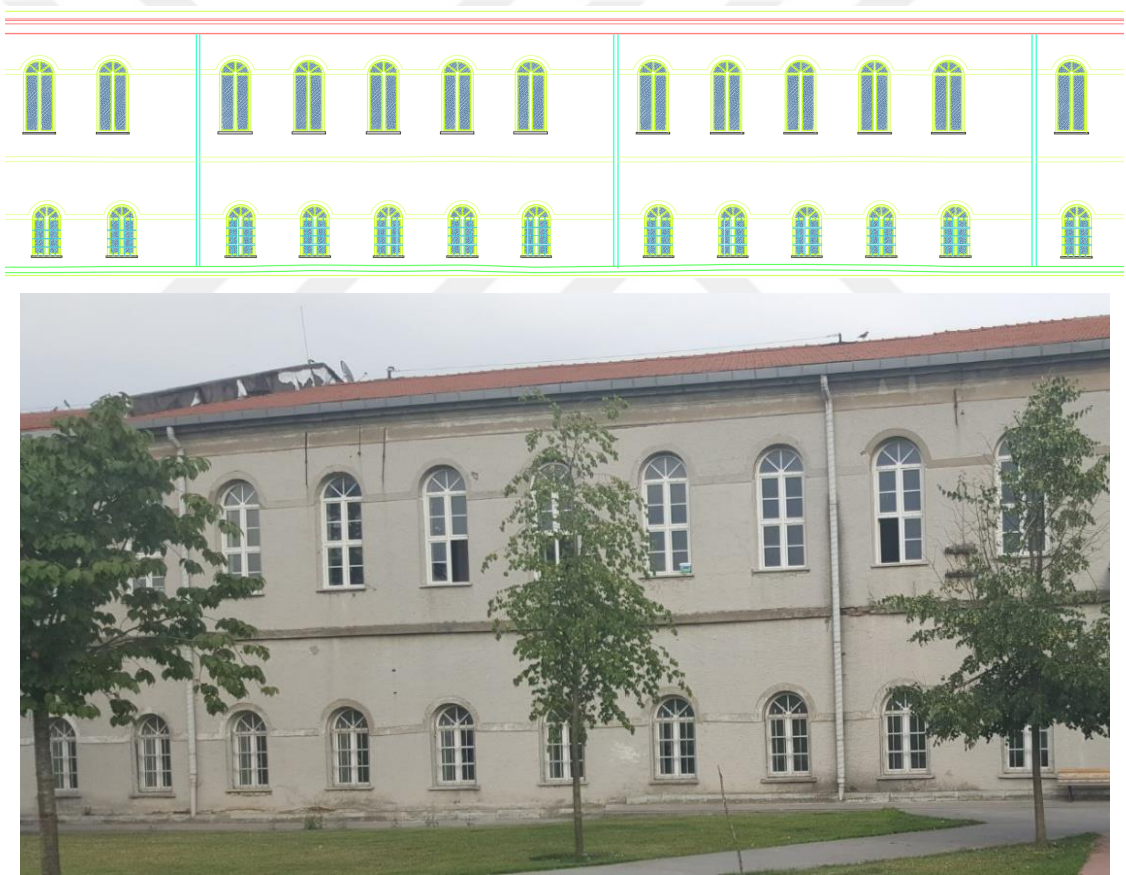
Şekil 6. 9 Zemin kat kirişleri ve tonoz örtülü koridor



Şekil 6. 10 Ters kirişli birinci kat döşemelerinin düz tavan görünüşü

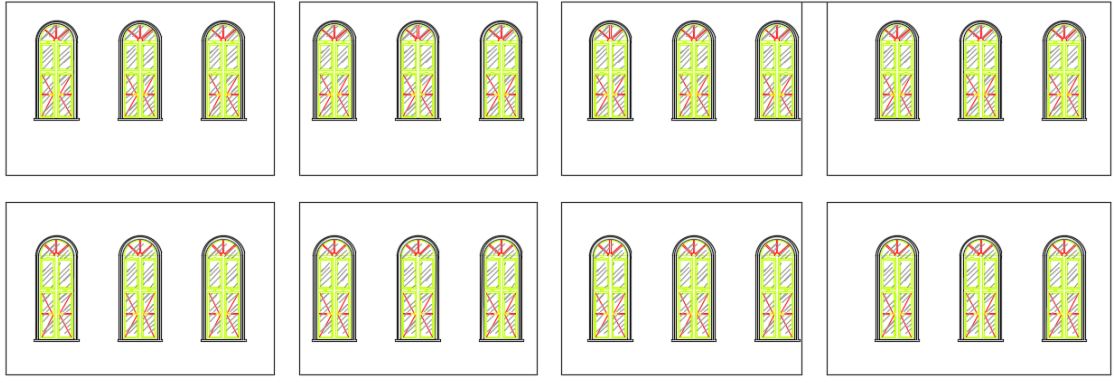
Tarihi kışlanın iç avlu duvarları 80 cm kalınlığındadır. Dış duvarlar ise, 90 ile 140 cm arasında değişen kalınlıklarda inşa edilmiştir. Sınıf ve odaların girişlerini oluşturan iç duvarlar ise B bölümünün bir kısmı dışında 100 cm kalınlığındadır. Sınıf ve odaların sınırlarını belirleyen bölme duvar kalınlıkları da 80-125 cm arasında değişmektedir ve bazı bölme duvarlar üst katlarda kaldırılmıştır.

Tarihi kışlanın iç avlu duvarlarında 1 m ile 1.3 m arasında değişen genişliklerde pencereler bulunmaktadır. Pencereler arasındaki duvar parçaları ortalama 1.5-1.65m uzunluğundadır. Zemin kat pencerelerinin yüksekliği birinci kattaki pencerelere göre daha azdır ve tüm pencereler kemerli olarak inşa edilmiştir. Kışlanın iç avludan görünüşü Şekil 6.11’de verilmiştir.



Şekil 6. 11 Kışlanın iç avludan görünüşü

Kışlanın dış duvarlarında da iç avludakine benzer şekilde kemerli pencereler bulunmaktadır. Sınıf veya odaları ayıran her dolu duvar arasında eşit yüksekliklerde ve 1metre genişlikli 3 pencere yer almaktadır. Pencereler arasındaki duvar parçaları ise ortalama 1.1-1.3 metredir. Kışlanın dış duvarlarının görünüşü Şekil 6.12’de verilmiştir.



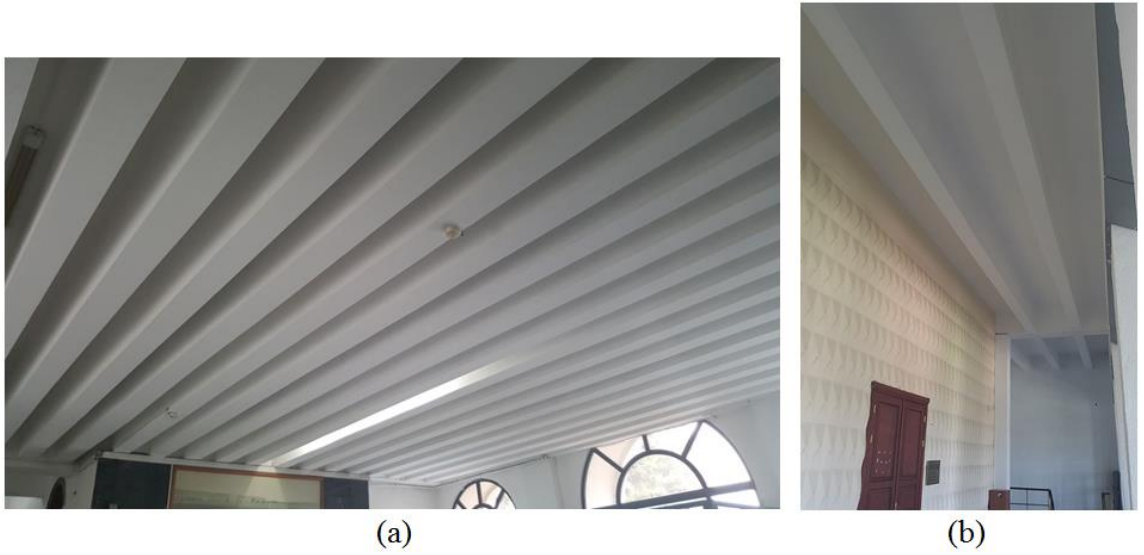
Şekil 6. 12 Kışlanın dış duvarlarının görünüşü

Şekil 6.3’de B bölümü olarak gösterilen doğu cephesinin orta kısmı kışlanın ana girişidir. Ana girişin günümüzdeki durumu Şekil 6.13’de gösterilmiştir.



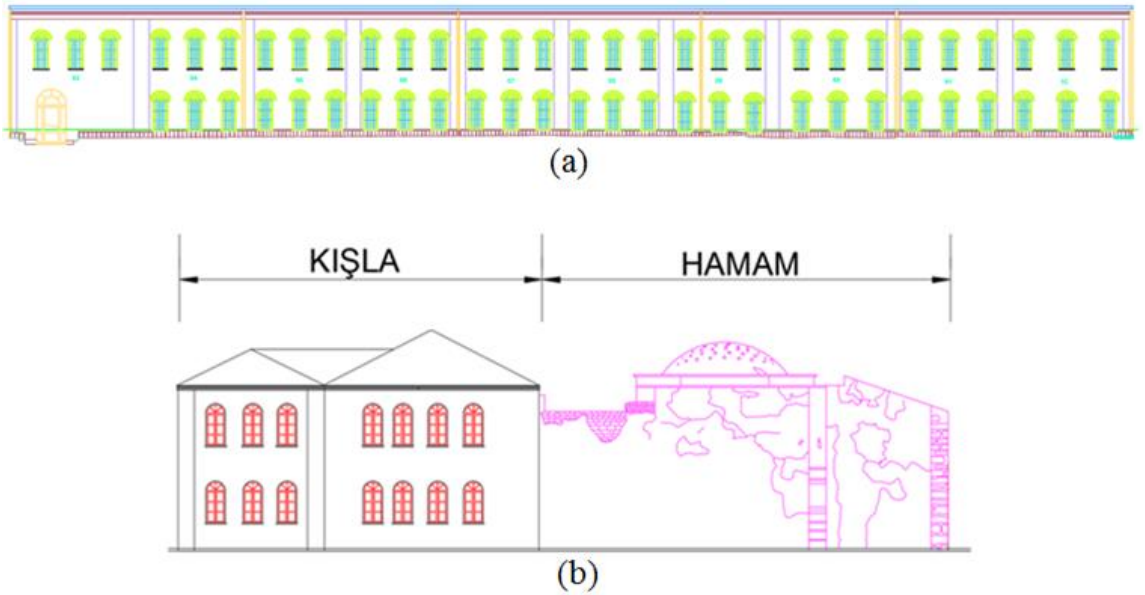
Şekil 6. 13 Kışlanın ana girişi

Şekil 6.3’de kışlanın ana girişi için gösterilen döşeme ve kiriş sistemleri aşağıda verilmiştir. Ana girişin zemin katında, açıklığın büyük olması sebebiyle sık bir kiriş sistemi uygulanmıştır (Şekil 6.14a). Birinci katta değişen plan gereği daha farklı bir kiriş sistemi kullanılmıştır (Şekil 6.14b).



Şekil 6. 14 Kışlanın ana girişine ait kirişli döşeme sistemi

Şekil 6.3’de C bölümü olarak gösterilen kol kışlanın kuzey cephesidir. Bölüm 6.1.1’de açıklanan tarihi hamam, C koluna bitişik şekilde batı cephesi doğrultusunda inşa edilmiştir. C kolunun kuzey cephesindeki görünüşü Şekil 6.15a, batı cephesindeki görünüşü ise Şekil 6.15b ile verilmiştir.



Şekil 6. 15 Kışlanın kuzey cephesi(a) ve batı cephesi(b) dışarıdan görünüşü

Taş malzemeler ve bazı yerlerde kullanılan tuğlalar ile yığma olarak inşa edilen tarihi Davutpaşa Kışlası çeşitli değişimler ve yenilemeler ile günümüzdeki haline ulaşmıştır. Bodrum ve zemin kattaki tonoz örtülü bölümler dışında yapının özgün döşemeleri hakkında kesin bilgiler bulunmamaktadır. Yukarıda açıklanan kirişli betonarme

döşemeler, bilinmeyen bir tarihte sonradan inşa edilmiştir. Bazı kapı ve pencereler kaldırılmıştır. İç mekan duvar planlarında değişiklikler yapılarak kışlanın özgün yapısı kısmen değiştirilmiştir. Çatı kiremit kaplama ile beşik çatı olarak inşa edilmiştir ve tarihi binanın cepheleri sıvalanıp boyanmıştır.

Davutpaşa Kışlası, 01.08.1990 tarih ve 2005 sayılı karar ile korunması gerekli kültür varlığı olarak tescil edilmiştir ve hala Maliye Hazinesi mülkiyetinde bulunmaktadır. Tarihi kışlanın günümüzdeki görünüşü Şekil 6.16'da verilmiştir.



Şekil 6. 16 Davutpaşa Kışlası'nın günümüzdeki görünüşü [126]

6.1.3 Kışlanın Zemin Özellikleri

Davutpaşa Kışla Binası'nın zemin özelliklerinin incelenmesi, zemin oturumaları ile oturma çatlaklarının araştırılması ve yapı-zemin ilişkisinin incelenmesi amacıyla binanın iç avlusu tarafında binaya bitişik bir araştırma çukuru açılmıştır. Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Öğretim Elemanlarından oluşan bir heyet tarafından yapılan çalışmada, zemin cinsi ve özellikleri tespit edilmiştir.

Araştırma çukuru, bina temeli veya zeminde herhangi bir hasara neden olunmaması için iki kademeli olarak açtırılmıştır. Birinci kademe, 11.04.2013 tarihinde, iç avluya bakan dış duvarların uzandığı doğrultuya 2 m uzaklıkta açılmıştır ve 2.30m x 3.80 ebatlarındaki birinci kademe derinliği 4.10 metredir (Şekil 6.17, Şekil 6.18 ve Şekil 6.19). Yapılan incelemelerde, tretuvar üst kotundan 3,55 m derinliğe kadar olan zemin bölümünde kontrolsüz yapay dolgu, 3,50 metreden itibaren daha derin bölgelerde ise

ana zemini oluşturan açık gri-krem renkli karbonatlı Kil/Marn (Bakırköy Formasyonu/st Miyosen) litolojilerine rastlandığı belirlenmiştir [128].



şekil 6. 17 Kışlanın kuzey kesiminde açılan araştırma çukuru [128]



şekil 6. 18 Kışlanın kuzey kesiminde açılmakta olan 1. Kademe araştırma ukuru [128]



Şekil 6. 19 Kışlanın kuzey kesiminde 4.10m derinlikteki 1.Kademe araştırma çukuru [128]

Araştırma çukurunun ikinci kademesi, 15.04.2013 tarihinde açılmıştır. Kışla binasına bitişik şekilde uzanan 2 m genişliğindeki tretuvar kısmının altı, bir insanın girebileceği şekilde 1 m kazılmıştır ve bina temelini oluşturan düzenli taş istife ulaşılmıştır (Şekil 6.20). Bu şekilde yapılan kazıda, temeli oluşturan taşların altındaki zemine ulaşamadığı için, temele paralel düşey yönde de kazılmasına karar verilmiştir [128].



Şekil 6. 20 Kışlanın kuzey kesiminde açılmakta olan 2. Kademe araştırma çukuru [128]

Araştırma çukurunun ikinci kademesi, 18.04.2013 tarihinde, temeli taşıyan zemini görmek amacıyla bina temelinin 65cm aşağısına kadar düşey yönde derinleştirilmiştir (şekil 6.21, şekil 6.22 ve şekil 6.23). Yapılan incelemelerde, bina temellerinin eski kontrolsüz bir yapay dolgu+bitkisel toprak karışımı zemin üzerine oturduğu belirlenmiştir [128].



şekil 6. 21 Kışlanın kuzey kesiminde açılmakta olan 2.Kademe araştırma çukuru [128]

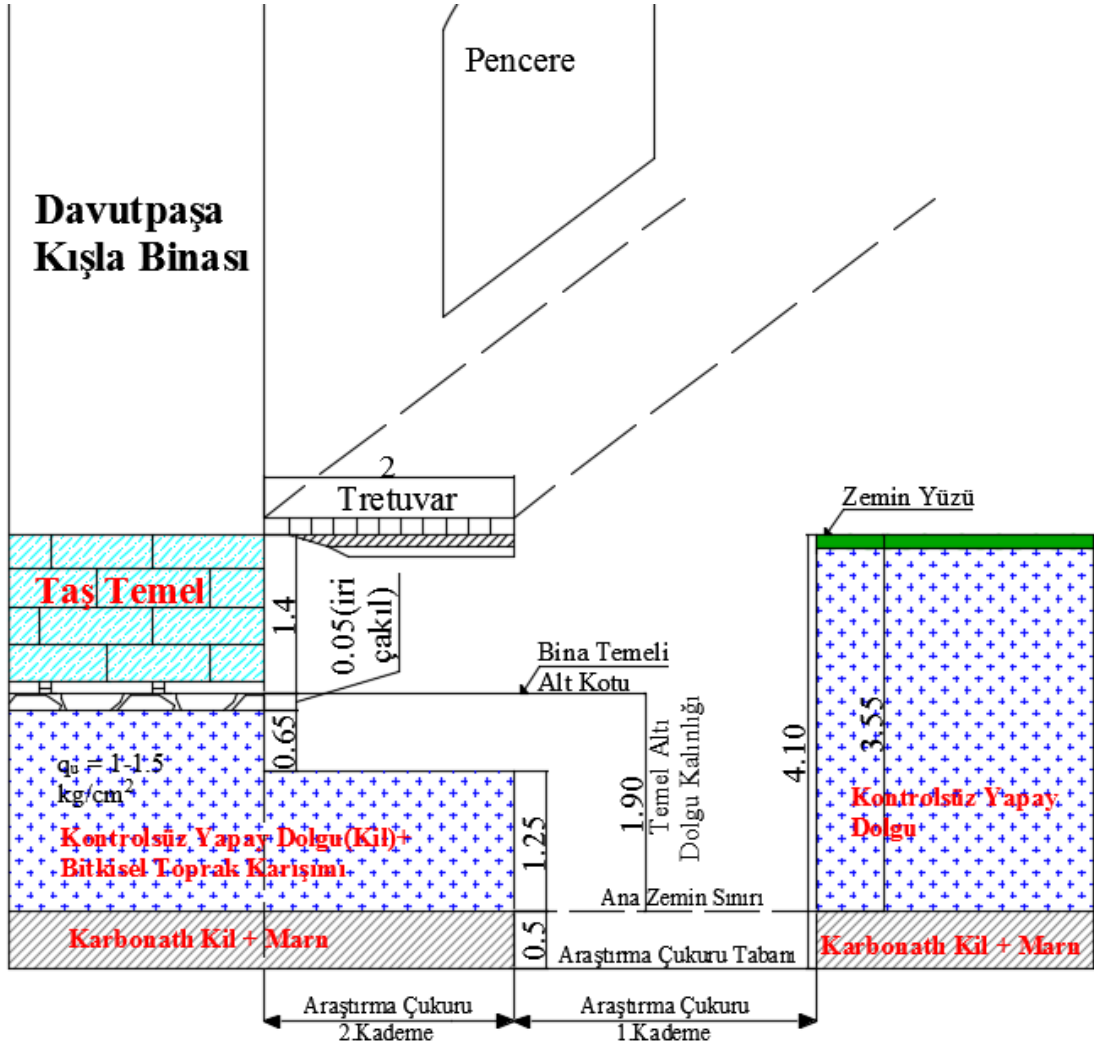


Şekil 6. 22 Araştırma çukuru 2.Kademedebina temeli ve temel altındaki yapay dolgu
[128]



Şekil 6. 23 Araştırma çukurunun 1. ve 2.Kademe genel görünüşü [128]

Araştırma çukurunda yapılan incelemelere göre, tarihi kışla binası (kuzey yarısı kesimi) temelleri, 140cm kalınlıkta düzenli şekilde istiflenmiş sağlam kireçtaşı bloklardan oluşmaktadır. Temel altında, 190 cm kalınlığında kontrolsüz bir yapay dolgu bulunmaktadır ve yapay dolgunun altında ise bölgenin ana zeminini oluşturan karbonatlı kil ve marnlar yer almaktadır. Bina temeli altındaki sarımsı açık gri renkli karbonat içerikli killeri oluşturan yapay dolguda cep penetrometresi ile yapılan ölçümlerde, dolgu serbest basınç direncinin $q_u = 1 \text{ kg/cm}^2$ ve $q_u = 1,50 \text{ kg/cm}^2$ arasında değiştiği belirlenmiştir. Dolgu altındaki ana zeminde ise bu değer yaklaşık $2-3 \text{ kg/cm}^2$ civarlarındadır. Araştırma çukurunda 4.10 m derinlikte ana zeminde çok az miktarda sızıntı suya rastlanmıştır ve bunun haricinde zeminde yer altı suyuna veya göçmelere rastlanmamıştır. Araştırma çukurunun kesiti Şekil 6.24’de verilmiştir [128].

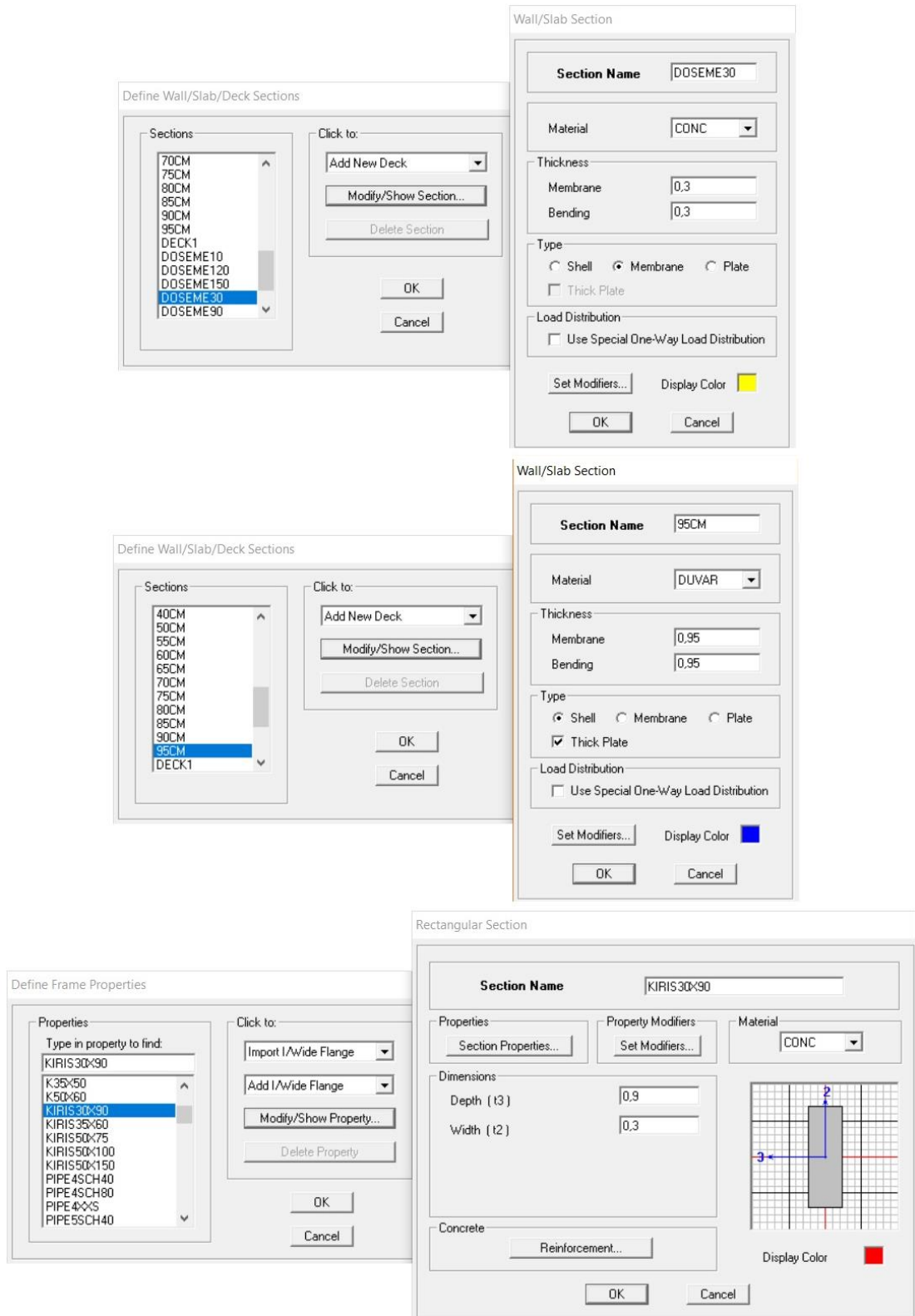


Şekil 6. 24 Araştırma çukuru zemin kesiti [128]

6.2 Kışlanın Nümerik Analizi

Nümerik modelleme için öncelikle, bina planı röleveleri çıkartılmış ve total station ile yapılan ölçümlerle kat yükseklikleri ve döşeme kalınlıkları belirlenmiştir. Modelleme için yapılan bu ölçümler sırasında ayrıca binanın zemin ve birinci kat döşemelerindeki çökme değerleri de ölçülmüştür. Geometrik verilerin elde edilmesinin ardından tarihi Davutpaşa Kışlası'nın nümerik modeli, Etabs sonlu elemanlar programı kullanılarak hazırlanmıştır [129].

Öncelikle yapı elemanları tanımlanmıştır. Binanın yığma duvarları kalınlıklarına uygun olarak tanımlanıp shell eleman ve 'thick' olarak modellenirken, kiriş ve kolonlar çubuk eleman olarak modellenmiştir. Döşemeler ise membran olarak tanımlanmıştır (Şekil 6.25).

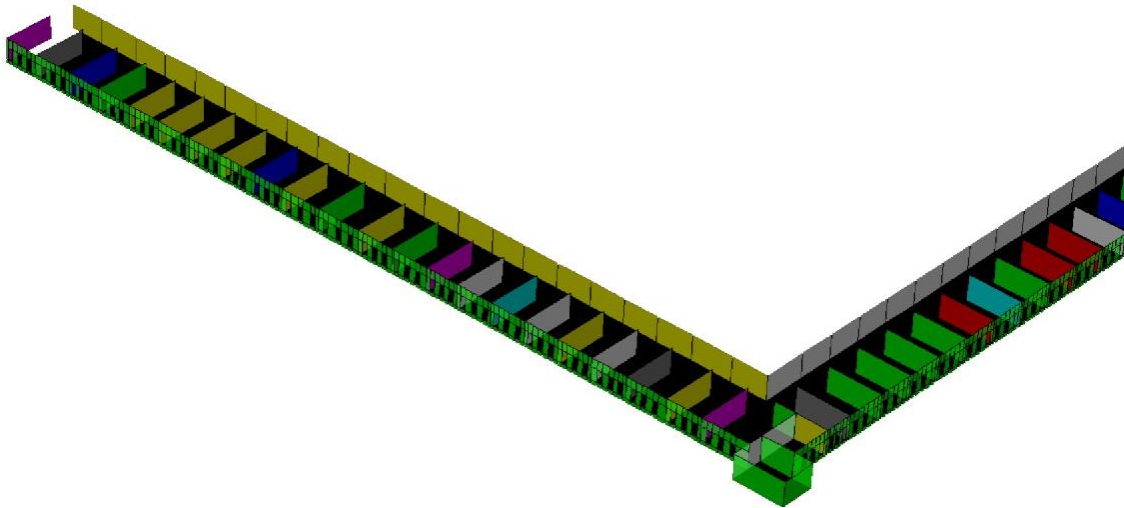


Şekil 6. 25 Shell ve frame elemanlar

Tarihi kışının modellenmesinde makro modelleme tekniği kullanılmıştır. Bölüm 4.2’de açıklanan modelleme teknikleri arasındaki daha detaylı yöntemler kullanılmamıştır

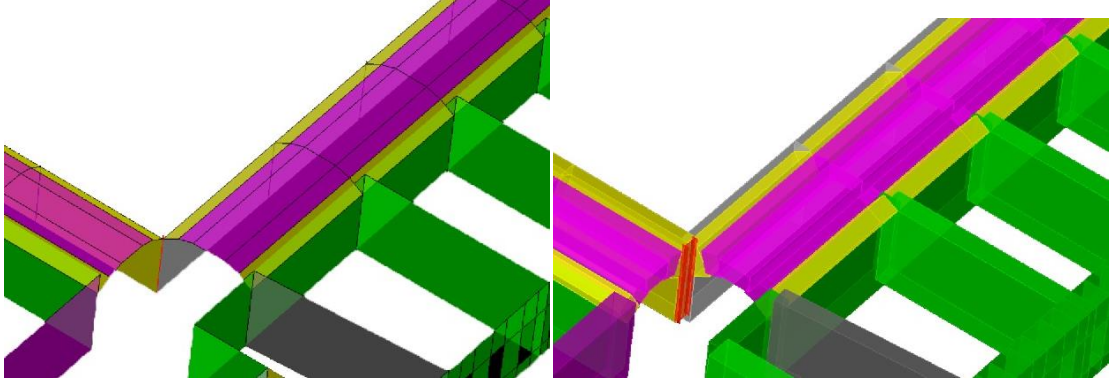
Çünkü kışla binası çok büyük bir yapıdır. Daha detaylı modelleme teknikleri, çok karmaşıık hesaplamalar ve süre-maliyet gerektirdiğinden kışlanın yapısal analizinde makro modelleme yöntemi tercih edilmiştir. Ayrıca alışma kapsamında, eleman bazında çok detaylı gerilme dağılımları değıl, binanın genel davranışı ve kritik kesitlerinin belirlenmesi amaçlandığından makro modelleme tekniğinin en uygun yöntem olduğu düşünülmüştür.

Modellemede ilk olarak duvarlar tanımlanarak bina geometrisi oluşturulmuştur. Ardından, kapı ve pencere boşluklarına uygun kotlarda tanımlanan düzlemlerle duvar elemanları parçalara ayrılmıştır ve fazla parçalar silinerek duvar boşlukları oluşturulmuştur (şekil 6.26). Kemerli pencereler alanlarına uygun idealleştirmeler ile modelleme kolaylığı açısından dikdörtgen şeklinde oluşturulmuştur. Pencerelerin kemerli ve dikdörtgen geometrili olmasından kaynaklanan gerilme farklılıkları analiz bölümünde belirtilmiştir.



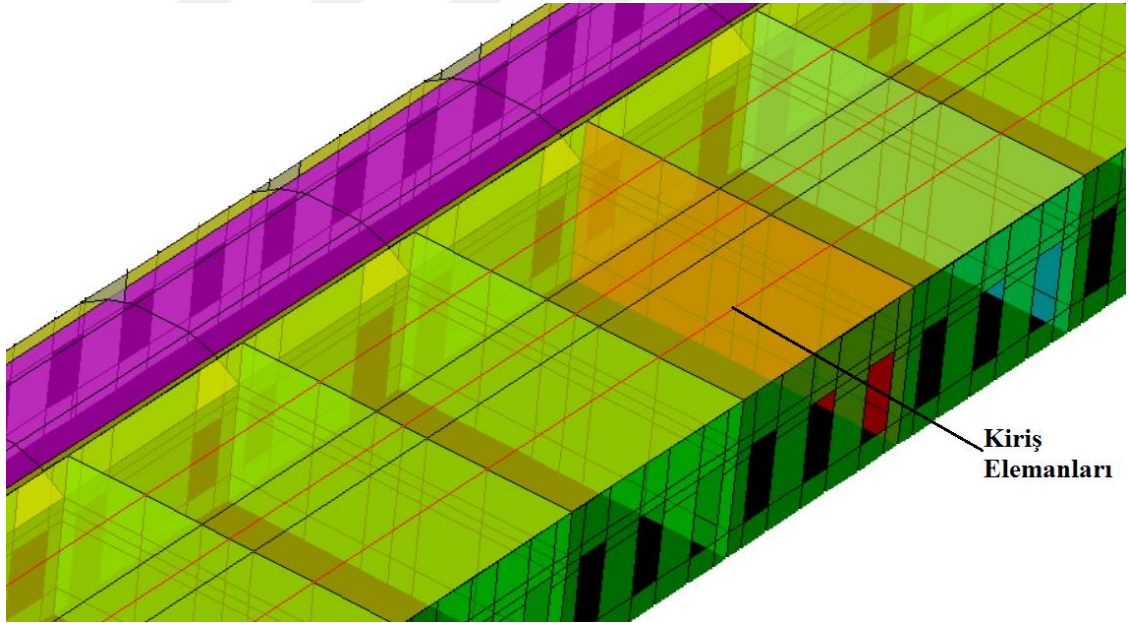
şekil 6. 26 Duvarların modellenmesi

Koridor bölümlerindeki tonoz, farklı kalınlıklardaki shell elemanlarla, gerçek boyut ve kotlarına uygun olarak tanımlanmıştır. Koridorda bulunan elik gergiler ihmal edilmiştir. Tonozlu koridor bölümlerinin 2 ve 3 boyutlu görünüşleri şekil 6.27’de verilmiştir.



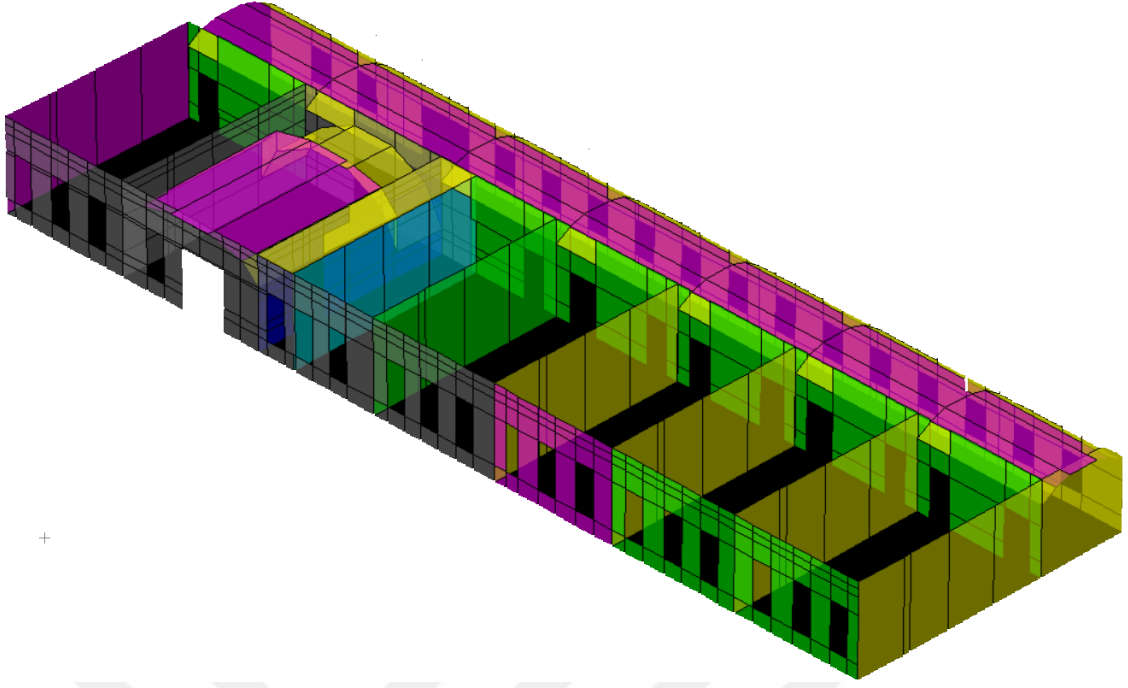
Şekil 6. 27 Tonoz örtülü koridorların modellenmesi

Duvar boşluklarının açılmasının ardından Planı Şekil 6.8’de verilen betonarme kirişli döşemeler, gerçek boyutlarına uygun olarak Şekil 6.28’de görüldüğü gibi modellenmiştir. Duvar boşluklarının açılması, kirişlerin duvarlara yük aktarması için gereken düğüm noktaları, duvarların birbiri ile bağlantıları gibi modelleme işlemlerinde duvarların parçalara bölünmesi gerekmektedir. Bu şekilde duvarların parçalara ayrılmasıyla, modelin meshlenmesi işlemi de başlamış olmaktadır ancak buradaki mesh ağı, başlangıç modeli olması sebebiyle daha seyrek olarak kurgulanmıştır.



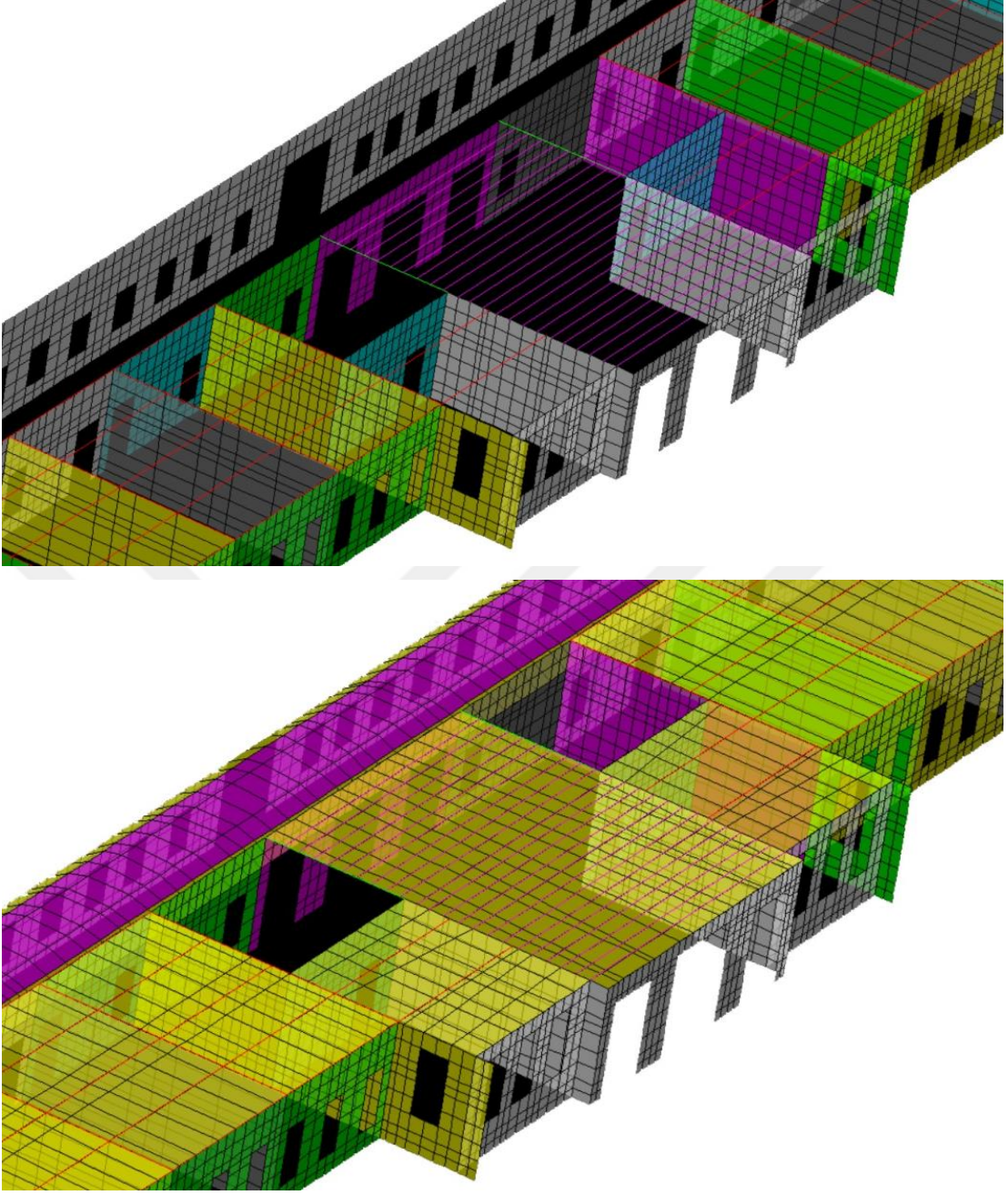
Şekil 6. 28 Döşeme ve kiriş elemanlarının modellenmesi

Dışarıdan görünüşü ve planı Şekil 6.5 ve Şekil 6.6’da verilen bodrum katın modellenmesinde de benzer yollar izlenmiştir. Ana giriş kısmındaki farklı açıklık ve kotlardaki kemerler ile tonozlar, zemin katın kopyalanıp düzenlenmesiyle Şekil 6.29’daki gibi tanımlanmıştır.

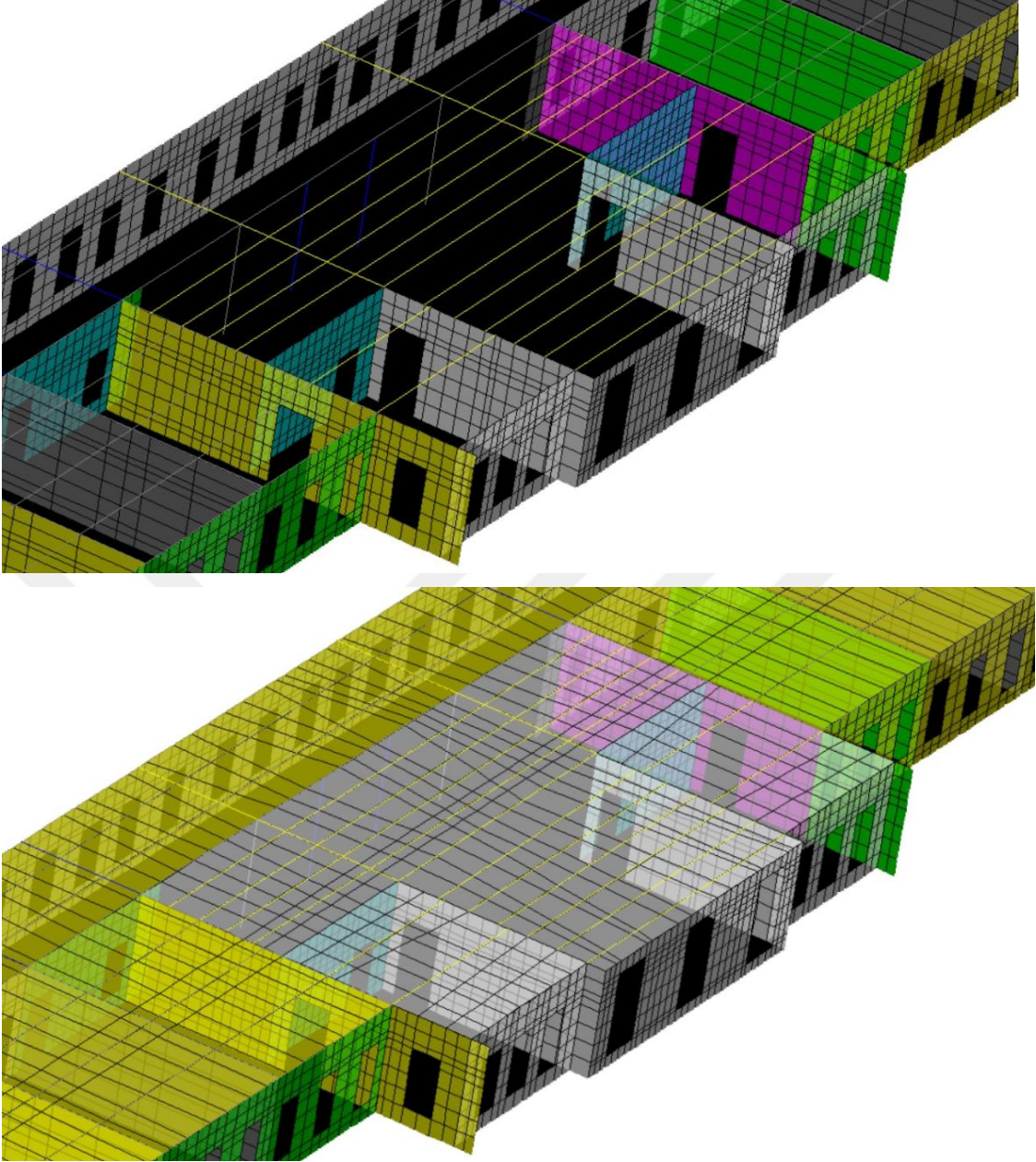


Şekil 6. 29 Bodrum katın modellenmesi

Bodrum ve zemin katın tamamlanmasının ardından zemin kat üst kata kopyalanarak, birinci kat için gerekli değişiklikler yapılmış ve modelin ana hatları oturtulmuştur. Ters kirişli çatı katı döşemesinin modellenmesinde ana kirişler tanımlanırken tali ters kirişler tanımlanmamıştır. Bunun yerine döşeme kalınlığı arttırılarak, gerçek döşeme sistemine benzer şekilde yığma duvarlara yük aktarımı sağlanmıştır. Döşemelerin tamamlanmasının ardından binanın ana giriş bölümü de Şekil 6.3’de verilen kat planlarına uygun olarak modellenmiştir ve gereken mesh bağlantıları yapılmıştır (Şekil 30 ve Şekil 31).

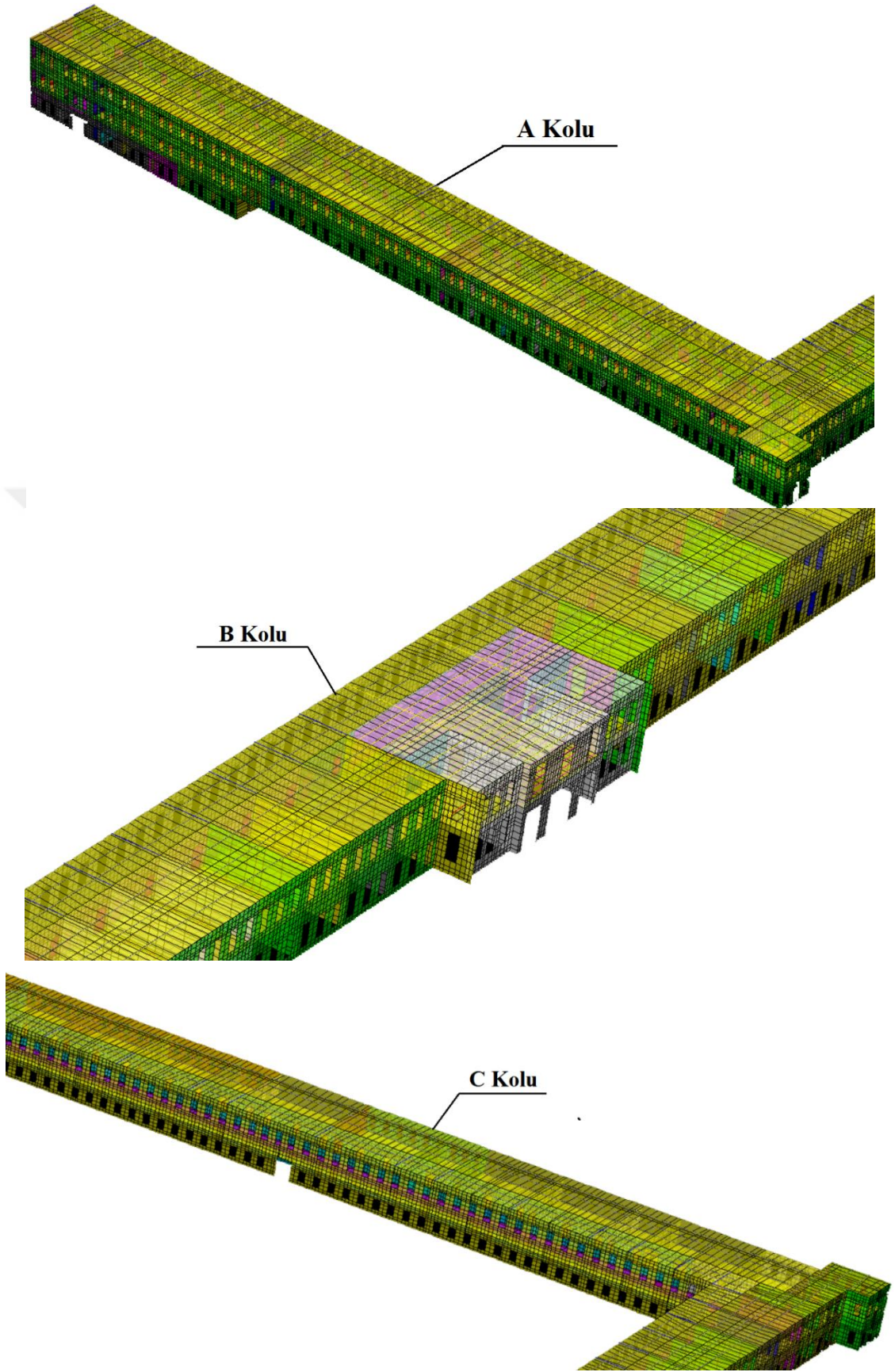


Şekil 6. 30 Tarihi kışlanın ana girişi (Zemin kat)



Şekil 6. 31 Tarihi kışlanın ana girişi (Birinci kat)

Son olarak, modeldeki tüm elemanların (duvar, döşeme, kiriş) düğüm noktalarının birbiri ile bağlantıda olmasını sağlayacak şekilde tüm elemanlar daha küçük parçalara bölünmüştür ve mesh ağı sıklaştırılarak model tamamlanmıştır (Şekil 6.32).



Şekil 6. 32 Tarihi kışla binasının nümerik modeli

Modelleme işleminin tamamlanmasından sonra sınır koşulları atanmış ve döşemelere yük tanımlamaları yapılmıştır. Duvarların zemine ankastre olarak bağlandığı kabulü yapılarak zeminle temas eden her düğüm noktasında ankastre mesnetler tanımlanmıştır. Döşemelere tanımlanan ölü ve hareketli yükler Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6. 1 Döşemelere verilen ölü ve hareketli yükler

KAT	G (Ölü yük) (t/m ²)	Q (Hareketli Yük) (t/m ²)
Bodrum	0.2	0.5
Zemin	0.2	0.5
Birinci Kat	0.1	0.2

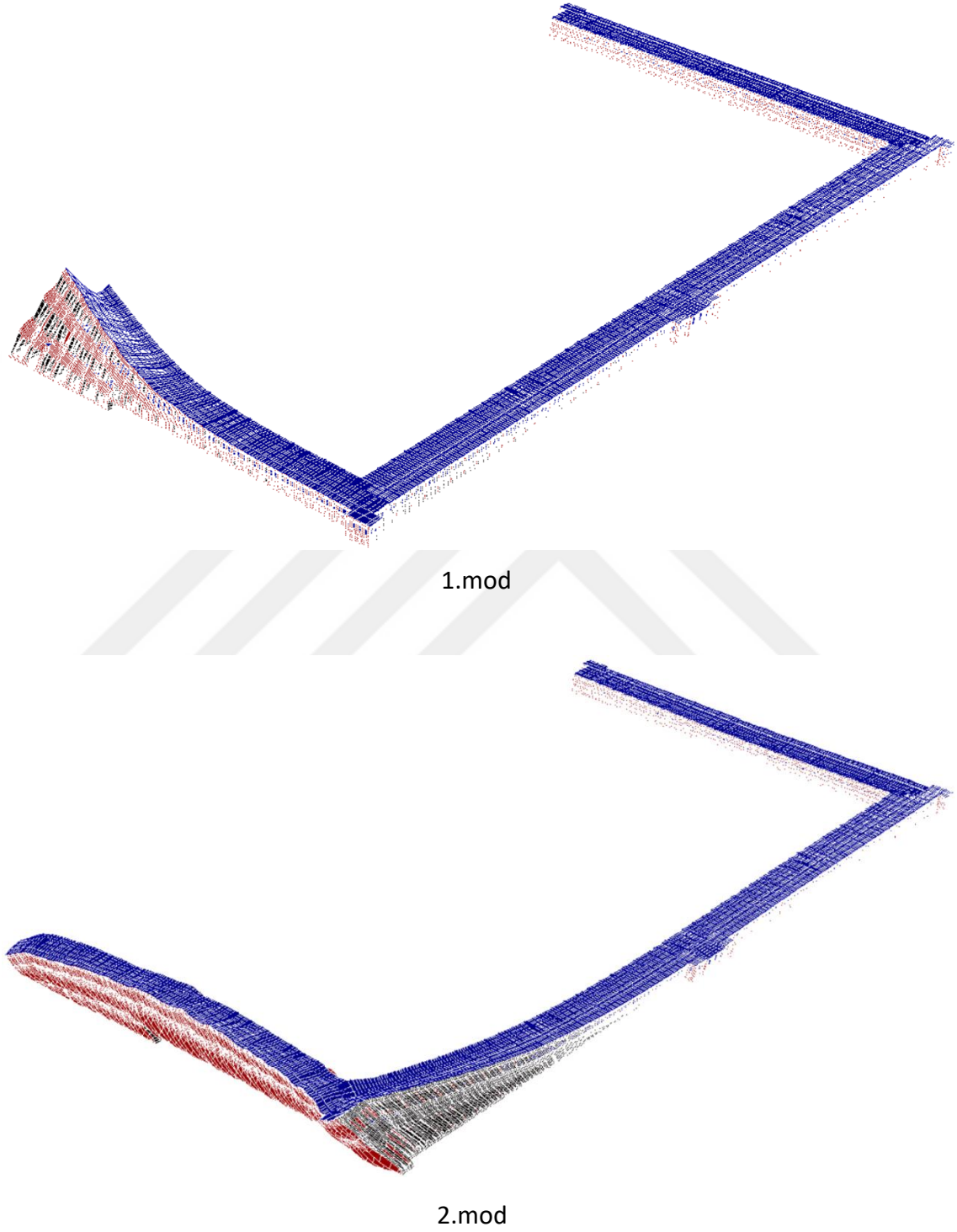
Çizelge 6.1’de verilen ölü yükler, malzemenin kendi ağırlığının haricinde, kaplama, harç, tesviye betonu, sıva ve tesisat yüklerinin toplamını yansıtan ölü yüklerdir. Çatı kısmı kullanılmadığı için burada kaplama vs. bulunmadığından ölü yükler çatıda azaltılmıştır. Hareketli yükler ise, TDY2007 yönetmeliğine uygun olarak okul için 0.5 ton/m² olarak alınırken çatı katında zaman zaman kullanılan çatılar için önerilen 0.2 ton/m² değeri kullanılmıştır.

Yığma malzeme kabulleri TDY2007 5.Bölüm koşullarına göre yapılmıştır. Duvarların basınç emniyet gerilmesi, taş malzemeler için önerilen $f_{em}=30$ ton/m² olarak alınmıştır. Yönetmelik gereği elastisite modülünün, basınç emniyet gerilmesinin 800 katı olması şart koşulduğundan bu değer 24000 ton/m² olarak alınmıştır. Modellemede kullanılan yapı malzemelerinin özellikleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

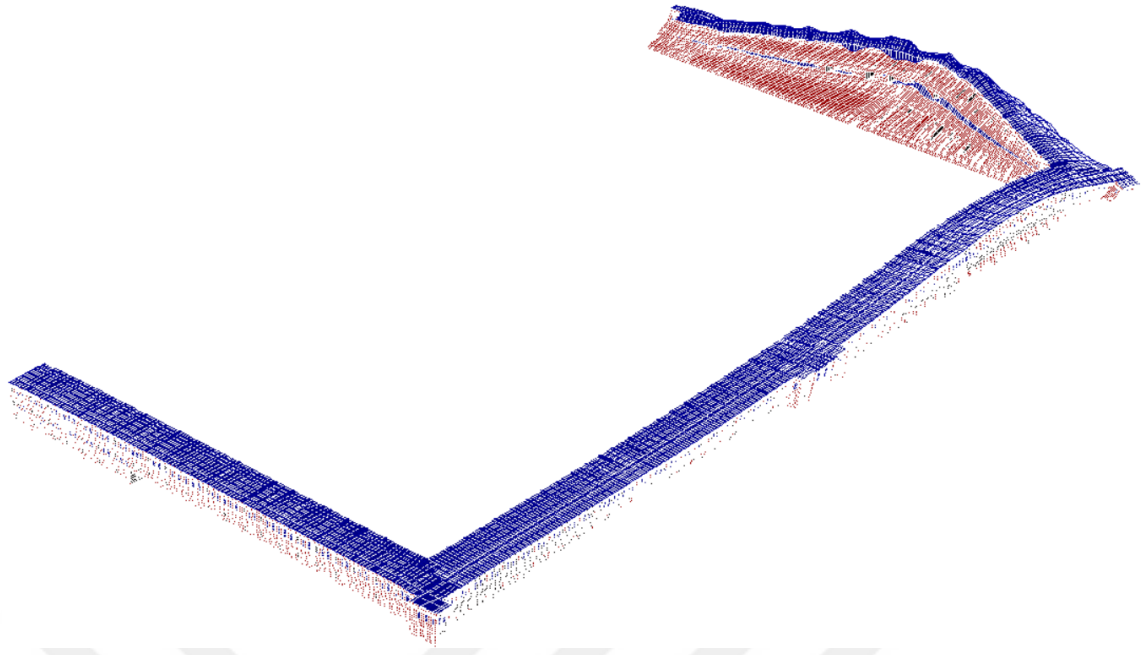
Çizelge 6. 2 Yapı malzeme özellikleri

Yapı Elemanları	Birim Ağırlık (t/m ³)	Elastisite Modülü (t/m ²)	Kayma Modülü (t/m ²)	Poisson Oranı
Yığma Elemanlar	2.5	24000	10256.41	0.17
Betonarme Kiriş	2.4	2531050.65	1054604.44	0.2
Betonarme Döşeme	2.4	2531050.65	1054604.44	0.2

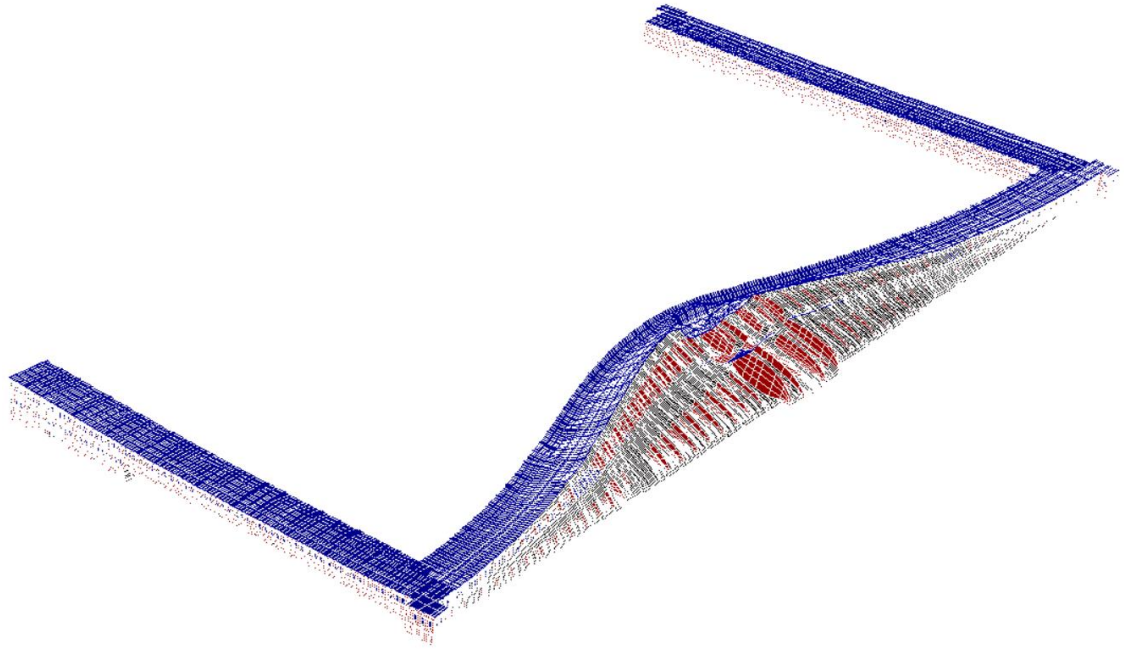
Tarihi kışlanın düşey ve yatay yükler altındaki analizi, doğrusal elastik hesap yöntemiyle yapılmıştır. 23202 düğüm noktası, 38818 frame ve 81529 shell elemanla tamamlanan analizde elde edilen mod şekilleri aşağıda verilmiştir (Şekil 6.33).



Şekil 6. 33 Tarihi binaya ait nümerik mod şekilleri

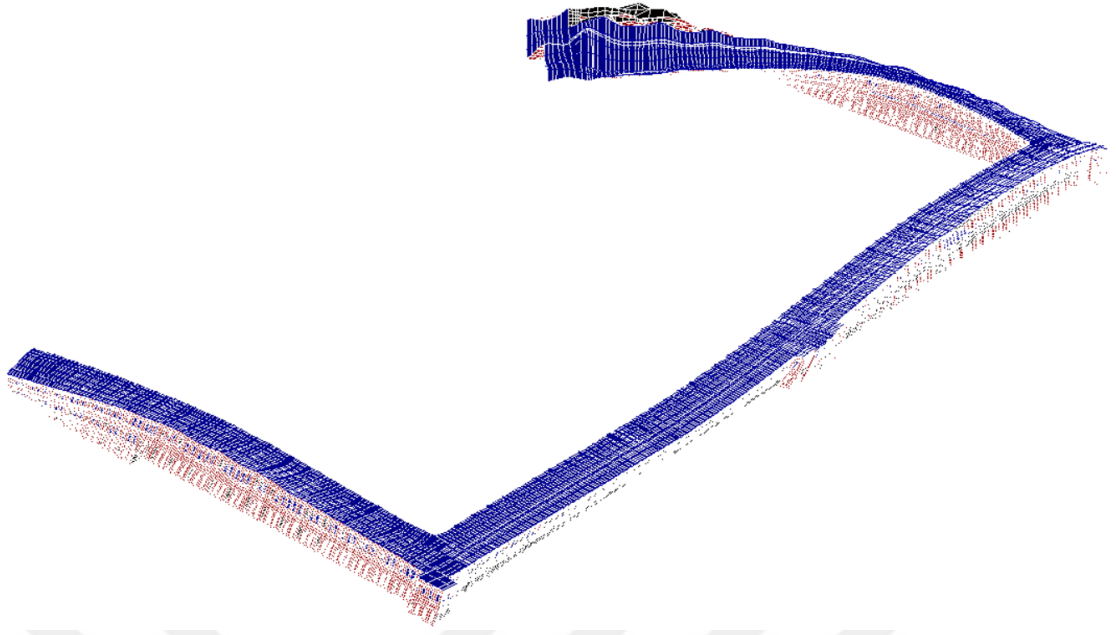


3.mod

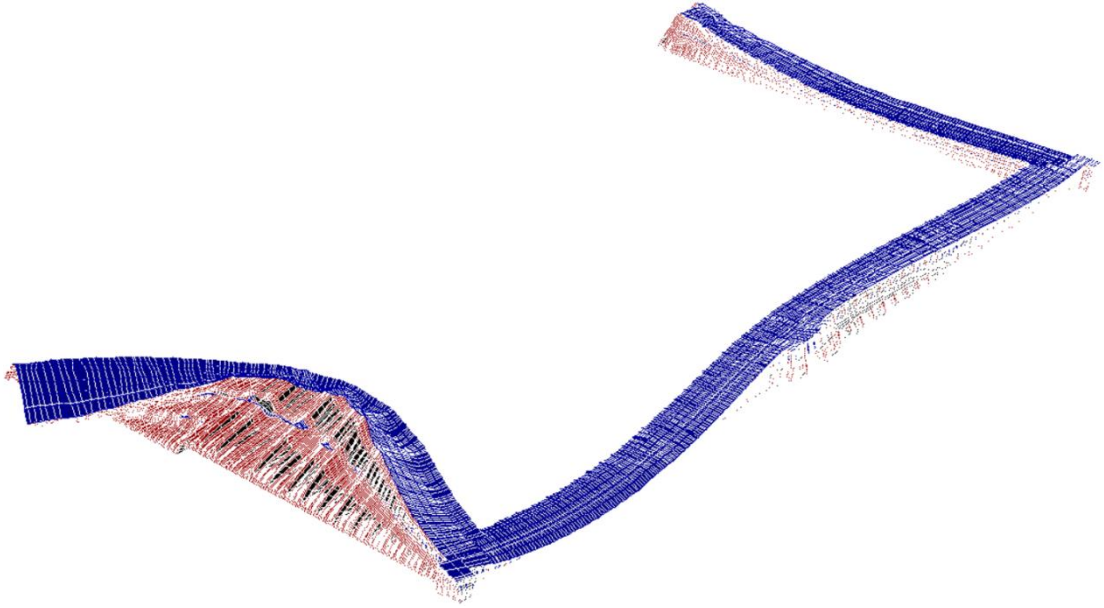


4.mod

Şekil 6. 33 Tarihi binaya ait nümerik mod şekilleri (devamı)

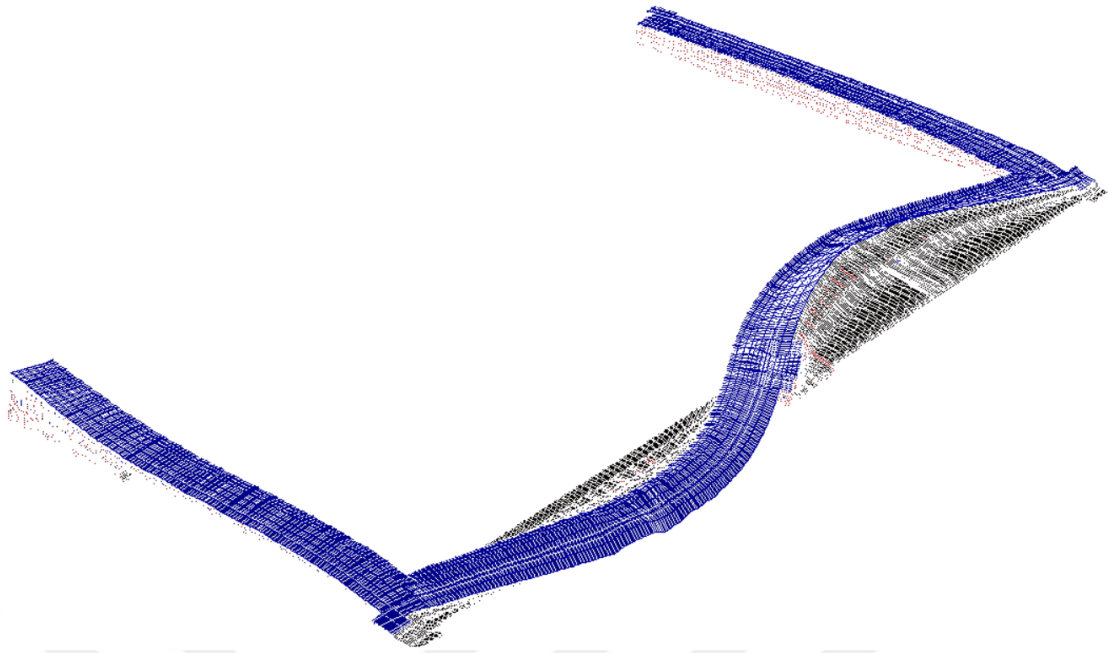


5.mod

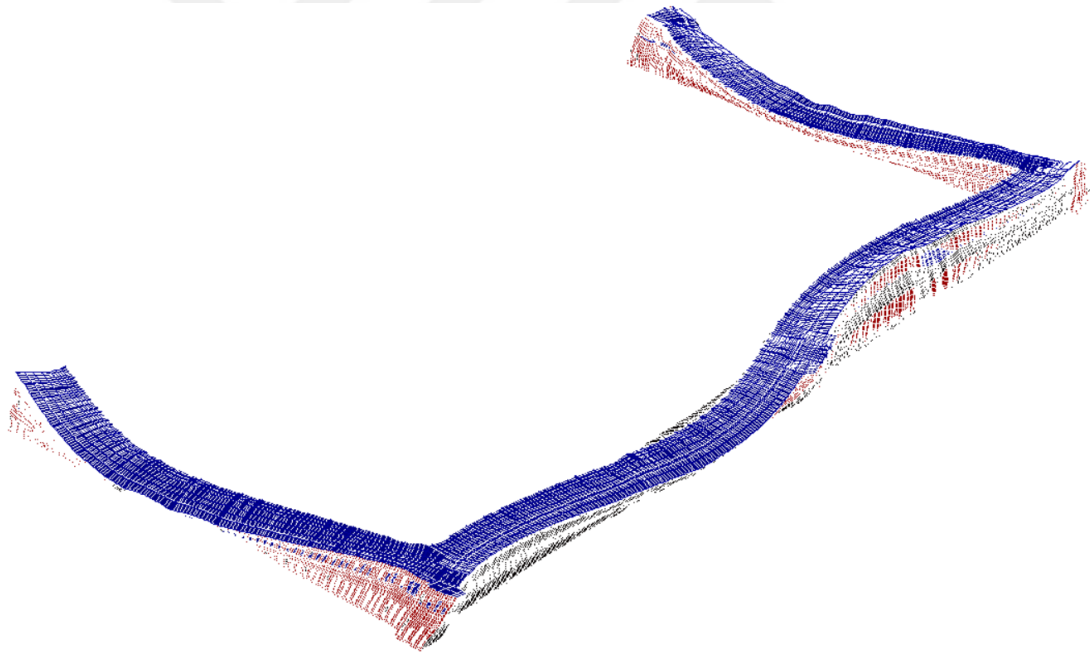


6.mod

Şekil 6. 33 Tarihi binaya ait nümerik mod şekilleri (devamı)

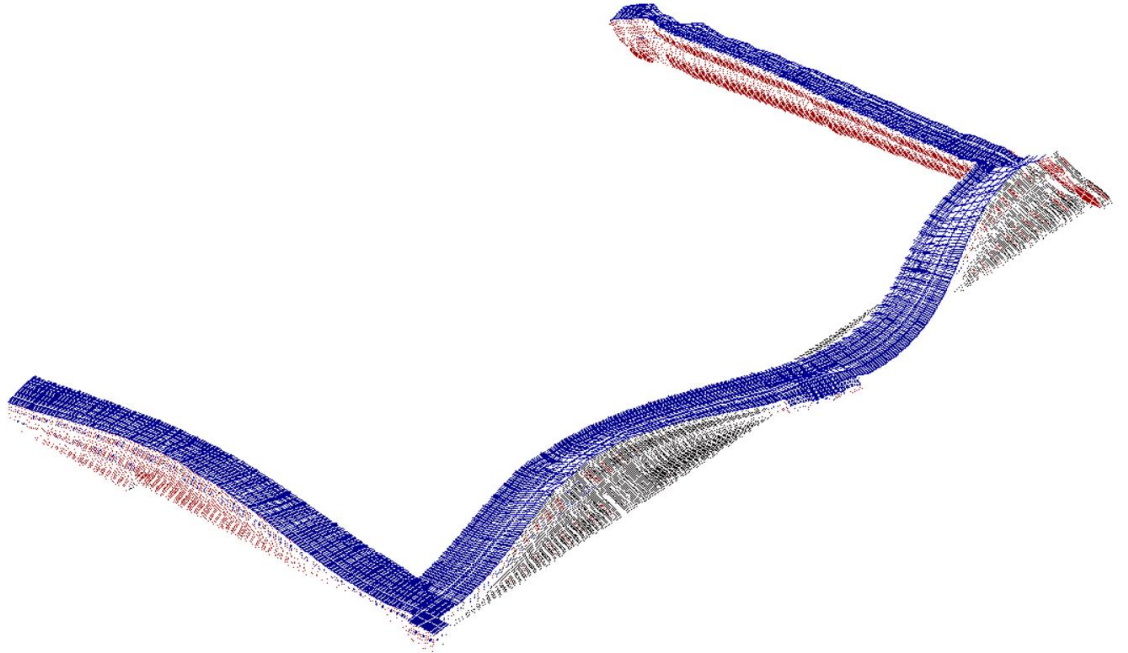


7.mod

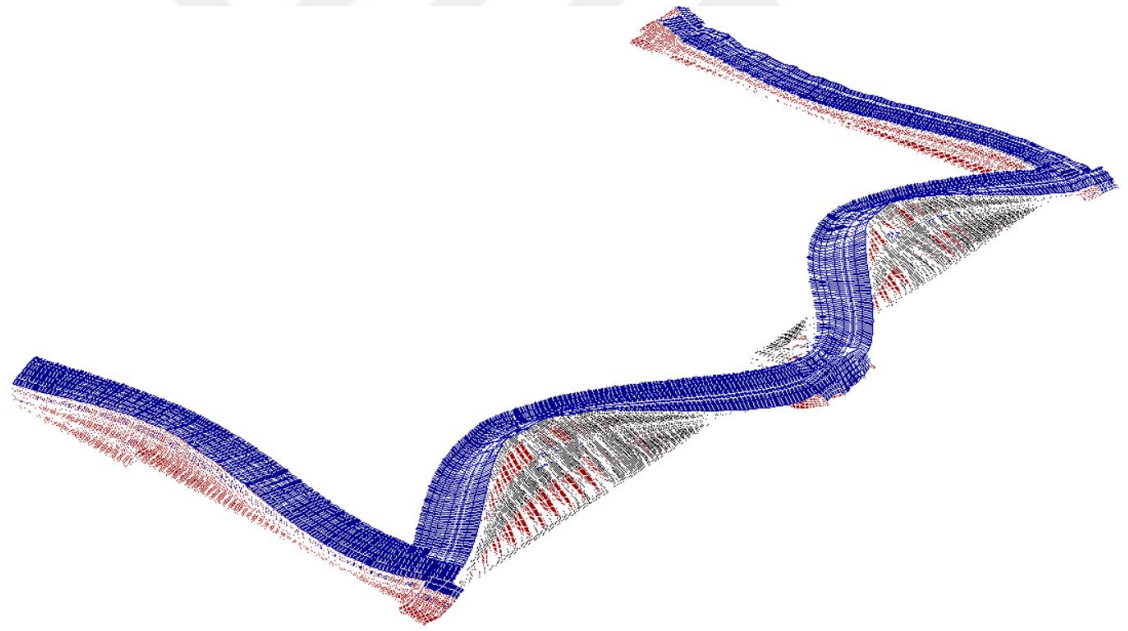


8.mod

Şekil 6. 33 Tarihi binaya ait nümerik mod şekilleri (devamı)

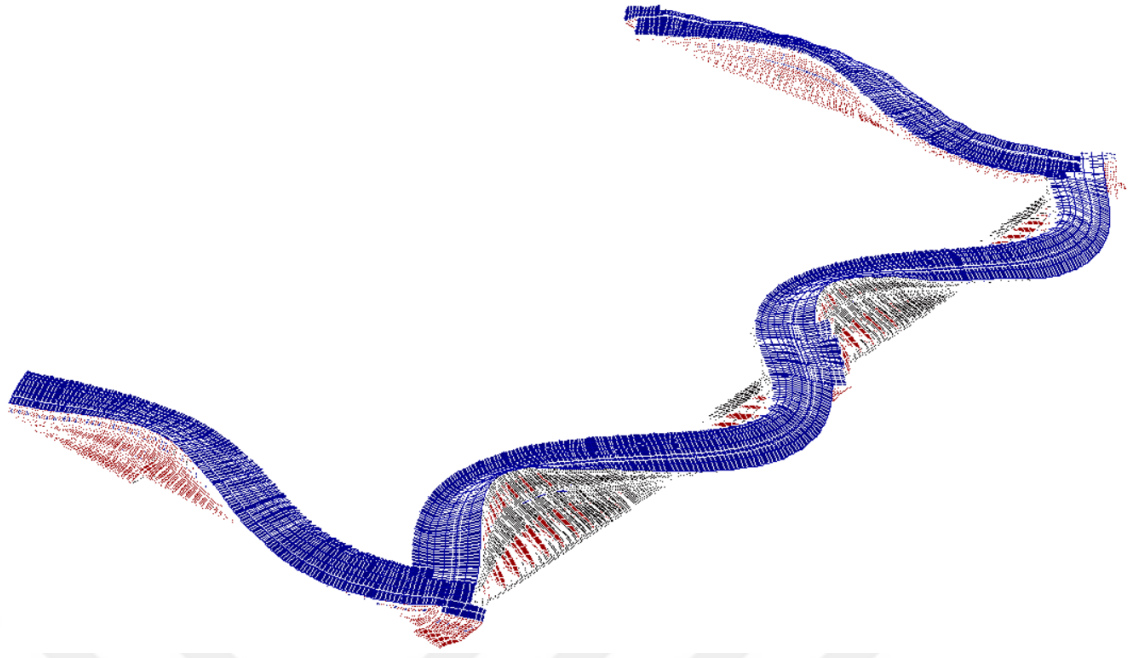


9.mod

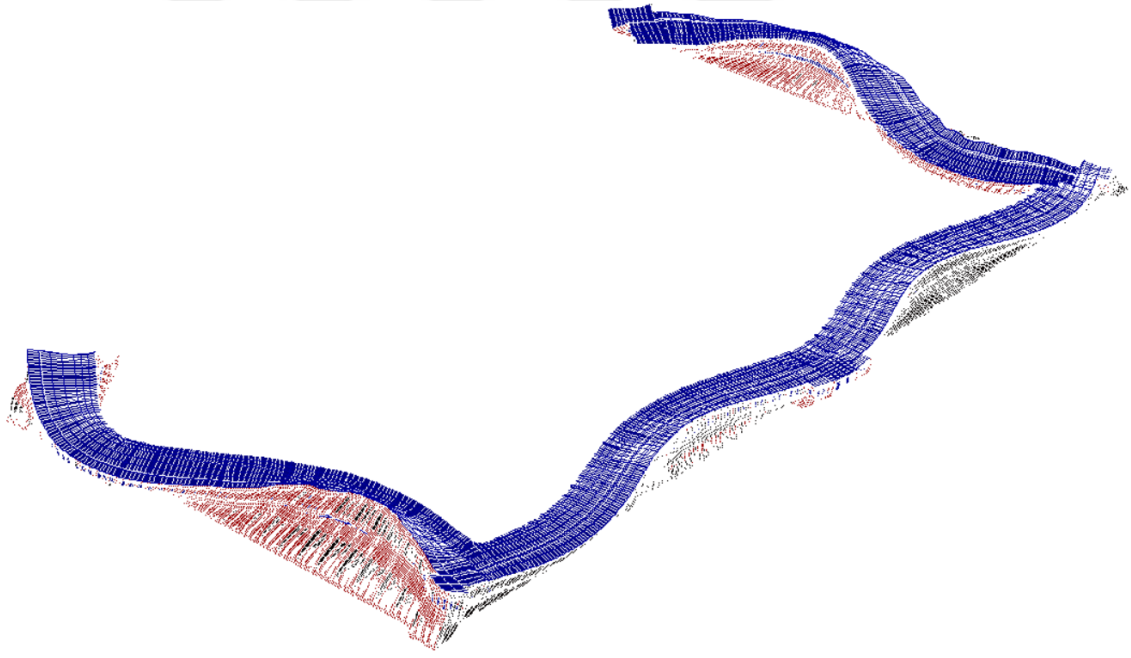


10.mod

Şekil 6. 33 Tarihi binaya ait nümerik mod şekilleri (devamı)



11.mod



12.mod

Şekil 6. 33 Tarihi binaya ait nümerik mod şekilleri (devamı)

Yukarıda görülen mod şekillerine ait periyot değerleri ve kütle katılım oranları Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6. 3 Periyot değerleri ve kütle katılım oranları

Mode	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
1	0,55322	10,5547	0,0223	0	10,5547	0,0223	0
2	0,43414	0,2372	28,6602	0	10,792	28,6825	0
3	0,43104	21,634	0,2307	0	32,426	28,9131	0
4	0,42419	0,1969	27,1367	0	32,6229	56,0499	0
5	0,41474	0,0651	1,2764	0	32,688	57,3263	0
6	0,413	11,2832	0,9961	0	43,9712	58,3224	0
7	0,40411	10,1044	2,0806	0	54,0755	60,403	0
8	0,40094	37,2376	4,9759	0	91,3131	65,3789	0
9	0,39255	0,4542	28,0986	0	91,7673	93,4775	0
10	0,38178	0,0005	0,0003	0	91,7678	93,4778	0
11	0,35112	0,1935	0,2625	0	91,9613	93,7403	0
12	0,33719	0,7237	0,0059	0	92,6849	93,7462	0

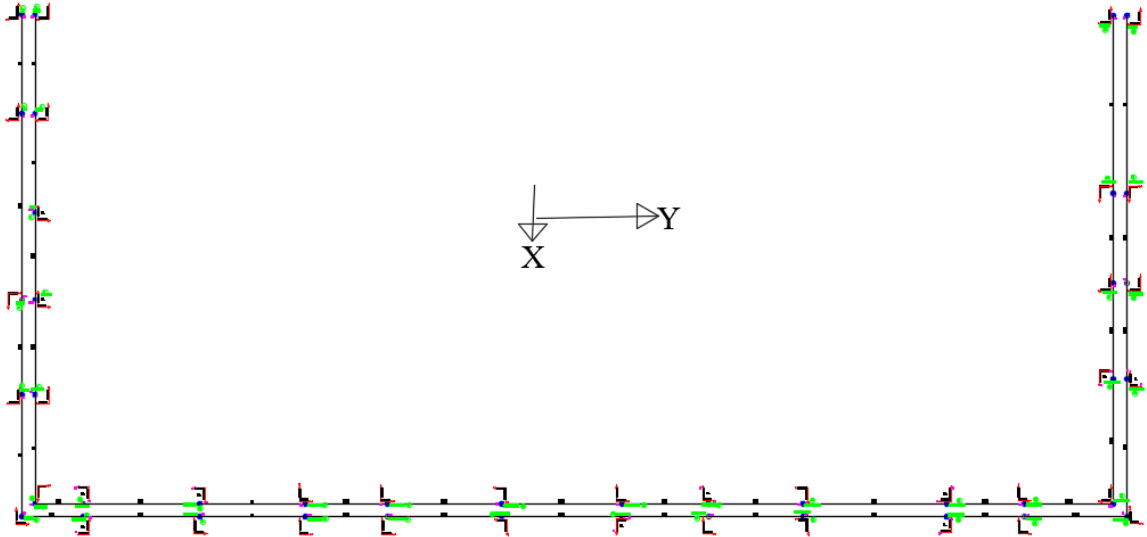
6.3 Kışla Üzerinde Yapılan Deneysel Çalışma

Tarihi kışlanın nümerik modelinin doğrulanması için operasyonel modal analiz yöntemi uygulanmıştır. Binanın koridor bölümleri boyunca 15-30 m aralıklarında değişen şekilde X ve Y yönünde titreşim kaydı yapan ivme ölçerler vasıtasıyla 14 kanaldan titreşim verileri toplanmıştır (Şekil 6.34).



Şekil 6. 34 Kışlada yapılan OMA çalışmaları

4 adet tek eksenli ve 5 adet çift eksenli ivme ölçerle yapılan titreşim ölçümleri, binanın çok uzun olması sebebiyle her ölçümün birbirine referans noktaları ile bağlandığı 7 adımda tamamlanmıştır. İvme ölçerlerin yerleşim planı Şekil 6.35’de verilmiştir.



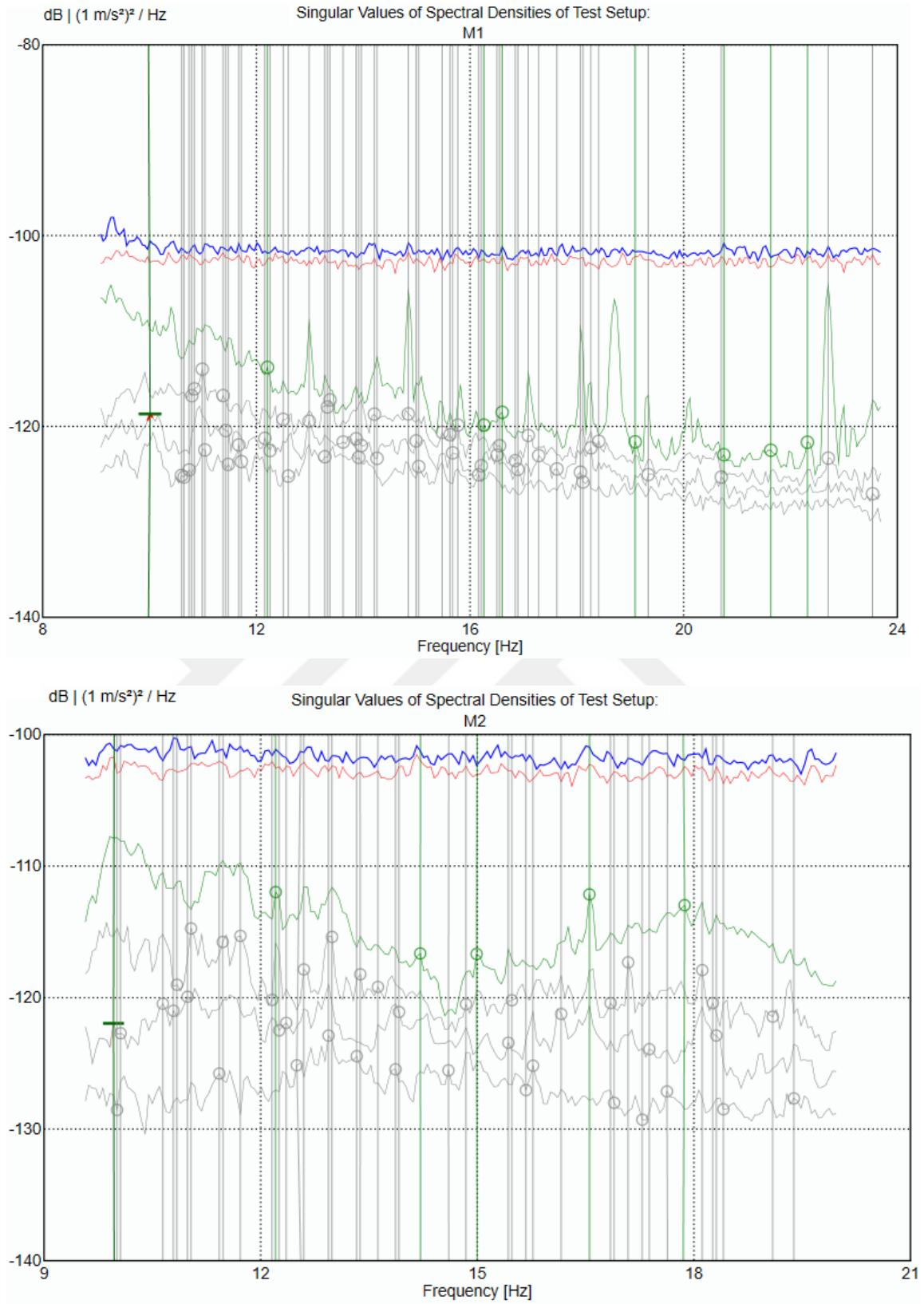
Şekil 6. 35 İvme ölçerlerin yerleşim planı

Ölçülen ivme değerleri, Şekil 6.36’da gösterilen Veri Toplama Cihazı tarafından birleştirilmiştir ve ardından ‘Artemis Modal’ programında spektral yoğunluk matrisleri çıkarılmış ve geliştirilmiş frekans ortamında ayrıştırma (GFOA, Enhanced Frequency Domain Decomposition-EFDD) yöntemi kullanılarak tarihi binaya ait mod şekilleri elde edilmiştir.

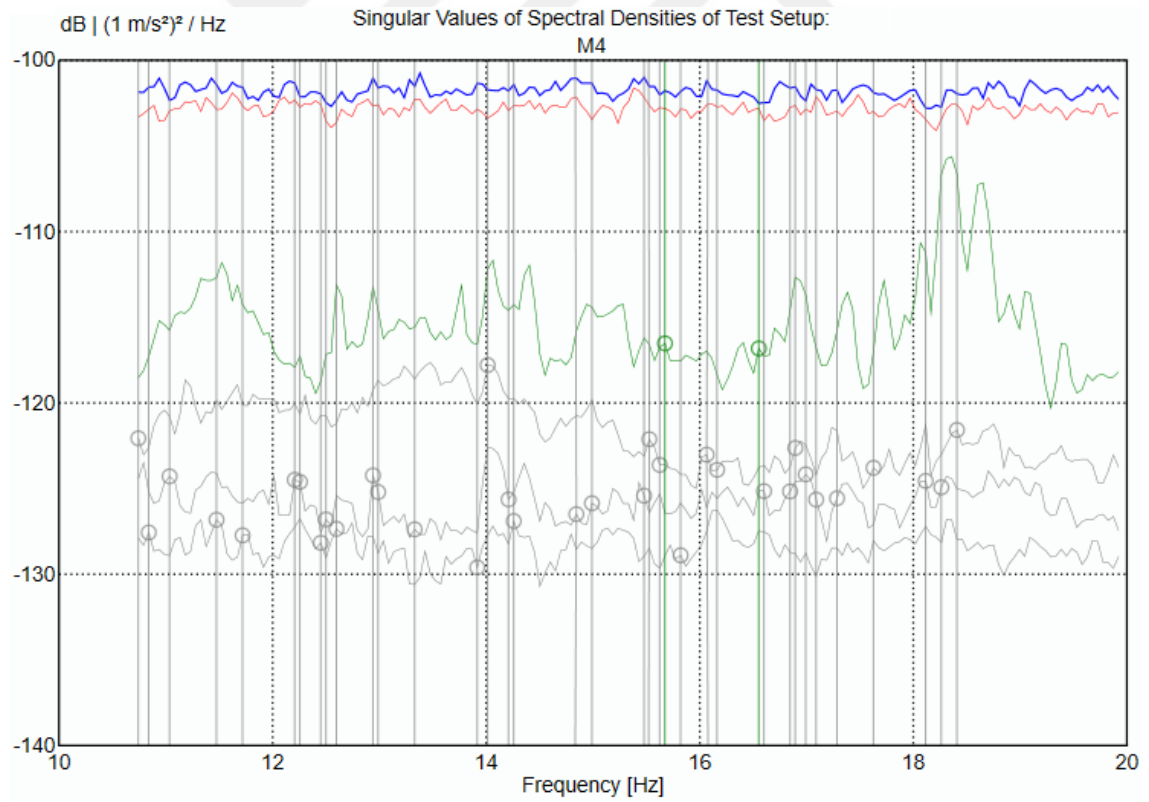
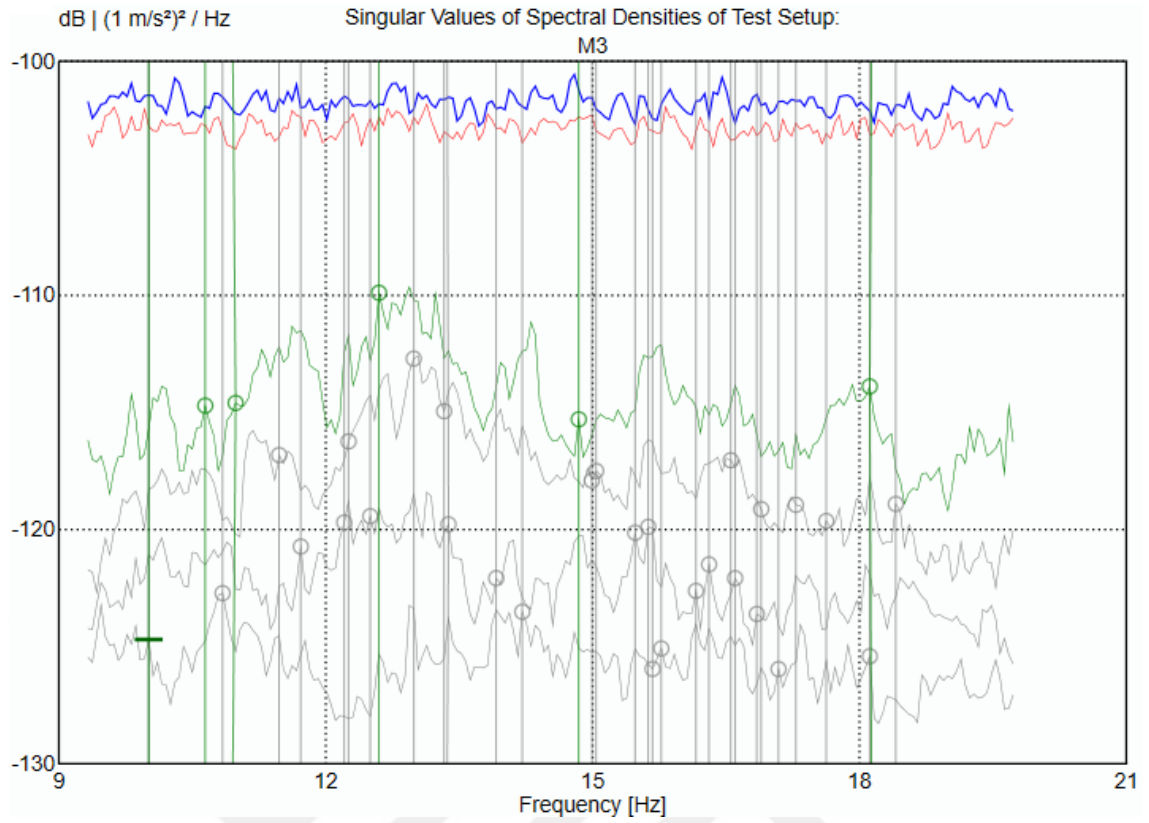


Şekil 6. 36 Veri toplama cihazı

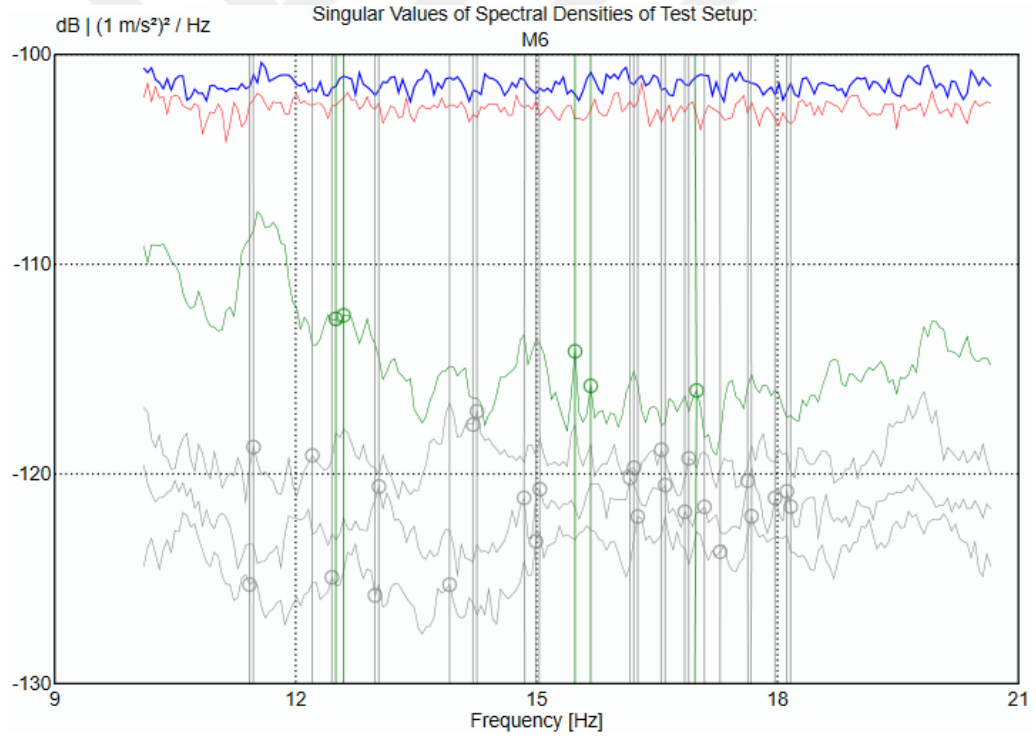
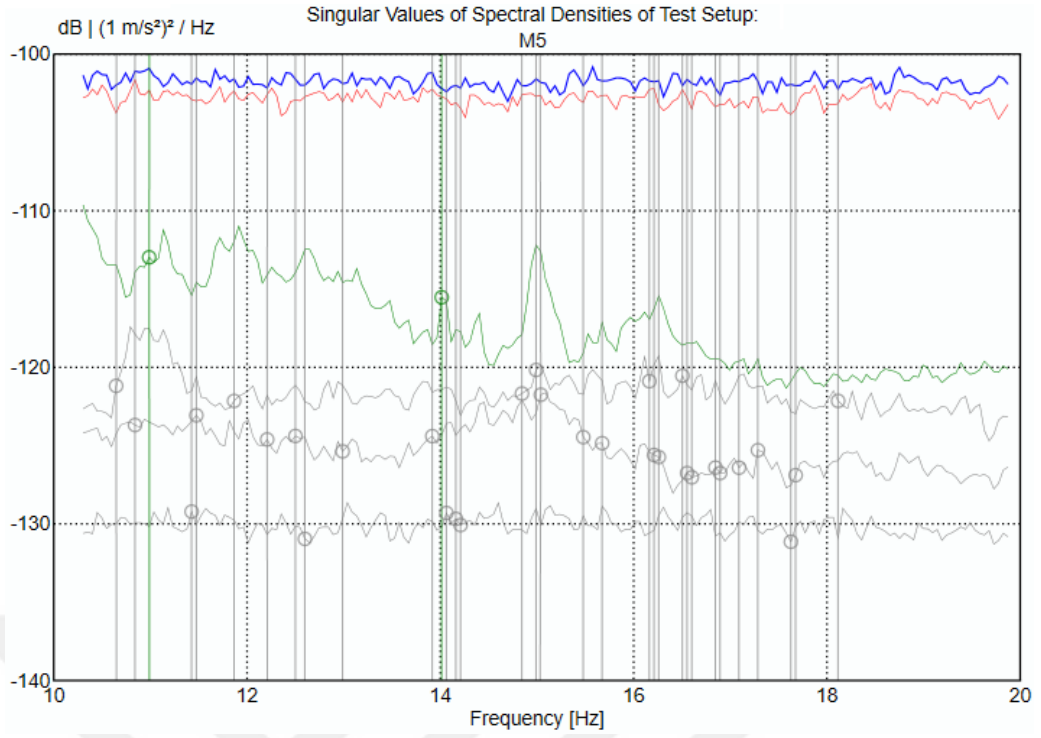
Titreşim ölçüm datalarının çok fazla olması sebebiyle, Artemis programına 7 ölçüm tek seferde girilememiştir. Bu nedenle, her 2 ölçüm dosyasının 12-23-34-45-56-67 şeklinde birbirine bağlanması ile, M1-M2-M3-M4-M5-M6 şeklinde toplam 6 adet analiz dosyası oluşturulmuştur. Mod şekillerinin elde edilmesinde 6 adet analiz dosyasının kendi içerisinde incelenmesinin yanı sıra birbirleri ile olan ilişkileri de göz önünde bulundurulmuştur. Ortak olarak pik yapan frekanslar işaretlenerek mod şekilleri öncelikle her analiz dosyasının kendi içerisinde, ardından da birbirleri ile ilişkili olarak incelenmiştir ve tarihi binaya ait olabilecek frekanslar belirlenmiştir. Öncelikle seçilen piklere göre elde edilen grafiksel mod şekilleri incelenerek muhtemel frekans aralığı belirlenmiştir ve daha detaylı incelemeler bu aralıkta yapılmıştır. Yapılan ilk frekans seçimleri sonrasında çalışma aralığı olarak 11 Hz-20 Hz aralığı seçilmiştir. Dosyaların kendi içerisindeki frekans incelemeleri ve seçilen pik değerleri aşağıda verilmiştir (Şekil 6.37, Şekil 6.38 ve Şekil 6.39).



Şekil 6. 37 Analiz dosyalarının frekans seçimleri (M1-M2)

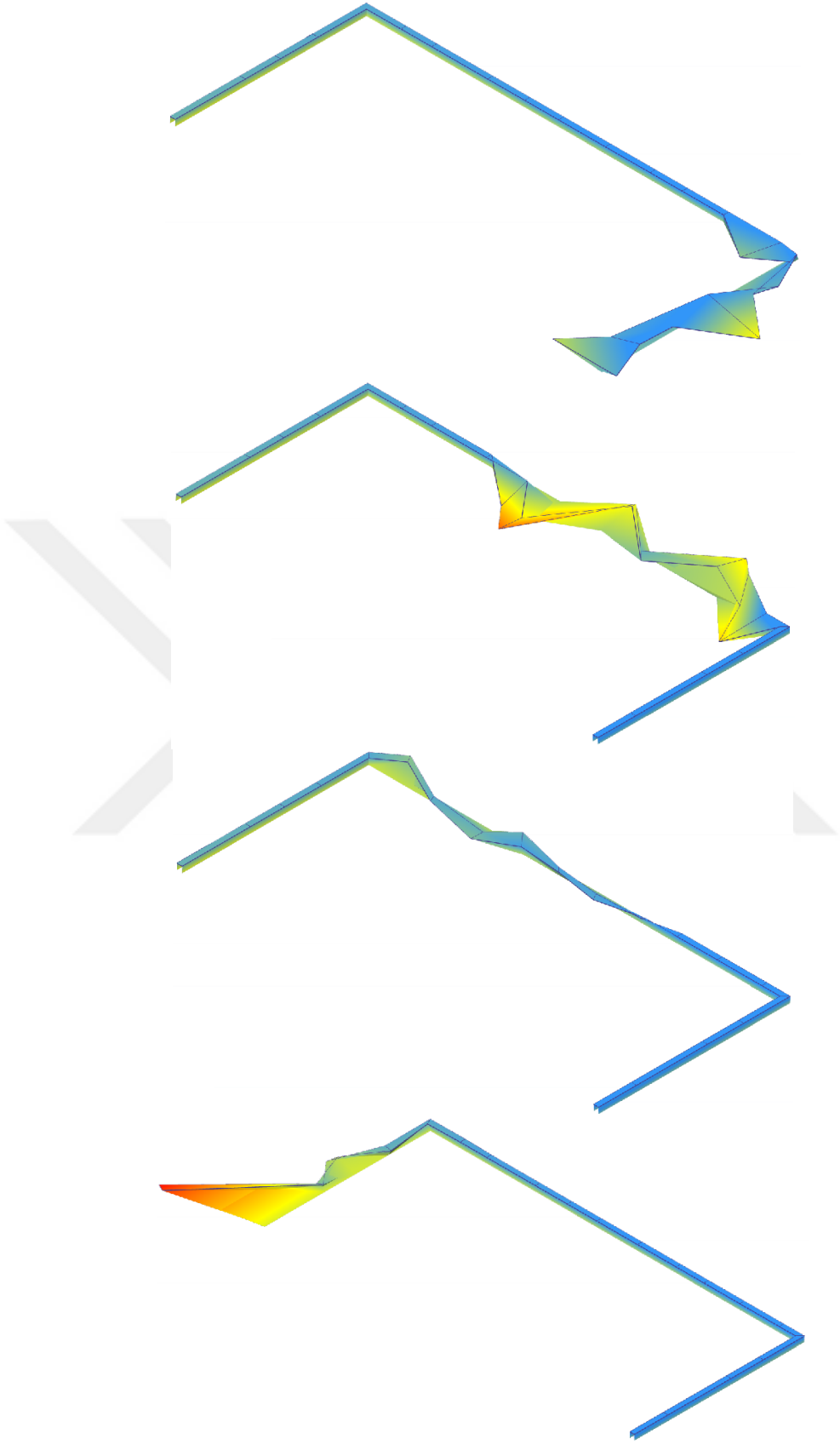


Şekil 6. 38 Analiz dosyalarının frekans seçimleri (M3-M4)

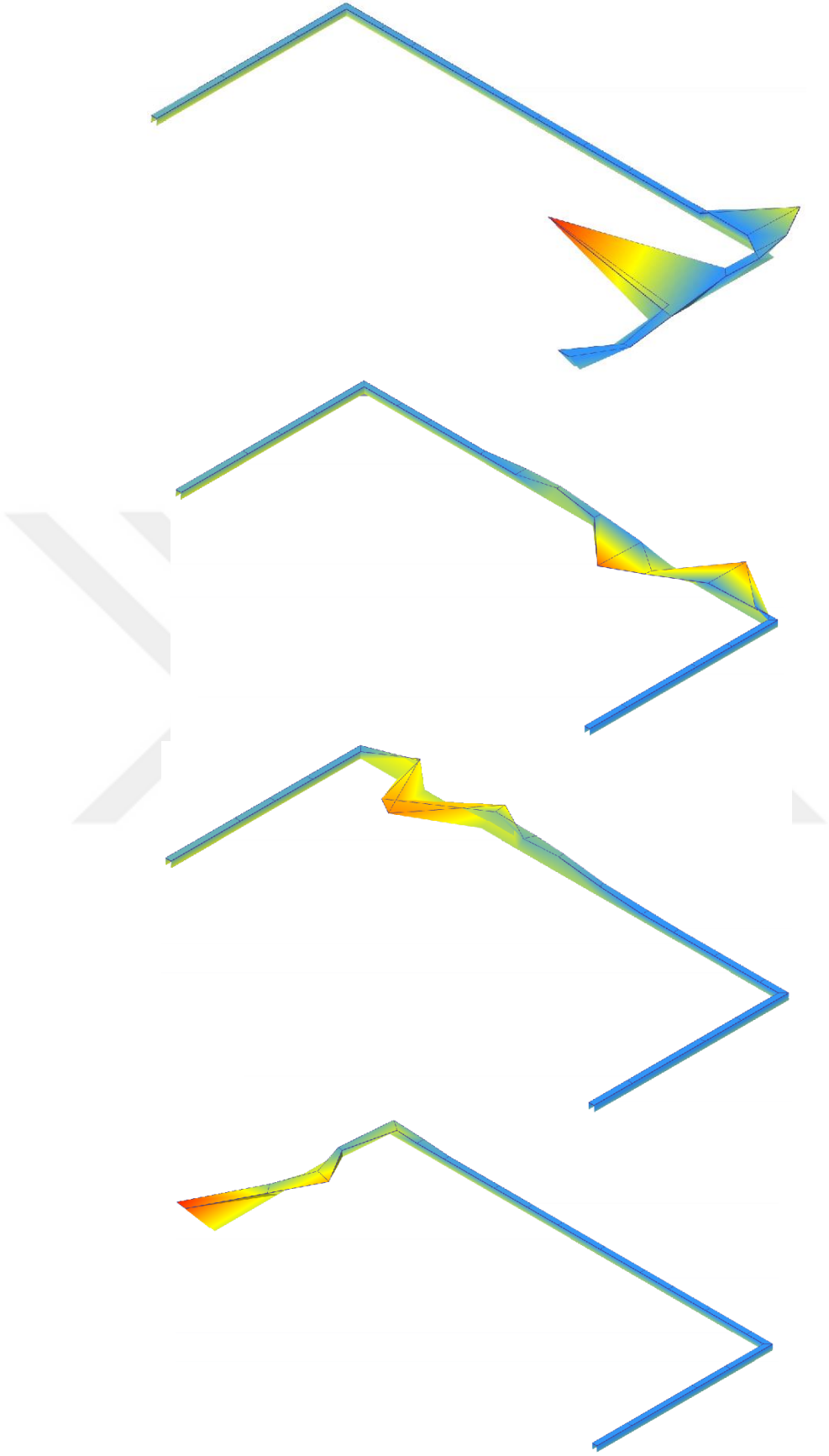


Şekil 6. 39 Analiz dosyalarının frekans seçimleri (M5-M6)

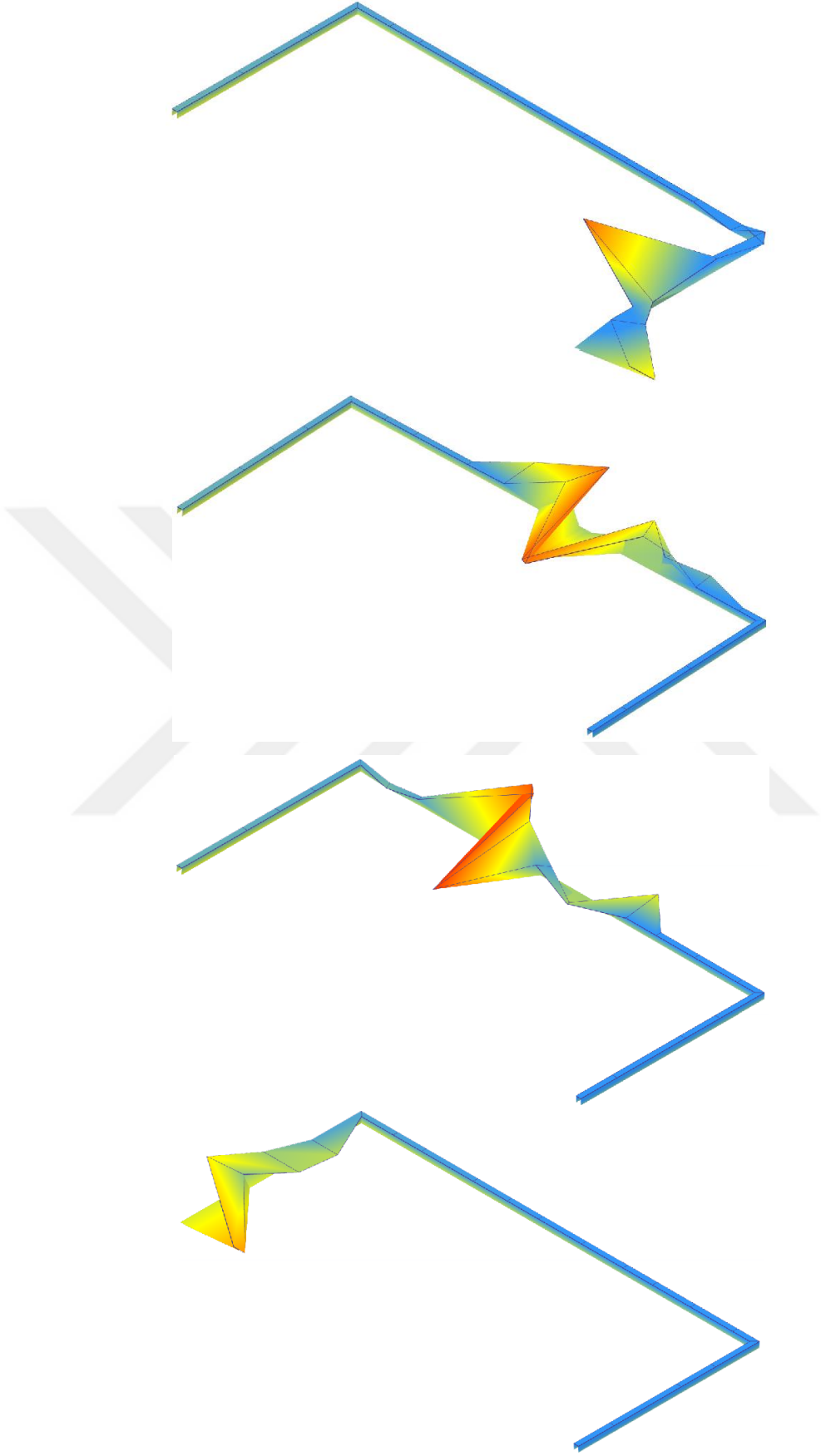
Seçilen frekansların gösterdiği grafik mod şekilleri incelenerek en uygun 6 mod şekli belirlenmiştir. 13.92, 14.21, 14.84, 15.67, 16.55, 17.29 Hz olarak seçilen frekans değerleri ve bu değerlere ait mod şekilleri, ayrı analiz dosyalarında çalışılması nedeniyle binanın dört bölgesini temsil edecek şekilde ayrı olarak aşağıda verilmiştir (Şekil 6.40, 6.41, 6.42, 6.43, 6.44, 6.45).



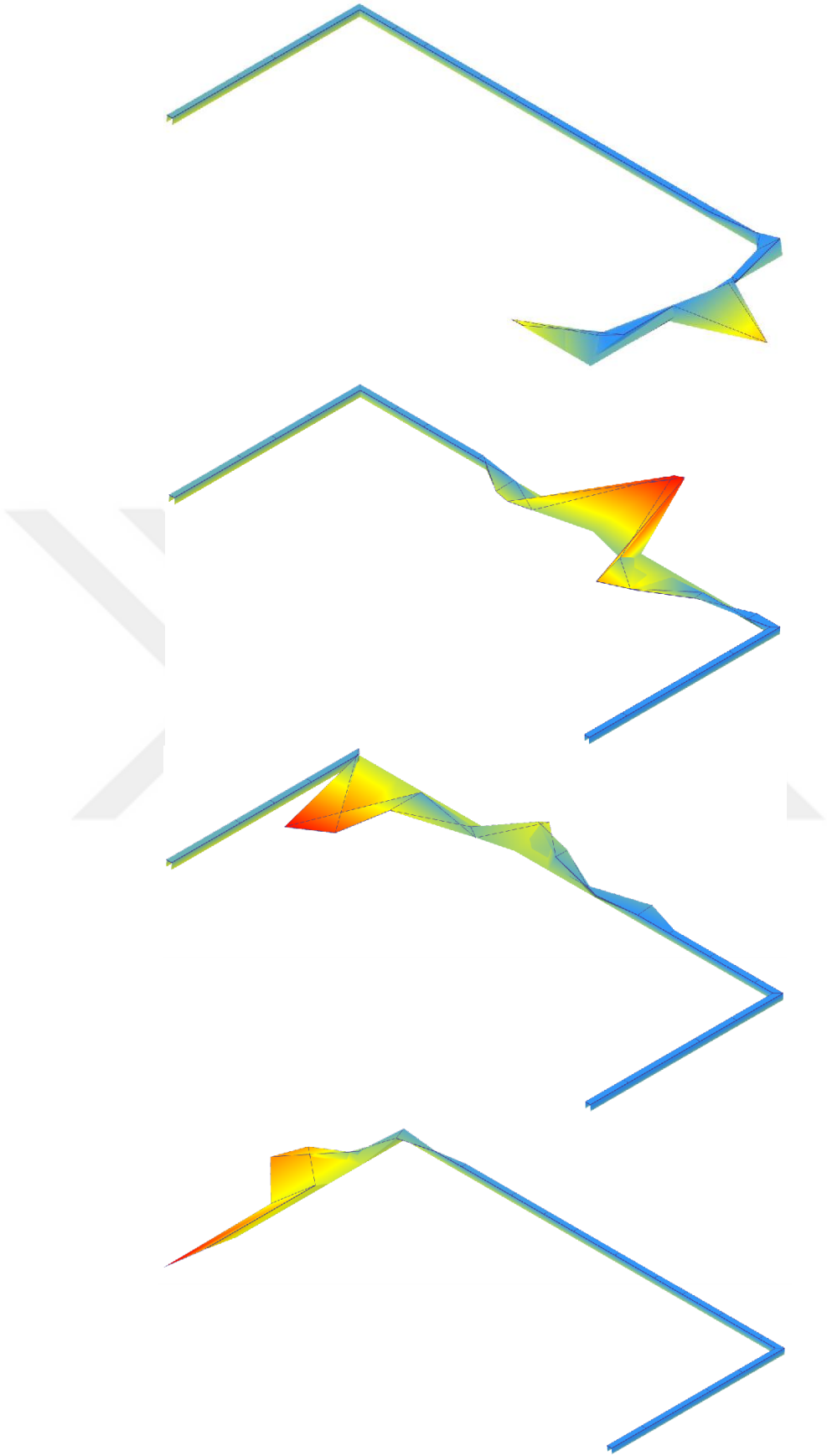
Şekil 6. 40 Artemis Modal grafiksel mod şekli (13.92 Hz)



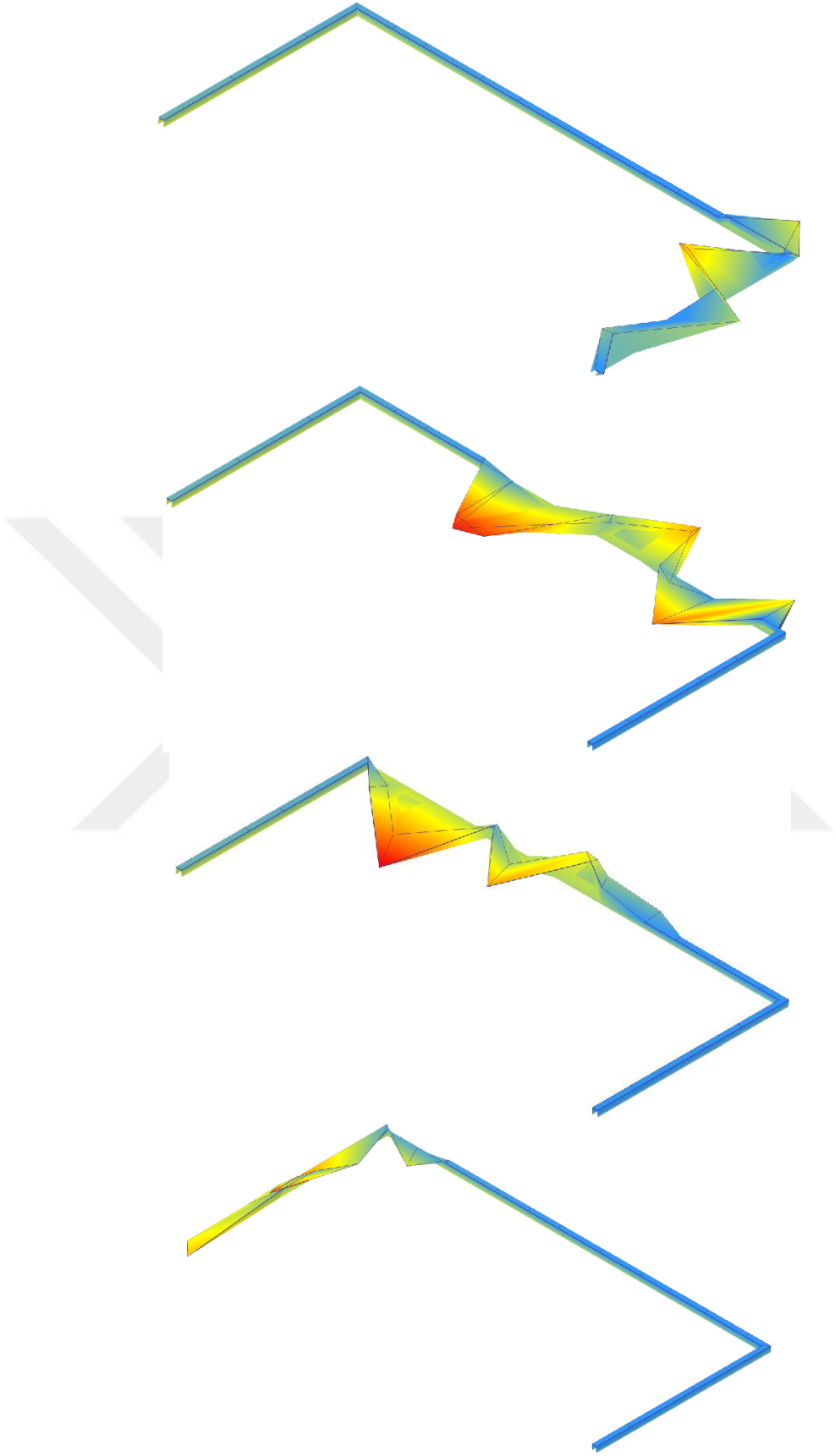
Şekil 6. 41 Artemis Modal grafiksel mod şekli (14.21 Hz)



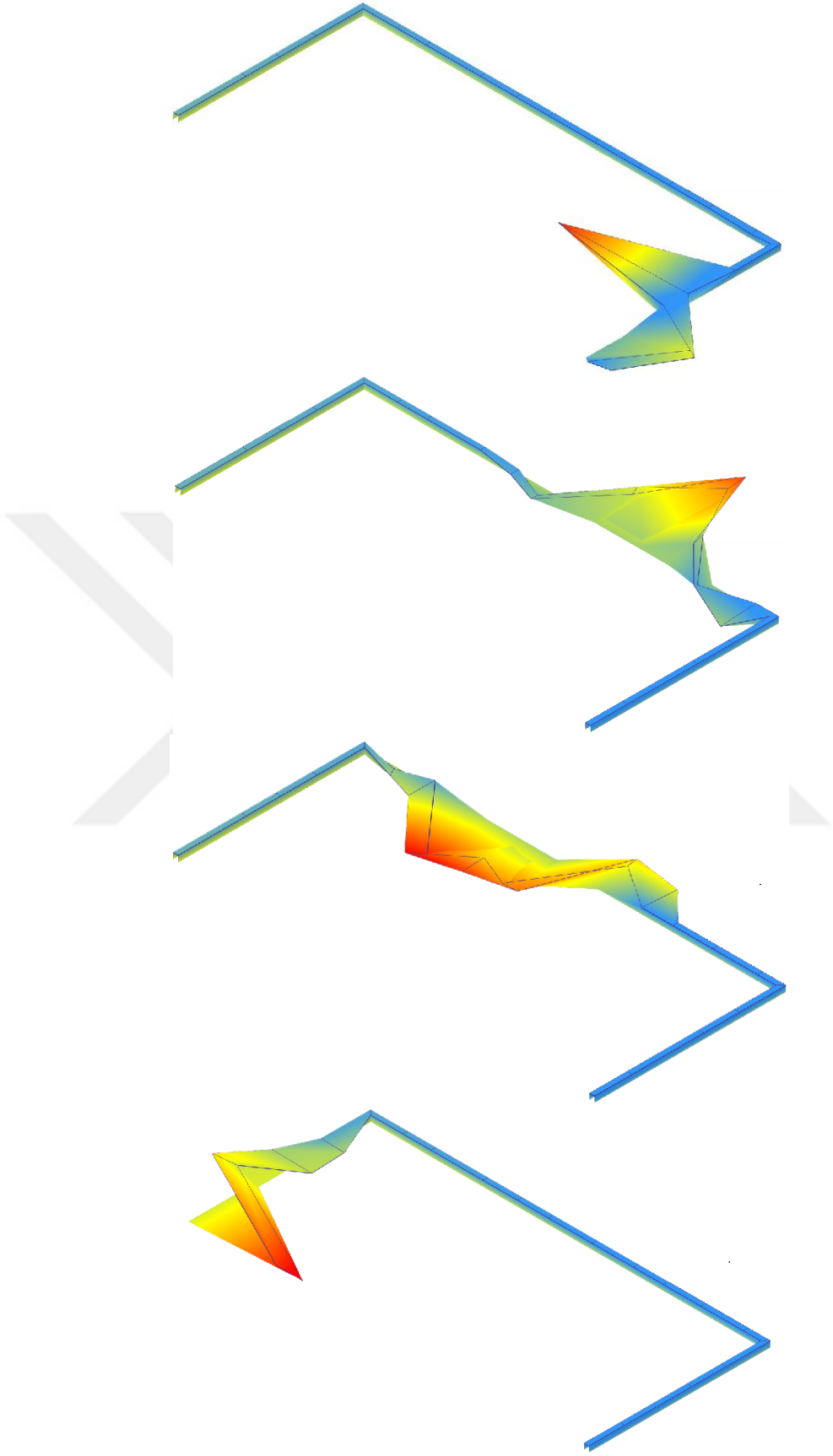
Şekil 6. 42 Artemis Modal grafiksel mod şekli (14.84 Hz)



Şekil 6. 43 Artemis Modal grafiksel mod şekli (15.67 Hz)



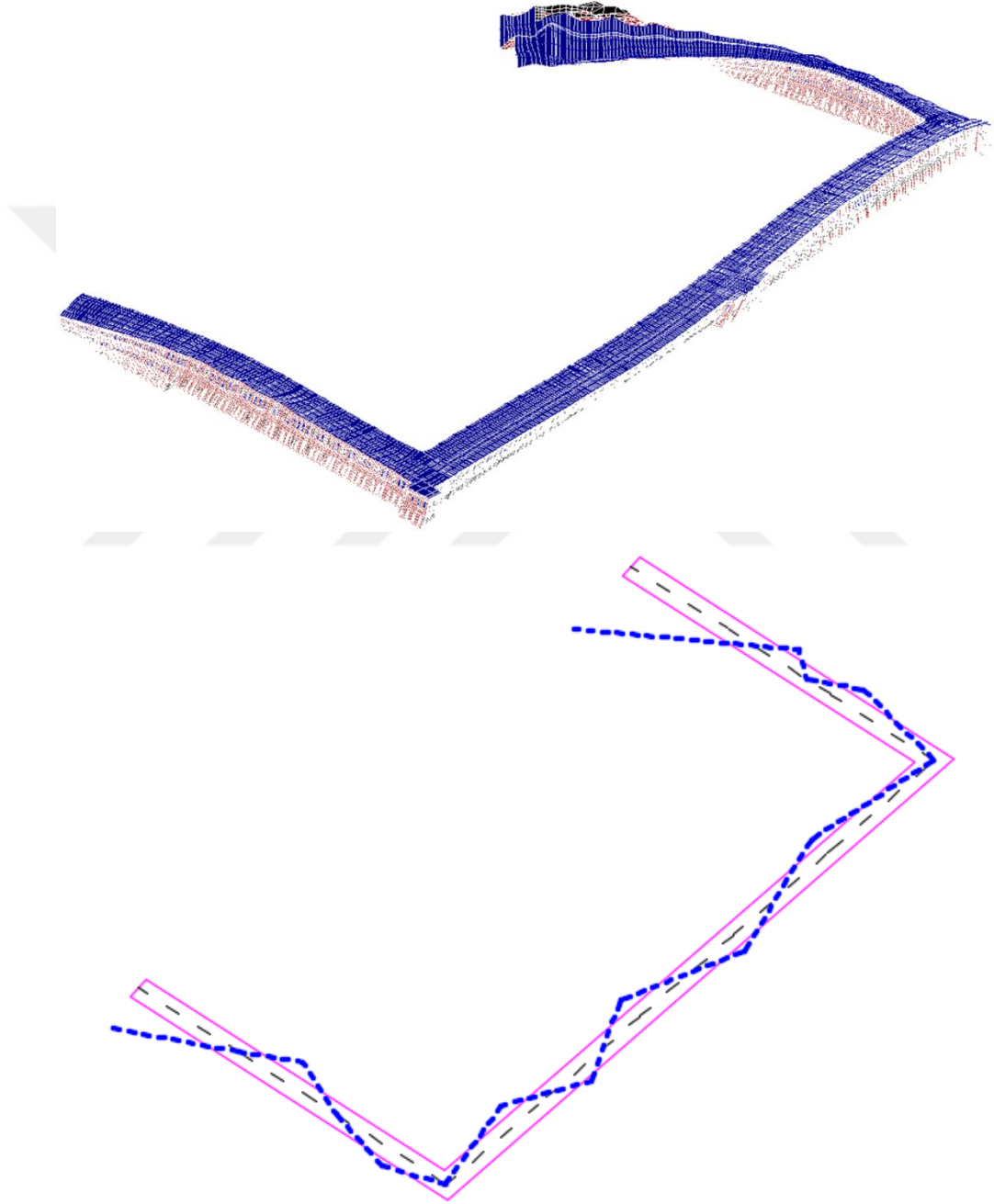
Şekil 6. 44 Artemis Modal grafiksel mod şekli (16.55 Hz)



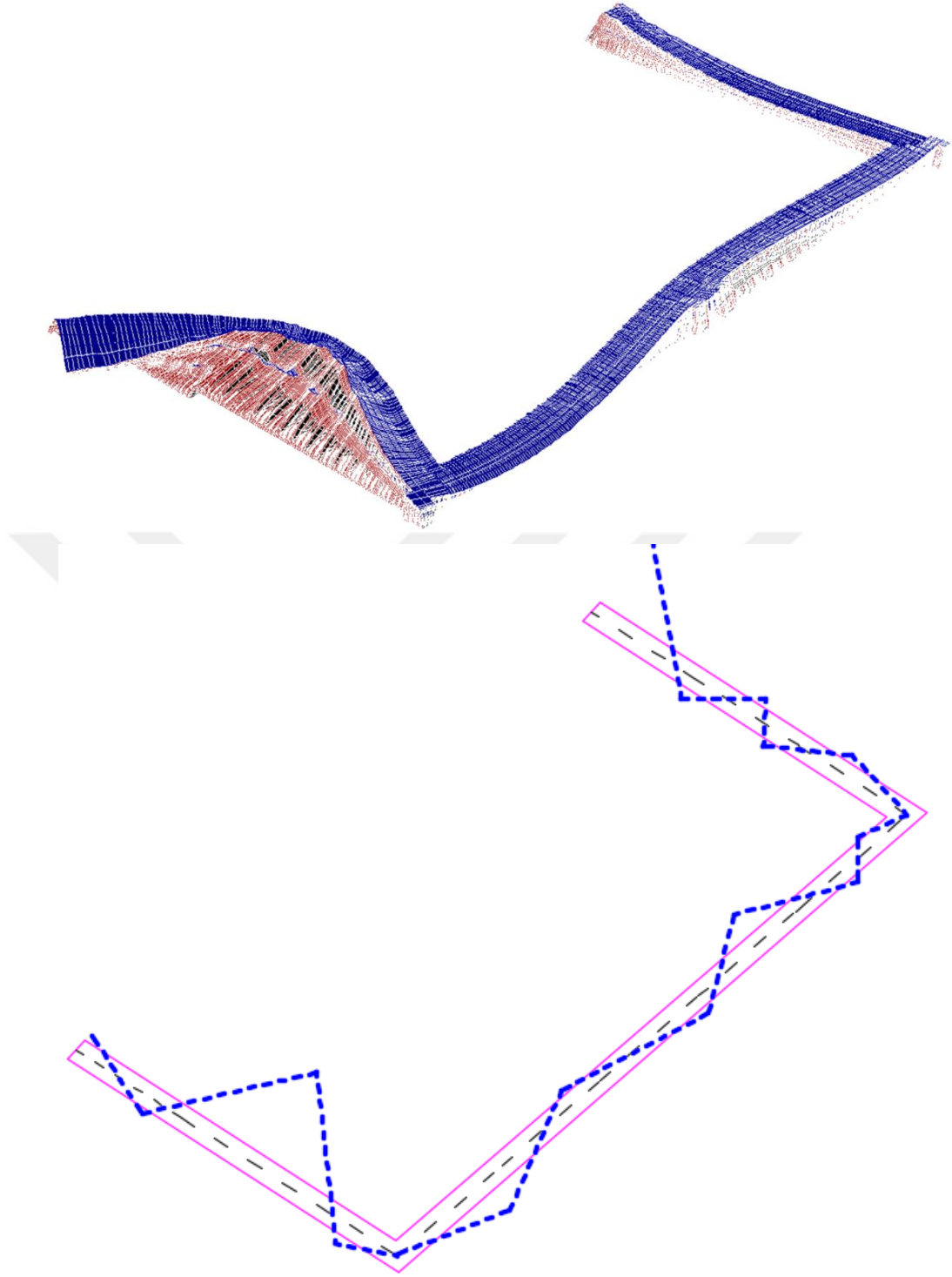
Şekil 6. 45 Artemis Modal grafiksel mod şekli (17.29 Hz)

6.4 Nümerik ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

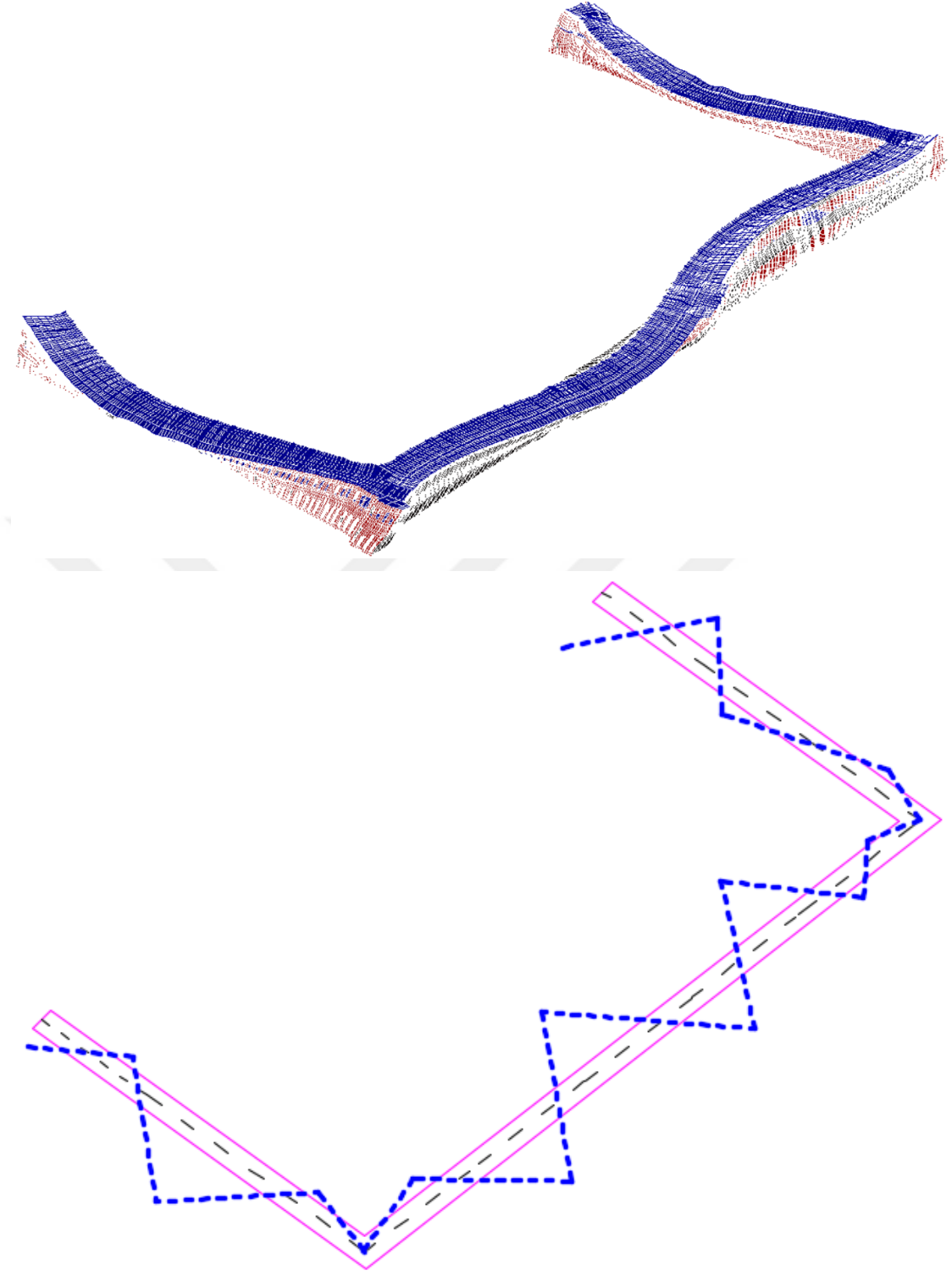
Nümerik analiz sonuçlarının gösterdiği mod şekilleri ile Artemis programından elde edilen deneysel mod şekilleri karşılaştırılacak olursa, Artemis programının verdiği mod şekillerinin nümerik analizdeki 5,6,8,9,10 ve 11.modlarla uyumlu olduğu görülmektedir. Etabs ve Artemis mod şekillerinin grafiksel karşılaştırması aşağıda verilmiştir (Şekil 6.46, Şekil 6.47, Şekil 6.48, Şekil 6.49, Şekil 6.50 ve Şekil 6.51).



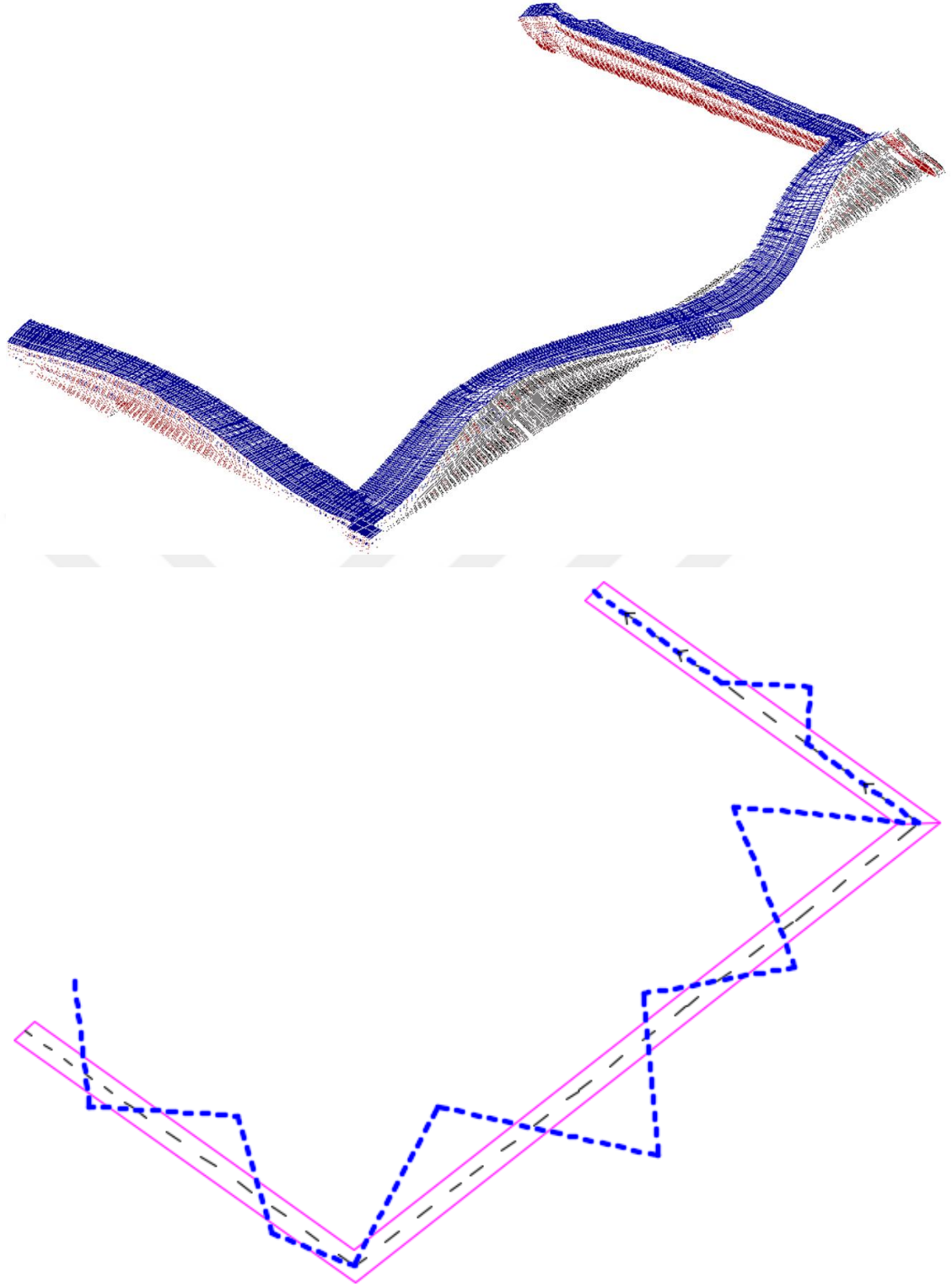
Şekil 6. 46 Artemis-Etabs mod şekillerinin karşılaştırılması (5.mod)



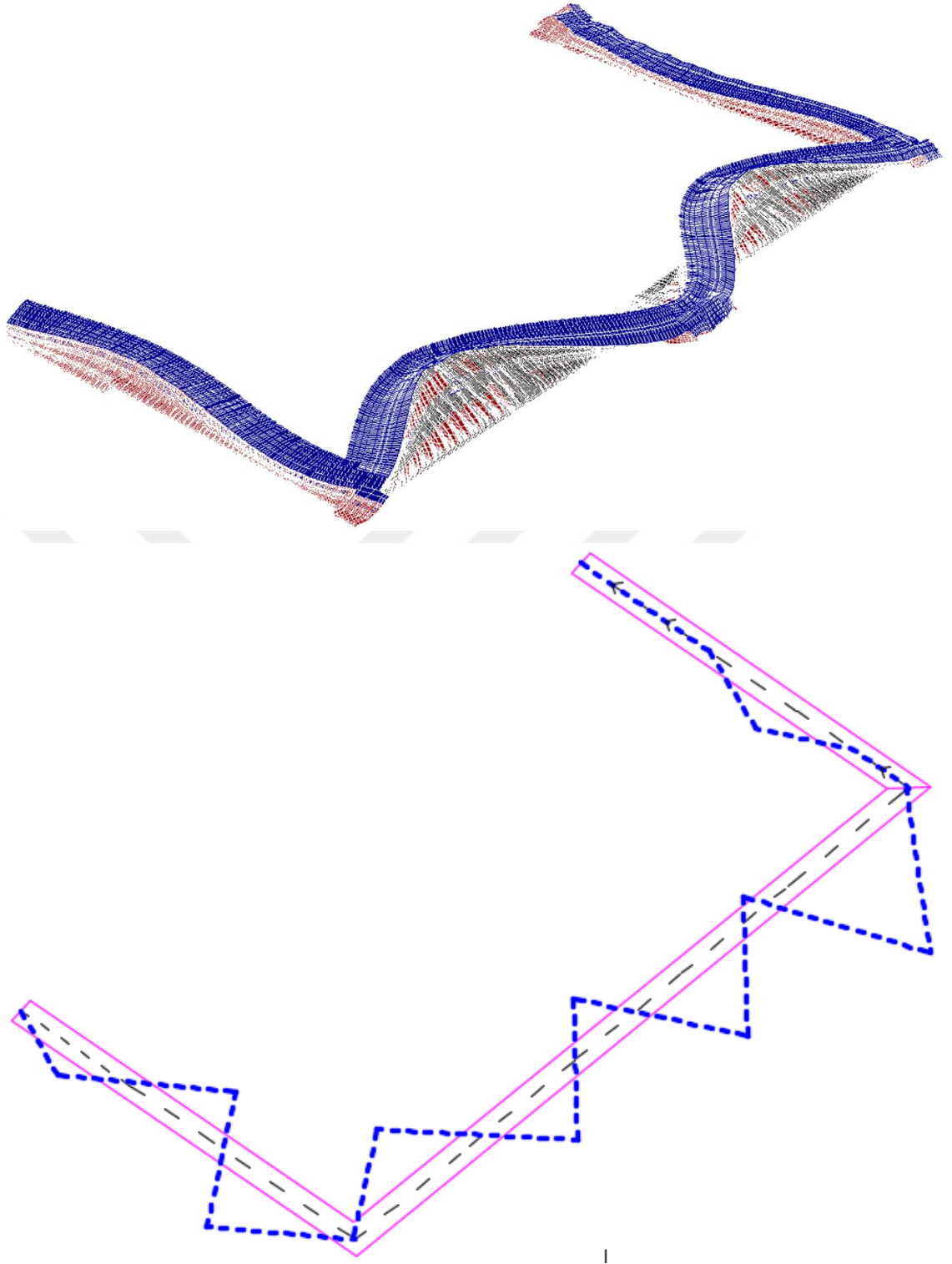
Şekil 6. 47 Artemis-Etabs mod şekillerinin karşılaştırılması (6.mod)



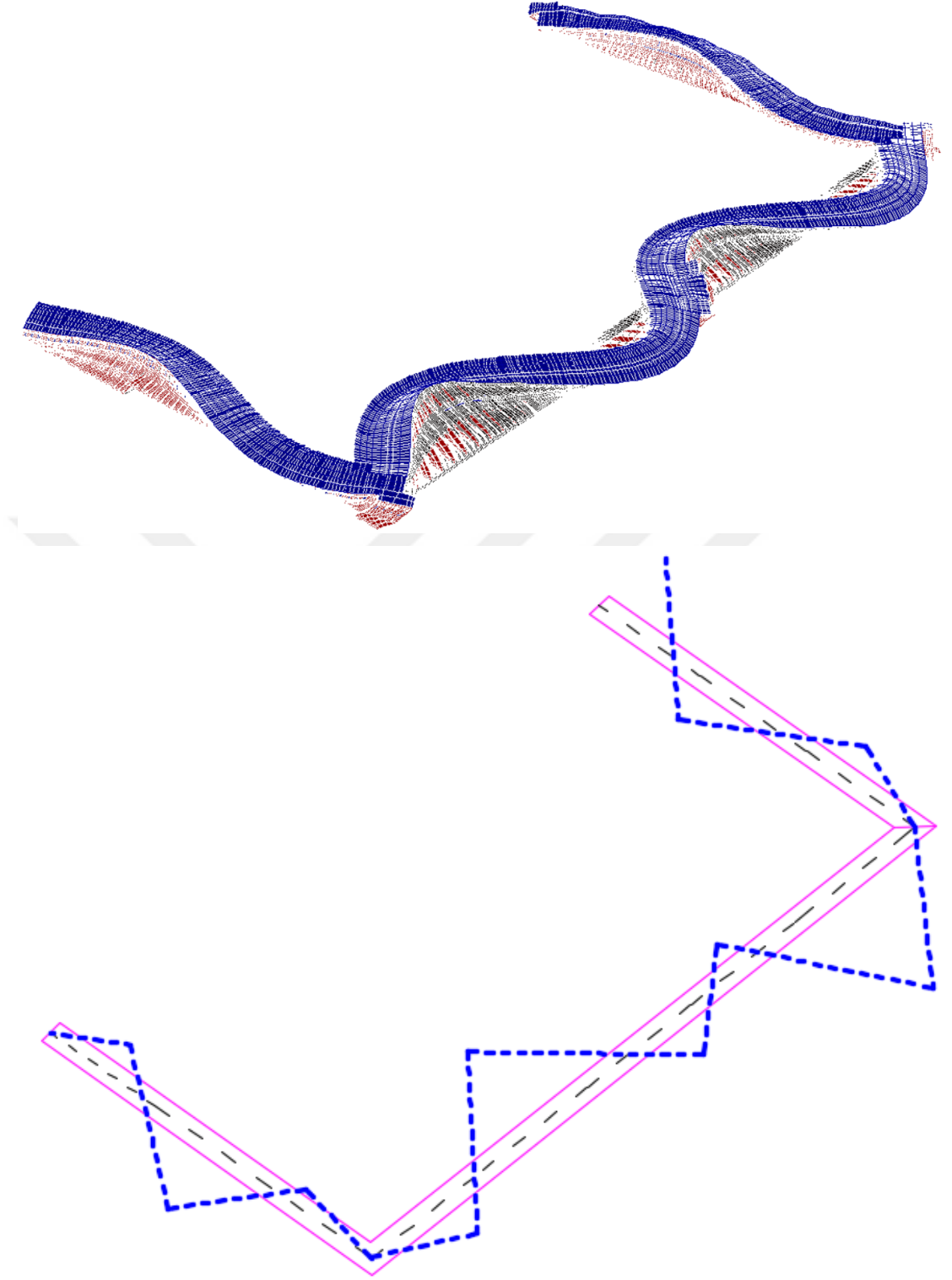
Şekil 6. 48 Artemis-Etabs mod şekillerinin karşılaştırılması (8.mod)



Şekil 6. 49 Artemis-Etabs mod şekillerinin karşılaştırılması (9.mod)



Şekil 6. 50 Artemis-Etabs mod şekillerinin karşılaştırılması (10.mod)



Şekil 6. 51 Artemis-Etabs mod şekillerinin karşılaştırılması (11.mod)

Artemis programından elde edilen frekanslara ait periyot değerleri ile nümerik periyotların karşılaştırması Çizelge 6.4’de verilmiştir.

Çizelge 6. 4 Artemis-Etabs mod şekillerinin karşılaştırılması

Etabs Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)		Fark(%)
	Artemis Modal	Artemis Modal	Etabs	
5	13,92	0,451364943	0,414744	8,11
6	14,21	0,442153413	0,413001	6,59
8	14,84	0,423382749	0,400942	5,30
9	15,67	0,400957243	0,39255	2,10
10	16,55	0,379637462	0,381781	-0,56
11	17,29	0,363389242	0,351121	3,38

Şekil 6.19’da görüldüğü üzere, OMA sonuçlarına göre elde edilen mod şekilleri ile nümerik mod şekilleri arasında önemli ölçüde uyum sağlanmaktadır. Tarihi yapının kollarında OMA sonuçları daha fazla parçalı S şekilli salınımlar göstermektedir ve bazı mod şekillerinde kolların genliği nümerik modele kıyasla daha büyük olarak karşımıza çıkmaktadır. Benzer şekilde, B bölümü olarak adlandırılan orta kısımda da birkaç mod şeklinde daha fazla parçalı salınımlara rastlanmıştır ancak genel anlamda, nümerik ve deneysel mod şekillerinin hem grafiksel olarak hem de sayısal olarak yapılan kıyaslamasında oldukça tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, nümerik modelin gerçeğe uygunluğunu doğrulamaktadır. Dolayısıyla, nümerik model vasıtasıyla yapılacak sayısal hesaplamaların da gerçeğe oldukça yakın sonuçlar vereceği söylenebilmektedir.

6.5 Kışının Yatay ve Düşey Yükler Altındaki Yapısal Davranışı

Kışının deprem hesabı TDY2007 yönetmeliğine göre yapılmıştır. Eşdeğer deprem kuvvetlerinin hesabında kullanılan deprem parametreleri Çizelge6.5’de verilmiştir.

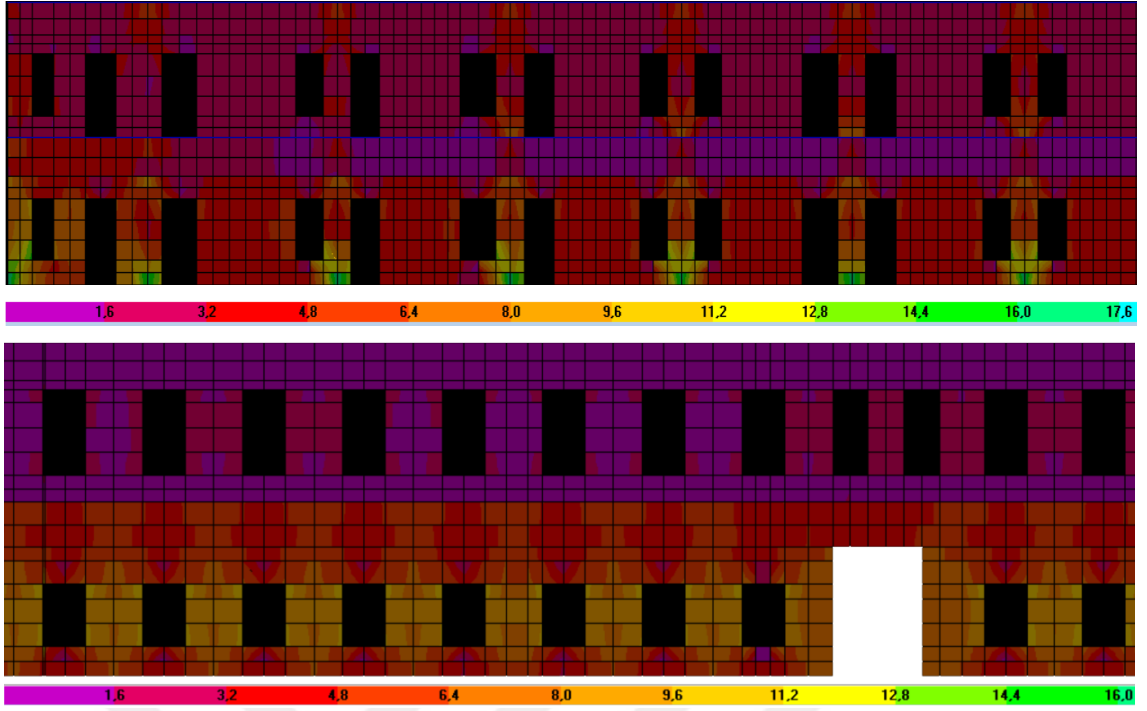
Çizelge 6. 5 Deprem parametreleri

Etkin Yer İvmesi Katsayısı (Ao)	0.4
Yapı Önem Katsayısı (I)	1.4
Spektrum Katsayısı S(T)	2.5
Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı (R)	2
Hareketli Yüğü Katılım Katsayısı (n)	0.6

Tarihi binanın hakim modları, öncelikle her yapı kolunun bireysel salınımları şeklinde elde edilmiştir. Şekil 6.33'de görülen ilk mod şekli, yapının rijitliği daha az olan 3 katlı bölümünde oluşmuştur ancak bu mod şekli yapının tamamını ilgilendirmemektedir. Benzer şekilde, ikinci, üçüncü modlar da rijitliğin daha düşük olduğu yapı kollarındaki yatay salınımlar şeklinde karşımıza çıkmıştır. Dördüncü mod şeklinde ise yapının kollara nazaran daha ağır ve rijit olan orta bölgesinde yine yatay salınımlar elde edilmiştir. Tarihi binanın tüm kollarının beraber hareketleri, dördüncü mod üzerindeki modlarda elde edilmiştir. Yine yatay salınımlar şeklinde oluşan bu modlar, OMA verileri ile uyumlu olan mod şekilleridir. Plandaki uzunluğu yüksekliğine oranla çok büyük olan tarihi kışla binası, geometrik ve mekanik özelliklerine bağlı olarak düşey yönde salınımlar yapmamıştır ve tüm mod şekilleri yataya gerçekleşen salınımlar olarak karşımıza çıkmıştır.

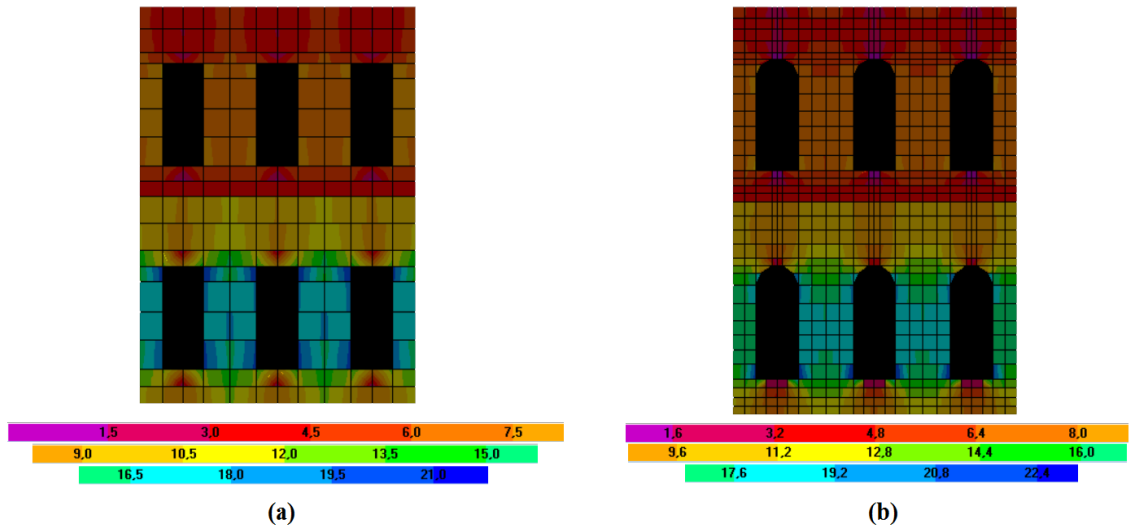
OMA verileri binanın mevcut koşullarındaki hakim mod şekillerinin, Etabs sonuçlarında 5. mod ve üzerinde elde edilen mod şekilleri olduğunu göstermektedir. Yani burada hakim 1.mod olarak, nümerik modeldeki 5.modun göz önüne alınması gerekmektedir.

Yapılan analiz sonrası kuvvet dağılımları incelenecek olursa, deprem taban kesme kuvveti nedeniyle binanın zemin katının beklenen şekilde daha büyük kesme kuvvetlerine maruz kaldığı görülmektedir. Şekil 6.52'de tarihi kışla binasının B bölümüne ait duvarlarda oluşan Y yönü depremi kesme kuvvetlerinin maksimum değerleri verilmiştir. Duvarların en büyük kesme kuvvetlerine maruz kalan kısımları, Bölüm 2'de açıklanan şekilde boşluk çevreleri ve boşluklar arasındaki kısa rijit duvar parçalarıdır. Bu bölümler daha büyük kesme kuvvetine maruz kaldığından yığma duvarlarının dayanımlarının ana belirleyicileri olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 6. 52 Duvarlarda oluşan maksimum kesme kuvvetleri

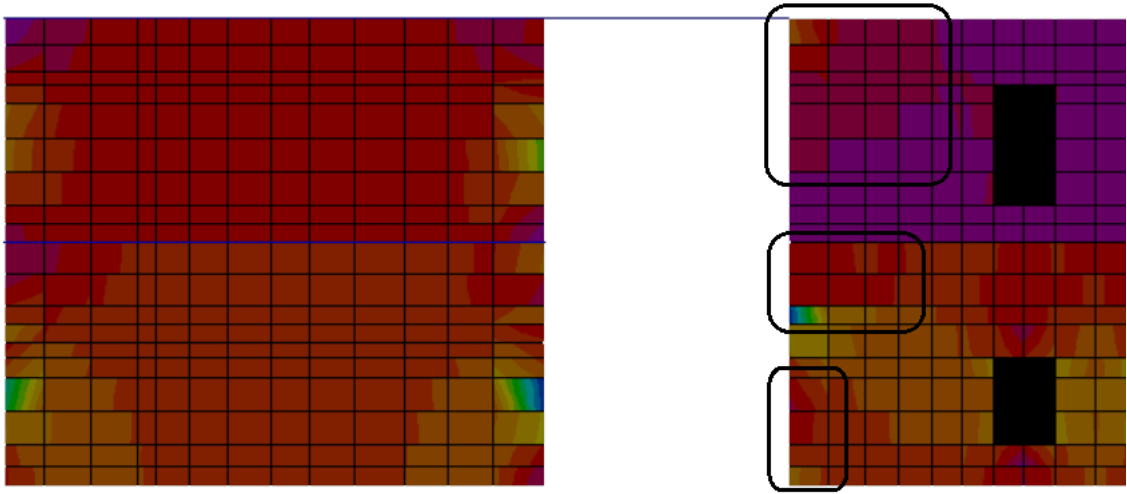
Duvar boşluklarının çevresinde elde edilen gerilmelerde pencere ve kapı boşluklarının dikdörtgen şekilli olarak açılması da rol oynamaktadır. Tarihi kışlanın mevcut pencereleri yarım kemerli şekilde olduğundan dikdörtgen pencere kabulünün yapılması mevcut durumdan farklı değerlerin elde edilmesine yol açmaktadır. Yapılan dikdörtgen pencere kabulü, modelleme kolaylığı ve süre açısından avantaj sağlamaktadır ve mesh sayısının önemli ölçüde azaltılması anlamına gelmektedir. Yapılan bu kabul ile oluşan gerilme farklılıkları Şekil 6.53’de verilen bir duvar parçası üzerinde incelenmiştir.



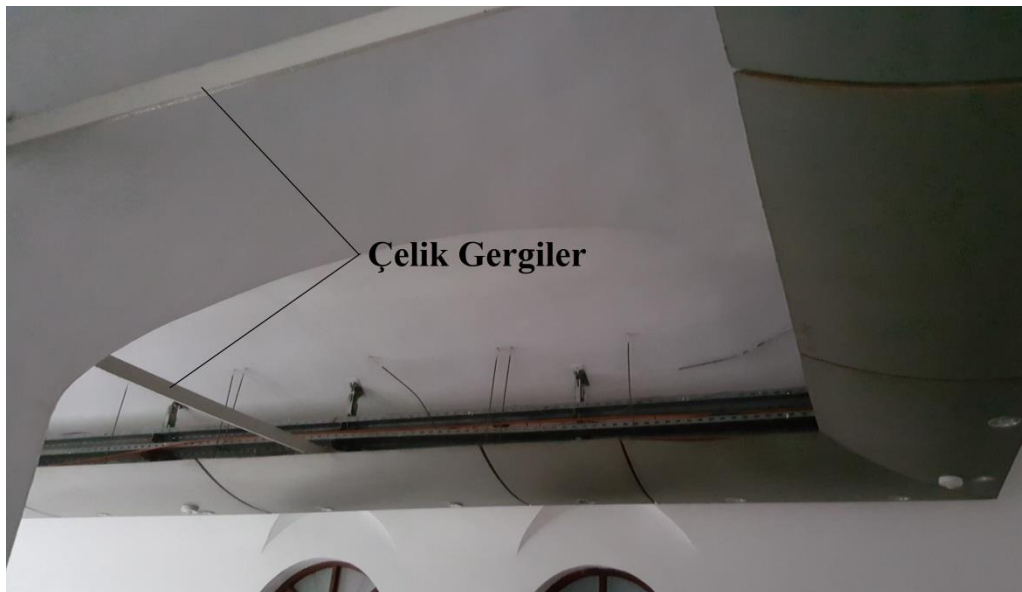
Şekil 6. 53 Dikdörtgen ve kemerli pencere modelleri

Şekil 6.53a'da, dikdörtgen pencere modelinde elde edilen maksimum kuvvet 21 ton/m^2 iken, Şekil 6.53b'de görülen kemerli pencere modelinde bu değer 22.4 ton/m^2 olarak bulunmuştur. Aradaki fark, dikdörtgen pencere kabulü yapılmasına elverecek kadar düşük değerde olduğundan tüm modelde pencereler dikdörtgen olarak modellenmiştir.

Tarihi taş kışlanın zorlanan bölümlerinden biri de yapı köşeleridir. Geometrik özelliklerden kaynaklanan gerilme yığılmaları nedeniyle bina köşelerinde gerilmelerin arttığı görülmektedir (Şekil 6.54). Tarihi yapının mevcut durumunda bu kısımlardaki zorlanmaların karşılanması amacıyla çelik profiller yerleştirilmiştir (Şekil 6.55).



Şekil 6. 54 Bina köşesinde oluşan örnek bir gerilme yığılması



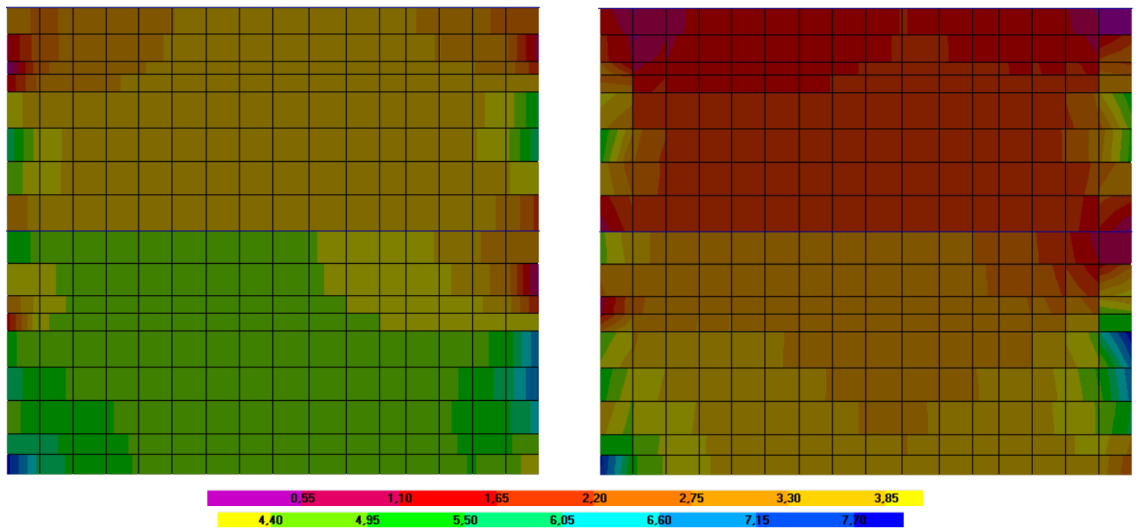
Şekil 6. 55 Binaköşesindeki çelik gergiler

Tarihi binanın geometrik yapısından kaynaklanan köşe gerilmeleri nedeniyle binada oluşan köşe hasarlarına mevcut binadan bir örnek Şekil 6.56’da verilmiştir.



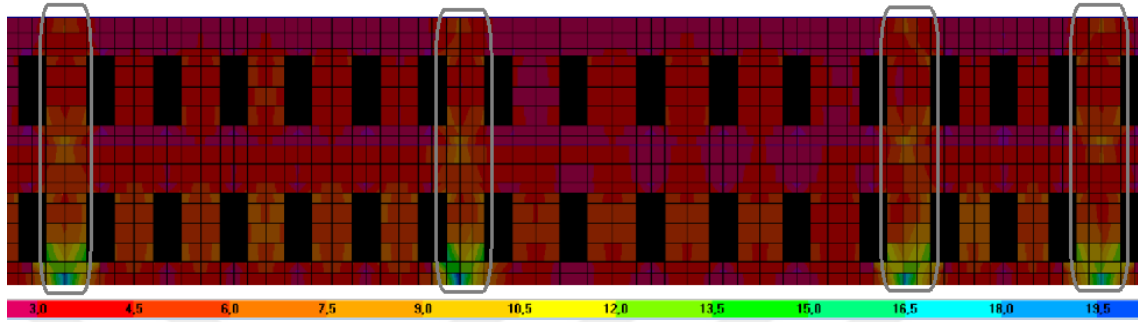
Şekil 6. 56 Tarihi kışlaya ait mevcut bir köşe hasarı

Tarihi yığma binadaki sınıf ve odaları ayıran bölme duvarları teşkil eden boşluksuz dolu duvarlarda oluşan gerilmeler incelenecek olursa, Bölüm 2’de açıklanan şekilde gerilmelerin köşe kısımlarda ve duvar bağlantılarının yapıldığı noktalarda olduğu görülmektedir (Şekil 6.57).



Şekil 6. 57 Dolu duvarlarda oluşan gerilme dağılımları

Dolu duvarların cephe duvarlarına bağlantılarının olduğu bölümlerde, dolu duvarların kesme kuvvetine maruz kaldığı deprem yönünde cephe duvara yük aktarmasıyla da gerilme yığılmaları oluşmaktadır. X yönü depremindeki dolu duvarların cephe duvarlarına aktardığı kuvvetler Şekil 6.58’de C bölümüne ait duvar elemanları üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 6. 58 Bölme duvarların yük aktarımı

Tarihi binanın deprem hesabında kayma gerilme kontrolleri, Koçak ve Kilit [131] çalışmasındaki şekilde, TDY2007 koşullarına uygun olarak yapılmıştır. TDY2007 5.3.3.4 koşulu gereği, duvarlara gelen deprem kuvveti duvar yatay en kesit alanına bölünerek duvarlarda oluşan kayma gerilmeleri hesaplanmıştır. Daha sonra, hesaplanan duvar kayma gerilmeleri (6.1) ile verilen duvar kayma emniyet gerilmeleri (τ_{em}) ile karşılaştırılmıştır ve duvar elemanlarının izin verilen gerilmelerin altında kalıp kalmadığı kontrol edilmiştir.

$$\tau_{em} = \tau_0 + \mu\sigma \quad (6.1)$$

Burada τ_{em} , duvar kayma emniyet gerilmesini, τ_0 , duvar çatlama emniyet gerilmesini, μ , sürtünme katsayısını, σ ise duvar düşey gerilmelerini ifade etmektedir. τ_0 değeri, duvarlarda kullanılan yığma birimlerin cinsine bağlıdır ve tarihi kışla için bu parametre, yönetmelik tarafından verilen duvar değerlerine uygun olarak 15 ton/m² olarak alınmıştır. Sürtünme katsayısı μ için de yönetmelik tarafından önerilen 0.5 değeri kullanılmıştır.

Duvarlara gelen kesme kuvvetleri, kat kesme kuvvetlerinin yanında kat burulma momentleri de göz önüne alınarak binanın birbirine dik her iki eksen doğrultusunda +%5 ve -%5 eksantrisite ile aşağıdaki tablolarda verilen şekilde bulunmuş ve izin verilen gerilmelerin aşıldığı duvar elemanları belirlenmiştir. Tarihi bina çok büyük

olduğundan, duvar elemanlarının tamamının hesabı sunulamamıştır. Burada verilen duvar elemanları, binanın farklı bölümlerine ait olan ve belirtilen özellikleri (köşe duvarlar, sıralı boşluklu duvarlar, büyük kapı boşluklarının bulunduğu kısımlar, dolu duvarlar vs.) temsil eden duvar elemanlarıdır. Tarihi binada yapılan kayma kontrolleri Çizelge 6.6' da verilmiştir. Boyalı hücrelerdeki duvar elemanlarında izin verilen emniyet gerilmeleri aşılmaktadır.

Çizelge 6. 6 Duvar elemanlarının kayma gerilme kontrolleri

Story	Pier	P(G+Q) (t/m ²)	V2EX (t/m ²)	V3EX (t/m ²)	V2EY (t/m ²)	V3EY (t/m ²)	VMAX (t/m ²)	L (m)	B (m)	σ (t/m ²)	τ (t/m ²)	τ_{em} (t/m ²)
STORY2	P3X-158	26,9	0,41	2,78	3,73	0	3,73	1,05	1	25,62	3,55	27,8
STORY2	P3X-159	18,01	2,17	2,06	18	0,03	18	1	1	18,01	18,00	24,0
STORY2	P3X-160	9,05	2,02	1,5	19,16	0,01	19,16	1	1	9,05	19,16	19,5
STORY2	P3X-162	25,74	0,1	2,53	2,97	0,07	2,97	1	1	25,74	2,97	27,9
STORY2	P3X-163	18,61	0,27	2,95	23,46	0,01	23,46	1	1	18,61	23,46	24,3
STORY2	P3X-164	9,36	0,71	1,6	23,15	0	23,15	1	1	9,36	23,15	19,7
STORY2	P3X-166	48,11	1,25	10,84	13,35	0,15	13,35	1,61	1	29,88	8,29	29,9
STORY2	P3X-167	18,75	1,9	3,6	24,7	0,05	24,7	1	1	18,75	24,70	24,4
STORY2	P3X-168	9,67	2,25	1,52	24,14	0,03	24,14	1	1	9,67	24,14	19,8
STORY2	P3X-169	55,59	15,87	0,14	0,22	6,87	15,87	1,55	0,85	42,19	12,05	36,1
STORY2	P3X-170	33,76	0,09	3,21	6,16	0,03	6,16	1,23	1	27,45	5,01	28,7
STORY2	P3X-171	18,56	0,6	1,97	21,98	0,02	21,98	1	1	18,56	21,98	24,3
STORY2	P3X-172	9,58	0,34	1,44	22,43	0	22,43	1	1	9,58	22,43	19,8
STORY2	P3X-174	33,45	0,47	3,08	6,55	0,04	6,55	1,23	1	27,20	5,33	28,6
STORY2	P3X-175	18,58	2,81	3,08	26,72	0,02	26,72	1	1	18,58	26,72	24,3
STORY2	P3X-176	9,48	2,26	1,66	26,1	0,02	26,1	1	1	9,48	26,10	19,7
STORY2	P3X-178	85,3	2,79	44,14	30,2	0,62	44,14	56,56	0,054	27,82	14,40	28,9
STORY2	P3X-179	17,74	2,68	3,47	22,87	0,08	22,87	1	1	17,74	22,87	23,9
STORY2	P3X-180	9,17	2,88	1,6	23,48	0,05	23,48	1	1	9,17	23,48	19,6
STORY2	P3X-181	55,98	14,97	0,16	0,16	6,91	14,97	1,55	0,85	42,49	11,36	36,2
STORY2	P3X-182	23,4	0,07	2,31	2,87	0,04	2,87	0,97	1	24,12	2,96	27,1
STORY2	P3X-183	17,16	0,43	1,88	16,13	0,01	16,13	1	1	17,16	16,13	23,6
STORY2	P3X-184	8,37	0,51	1,38	17,79	0	17,79	1	1	8,37	17,79	19,2
STORY2	P3X-186	23,36	0	2,31	2,52	0,07	2,52	0,97	1	24,08	2,60	27,0
STORY2	P3X-187	17,75	1,8	3,58	20,92	0,06	20,92	1	1	17,75	20,92	23,9
STORY2	P7Y-1	98,83	51,62	1,34	4,24	28,03	51,62	2,229	1,4	31,67	16,54	30,8
STORY2	P7Y-2	23,75	27,58	0,25	1,73	6,24	27,58	0,921	1,4	18,42	21,39	24,2
STORY2	P7Y-3	11,97	30,05	0,17	1,04	3,62	30,05	0,921	1,4	9,28	23,31	19,6
STORY2	P7Y-5	32,51	4,54	0,23	0,34	6,38	6,38	0,95	1,4	24,44	4,80	27,2
STORY2	P7Y-6	23,27	20,43	0,12	2,12	5,41	20,43	1	1,4	16,62	14,59	23,3
STORY2	P7Y-7	10,98	23,26	0,1	1,29	3,58	23,26	1	1,4	7,84	16,61	18,9
STORY2	P7Y-9	34,27	3,36	0,02	0,02	6,81	6,81	1	1,4	24,48	4,86	27,2
STORY2	P7Y-10	24,8	23,79	0,27	5,43	8,98	23,79	1	1,4	17,71	16,99	23,9
STORY2	P7Y-11	11,97	25,24	0,06	5,77	3,24	25,24	1	1,4	8,55	18,03	19,3
STORY2	P7Y-13	49,5	8,73	0,94	2,67	21,23	21,23	1,295	1,4	27,30	11,71	28,7

Çizelge 6. 6 Duvar elemanlarının kayma gerilme kontrolleri (devamı)

Story	Pier	P(G+Q) (t/m ²)	V2EX (t/m ²)	V3EX (t/m ²)	V2EY (t/m ²)	V3EY (t/m ²)	VMAX (t/m ²)	L (m)	B (m)	σ (t/m ²)	τ (t/m ²)	τ_{em} (t/m ²)
STORY2	P7Y-14	22,53	17,63	0,16	4,86	7,21	17,63	0,95	1,4	16,94	13,26	23,5
STORY2	P7Y-15	11,98	19,34	0,07	3,66	3,06	19,34	0,95	1,4	9,01	14,54	19,5
STORY2	P7Y-17	12,52	1,98	0,02	0,25	2,58	2,58	0,5	1,4	17,89	3,69	23,9
STORY2	P7Y-18	22,86	9,21	0,02	0,1	4,49	9,21	0,95	1,4	17,19	6,92	23,6
STORY2	P7Y-19	12,04	12	0,03	0,91	3,35	12	0,95	1,4	9,05	9,02	19,5
STORY2	P7Y-21	20,47	1,66	0,02	0,16	3,75	3,75	0,7	1,4	20,89	3,83	25,4
STORY2	P7Y-22	25,45	21,54	0,09	2,28	7,19	21,54	1	1,4	18,18	15,39	24,1
STORY2	P7Y-23	13,1	23,11	0,05	2,05	3,28	23,11	1	1,4	9,36	16,51	19,7
STORY2	P7Y-25	64,95	14,8	0,34	3,17	21,28	21,28	1,58	1,4	29,36	9,62	29,7
STORY2	P7Y-26	25,58	31,17	0	4,57	6,4	31,17	1	1,4	18,27	22,26	24,1
STORY2	P7Y-27	13,04	30,3	0	4,62	3,15	30,3	1	1,4	9,31	21,64	19,7
STORY2	P7Y-29	51,15	9,89	0,15	0,72	7,81	9,89	1,34	1,4	27,27	5,27	28,6
STORY2	P7Y-30	25,75	28,78	0,07	0,69	4,55	28,78	1	1,4	18,39	20,56	24,2
STORY2	P7Y-31	13,13	28,82	0,05	0,6	3,2	28,82	1	1,4	9,38	20,59	19,7
STORY2	P7Y-33	50,95	9,57	0,07	0,1	7,83	9,57	1,34	1,4	27,16	5,10	28,6
STORY2	P7Y-34	25,38	29,09	0,13	3,07	6,82	29,09	1	1,4	18,13	20,78	24,1
STORY2	P7Y-35	12,66	29,25	0,08	3,73	3,05	29,25	1	1,4	9,04	20,89	19,5
STORY2	P7Y-37	53,34	10,43	0,5	1,34	18,67	18,67	1,335	1,4	28,54	9,99	29,3
STORY2	P7Y-38	25,67	28,26	0,2	4,11	7,29	28,26	1	1,4	18,34	20,19	24,2
STORY2	P7Y-39	12,86	28,83	0,11	5,29	3,03	28,83	1	1,4	9,19	20,59	19,6
STORY2	P7Y-41	50,25	9,53	0,21	0,3	7,82	9,53	1,34	1,4	26,79	5,08	28,4
STORY2	P7Y-42	25,36	28,64	0,07	0,66	4,52	28,64	1	1,4	18,11	20,46	24,1
STORY2	P7Y-43	12,82	28,74	0,05	0,66	3,19	28,74	1	1,4	9,16	20,53	19,6
STORY2	P64X-43	34,86	0,05	3,29	6,06	0,02	6,06	1,3	0,95	28,23	4,91	29,1
STORY2	P64X-44	18,29	2,68	4,3	16,85	0,02	16,85	0,95	0,95	20,27	18,67	25,1
STORY2	P64X-45	9,03	3,51	1,55	18,02	0	18,02	0,95	0,95	10,01	19,97	20,0
STORY2	P64X-47	27,57	0,94	9,3	4,05	0,05	9,3	0,995	0,95	29,17	9,84	29,6
STORY2	P64X-48	17,9	3,35	3,9	17,81	0,02	17,81	1	0,95	18,84	18,75	24,4
STORY2	P64X-49	9,27	3,8	1,63	18,59	0,01	18,59	1	0,95	9,76	19,57	19,9
STORY2	P64X-51	34,01	0,36	3,16	5,61	0,08	5,61	1,3	0,95	27,54	4,54	28,8
STORY2	P64X-52	17,24	0,83	1,8	18,72	0,02	18,72	1	0,95	18,15	19,71	24,1
STORY2	P64X-53	8,85	0,84	1,35	18,78	0,01	18,78	1	0,95	9,32	19,77	19,7
STORY2	P64X-55	32,24	0,12	3,12	5,99	0,03	5,99	1,3	0,95	26,11	4,85	28,1
STORY2	P64X-56	16,7	2,22	3,72	19,82	0,03	19,82	1	0,95	17,58	20,86	23,8
STORY2	P64X-57	8,45	2,55	1,6	20,07	0,01	20,07	1	0,95	8,89	21,13	19,4
STORY2	P64X-59	36,91	1,29	12,74	10,32	0,11	12,74	1,505	0,95	25,82	8,91	27,9
STORY2	P64X-60	16,41	1,73	3,4	19,68	0	19,68	1	0,95	17,27	20,72	23,6
STORY2	P64X-61	8,23	1,62	1,6	19,63	0	19,63	1	0,95	8,66	20,66	19,3
STORY2	P64X-63	29,49	0,04	2,82	4,53	0,06	4,53	1,2	0,95	25,87	3,97	27,9
STORY2	P64X-64	17,24	1,2	1,8	17,5	0,01	17,5	1	0,95	18,15	18,42	24,1
STORY2	P64X-65	8,83	1,15	1,34	17,86	0,01	17,86	1	0,95	9,29	18,80	19,6
STORY2	P64X-67	32,6	0,18	3,02	4,89	0,03	4,89	1,25	0,95	27,45	4,12	28,7
STORY2	P64X-68	18,13	3,22	4,17	17,7	0,06	17,7	1	0,95	19,08	18,63	24,5
STORY2	P64X-69	9,28	3,92	1,52	18,26	0,03	18,26	1	0,95	9,77	19,22	19,9
STORY2	P64X-71	34,61	1,63	10,56	5,67	0,17	10,56	1,22	0,95	29,86	9,11	29,9
STORY2	P64X-72	17,55	2,41	3,57	18,74	0,02	18,74	1	0,95	18,47	19,73	24,2

Çizelge 6. 6 Duvar elemanlarının kayma gerilme kontrolleri (devamı)

Story	Pier	P(G+Q) (t/m ²)	V2EX (t/m ²)	V3EX (t/m ²)	V2EY (t/m ²)	V3EY (t/m ²)	VMAX (t/m ²)	L (m)	B (m)	σ (t/m ²)	τ (t/m ²)	τ_{em} (t/m ²)
STORY2	P11Y-1	33,14	13,84	0,7	4,04	10,78	13,84	0,95	1	34,88	14,57	32,4
STORY2	P11Y-2	24,26	23,4	0,15	1,74	5,89	23,4	0,85	1	28,54	27,53	29,3
STORY2	P11Y-3	17,13	25,15	0,11	2,02	4,27	25,15	0,85	1	20,15	29,59	25,1
STORY2	P11Y-5	53,69	13,7	0,11	0,2	8,25	13,7	1,246	1	43,09	11,00	36,5
STORY2	P11Y-6	15,23	24,52	0,08	2,86	3,46	24,52	1,2	1	12,69	20,43	21,3
STORY2	P11Y-8	90,01	36,86	0,2	4,59	19,19	36,86	1,8	1	50,01	20,48	40,0
STORY2	P11Y-9	17,21	28,47	0,07	4,68	4,08	28,47	1,4	1	12,29	20,34	21,1
STORY2	P11Y-11	66,15	37,29	0,05	2,15	7,97	37,29	1,28	1	51,68	29,13	40,8
STORY2	P11Y-12	64,96	44,8	0,05	0,91	8	44,8	1,302	1	49,89	34,41	39,9
STORY2	P11Y-13	57,5	33,94	0,05	1,48	7,11	33,94	1,307	1	43,99	25,97	37,0
STORY2	P11Y-14	25,63	33,42	0,05	2,86	5,65	33,42	1,1	1	23,30	30,38	26,7
STORY2	P11Y-15	15,43	25,8	0,18	5,61	4,13	25,8	1,1	1	14,03	23,45	22,0
STORY2	P11Y-17	49,25	8,66	0,07	0,63	13,04	13,04	1,1	1	44,77	11,85	37,4
STORY2	P11Y-18	16,04	26,36	0,15	4,34	4,07	26,36	1,1	1	14,58	23,96	22,3
STORY2	P11Y-20	57,86	29,93	0,07	2,1	6,8	29,93	1,107	1	52,27	27,04	41,1
STORY2	P11Y-21	54,55	33,45	0,06	0,56	6,51	33,45	1,085	1	50,28	30,83	40,1
STORY2	P11Y-22	43,75	24,11	0,04	1,89	5,18	24,11	1,018	1	42,98	23,68	36,5
STORY2	P11Y-23	26,95	38,01	0,1	2,01	6,19	38,01	1,4	1	19,25	27,15	24,6
STORY2	P11Y-24	16,61	26,77	0,14	4,83	4,52	26,77	1,4	1	11,86	19,12	20,9
STORY2	P11Y-26	50,18	8,05	0,22	0,64	13,25	13,25	1,1	1	45,62	12,05	37,8
STORY2	P11Y-27	16,47	27,35	0,26	4,11	4,2	27,35	1,2	1	13,73	22,79	21,9
STORY2	P59X-1	32,36	1,52	2,92	21,42	0,22	21,42	0,976	1	33,16	21,95	31,6
STORY2	P59X-2	66	2,04	9,6	54,18	0,29	54,18	1,846	1	35,75	29,35	32,9
STORY2	P59X-3	68,99	2,64	9,85	63,33	0,34	63,33	1,859	1	37,11	34,07	33,6
STORY2	P59X-4	38,32	2,81	6,59	35,61	0,22	35,61	1	1	38,32	35,61	34,2
STORY2	P59X-6	93,22	6,04	19,89	84,06	0,49	84,06	2,341	1	39,82	35,91	34,9
STORY2	P59X-7	101,48	10,54	17,04	86,1	0,05	86,1	2,399	1	42,30	35,89	36,2
STORY2	P59X-8	40,05	1,65	7,69	18,6	0	18,6	0,7	1,25	45,77	21,26	37,9
STORY2	P59X-9	19,07	5,89	3,11	39,93	0,04	39,93	1,35	1,25	11,30	23,66	20,7
STORY2	P59X-11	108,71	10,77	19,7	67,28	0,82	67,28	1,819	1,25	47,81	29,59	38,9
STORY2	P59X-12	80,12	6,52	20,08	47,67	0,8	47,67	1,515	1,25	42,31	25,17	36,2
STORY2	P59X-13	32,32	0,36	8,03	47,33	0,22	47,33	1,15	1,25	22,48	32,93	26,2
STORY2	P59X-14	19,3	3,41	4,8	35,39	0,01	35,39	1,15	1,25	13,43	24,62	21,7
STORY2	P59X-16	43,68	2,17	6,79	25,73	0,04	25,73	0,886	1,25	39,44	23,23	34,7
STORY2	P59X-17	65,81	0,4	9,99	37,52	0,06	37,52	1,081	1,25	48,70	27,77	39,4
STORY2	P59X-18	63,43	1,14	9,44	31,45	0,07	31,45	0,997	1,25	50,90	25,24	40,4
STORY2	P59X-19	20,56	4,49	5,18	36,74	0,21	36,74	1,35	1,25	12,18	21,77	21,1
STORY2	P6X-47	25,27	4,48	2,74	29,41	0,1	29,41	1,1	1	22,97	26,74	26,5
STORY2	P6X-48	14,93	2,96	2,98	21,37	0,25	21,37	1,1	1	13,57	19,43	21,8
STORY2	P6X-50	50,93	0,42	6,57	11,45	0,24	11,45	1,4	1	36,38	8,18	33,2
STORY2	P6X-52	15,95	1,47	1,42	18,17	0,02	18,17	1,1	0,8	18,13	20,65	24,1
STORY2	P6X-55	72,33	4,82	5,67	31,29	0,15	31,29	1,545	1	46,82	20,25	38,4
STORY2	P6X-58	17,56	6,29	2,41	5,47	0,14	6,29	0,65	1	27,02	9,68	28,5
STORY2	P6X-60	82,71	20,66	34,18	49,96	0,91	49,96	0,65	1	127,25	76,86	78,6
STORY2	P6X-62	17,73	6,83	4,08	29,01	0,33	29,01	1,4	1	12,66	20,72	21,3
STORY2	P6X-63	93,82	2,55	11,62	49,62	0,37	49,62	1,465	1	64,04	33,87	47,0

Çizelge 6. 6 Duvar elemanlarının kayma gerilme kontrolleri (devamı)

Story	Pier	P(G+Q) (t/m ²)	V2EX (t/m ²)	V3EX (t/m ²)	V2EY (t/m ²)	V3EY (t/m ²)	VMAX (t/m ²)	L (m)	B (m)	σ (t/m ²)	τ (t/m ²)	τ _{em} (t/m ²)
STORY2	P9X-123	53,48	1,01	5,57	19,68	0,12	19,68	1,35	0,8	49,52	18,22	39,8
STORY2	P9X-124	21,47	0,77	2,1	6,2	0,05	6,2	0,45	0,8	59,64	17,22	44,8
STORY2	P9X-125	5,31	0,01	2,82	7,89	0,05	7,89	0,75	0,8	8,85	13,15	19,4
STORY2	P9X-127	4,04	0,22	4,42	10,9	0,01	10,9	1,2	0,8	4,21	11,35	17,1
STORY2	P9X-128	4,32	0,27	2,1	5,8	0,11	5,8	0,55	0,8	9,82	13,18	19,9
STORY2	P9X-129	31,57	0,34	3,01	9,85	0,04	9,85	0,65	0,8	60,71	18,94	45,4
STORY2	P9X-131	46,54	0,8	4,86	17,89	0,06	17,89	1,2	0,8	48,48	18,64	39,2
STORY2	P9X-132	22,82	1	3,06	29,24	0,01	29,24	1,1	0,8	25,93	33,23	28,0
STORY2	P9X-133	16,71	1,41	2,77	27,44	0,02	27,44	1,1	0,8	18,99	31,18	24,5
STORY2	P9X-135	55,73	0,82	6,27	18,76	0,05	18,76	1,6	0,8	43,54	14,66	36,8
STORY2	P9X-137	17,26	1,37	2,78	27,51	0,02	27,51	1,1	0,8	19,61	31,26	24,8
STORY2	P9X-139	54,7	0,91	6,06	18,52	0,04	18,52	1,6	0,8	42,73	14,47	36,4
STORY2	P9X-140	22,74	1,39	2,97	28,39	0,03	28,39	1,1	0,8	25,84	32,26	27,9
STORY2	P9X-141	16,95	1,28	2,64	27,24	0,07	27,24	1,1	0,8	19,26	30,95	24,6
STORY2	P9X-143	54,82	0,79	5,84	18,48	0,03	18,48	1,6	0,8	42,83	14,44	36,4
STORY2	P14Y-201	55,68	15,34	0,08	0,21	6,95	15,34	1,55	0,85	42,26	11,64	36,1
STORY2	P14Y-202	25,09	27,84	0,02	0,38	3,78	27,84	1,2	0,85	24,60	27,29	27,3
STORY2	P14Y-203	18,58	26,53	0,03	0,26	3,39	26,53	1,2	0,85	18,22	26,01	24,1
STORY2	P14Y-205	55,52	15,3	0,01	0,24	6,94	15,3	1,55	0,85	42,14	11,61	36,1
STORY2	P14Y-206	25,07	27,79	0,02	0,52	3,78	27,79	1,2	0,85	24,58	27,25	27,3
STORY2	P14Y-207	18,59	26,37	0,02	0,56	3,38	26,37	1,2	0,85	18,23	25,85	24,1
STORY2	P14Y-209	56,07	15,29	0,06	0,32	6,95	15,29	1,55	0,85	42,56	11,61	36,3
STORY2	P14Y-210	25,28	27,85	0,03	0,59	3,82	27,85	1,2	0,85	24,78	27,30	27,4
STORY2	P14Y-211	18,95	26,52	0,03	0,45	3,41	26,52	1,2	0,85	18,58	26,00	24,3
STORY2	P14Y-213	55,75	15,37	0,06	0,37	7	15,37	1,55	0,85	42,31	11,67	36,2
STORY2	P14Y-214	25,21	27,79	0,04	0,78	3,82	27,79	1,2	0,85	24,72	27,25	27,4
STORY2	P14Y-215	18,76	26,33	0,02	0,77	3,41	26,33	1,2	0,85	18,39	25,81	24,2
STORY2	P14Y-217	56,36	15,31	0,09	0,49	7,07	15,31	1,55	0,85	42,78	11,62	36,4
STORY2	P14Y-218	24,87	28,07	0,06	0,93	3,83	28,07	1,2	0,85	24,38	27,52	27,2
STORY2	P14Y-219	18,3	26,26	0,09	1,02	3,41	26,26	1,2	0,85	17,94	25,75	24,0
STORY2	P14Y-221	63,49	18,61	0,12	0,62	7,92	18,61	1,7	0,85	43,94	12,88	37,0
STORY2	P14Y-222	25,79	29,13	0,04	0,9	3,95	29,13	1,3	0,85	23,34	26,36	26,7

Çizelge 6. 6 Duvar elemanlarının kayma gerilme kontrolleri (devamı)

Story	Pier	P(G+Q) (t/m ²)	V2EX (t/m ²)	V3EX (t/m ²)	V2EY (t/m ²)	V3EY (t/m ²)	VMAX (t/m ²)	L (m)	B (m)	σ (t/m ²)	τ (t/m ²)	τ _{em} (t/m ²)
STORY3	P6X-160	10,27	4,17	1,67	17,51	0,18	17,51	1,2	1	8,56	14,59	19,3
STORY3	P6X-161	4,91	3,94	1,47	17,1	0,09	17,1	1,2	1	4,09	14,25	17,0
STORY3	P6X-162	26,24	2,41	2,67	20,29	0,12	20,29	1,468	1	17,87	13,82	23,9
STORY3	P6X-163	27,26	1,26	3,09	23,94	0,12	23,94	1,688	1	16,15	14,18	23,1
STORY3	P6X-165	9,5	1,42	1,69	19,62	0,04	19,62	1,3	1	7,31	15,09	18,7
STORY3	P6X-166	4,92	0,9	1,5	19,63	0,05	19,63	1,3	1	3,78	15,10	16,9
STORY3	P6X-167	18,13	0,54	6,2	6,68	0,01	6,68	1,2	1	15,11	5,57	22,6
STORY3	P6X-168	0,67	0,01	0,01	0,37	0	0,37	0,065	0,8	12,88	7,12	21,4
STORY3	P6X-169	27,12	6,98	2,2	24,57	0,03	24,57	50,39	0,047	11,40	10,33	20,7
STORY3	P6X-170	4,43	5,98	1,37	19,1	0,07	19,1	1,1	1	4,03	17,36	17,0
STORY3	P9X-225	13,99	0,11	0,18	1,77	0,02	1,77	1,3	0,8	13,45	1,70	21,7
STORY3	P9X-227	8,32	0,67	0,45	15,32	0,02	15,32	1,1	0,8	9,45	17,41	19,7
STORY3	P9X-228	2,9	0,44	0,15	11,36	0,02	11,36	1,1	0,8	3,30	12,91	16,6
STORY3	P9X-229	19,02	0,02	0,2	3,21	0,04	3,21	1,6	0,8	14,86	2,51	22,4
STORY3	P9X-231	8,63	1,97	0,57	16,68	0,05	16,68	1,1	0,8	9,81	18,95	19,9
STORY3	P9X-232	2,79	1,56	0,18	11,15	0,02	11,15	1,1	0,8	3,17	12,67	16,6
STORY3	P9X-233	19,96	0,96	0,28	7,09	0,12	7,09	1,7	0,8	14,68	5,21	22,3
STORY3	P9X-235	8,88	4,21	0,55	18,79	0,14	18,79	1,1	0,8	10,09	21,35	20,0
STORY3	P9X-236	2,49	3,26	0,41	10,51	0,04	10,51	1,1	0,8	2,83	11,94	16,4
STORY3	P9X-237	18,13	4,19	0,07	10,35	0,38	10,35	1,35	0,8	16,79	9,58	23,4
STORY3	P9X-238	16,34	7,33	0,43	9,85	0,57	9,85	1,35	0,8	15,13	9,12	22,6
STORY3	P14Y-1	51,14	33,27	0,02	0,7	9,32	33,27	2,599	1,15	17,11	11,13	23,6
STORY3	P14Y-2	48,94	49,82	0,18	0,55	9,96	49,82	2,6	1,15	16,37	16,66	23,2
STORY3	P14Y-3	52,33	53,97	0,44	1,18	10,15	53,97	2,6	1,15	17,50	18,05	23,8
STORY3	P14Y-4	56,98	43,95	0,65	0,63	9,44	43,95	2,726	1,15	18,18	14,02	24,1
STORY3	P14Y-5	20,14	12,99	0,52	8,44	0,69	12,99	1,508	0,85	15,71	10,13	22,9
STORY3	P14Y-6	36,59	20,93	0,59	6,7	0,46	20,93	2,492	0,85	17,27	9,88	23,6
STORY3	P14Y-8	9,44	20,4	0,12	3,21	0,69	20,4	1,2	0,85	9,25	20,00	19,6
STORY3	P14Y-9	2,9	11,22	0,06	2,58	0,35	11,22	1,2	0,85	2,84	11,00	16,4

Çizelge 6. 6 Duvar elemanlarının kayma gerilme kontrolleri (devamı)

Story	Pier	P(G+Q) (t/m ²)	V2EX (t/m ²)	V3EX (t/m ²)	V2EY (t/m ²)	V3EY (t/m ²)	VMAX (t/m ²)	L (m)	B (m)	σ (t/m ²)	τ (t/m ²)	τ_{em} (t/m ²)
STORY3	P14Y-470	10,05	16,31	0,03	2,59	0,62	16,31	1,2	0,85	9,85	15,99	19,9
STORY3	P14Y-471	3,13	10,57	0,01	2,25	0,25	10,57	1,2	0,85	3,07	10,36	16,5
STORY3	P14Y-472	20,46	3,1	0,08	1,14	0,19	3,1	1,6	0,85	15,04	2,28	22,5
STORY3	P14Y-474	9,25	16,4	0,33	5,48	0,25	16,4	1,2	0,85	9,07	16,08	19,5
STORY3	P14Y-475	2,88	10,47	0,02	2,94	0,83	10,47	1,2	0,85	2,82	10,26	16,4
STORY3	P14Y-476	9,08	2,08	0,56	2,44	0,59	2,44	0,858	0,85	12,45	3,35	21,2
STORY3	P14Y-477	38,78	34,61	0,71	4,47	5,71	34,61	2,577	0,8	18,81	16,79	24,4
STORY3	P11Y-1	13,86	6,53	0,01	1,24	2,28	6,53	0,95	1	14,59	6,87	22,3
STORY3	P11Y-3	9,9	13,77	0,01	0,14	1,8	13,77	0,85	1	11,65	16,20	20,8
STORY3	P11Y-4	4,99	15,42	0,13	0,12	1,62	15,42	0,85	1	5,87	18,14	17,9
STORY3	P58X-211	8,68	0,88	0,6	13,84	0,07	13,84	1,2	0,8	9,04	14,42	19,5
STORY3	P58X-212	3,15	0,61	0,21	9,62	0,05	9,62	1,2	0,8	3,28	10,02	16,6
STORY3	P58X-213	17,54	0,19	0,31	1,49	0,16	1,49	1,5	0,8	14,62	1,24	22,3
STORY3	P58X-215	8,59	0,86	0,59	15,47	0,12	15,47	1,2	0,8	8,95	16,11	19,5
STORY3	P58X-216	3,13	0,67	0,2	10,6	0,08	10,6	1,2	0,8	3,26	11,04	16,6
STORY3	P58X-217	16,27	0,12	0,17	4,11	0,25	4,11	1,5	0,8	13,56	3,43	21,8
STORY3	P58X-219	8,17	0,43	0,55	19,31	0,1	19,31	1,2	0,8	8,51	20,11	19,3

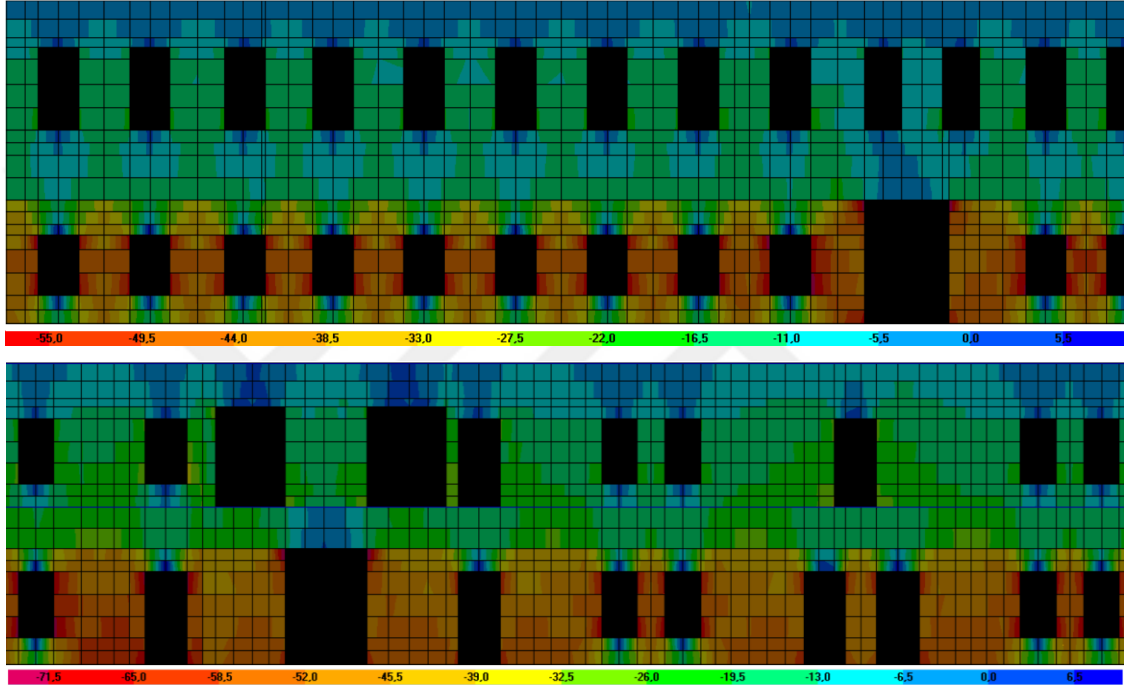
Yapılan kontrollere göre kurtarmayan elemanların çok büyük bir kısmı duvar altları ve üstlerindeki spandrel olarak adlandırılan duvar parçalarıdır. Uzun pencereler ile kat düyaframı arasında kalan kısa duvar parçalarının rijitliği fazladır. Yapılan kesme hesabında, rijitliği yüksek olan bu bölümlerin daha büyük kesme kuvvetlerine maruz kalarak izin verilen emniyet gerilmelerini aştığı görülmektedir. Binanın mevcut hasarları incelenecek olursa, tarihi binanın spandrellarında kesme çatlakları olduğu Şekil 6.59'daki gibi görülmektedir. Tarihi kışla binası, değişik zamanlarda ve içeriği tam olarak bilinmeyen tadilatlar geçirmiştir. Bu durum, önceki deprem hasarlarının bir kısmının giderilmesi anlamına gelmektedir ve binanın günümüzdeki durumu aslında nümerik analizdeki gibi önemli bir depreme maruz kalmamıştır. Nümerik analiz sonuçları, gelecekteki depremlerde tarihi kışlanın spandrellarında çatlakların oluşabileceğine veya var olan çatlakların genişleyebileceğine işaret etmektedir.



Şekil 6. 59 Tarihi kıslada mevcut spandrel hasarları

Dolu duvarlar ve köşe kısımlar ile pencereler arasında bulunan boşluksuz duvarlar, izin verilen emniyet gerilmelerinin altında kalan duvar elemanlarıdır. Beklenen şekilde birinci kat duvar elemanları ikinci kat elemanlarına göre daha fazla zorlanmaktadır.

Tarihi taş kışlanın düşey yükler altındaki gerilme değerleri incelenecek olursa Şekil 6.60'da görüldüğü gibi boşluk çevrelerinde basınç gerilme yığılmaları görülmektedir. Bu kısımlardaki gerilmeler diğer bölgelere kıyasla daha yüksektir. Düşey yük ve zati ağırlıkları sebebiyle alt kattaki duvarlar daha yüksek gerilmelere maruz kalmıştır.



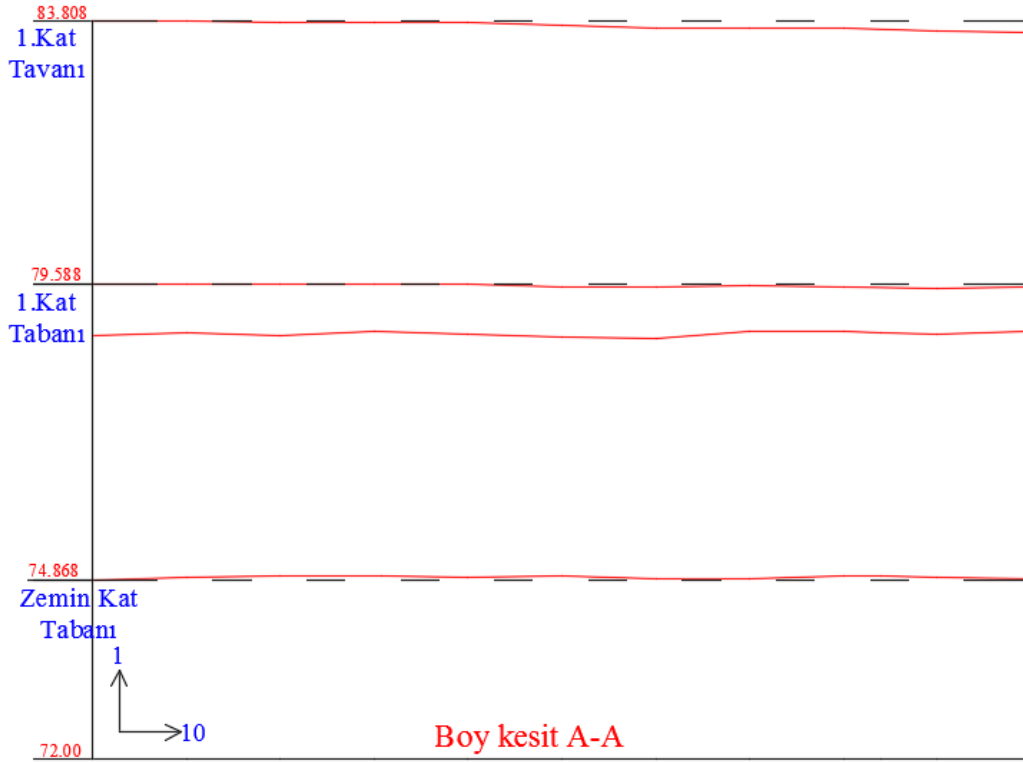
Şekil 6. 60 Düşey yüklerden oluşan gerilme dağılımı

Kışlanın zemini incelenecek olursa, özellikle zeminle temas eden tüm kısımlarla beraber özellikle C kolu tabanında önemli çökmeler olduğu görülmektedir. Düşey yükler, malzeme ve zemin özelliklerine bağlı olan bu çökmeler duvar ve yer kaplamasında önemli hasarlar meydana getirmiştir (Şekil 6.61).

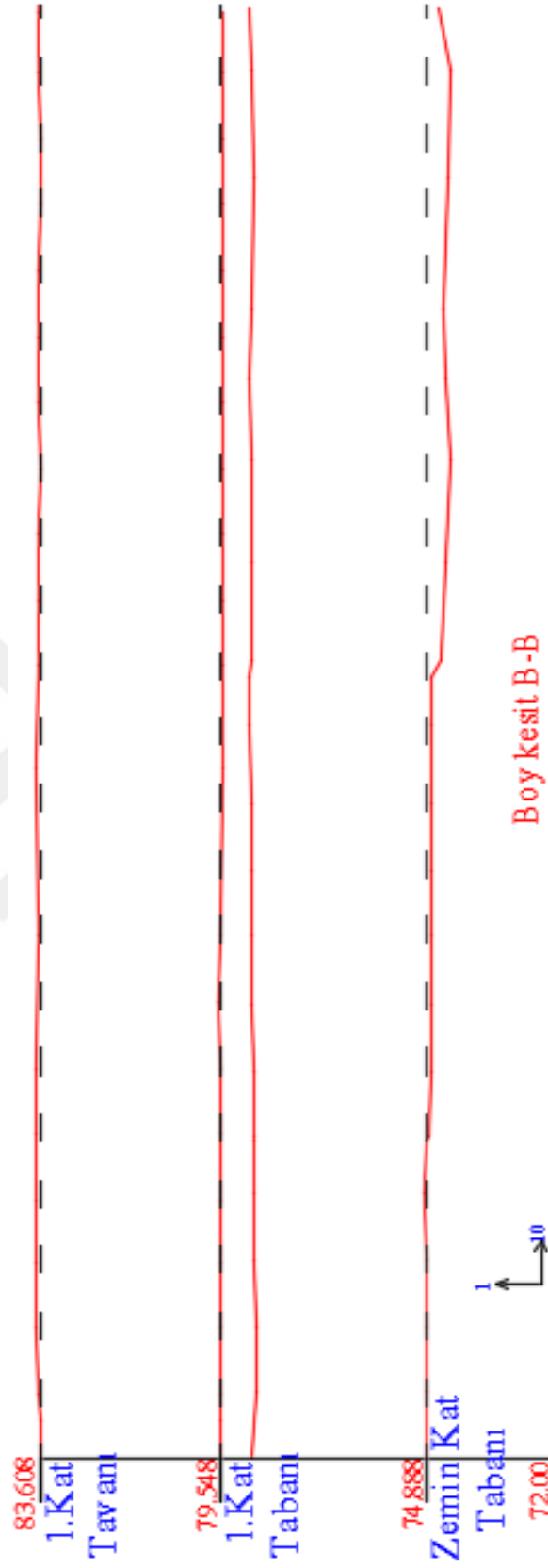


Şekil 6. 61 Tarihi kışlanın zemin çatlakları

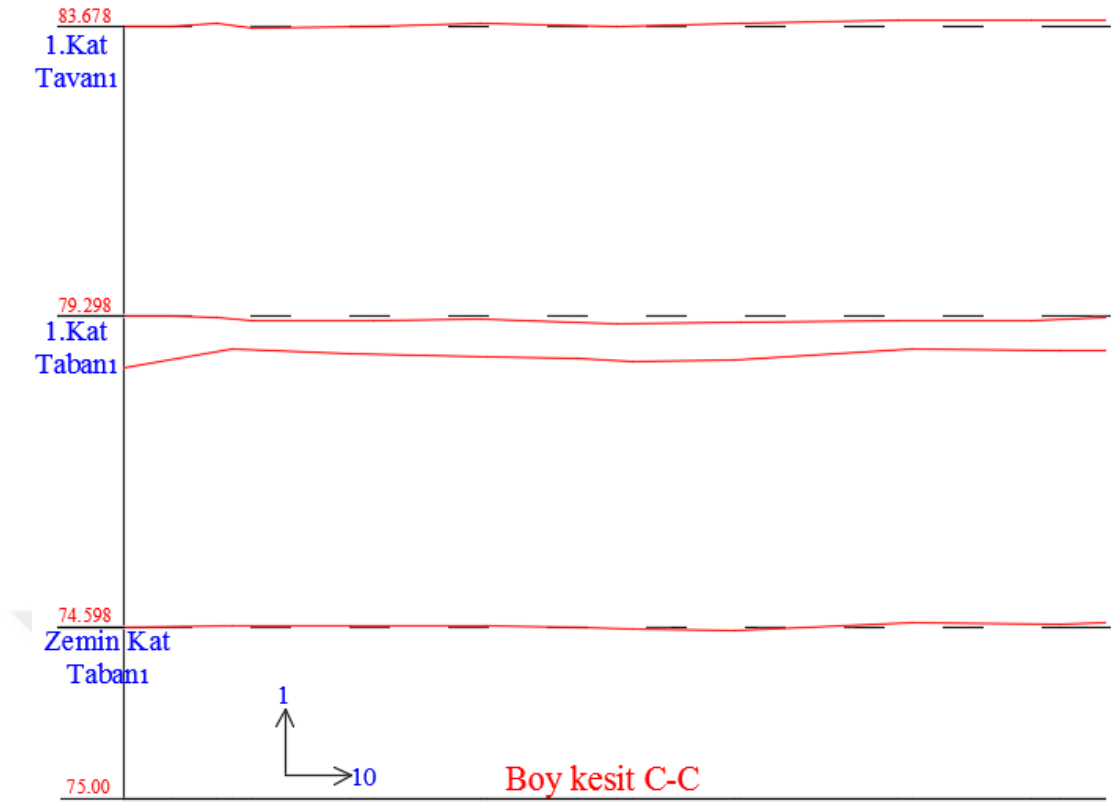
Nümerik modelin oluşturulmasından önce, kat yükseklikleri ve döşeme kalınlıklarının belirlenmesi amacıyla yapılan arazi ölçümlerinde zemin seviyesinde seçilen noktaların kotları ölçülerek tarihi kışlanın taban çökmeleri elde edilmiştir. Aşağıda, binanın A, B ve C bölümlerine ait olan boy kesitler verilmiştir (Şekil 6.62, Şekil 6.63 ve Şekil 6.64).



Şekil 6. 62 A koluna ait koridor ortası boykesiti (metre)



Şekil 6. 63 B koluna ait koridor ortası boykesiti (metre)



Şekil 6. 64 C koluna ait koridor ortası boykesiti (metre)

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında, yakın zamana kadar kışla binası olarak kullanılan tarihi bir binanın statik ve dinamik yükler altındaki yapısal analizi konu alınmıştır. Ele alınan tarihi kışla binasında elde edilen mod şekilleri, plandaki uzunluğu yüksekliğine göre çok daha fazla olan U şekilli yığma binalardaki hakim modların, rijitliği daha düşük olan bina kollarında kendi içlerinde gerçekleşen kısmi salınımlar şeklinde oluştuğunu göstermektedir. İlk modlarda, periyodun daha yüksek olduğu, yani daha sünek davranış sergileyen bina kollarının hareketleri ile karşılaşılırken üst modlara çıkıldıkça binanın farklı bölgelerinin de birlikte harekete katıldığı daha düşük periyotlu mod şekilleriyle karşılaşmıştır. Nümerik ve deneysel çalışma sonuçları, benzer fiziksel ve mekanik özelliklere sahip yığma binalarda mod şekillerinin yataydaki salınımlar şeklinde oluştuğunu, bu tip binalarda düşey yönde salınımlar gerçekleşmediğini göstermektedir.

Binanın U şeklinden kaynaklı köşe gerilme yığılmaları, geometrinin değiştiği bu kısımların yüksek gerilmelere maruz kalmasına yol açmıştır. Spandrelların zorlanma sebebi ise, bina boyunca çok sık aralıklarla uygulanan uzun pencere ve kapı boşluklarıdır. Bu boşluklar, boşluk ile zemin veya kat diyaframları arasında kısa rijit duvar elemanların oluşmasına sebep olmuştur ve bu rijit kısa elemanlar kesme kuvvetlerine daha fazla maruz kalmıştır. Tarihi binanın geometrik ve mekanik özelliklerine bağlı olarak oluşan bu durum, benzer niteliklere sahip tarihi binalarda, bina köşeleri ve spandrelların deprem durumunda binanın kritik kesitlerinden olduğu sonucunu doğurmaktadır.

Tarihi kışlanın nümerik modellemesinde makro modelleme tekniği, analizinde ise doğrusal elastik analiz yöntemi tercih edilmiştir. Tez kapsamında, tarihi kışlanın genel davranışının ve duvarlardaki gerilme dağılımlarının elde edilmesi amaçlandığından, operasyonel modal analiz ile nümerik analiz sonuçlarının oldukça tutarlı olmasına dayanılarak, doğrusal olarak çözülen makro modelin amaç doğrultusunda yeterli sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu durum, benzer şekilli büyük yapıların analizlerinde, deneysel verilerle desteklenen makro modellerin incelenen konunun kapsamına bağlı olarak oldukça gerçekçi sonuçlar sunabildiğini göstermektedir. Bu şekilde gerçekleştirilecek yapısal analizlerle süre-maliyet ihtiyacı düşürülerek önemli sonuçlara ulaşılabilir veya mikro modelleme ve doğrusal olmayan analizler gibi daha detaylı çalışmalar için öngörü oluşturularak zemin hazırlanabilir.

Tarihi taş kışlanın yapısal analizi için daha detaylı çalışmalar yapılarak gerçeğe daha yakın sonuçların elde edilmesi mümkündür. Daha detaylı sonuçların elde edilmesi için, tarihi binanın doğrusal olmayan davranışını da dikkate alabilecek doğrusal olmayan analizler yapılması gerekmektedir. Malzeme ve geometriden kaynaklanan doğrusal olmayan durumlar da dikkate alınarak eleman bazında daha detaylı sonuçlara ulaşılabilir ve binanın kritik kesitleri üzerinde daha detaylı incelemeler yapılabilir.

Tez çalışmasındaki makro modelde, binanın koridor kısımlarında bulunan çelik gergiler ihmal edilmiştir. Bina ile ilgili yapılacak yeni çalışmalarda, bu çubukların gerilme dağılımlarına ve bina davranışına etkisi de dikkate alınmalıdır.

Tarihi kışla binasının özellikle C kolunda önemli ölçüde zemin oturmaları olduğu gözlemlenmiştir ancak oluşturulan nümerik modelde zemin etkisi ve oturma hasarlarının yapı davranışına olan etkisi incelenmemiştir. Yapılacak daha detaylı incelemerde, yapı-zemin etkileşimi ve geometrik doğrusal olmayan etkileri de dikkate alan modelleme ve analizlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Casolo, S., Milani G., Uva, G. ve Alessandri, C., (2013). "Comparative seismic vulnerability analysis on ten masonry towers in the coastal Po Valley in Italy", Engineering Structures 49: 465-490.
- [2] Brandonisio, G., Lucibello, G., Mele, E. ve De Luca, A., (2013). "Damage and performance evaluation of masonry churches in the 2009 L'Aquila earthquake", Engineering Failure Analysis 34: 693-714.
- [3] Parisi, F. ve Augenti, N., (2013). "Earthquake damages to cultural heritage constructions and simplified assessment of artworks", Engineering Failure Analysis 34: 735-760.
- [4] Casolo, S., Milani G., Uva, G. ve Alessandri, C., (2013). "Comparative seismic vulnerability analysis on ten masonry towers in the coastal Po Valley in Italy", Engineering Structures 49: 465-490.
- [5] Bayraktar, A., Sahin, A., Özcan, D.M. ve Yildirim, F., (2010). "Numerical damage assessment of Hagia Sophia bell tower by nonlinear FE modeling", Applied Mathematical Modelling 34: 92-121.
- [6] Milani, G. ve Valente, M., (2015). "Failure analysis of seven masonry churches severely damaged during the 2012 Emilia-Romagna (Italy) earthquake: Non-linear dynamic analyses vs conventional static approaches", Engineering Failure Analysis 54: 13-56.
- [7] Cakir, F., Uckan, E., Shen, J., Seker, B.S. ve Akbas, B. (2015). "Seismic damage evaluation of historical structures during Van earthquake, October 23, 2011", Engineering Failure Analysis 58: 249-266.
- [8] Betti, M. ve Vignoli, A. (2011). "Numerical assessment of the static and seismic behaviour of the basilica of Santa Maria all'Impruneta (Italy) ", Construction and Building Materials 25: 4308-4324.
- [9] Verstrynge, E., Schueremans, L., Van Gemert, D. ve Hendriks, M.A.N., (2011). "Modelling and analysis of time-dependent behaviour of historical masonry under high stress levels". Engineering Structures 33: 210-217.

- [10] Koçak, A. ve Köksal, T., (2010). "An example for determining the cause of damage in historical buildings: Little hagia sophia (Church of St. Sergius and Bacchus) – Istanbul, Turkey", *Engineering Failure Analysis* 17: 926–937.
- [11] Koçak, A. ve Köksal, T., (2010). "Investigation of Earthquake Behavior of the Church of St. Sergius and Bacchus in Istanbul/Turkey", *Advanced Materials Research* 133-134: 821-830.
- [12] Sevim, B., Bayraktar, A., Altunişik, A.C., Atamtürktür, S. ve Birinci, F., (2011). "Finite element model calibration effects on the earthquake response of masonry arch bridges", *Finite Elements in Analysis and Design* 47: 621-634.
- [13] Aras, F., Krstevska, L., Altay, G. ve Tashkov, L., (2011). "Experimental and numerical modal analyses of a historical masonry palace", *Construction and Building Materials* 25: 81-91.
- [14] Ramos, L.F., Marques, L., Lourenço, P.B., De Roeck, G., Campos-Costa, A. Ve Roque, J., (2010). "Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: Two case studies", *Mechanical Systems and Signal Processing* 24: 1291-1305.
- [15] D’Ambrisi, A., Mariani, V. ve Mezzi, M. (2012). "Seismic assessment of a historical masonry tower with nonlinear static and dynamic analyses tuned on ambient vibration tests", *Engineering Structures* 36: 210-219.
- [16] Votsis, R.A., Kyriakides, N., Chrysostomou, C.Z., Tantele, E. ve Demetriou, T., (2012). "Ambient vibration testing of two masonry monuments in Cyprus", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 43, 58-68.
- [17] Gentile, C. ve Saisi, A. (2013). "Operational modal testing of historic structures at different levels of excitation", *Construction and Building Materials* 48: 1273-1285.
- [18] Osmancikli, G., Uçak, Ş., Turan, F.N., Türker, T. ve Bayraktar, A., (2012). "Investigation of restoration effects on the dynamic characteristics of the Hagia Sophia bell-tower by ambient vibration test", *Construction and Building Materials* 29: 564-572.
- [19] Pau, A. Ve Vestroni, F. (2013). "Vibration assessment and structural monitoring of the Basilica of Maxentius in Rome", *Mechanical Systems and Signal Processing* 4: 454-466.
- [20] Foti, D., Diaferio, M., Giannoccaro, N.I. ve Mongelli, M., (2012). "Ambient vibration testing, dynamic identification and model updating of a historic tower", *NDT & E International* 47: 88-95.
- [21] Bayraktar, A., Türker, T. ve Altunişik, A.C., (2015). "Experimental frequencies and damping ratios for historical masonry arch bridges", *Construction and Building Materials* 75: 234-241.

- [22] Ceroni, F., Sica, S., Pecce, M.R. ve Garofano, A., (2014). Evaluation of the natural vibration frequencies of a historical masonry building accounting for SSI, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 64: 95-101.
- [23] Lacanna G., Ripepe, M., Marchetti, E., Coli, M. ve Garzonio, C.A., "Dynamic response of the Baptistery of San Giovanni in Florence, Italy, based on ambient vibration test", *Journal of Cultural Heritage*, In Press, Corrected Proof. Available online 11 March 2016.
- [24] Altunışık, A.C., Adanur, S., Genç, A.F., Günaydin, M. ve Okur, F.Y., Non-destructive testing of an ancient Masonry Bastion, *Journal of Cultural Heritage*, In Press, Corrected Proof. Available online 16 June 2016.
- [25] Petrović, S. ve Kilar, V., (2013). "Seismic failure mode interaction for the equivalent frame modeling of unreinforced masonry structures", *Engineering Structures* 54: 9–22.
- [26] Mebarki, A., Bui, Q.H., Saada, R.A., Delmotte, P. ve Tizapa, S.S., (2009). "A simplified mechanical model to assess the bearing capacity of masonry walls: Theory and experimental validation", *Construction and Building Materials* 23: 1109–1117.
- [27] Haach, V.G., Vasconcelos, G. ve Lourenço, P.B. (2011). "Parametrical study of masonry walls subjected to in-plane loading through numerical modeling", *Engineering Structures* 33: 1377–1389.
- [28] Zimmermann, T., Strauss A. Ve Bergmeister, K. (2010). "Numerical investigation of historic masonry walls under normal and shear load", *Construction and Building Materials* 24, 1385–1391.
- [29] Wang, J., Heath, A. ve Walker, P. (2013). "Experimental investigation of brickwork behaviour under shear, compression and flexure", *Construction and Building Materials* 48: 448–456.
- [30] Vasconcelos, G. ve Lourenço, P.B., (2009). "Experimental characterization of stone masonry in shear and compression", *Construction and Building Materials* 23: 3337–3345.
- [31] Najafgholipour, M.A., Maheri, M.R. ve Lourenço, P.B., (2014). "Definition of interaction curves for the in-plane and out-of-plane capacity in brick masonry walls", *Construction and Building Materials* 55: 168–182.
- [32] Najafgholipour, M.A., Maheri, M.R. ve Lourenço, P.B., (2013). "Capacity interaction in brick masonry under simultaneous in-plane and out-of-plane loads", *Construction and Building Materials* 38: 619–626.
- [33] Agnihotri, P., Singhal, V. ve Rai, D.C., (2013). "Effect of in-plane damage on out-of-plane strength of unreinforced masonry walls", *Engineering Structures* 57: 1–11.
- [34] Dhanasekar, M., (2011). "Shear in Reinforced and Unreinforced Masonry: Response, Design and Construction", *Procedia Engineering* 14: 2069–2076.

- [35] Ural, A., (2009). Yığma Yapıların Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [36] Kuruşçu, A.O., (2005). Yığma Yapıların Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [37] Bayülke, N., (2011). “Yığma Yapıların Deprem Davranışı ve Güvenliği”, 1.Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-14 Ekim 201, Ankara.
- [38] Dipasquale, L., Rovero, L. ve Fratini, F., (2016). “Ancient stone masonry Constructions, Nonconventional and Vernacular Construction Materials”,301-330.
- [39] Bayülke, N., (1992). “Yığma Yapılar”. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, 184s. Ankara.
- [40] Karakuş, F., (2012). Geleneksel Yığma Yapılarda Strüktrel Sorunlar ve Çözüm Yolları, Yüksek Lisans Tezi, , Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [41] Croci, G., (1998). “The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage”, Computational Mechanics Inc.,UK and Boston, USA.
- [42] Lourenço, P.B., (1996). Computational Strategies for Masonry Structures, PhD Thesis, Delft University of Technology, Holland.
- [43] Çöğürçü, M.T. ve Kamanlı, M., (2007). “Yığma Yapıların Dinamik ve Mühendislik Davranışının Düzlem Dışı Kuvvetler Altında Deneyisel Olarak İncelenmesi”, Teknik-Online Dergi 6, Sayı 2.
- [44] Bayülke, N., (1999). “Depremlerde Hasar Gören Yapıların Onarım Ve Güçlendirilmesi”, İzmir İMO, 15.s., İzmir.
- [45] Vakıflar Genel Müdürlüğü, Arşiv, 2011.
- [46] Arun, G., (2007). Yığma Kagir Yapı Davranışı, Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı, 17 Şubat 2005, ANKARA.
- [47] Kerisel, J., (1975). “Old structure in relation to soil conditions”. Geotechnique 25, No. 8, 433–483.
- [48] Dardzinska, I., (2005). Analysis of selected problems of historical buildings’ foundations, PhD thesis, Technical University of Gdask, Poland (in Polish).
- [49] Przewlocki, J. ve Zielinska, M. (2016). “Analysis of the Behavior of Foundations of Historical Buildings”, Procedia Engineering 16: 362 – 367.
- [50] Batur, N., (2006). Yığma Yapı Tasarımı ve Analizi, Bitirme Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- [51] Bayülke, N., (2001). “Depreme Dayanıklı Betonarme ve Yığma Yapı Tasarımı”, İzmir İMO, 3.s., İzmir.
- [52] Çelik, O.C., (2007). “Tarihi Yapı Onarım ve Güçlendirme Rehberi”, BASF Yapı Kimyasalları A.Ş.,İstanbul.

- [53] Ankara Vakıflar Bölge Müdürlüğü, Arşiv, (2007-2010).
- [54] Sandoval, C. ve Roca, P., (2012). "Study of the influence of different parameters on the buckling behaviour of masonry walls", *Construction and Building Materials* 35: 888–899.
- [55] Chapman J.C. ve Slatford J., (1957). "The elastic buckling of brittle columns". *Proc Inst Civil Eng*, 6: 107–25.
- [56] De Falco A. ve Lucchesi, M., (2002). "Stability of columns with no tension strength and bounded compressive strength and deformability". Part I: large eccentricity. *Int J Solids Struct*, 39: 6191–210.
- [57] Watstein, D., Watstein, D. ve Allen MH., (1970). "Structural performance of clay masonry assemblages built with high-bond organic-modified mortars", In: *Second international brick masonry conference*, 99–112.
- [58] Sandoval C., Roca P., Bernat E. ve Gil Ll., (2011). "Testing and numerical modelling of buckling failure of masonry walls", *Constr Build Mater*, 25(12):4394–402.
- [59] Schultz A.E., Mueffelman J.G. ve Ojard N.J., (2000). "Critical axial loads for transversely loaded masonry walls", In: *12th Int brick/block masonry conf proc*, 3: 1633–46.
- [60] Bean J.R., Schultz A.E., Lu M., Stolarski H.K. ve Ojard N.J., (2008). "Influence of transverse loading on the stability of slender unreinforced masonry walls". *Eng Struct* 30(10):2830–9.
- [61] Ganduscio S. ve Romano F., (1997). "FEM and analytical solutions for buckling of nonlinear masonry members", *J Struct Eng ASCE*, 123(1):104–11.
- [62] Romano F., Ganduscio S. ve Zingone G., (1993). "Cracked nonlinear masonry stability under vertical and lateral loads", *J Struct Eng ASCE*, 119(1):69–87.
- [63] La Mendola L ve Papia M., (1993). "Stability of masonry piers under their own weight and eccentric load", *J Struct Eng ASCE*, 119(6):1678–93.
- [64] La Mendola L., (1997). "Influence of nonlinear constitutive law on masonry pier stability", *J Struct Eng ASCE*, 123(10):1303–11.
- [65] Mura [22] Mura I., (2008). "Stability of nonlinear masonry members under combined load", *Comput Struct* 86(15–16):1579–93.
- [66] Frish-Fay R., (1975). "Stability of masonry piers", *Int J Solid Struct*, 11(2):187–98.
- [67] Morton, J., (1990). "The design of masonry compression members. *Br Masonry Soc Proc*", 106–11.
- [68] Sandoval, C., Roca, P., Bernat, E. ve Gil, L., (2011). "Testing and numerical modelling of buckling failure of masonry walls", *Construction and Building Materials* 25: 4394–4402.

- [69] Dabanlı, Ö., (2008), Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [70] Yılmaz, P., (2006), Tarihi yapıların modellenmesi ve deprem güvenliklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- [71] Milosevic, J., Lopes, M., Gago, A.S. ve Bento, R., (2013). "Testing and modeling the diagonal tension strength of rubble stone masonry panels", *Engineering Structures* 52: 581–591.
- [72] Korkanç, M., (2013). "Deterioration of different stones used in historical buildings within Nigde province, Cappadocia", *Construction and Building Materials* 48: 789–803.
- [73] García, D., San-José, C.T., Garmendia, L. ve Larrinaga, P., (2012). "Comparison between experimental values and standards on natural stone masonry mechanical properties", *Construction and Building Materials* 28: 444–449.
- [74] Ludovico-Marques, M., Chastre, C. Ve Vasconcelos, G., (2012). "Modelling the compressive mechanical behaviour of granite and sandstone historical building stones", *Construction and Building Materials* 28: 372–381.
- [75] Lourenço, P.B., (2000), Current experimental and numerical issues in masonry research, Universidade do Minho, Portugal.
- [76] Saygılı, Ö., (2014). Use of Distinct Element Method in the Assessment of Earthquake Behavior of Masonry Structures, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [77] Ünay, A. İ., (2002), Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, ODTÜ Mimarlık Fakültesi, Ankara.
- [78] Barluenga, G., Estirado, F., Undurraga R., Conde, J.F., Agua, F., Villegas, M.A. ve García-Heras, M., (2014). "Brick masonry identification in a complex historic building, the Main College of the University of Alcalá, Madrid (Spain) ", *Construction and Building Materials* 54: 39–46.
- [79] Pineda, P., Robador, M.D. ve Perez-Rodriguez, J.L., (2013). "Characterization and repair measures of the medieval building materials of a Hispanic–Islamic construction", *Construction and Building Materials* 41: 612–633.
- [80] Porco, F., Porco, G., Uva, G. ve Sangirardi, M., (2013). "Experimental characterization of "non-engineered" masonry systems in a highly seismic prone area", *Construction and Building Materials* 48: 406–416.
- [81] Koçak, A. Ve Zengin, B., (2012). "Determining Material and Free Vibration Values of Historical Structures by way of Sampling", *Structural Analysis of Historical Constructions, Vols 1-3*: 1189-1204.
- [82] Gür, N.V., Deniz, Ö.Ş. ve Ekinçi S., (2012). "Kagir Yığma Duvarlarda Taşıyıcı Malzeme ve Bileşenler", 6. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu, 12-13 Nisan 2012, Bursa.

- [83] TDY, 2(2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Ankara.
- [84] Illampas, R., Ioannou, I. ve Charmpis, D.C., (2014). "Adobe bricks under compression: Experimental investigation and derivation of stress-strain equation", *Construction and Building Materials* 53: 83–90.
- [85] Haach, V.G., Vasconcelos, G. ve Lourenço, P.B., (2011). "Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars", *Construction and Building Materials* 25: 2980–2987.
- [86] Alecci, V., Fagone, M., Rotunno, T. ve De Stefano, M., (2013). "Shear strength of brick masonry walls assembled with different types of mortar", *Construction and Building Materials* 40: 1038–1045.
- [87] Lombillo, I., Thomas, C., Villegas, L., Fernández-Álvarez J.P. ve Norambuena-Contreras, J., (2013). "Mechanical characterization of rubble stone masonry walls using non and minor destructive tests", *Construction and Building Materials* 43: 266–277.
- [88] Mazzotti, C., Sassoni, E. ve Pagliai, G. (2014). "Determination of shear strength of historic masonries by moderately destructive testing of masonry cores", *Construction and Building Materials* 54: 421–431.
- [89] Ercan, E., (2010). Tarihi Yığma Yapıların Güvenliklerinin Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Ege Üniversitesi, İzmir.
- [90] Orduna, A., (2003), Seismic Assessment of Ancient Masonry Structures by Rigid Blocks Limit Analysis, PhD Dissertation, University of Minho, Portugal.
- [91] Demirel, İ.O., (2010). A Nonlinear Equivalent Frame Model for Displacement Based Analysis of Unreinforced Brick Masonry Buildings, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [92] Şen, B., (2003), Modeling and analysis of historical masonry structures, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Ankara.
- [93] Can, H. ve Ünay A.İ., (2012). "Tarihi Yapıların Deprem Davranışını Belirlemek İçin Sayısal Analiz Yöntemleri, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi 27: 211-217.
- [94] Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A. ve Cattari, S., (2013). "TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings", *Engineering Structures* 56: 1787–1799.
- [95] Demirel, İ.O., Akansel, V.H., Bankir, Ş., Geneş, M.C., Erberik, M.A. ve Yakut, A., (2013). "Antakya'daki Yığma Binaların Özelliklerinin Deprem Performansı Açısından Analitik Olarak Değerlendirilmesi, 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı", 25-27 Eylül 2013, Hatay.
- [96] Demirel, İ.O., Erberik, M.A. ve Sucuoğlu, H., (2011). "Tuğla Yığma Yapıların Performans Esaslı Değerlendirilmesi İçin Doğrusal Olmayan Çerçeve Modeli", 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-14 Ekim 2011, Ankara.

- [97] Aldemir, A., (2010). A Simple Performance Assesment Technique for Unreinforced Brick Masonry Structures, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [98] Salonikios T., Karakostas, C., Lekidis, V. and Anthoine, A., (2003), "Comparative inelastic pushover analysis of masonry frames", Engineering Structures; 25: 1515–1523.
- [99] Belmouden, Y ve Lestuzzi, P., (2009). "An equivalent frame model for seismic analysis of masonry and reinforced concrete buildings", Construction and Building Materials 23: 40–53.
- [100] Hutton, D.V., (2004). Fundamentals of The Finite Element Analysis, The McGraw Hill Companies, London.
- [101] Xu, C., Xiangli, C. ve Bin, L., (2012). "Modeling of influence of heterogeneity on mechanical performance of unreinforced masonry shear walls", Construction and Building Materials 26: 90–95.
- [102] Drougkas, A., Roca, P. ve Molins, C. (2015). "Numerical prediction of the behavior, strength and elasticity of masonry in compression, Engineering Structures 90: 15–28.
- [103] Ural, A. ve Doğangün, A., (2007). "Mikro Modelleme Tekniği Kullanılarak Yığma Yapıların Deprem Performanslarının İncelenmesi", Uluslar arası Deprem Sempozyumu, 22-26 Ekim 2007, KOCAELİ.
- [104] Portioli, F., Cascini, L., Casapulla, C. ve D'Aniello, M., (2013). "Limit analysis of masonry walls by rigid block modelling with cracking units and cohesive joints using linear programming", Engineering Structures 57: 232–247.
- [105] Rekik, A. ve Lebon, F., (2012). "Homogenization methods for interface modeling in damaged masonry", Advances in Engineering Software 46: 35–42.
- [106] Milani, G., (2011). "Simple homogenization model for the non-linear analysis of in-plane loaded masonry walls", Computers and Structures 89: 1586–1601.
- [107] Bertolesi, E., Milani, G. ve Lourenço, P.B., (2016). "Implementation and validation of a total displacement non-linear homogenization approach for in-plane loaded masonry", Computers and Structures 176: 13–33.
- [108] Demirkan, D.S., (2014). Yığma Yapılarda Derz Kalınlığı ve Duvar Örme Tekniğinin Yapıya Etkisinin Anizotrop Bir Model Üzerinde İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İSTANBUL.
- [109] Ghiassi, B., Soltani, M. ve Tasnimi, A.A., (2012). "A simplified model for analysis of unreinforced masonry shear walls under combined axial, shear and flexural loading", Engineering Structures 42: 396–409.
- [110] Marques, R. ve Lourenço, P.B., (2014). "Unreinforced and confined masonry buildings in seismic regions: Validation of macro-element models and cost analysis", Engineering Structures 64: 52–67.

- [111] Miccoli, L., Garofano, A., Fontana, P. ve Müller, U., (2015).“Experimental testing and finite element modelling of earth block masonry“, Engineering Structures 104: 80–94.
- [112] Serhal, J., Deck, O., Al Heib, M., Chehade, F.H., Massih, D.Y.A., (2016). “Damage of masonry structures relative to their properties: Development of ground movement fragility curves“, Engineering Structures 113: 206–219.
- [113] Casolo, S. ve Sanjust, C.A., (2009).“Seismic analysis and strengthening design of a masonry monument by a rigid body spring model: The “Maniace Castle” of Syracuse“, Engineering Structures 31: 1447-1459.
- [114] Calì, I., Marletta, M. ve Pantò, B., (2012).“A new discrete element model for the evaluation of the seismic behaviour of unreinforced masonry buildings“, Engineering Structures 40: 327–338.
- [115] Dimitri, R., De Lorenzis, L. ve Zavarise, G., (2011).“Numerical study on the dynamic behavior of masonry columns and arches on buttresses with the discrete element method“, Engineering Structures 3: 3172–3188.
- [116] Çaktı, E., Saygılı, Ö., Lemos, J.V. ve Oliveira, C.S., (2016). “Discrete element modeling of a scaled masonry structure and its validation“, Engineering Structures 126: 224–236.
- [117] Sreejith, P.P., Sivan, P.P., Praveen, A., Gajendran, C. ve Nisha, V., (2016).“Simplified Method for Shear Strength Prediction of Confined Masonry Walls Subjected To In Plane Loads“, Procedia Technology 24: 155 – 160.
- [118] Foraboschi, P. ve Vanin, A., (2013). “Non-linear static analysis of masonry buildings based on strut-and-tie modeling“, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 55: 44–58.
- [119] Clementi, F., Gazzani, V., Poiani, M. ve Lenci, S.,(2016). “Assessment of seismic behaviour of heritage masonry buildings using numerical modelling“, Journal of Building Engineering 8: 29–47.
- [120] Smoljanovic, H., Zivaljic´, N. Ve Nikolic´, Z., (2013).“A combined finite-discrete element analysis of dry stone masonry structures“, Engineering Structures 52: 89–100.
- [121] Uzsoy, Z., (2001). Yapı Dinamiği ve Deprem Mühendisliği, DEU yayınları.
- [122] Kocak, A., Doran, B., Kaya, E. ve Kütan, C., (2012).“Seismic Analysis of a Historical Monument: Davutpasa Barracks“. First International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering 1: 1620-1626.
- [123] Çiftçi, A., (2004). Yığma 19yy’da Osmanlı Devletinde Askeri Mimari ve İstanbul’da İnşa Edilen Askeri Yapılar , Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İSTANBUL.
- [124] Tuğlacı, P., (1993), Osmanlı Mimarlığında Balyan Ailesinin Rolü, Yeni Çığır Kitabevi, İstanbul.
- [125] Cezar, M., (2002), Osmanlı Başkenti İstanbul, Erol Kerim Aksoy Kültür, Eğitim, Spor ve Sağlık Vakfı Yayını, İstanbul.

- [126] <http://yildiz-teknik.blogspot.com.tr/>, 27.11.2016.
- [127] Kubilay A.Y., (1994), 'Gümüşsuyu Kışlası', 'Gümüşsuyu Hastanesi/Mimari', 'Humbaracı Kışlası', 'Davutpaşa Kışlası', 'Kalyoncu Kışlası', 'Rami Kışlası', Dünden Bugüne İstanbul Ansiklopedisi, Kültür Bakanlığı ve Tarih Vakfı Ortak Yayını, İstanbul, 3: 11-12, 450; 4: 96-97, 401; 6: 306.
- [128] Kocatürk, T., Yıldırım, M. ve Koçak, A., "Yıldız Teknik Üniversitesi Rektörlüğüne Sunulan Heyet Raporu", İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı, 19.04.2013. (Yayınlanmamış)
- [129] Etabs, Version 9, Integrated building design software, computers and structures, Inc. Berkeley, California, USA, November 2005.
- [130] Artemis Modal, V3, (2014). Structural Vibration Solutions A/S, Aalborg East Denmark
- [131] Koçak, A. ve Kilit, Z., (2010). "Restoration and Strengthening of a Historical Structure in Antalya – Turkey", Advanced Materials Research 133-134, 575-584.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Emre GANI
Doğum Tarihi ve Yeri :20.09.1992 İSTANBUL
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :emregani@outlook.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Fen Bilimleri	Yıldız Teknik Üniversitesi	2014
Lise	Fen Bilimleri	Eyüp Anadolu Lisesi	2010

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2014-2016	Sta Bilgisayar	Statik Proje Teknik Destek ve Eğitimlerinin Verilmesi

YAYINLARI

Bildiri

1.Gani, E., Toydemir, B., Zengin, B. ve Koçak, A., (2017). "Estimation of the Behavior of Historical Masonry Buildings Under Static and Dynamic Loads-A Case Study of Davutpaşa Barracks", ICOCEE2017, 8-10 Mayıs 2017, Nevşehir.(Baskıda)