

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**MEVCUT TARİHİ YIĞMA YAPILARIN
PERFORMANS ANALİZİ**

Yunus GÜNER

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Ayhan NUHOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

624.03.00

Sunuş Tarihi : 04.06.2018

Bornova-İZMİR

2018

Yunus GÜNER tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan “Mevcut Tarihi Yığma Yapıların Performans Analizi” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 04.06.2018 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

İmza

Jüri Başkanı

Doc. Dr. Bengi Kırıyazıcı

Raportör Üye

Doga R. Murat Bayraktar 

Üye

Dr. Öğr. Uyg. Aysen Nuroğlu (Ahligh)

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

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

04/06/2018

Yunus GÜNER


ÖZET**MEVCUT TARİHİ YIĞMA YAPILARIN PERFORMANS ANALİZİ**

GÜNER, Yunus

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ayhan NUHOĞLU

Haziran 2018, 164 sayfa

Bu çalışmada, tarihi yığma yapıların dış yükler etkisindeki yapısal davranışları deneysel ve nümerik yaklaşımlarla incelenmiştir. Bu amaçla, laboratuvar ortamında dolu harman tuğlaları ile imal edilen ardışık kemerli tonoz yığma sistem üzerinde tekrarlı yatay yükleme uygulanarak yapının yük-deplasman davranışı elde edilmiştir. Aynı yapı bilgisayar ortamında 3 boyutlu sonlu elemanlar (solid) ile idealize edilerek modellenmiş ve benzer yapısal davranış nümerik olarak elde edilmiştir. Bilgisayar ortamında gerçekleştirilen nümerik analizlerde kullanılan tuğla-harç malzemeleri için dikkate alınan mekanik parametrelerin belirlenmesi amacıyla, modelin imalatında kullanılan malzemeler üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. 3 boyutlu sonlu elemanlar ile oluşturulan nümerik analiz modelinde uygulanan yüklemeler sonucunda taşıyıcı sistemde oluşabilecek maksimum gerilme davranışları elde edilmiştir. Çalışmanın sonunda deneysel ve nümerik yöntemlerle bulunan sonuçlar karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Yığma yapılar, yığma yapılarda deneysel ve nümerik model, yığma yapılarda elastisite modülünün belirlenmesi.

ABSTRACT

PERFORMANCE ANALYSIS OF EXISTING HISTORICAL

MASONRY BUILDINGS

GÜNER, Yunus

MSc in Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Ayhan NUHOĞLU

June 2018, 164 pages

In this study, structural behaviors of historic masonry structures under the effect of external loads were investigated with experimental and numerical methods. For this purpose, the load-displacement behavior of the structure was obtained by consecutive horizontal loading on consecutive arched vault masonry system that was manufactured with full blend bricks in the laboratory. The same structure was modeled in a computer program by idealizing it with 3D finite elements (solid) and similar structural behavior was also obtained numerically. Experimental studies were carried out on the materials that used in the manufacturing of the experimental model in order to determine the mechanical parameters of brick-mortar materials that used in the numerical analyzes performed on the computer. As a result of the loads applied in the numerical analysis model formed with 3D finite elements, maximum stress behaviors that can occur in the bearing system were obtained. At the end of the study, the results obtained by experimental and numerical methods were evaluated comparatively.

Keywords: Masonry structures, experimental and numerical model in masonry structures, determination of elasticity module in masonry structures.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması sırasında maddi ve manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim aileme çok teşekkür ederim. Her zaman manevi desteklerini yanımda hissettiğim başta Elif SUCUOĞLU olmak üzere tüm arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Bu tezin oluşturulmasında tüm bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ayhan NUHOĞLU'na çok teşekkür ederim. Deneysel çalışmalar sırasında çok büyük destekleri olan, Öğr. Gör. Dr. Emre ERCAN, Arş. Gör. Dr. Duygu ÖZTÜRK, İnş. Müh. Ercan TUNA, İnş. Y. Müh. Hojjat HOSSEİNEZHAD, Sarati Mimarlıktan İnş. Tek. Ozan UĞUREL ve Kadir PAÇACI'ya çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün 16-MÜH-101 numaralı projesi kapsamında desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxxii
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	4
3. YIĞMA YAPILAR	16
3.1. Taşıyıcı Sistem Açısından Yığma Yapılar	16
3.1.1. Ahşap yığma yapılar	16
3.1.2. Taş yığma yapılar	17
3.1.3. Tuğla yığma yapılar	18
3.1.4. Kerpiç yığma yapılar	19
3.2. Yığma Yapılarda Kullanılan Malzemeler	19
3.2.1. Ahşap	20
3.2.2. Doğal taş	20

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.2.3. Tuğla.....	21
3.2.4. Harç	21
3.2.5. Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için uygulanan laboratuvar deneyleri	23
3.3. Yığma Yapılarda Taşıyıcı Elemanlar	26
3.3.1. Sütun.....	26
3.3.2. Duvar	27
3.3.3. Kemer	28
3.3.4. Tonoz.....	29
3.3.5. Kubbe.....	30
3.3.6. Gergi elemanı.....	31
4. YIĞMA YAPILARDA YAPISAL DAVRANIŞ.....	32
4.1. Yığma Yapılara Etkiyen Yükler	32
4.1.1. Sabit (zati) yükler	32
4.1.2. Hareketli yükler.....	32
4.1.3. Rüzgâr yükü	33
4.1.4. Kar yükü	33

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.1.5. Mesnet çökmesi	33
4.1.6. Deprem yükü	34
4.1.7. Diğer yükler	38
4.2. Yığma Yapılarda Dış Yükler Altında Yapısal Davranış	38
4.3. Yığma Yapılarda Meydana Gelen Hasarlar	39
4.3.1. Malzeme hasarları	40
4.3.2. Yapısal hasarlar	41
4.4. Yığma Yapılarda Güçlendirme	44
5. YIĞMA YAPILARDA STATİK VE DİNAMİK ANALİZ	49
5.1. Türk Deprem Yönetmeliğine (2007) Göre Yığma Yapılar	49
5.2. Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu (Taslak)	51
5.3. Tarihi Yapının İdealleştirilmesi	52
5.3.1. Geometrinin idealleştirilmesi	52
5.3.2. Malzemenin idealleştirilmesi	52
5.3.3. Farklı yapı malzemelerin homojenize edilmesi	54
5.4. SAP2000 Bilgisayar Programı	54
5.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi	55

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5.6. Yığma Yapıları Modelleme Yöntemleri.....	56
5.6.1. Mikro modelleme	57
5.6.2. Basitleştirilmiş mikro model.....	59
5.6.3. Makro modelleme	60
5.7. Analiz Türleri.....	61
5.7.1. Doğrusal elastik (lineer) analiz	62
5.7.2. Doğrusal elastik olmayan (non-lineer) analiz	62
6. ARDIŞIK KEMERLİ TONOZ TİPİNDEKİ BİR YIĞMA YAPININ DENEYSEL ANALİZİ	64
6.1. Manisa Ulu Camii	64
6.2. Laboratuvar Modelinin Çizimlerinin Oluşturulması.....	65
6.3. Laboratuvar Modelinin Hazırlanış Aşamaları	68
6.4. Deney Numuneleri	75
6.4.1. Harç	75
6.4.2. Tuğla.....	78
6.4.3. Duvar	80
6.5. Yapının Elastisite Modülünün Belirlenmesi.....	82

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

6.6. Deneysel Yapı Üzerinde Yatay Yükleme Deneyi	83
6.6.1. Gergisiz sistem yatay yükleme deneyi	84
6.6.2. Gergili sistem yatay yükleme deneyi	88
7. ARDIŞIK KEMERLİ TONOZ TİPİNDEKİ BİR YIĞMA YAPININ NÜMERİK ANALİZİ	92
7.1. Bilgisayar Modelinin Oluşturulması.....	92
7.2. Nümerik Modelde Yatay Yükleme Analizi	95
7.2.1. Gergisiz sistem yatay yükleme analizi	95
7.2.2. Gergili sistem yatay yükleme analizi	98
7.3. Mesnet Çökmesi Analizi	102
7.3.1. Gergisiz sistemde mesnet çökmesi analizi	103
7.3.2. Gergili sistem mesnet çökmesi analizi	105
7.4. Spektrum Analizi	107
7.4.1. Gergisiz sistem spektrum analizi	107
7.4.2. Gergili sistem spektrum analizi	110
8. DENEYSEL VE NÜMERİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMALI DEĞERLENDİRİLMESİ.....	116
9. SONUÇ.....	122

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

KAYNAKLAR DİZİNİ 124

ÖZGEÇMİŞ 130



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

1.1 Laboratuvar ortamında imal edilen deneysel analiz modeli.	2
1.2 Bilgisayar ortamında oluşturulan nümerik analiz modeli.	2
2.1 Oluşturulan Sistem a) Geometrik boyut, b) Deneysel model (Rossi et. al., 2017).	4
2.2 Deney yapıları a) Kemer b) Dolu duvar (Karimi et. al., 2016)	5
2.3 a) Gerilme-şekil değiştirme b) Kuvvet-yer değiştirme sonuçlarını vermektedir (Karimi et. al., 2016).	5
2.4 Deneysel ve nümerik çalışmaların sonuçları (Ural et. al., 2016).	6
2.5 Oluşturulan nümerik model (Szolomicki et. al., 2015).	7
2.6 Kemerlerin geometrik ölçüleri (Mora-Gomez, 2015).	7
2.7 Tip 1 için çökme yükleri (Mora-Gomez, 2015).	8
2.8 Tip 2 için çökme yükleri (Mora-Gomez, 2015).	8
2.9 Deneyin uygulanışı (Corradi et. al., 2015).	9
2.10 Yatay yük - deplasman ilişkisi (Mahini et. al., 2012).	10
2.11 a) Deney düzeneği b) Deneysel model (Mele et. al., 2012).	11
2.12 Deney düzeneği ve ölçüm cihazlarının yerleşim şeması (De Lorenzis et. al., 2007).	13
2.13 Oluşturulan yığma yapı modelleri (Ural ve Doğangün, 2007).	13

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

2.14 Deprem sonrası tonoz sistemler a) Güçlendirilmemiş tonoz b) Güçlendirilmiş tonoz (Torrealva et. al., 2006).	14
2.15 Deneysel elemanın geometrik boyutları ve düşey yükleme yeri (Valluzzi et. al., 2001).	15
2.16 Deney numunelerinin düşey yük- deplasman grafiği (Valluzzi et. al., 2001).	15
3.1 Taşıyıcı sistemine göre ahşap yapılar a) Ahşap yığma b) Payandalı c) Bağdadi ile güçlendirilmiş d) Payandasız (Yaman, 2007).	17
3.2 Taş yığma yapı örnekleri (Erdoğan, 2018).	17
3.3 Taş duvar örgüleri a) Toprak ile örülmüş b) Sıkıştırılarak kille harçsız örgü c) Köşeli taşlarla harçsız örgü d) Poligonal örgü e) Kesilmiş taşlarla kireç harçlı örgü f) Kesilmiş taşlarla harçsız örgü (Erdoğan, 2018).	18
3.4 Tuğla yığma yapılar (Erdoğan, 2018).	18
3.5 Kerpiç yapı (Erdoğan, 2018).	19
3.6 Zamanla basınç dayanımındaki değişim (Kanıt ve Işık, 2004).	23
3.7 Ultra ses cihazı.	24
3.8 Tek eksenli basınç deneyi cihazı.	25
3.9 Geometrik şekillerine göre sütun elemanlar (Tuluk, 1999).	26
3.10 Duvar örgüsü a) Üç cidarlı (Özer, 2006) b) Tuğla (Bayraktar, 2017).	27

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

3.11 Yığma duvarlarda meydana gelen normal ve kesme kuvvetleri (Tarihi Yapılar İçin Deprem Riskleri Yönetimi Kılavuzu, 2018).....	28
3.12 Zaman içinde değişen kemer tipleri (Özer, 2006).	29
3.13 Tonoz tipleri (Özer, 2006).....	30
3.14 Tonozlarda kuvvet akışı ve gergi kuvveti (Tarihi Yapılar İçin Risklerin Yönetimi Kılavuzu, 2018).....	30
3.15 Kubbede oluşan çekme ve basınç bölgeleri (Sesigür vd., 2007).	31
3.16 Kemerdeki gergi elemanlarının bağlantı detayı (Özer, 2006).	31
4.1 Zeminde farklı toprak cinsinden kaynaklanan oturma (Özer, 2006).	33
4.2 Deprem bölgeleri haritası (AFAD, 2018).	34
4.3 Katlara etkiyen eşdeğer deprem yükünün belirlenmesi (DBYBHY,2007).....	36
4.4 Yığma yapının deprem davranışı (Korkmaz vd., 2014).....	39
4.5 Taş malzemesinde oluşan hasarlar a) Yüzey kaybı b) Parça kopması c) Oyuklanma d) Çatlak e) Kabuk oluşumu f) Çiçeklenme (Tarihi Yapılar İçin Deprem Riskleri Yönetimi Kılavuzu, 2018).	40
4.6 Atmosfer olayları sonucu ahşapta oluşan bozulma (Tarihi Yapılar İçin Deprem Riskleri Yönetimi Kılavuzu, 2018).	41
4.7 Farklı oturmalar ve deprem etkisinde yapıda oluşan çatlaklar (Döndüren vd., 2017).....	42

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

4.8 Yatay derzlere paralel yükler altında yığma duvarlarda kırılma biçimleri (Döndüren vd., 2017).	43
4.9 Kemerde oluşan çatlaklar (Tarihi Yapılar İçin Deprem Riskleri Yönetimi Kılavuzu, 2018).....	44
4.10 Tonoz ve kubbede oluşan çatlaklar (Tarihi Yapılar İçin Deprem Riskleri Yönetimi Kılavuzu, 2018).....	44
4.11 a) Matkapla enjeksiyon yapılacak deliklerin açılması b) Hava ile deliklerin ve çatlakların temizlenmesi c) Temizlenen bölgelerin su ile ıslatılması d) Enjeksiyonun uygulanması (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2018).....	45
4.12 Dikiş elemanı ve uygulanış biçimi (Mahrebel, 2006).	46
4.13 Yığma duvarın güçlendirilmesi (Zemin Araştırma Merkezi LTD.,2018).....	46
4.14 FRP ile güçlendirme a) Izgaralarla b) Halatarla c) Şeritlerle d) Şeritlerle (Değirmenci ve Sarıbıyık, 2015).....	47
4.15 Temel zeminin güçlendirilmesi (Chamaky, 2014).....	48
4.16 Çelik profillerle güçlendirme (Chamaky, 2014).	48
5.1 Farklı boyutlarda sonlu elemanlarla tanımlanmış sistem (Hutton, 2004).	55
5.2 Yığma yapıların modellenmesi a) Yığma yapı b) Detaylı mikro modelleme c) Basitleştirilmiş mikro modelleme d) makro modelleme (Lourenço, 1996).....	57

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

5.3 Kırılma mekanizması a)Bağlantı çekme çatlağı b) Bağlantı kayması c) Birim direk çekme çatlaması d) Birim diyagonal çekme çatlağı e) Yığma ezilmesi (Lourenço, 1996).....	58
5.4 Basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi (Doğan, 2016).....	59
5.5 Malzemenin homojenize edilmesi (Doğan, 2016).....	60
5.6 Lourenço'nun modelinde nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması (Ercan, 2010).	61
5.7 Tarihi yapılarda doğrusal ve doğrusal olmayan yapısal analiz (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2018).	61
6.1 Manisa Ulu Camii.	64
6.2 Deney yapısı içi baz alınan avlu kısmının taşıyıcı sistemi.	65
6.3 Temel planı.	66
6.4 Yapıdaki sütun ayaklarının yerleşim planı.	67
6.5 Yapının önden görünüşü (uzun doğrultu).	67
6.6 Temel kalıp yerleşimi ve beton dökümü sonrası.	68
6.7 Horasan harcının hazırlanışı.	68
6.8 Dış beden duvarlarının oluşumu.	69
6.9 Mermerlerin yerleştirilmesi ve bağlantı şekli.	70
6.10 Kemer kalıpları a) Uzun doğrultudaki b) Kısa doğrultudaki.....	70

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

6.11 Beden duvarlarının birleştirilmesi ve tuğla örgüsünün kemer başlangıç kotuna çıkarılması.	71
6.12 Gergi elemanı için yapıda bırakılan yerler.	72
6.13 Dış kemer formlarının oluşturulması.	72
6.14 Uzun doğrultudaki kemerlerin tamamlanmış hali.	73
6.15 Kısa doğrultudaki iç kemerlerin tamamlanmış hali.	73
6.16 Dış kemer ve beden duvarlarının aynı kota getirilmiş hali.	74
6.17 Yapının tonoz kısmının oluşturulması.	74
6.18 Gergisiz deney yapısının son hali.	75
6.19 Harçtan alınan numuneler.	76
6.20 Tek eksenli basınç deneyi altında harç numunelerinde oluşan çatlaklar.	76
6.21 Dışarıda bekleyen harç numunelerinin gerilme-birim deformasyon eğrisi.	77
6.22 Suda bekleyen harç numunelerinin gerilme-birim deformasyon eğrisi.	77
6.23 Harman tuğlası.	78
6.24 Tek eksenli basınç deneyi altında tuğla numuneleri üzerinde oluşan çatlaklar.	79
6.25 Tuğla numuneleri için gerilme-birim deformasyon eğrisi.	79

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

6.26 Duvar numuneleri a) 1. tip duvar (küçük) b) 2. tip duvar (büyük).	80
6.27 Tek eksenli basınç deneyi altında tuğla duvar (3 sıra) numunelerinin üzerinde oluşan çatlaklar.....	81
6.28 Tek eksenli basınç deneyi altında tuğla duvar (4 sıra) numunelerinin üzerinde oluşan çatlaklar.....	81
6.29 Tuğla duvar (3 sıra - küçük) numunelerinin gerilme-birim deformasyon eğrisi.	81
6.30 Tuğla duvar (4 sıra - büyük) numunelerinin gerilme-birim deformasyon eğrisi.	82
6.31 Yapıya uygulamam yükleme şekli.....	83
6.32 Potansiyometre yerleşim planı.....	84
6.33 Potansiyometrelerin gergisiz yapı üzerine yerleştirilmiş hali.	84
6.34 Gergisiz sistem 2 ve 9 numaralı deplasman ölçerlerin yük-deplasman grafığı.....	85
6.35 Gergisiz sistem 3 ve 8 numaralı deplasman ölçerlerin yük-deplasman grafığı.....	85
6.36 Gergisiz sistem 4 ve 6 numaralı deplasman ölçerlerin yük-deplasman grafığı.....	86
6.37 Gergisiz sistem 5 ve 7 numaralı deplasman ölçerlerin yük-deplasman grafığı.....	86
6.38 Yapıda meydana gelen hasar bölgeleri.	87

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.39 Yapıda oluşan hasarların yakın görünümü.	88
6.40 Gergili sistem.	88
6.41 Gergili sistem 2 ve 9 numaralı deplasman ölçerlerin yük-deplasman grafiği.	89
6.42 Gergili sistem 3 ve 8 numaralı deplasman ölçerlerin yük-deplasman grafiği.	89
6.43 Gergili sistem 4 ve 6 numaralı deplasman ölçerlerin yük-deplasman grafiği.	90
6.44 Gergili sistem 5 ve 7 numaralı deplasman ölçerlerin yük-deplasman grafiği.	90
6.45 Gergili sistemde meydana gelen çatlaklar ve sistemin yatay hareketi.	91
6.46 Gergi elemanında meydana gelen eğilme.	91
7.1 Nümerik modelin oluşturulma aşamaları.	93
7.2 Gergili ve gergisiz yapının üç boyutlu tamamlanmış görseli.	94
7.3 Gergisiz sistem yatay yükleme etkisinde şekil değiştirmiş geometri.	95
7.4 Gergisiz sistem ilk 3 mod şekli.	96
7.5 Gergisiz sistem yatay yükleme S11 gerilme dağılımı.	97
7.6 Gergisiz sistem yatay yükleme S33 gerilme dağılımı.	97
7.7 Gergisiz sistem yatay yükleme S13 gerilme dağılımı.	98

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.8 Gergili sistem yatay yükleme etkisinde şekil değiştirmiş geometri.	98
7.9 Gergili sistem ilk 3 mod şekli.	100
7.10 Gergili sistem yatay yükleme S11 gerilme dağılımı.	101
7.11 Gergili sistem yatay yükleme S33 gerilme dağılımı.	101
7.12 Gergili sistem yatay yükleme S13 gerilme dağılımı.	102
7.13 Gergili sistem yatay yükleme gergi elemanlarında oluşan eksenel kuvvet değerleri.	102
7.14 Mesnet çökmesi ve ilave düşey yük.	103
7.15 Gergisiz sistem mesnet çökmesi S11 gerilme dağılımı.	103
7.16 Gergisiz sistem mesnet çökmesi S33 gerime dağılımı.	104
7.17 Gergisiz sistem mesnet çökmesi etrafındaki 3 kemerin S33 gerilme dağılımı.	104
7.18 Gergili sistem mesnet çökmesi S11 gerilme dağılımı.	105
7.19 Gergili sistem mesnet çökmesi S33 gerime dağılımı.	105
7.20 Gergili sistem mesnet çökmesi etrafındaki 3 kemerin S33 gerilme dağılımı.	106
7.21 Gergili sistem mesnet çökmesi gergi elemanlarında oluşan eksenel kuvvet değerleri.	106
7.22 Gergisiz sistem spektrum analizi şekil değiştirmiş geometri.	107

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.23 Gergisiz sistem spektrum analizi S11 gerilme dağılımı.	108
7.24 Gergisiz sistem spektrum analizi S33 gerilme dağılımı.	109
7.25 Gergisiz sistem spektrum analizi S13 gerilme dağılımı.	110
7.26 Gergili sistem spektrum analizi şekil değiştirmiş geometri.	111
7.27 Gergili sistem spektrum analizi S11 gerilme dağılımı.	112
7.28 Gergili sistem spektrum analizi S33 gerilme dağılımı.	113
7.29 Gergili sistem spektrum analizi S13 gerilme dağılımı.	114
7.30 Gergili sistem spektrum analizi gergi elemanlarında oluşan eksenel kuvvet değerleri.	115
8.1 Potansiyometre (deplasman ölçer) yerleşim planı.	121

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge

Sayfa

2.1 Güçlendirmelerin maliyet ve deprem performansı açısından değerlendirilmesi (Blondet et. al., 2011).	12
2.2 Deney elemanlarının gruplandırılması (Valluzzi et. al., 2001).	15
3.1 Duvardaki gerilme düzeyine bağlı olarak kullanılacak malzemenin minimum basınç dayanımı (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2018).	20
3.2 Doğal taşların ortalama mekanik özellikleri (Yılmaz, 2006).	20
3.3 Tuğlanın ortalama mekanik özellikleri (Yılmaz, 2006).	21
3.4 TS 771-1'e göre dolu harman tuğlası basınç dayanımı.	21
4.1 Eşdeğer deprem yükünün uygulanabileceği binalar (DBYBHY, 2007).	35
4.2 Hareketli yük azaltma katsayısı (DBYBHY, 2007).	37
5.1 Duvar malzemesinin serbest basınç dayanımına ve harç sınıfına bağlı duvar basınç emniyet gerilmeleri (DBYBHY, 2007).	50
5.2 Serbest basınç dayanımı bilinmeyen duvarların basınç emniyet gerilmeleri (DBYBHY, 2007).	50
5.3 Narinlik oranına göre emniyet gerilmeleri için azaltma katsayıları (DBYBHY, 2007).	50
5.4 Duvarların çatlama emniyet gerilmesi (τ_0) (DBYBHY, 2007).	51
5.5 Mikro ve makro modelin kıyaslanması (Ercan, 2010).	57
6.1 Dışarıda bekleyen harç numunelerinin deney sonuçları.	78

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
6.2 Su içerisinde bekleyen harç numunelerinin deney sonuçları.	78
6.3 Tuğla numunelerinin deney sonuçları.	80
6.4 Küçük tuğla duvar (3 sıra) numunelerinin deney sonuçları.	82
6.5 Büyük tuğla duvar (4 sıra) numunelerinin deney sonuçları.	82
7.1 Nümerik modelde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.	94
7.2 Gergisiz sistem 2 numaralı deplasman ölçere göre görelî ötelenmeleri (deplasman ölçer yerleşim planı için Şekil 6.32'e bakınız).	95
7.3 Gergili sistem 2 numaralı deplasman ölçere göre görelî ötelenmeleri (deplasman ölçer yerleşim planı için Şekil 6.32'e bakınız).	99
7.4 Gergisiz sistem 2 numaralı deplasman ölçere göre görelî ötelenmeleri (deplasman ölçer yerleşim planı için Şekil 6.32'e bakınız).	107
7.5 Gergili sistem 2 numaralı deplasman ölçere göre görelî ötelenmeleri (deplasman ölçer yerleşim planı için Şekil 6.32'e bakınız).	111
8.1 Malzemelerin elastisite modülleri.	116
8.2 Malzemelerin ortalama maksimum basınç gerilmeleri.	117
8.3 Gergili ve gergisiz sistemde 8 kN yatay yük altında oluşan deplasman değerleri (deplasman ölçer yerleşim planı için Şekil 8.1'e bakınız).	118
8.4 Gergili ve gergisiz sistemde 14,44 kN yatay yük altında oluşan deplasman değerleri (deplasman ölçer yerleşim planı için Şekil 8.1'e bakınız).	118

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)**Çizelge****Sayfa**

8.5 Gergisiz sistem 6,03 kN yatay yük altında 2 numaralı deplasman ölçere göre görelî deplasman değışim oranları (deplasman ölçer yerleşim planı için Şekil 8.1'e bakınız).	119
8.6 Gergili sistem 4,046 kN yatay yük altında 2 numaralı deplasman ölçere göre görelî deplasman değışim oranları (deplasman ölçer yerleşim planı için Şekil 8.1'e bakınız).	119
8.7 Gergili ve gergisiz sistemlerin nümerik analizden elde edilen doğal salınım frekans değeri.	120
8.8 Gergili ve gergisiz sistemde spektrum x yüklemesi altında oluşan maksimum deplasman değeri (deplasman ölçer yerleşim planı için Şekil 8.1'e bakınız).	121

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
<i>cm</i>	Santimetre.
<i>daN</i>	Dekanewton.
<i>GPa</i>	Gigapascal.
<i>kN</i>	Kilonewton.
<i>kPa</i>	Kilopascal.
<i>m</i>	Metre.
<i>mm</i>	Milimetre.
<i>MPa</i>	Megapascal.
<i>N</i>	Newton.
R_a	Deprem yükü azaltma katsayısı.
ϵ	Şekil değiştirme.
σ	Gerilme.
<u>Kısaltmalar</u>	
CFRP	Karbon fiber takviyeli polimer.
CQC	Tam karasal birleştirme kuralı.
GFRP	Cam elyaf takviyeli polimer.
EDS	Enerji dağılımlı X-ışını.

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
MDF	Orta yoğunluktaki ahşap levha.
SEM	Taramalı elektron mikroskobu.
SRSS	Karelerin toplamının karekökü kuralı.
UV	Ultraviyole ışını.



1. GİRİŞ

Eski dönemlerden günümüze kadar ulaşan tarihi yapılar, geçmişi anlamamıza yardımcı olan ve ulusal kimliğimizi yansıtan tarihi ve kültürel mirastır. Yapıldığı dönemin ve yer aldığı bölgenin özelliklerini taşıyan tarihi yapılar benzer taşıyıcı sistemlere sahip olsa da her biri gerek kullanılan malzemeler gerekse de inşa edilişi açısından kendine özgü özellikler içermektedirler. Bu nedenle her bir yapı özel olarak ele alınmalı ve incelenmelidir.

Tarihi yapılar yapıldıkları dönemde, günümüzde sahip olunan beton, çelik gibi teknolojik malzemelerin olmaması nedeniyle zorunlu olarak yığma yapı tarzında inşa edilmişlerdir. İnşasında genellikle o civarlarda kolay temin edilebilen taş, tuğla, kerpiç, mermer veya ahşap gibi malzemeler kullanılmıştır. Taş, tuğla, kerpiç gibi yapı elemanları birbirlerine harç yardımıyla bağlanmıştır. Kullanılan harç karışımında ve yığma malzeme çeşitliliğinde yöresel farklar olması nedeniyle her yığma yapıda benzer malzeme dayanımlarının olduğunu söylemek mümkün değildir. Ayrıca mevcut yapılarda yıllar içerisinde deprem, sel, fırtına, zemin hareketleri, yapıda ve malzemede oluşan bozulmalar ve aşınmalar gibi birçok dış etkiden dolayı hem malzemelerde hem de yapının taşıyıcı sisteminde zamanla hasarlar meydana gelmektedir. Bu nedenlerden dolayı mevcut tarihi yapıların yapısal davranışlarının gerçekçi olarak belirlenebilmesi oldukça güç ve karmaşıktır. Nümerik modelde kullanılan parametrelerin analiz sonuçlarına doğrudan etki etmesi sebebiyle de malzeme parametreleri için doğru tanımlamaların yapılması oldukça önemli bir konudur.

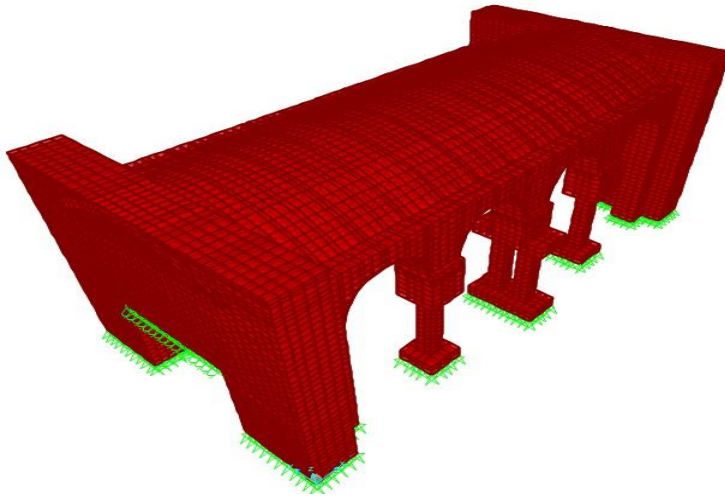
Bu çalışmada mevcut tarihi yığma yapıların yapısal davranışlarını gerçekçi olarak belirleyebilmek amacıyla deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda günümüze kadar ulaşan mevcut tarihi yığma yapılarda sıklıkla karşılaşılan kemer-tonoz taşıyıcı sistemini temsil edebilecek tipik bir ardışık kemerli tonoz yapısı ele alınmıştır. Bu yapının oluşturulmasında Manisa ilinde bulunan Ulu Camiinin avlu kısmında mevcut olan taşıyıcı sistemin geometrik ve yapısal özelliklerinden esinlenilmiştir. Harman tuğlası ve harç yardımıyla oluşturulan sistemde yalnızca sütun ve sütun alt ve üst başlıklarında mermer kullanılmıştır. İmal edilen laboratuvar modeli üzerinden tekrarlı statik yatay yüklemeler uygulanarak yapının yüksek deformasyon (çatlak) bölgeleri ve şekil değiştirme davranışı incelenmiştir. Modelin yük-deplasman grafiği çizilerek yapısal davranışı elde edilmiştir. Ayrıca malzemelerin ve sistemin mekanik özelliklerini (birim hacim ağırlık ve elastisite modülü) tahmin edebilmek amacıyla

tuğla, harç ve oluşturulan duvar numuneleri üzerinde birim hacim ağırlık ve tek eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Laboratuvar ortamında yapılan yığma yapının benzeri bilgisayar ortamında nümerik analiz modeli olarak da oluşturulmuştur. Yapının modellenmesinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak makro modelleme yaklaşımı esas alınmıştır. Yani harç ve tuğla malzemesi homojen tek bir malzeme olarak düşünülerek tek bir birim hacim ağırlık ve elastisite modülü kullanılmıştır. Bu kapsamda kullanılan yapısal parametrelerin belirlenmesinde laboratuvar ortamında yapılan deney sonuçları göz önüne alınmıştır. Böylece bilgisayar ortamından elde edilen sonuçlarla laboratuvar ortamında elde edilen sonuçlar kıyaslanarak uyumu değerlendirilmiştir. Şekil 1.1 ve 1.2’de bu çalışmada ele alınmış olan ardışık kemerli tonoz yapısının laboratuvar ortamında imal edilen şekli ve bilgisayar ortamında prizmatik sonlu elemanlar ile idealize edilmiş taşıyıcı sistem modeli görülmektedir.



Şekil 1.1 Laboratuvar ortamında imal edilen deneysel analiz modeli.



Şekil 1.2 Bilgisayar ortamında oluşturulan nümerik analiz modeli.

Oluşturulan her iki modelde çift yönlü gergili ve gergisiz olarak test edilmiştir. Ayrıca bilgisayar modelinde zemin oturmalarının yapıda oluşturduğu gerilme dağılımlarının incelenebilmesi için bir mesnette çökme uygulanmıştır. Depremın yapı üzerindeki etkisinin görülebilmesi için ise nümerik modelde spektrum analizi gerçekleştirilmiştir.

Tarihi yığma yapılar çok büyük öneme sahip olması nedeniyle yapılacak olan herhangi bir uygulamanın doğru ve dikkatli seçilmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle tarihi yapıların yapısal davranışının en doğru şekilde saptanması ve gerekli önlemlerin buna göre alınması gereklidir.

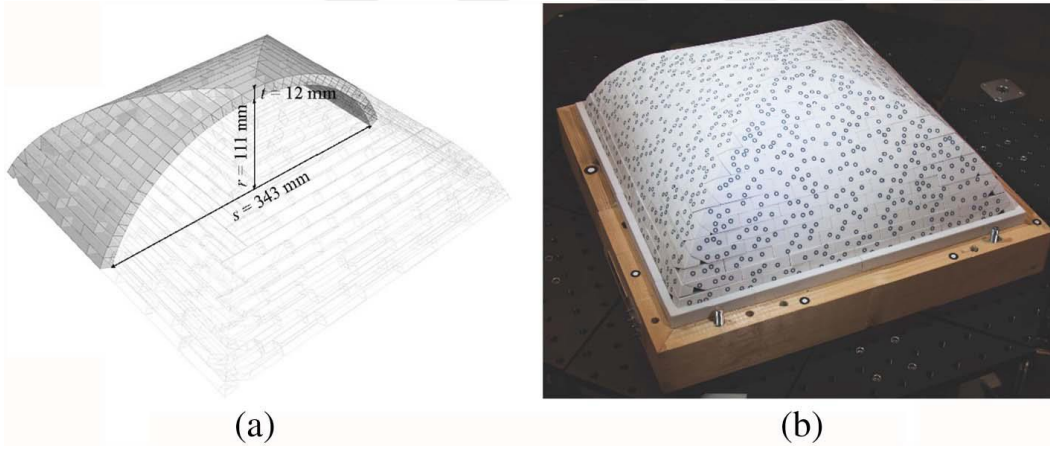


2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Daha önce yapılmış olan ve bu tez kapsamında ele alınan konulara benzer çalışmalara bu bölümde yer verilmiştir.

Rossi vd. (Rossi et. al., 2017), manastır tonozu yapılarının mesnetlere aktardığı yükler ve bu yüklerin etkisiyle mesnette meydana gelen açılmalar sonucunda tonozda oluşan çatlakların deneysel yolla tespit edilmesi üzerine bir çalışma yapmıştır.

Deneyde kullanılan tonozu oluşturan elemanlar 1/10 ölçek ile 342 parça halinde 3D yazıcı yardımıyla üretilmiştir. Deney yapısının boyutları ve deney sistemi Şekil 2.1'de görülmektedir. Tonoz üzerinde mesnet açılmalarının etkisini inceleyebilmek amacıyla Şekil 2.1b'de görülen farklı şekillerde hareket ettirilebilen ahşap malzemeye tonozu çevresel olarak mesnetleme yapılmıştır. Bu ahşaplar sayesinde farklı mesnet açılmaları etkiletilerek tonozda meydana gelen hasarlar gözlemlenmiştir.



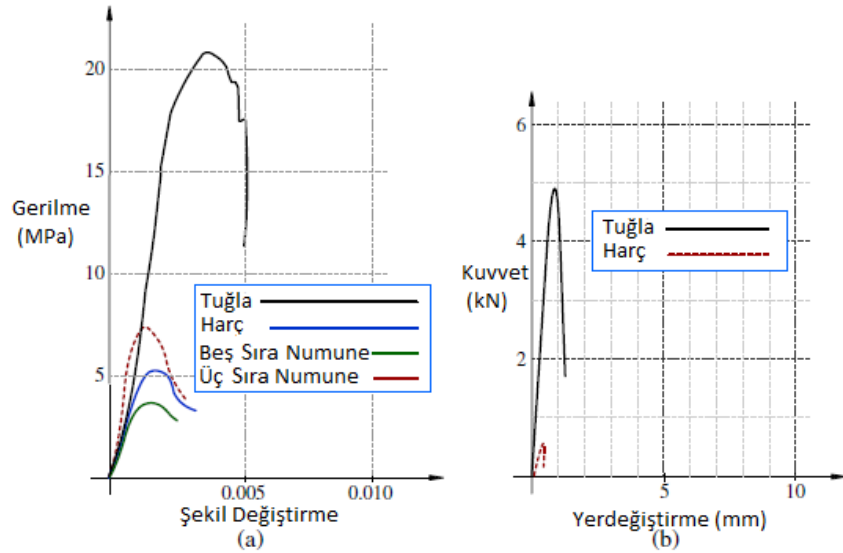
Şekil 2.1 Oluşturulan Sistem a) Geometrik boyut, b) Deneysel model (Rossi et. al., 2017).

Karimi vd. (Karimi et. al., 2016), dolu yığma duvar ve Pers mimarisinin en eski örneklerinden biri olan Sassani Dönemi kemer yapısının tekrarlı yatay yükler altındaki davranışını incelemişlerdir. Model, hem bilgisayar hem de laboratuvar ortamında oluşturularak elde edilen sonuçlar birbiriyle kıyaslanmıştır (Şekil 2.2).

Laboratuvar modelinde kullanılan malzemelerin özelliklerini belirlemek amacıyla malzemeler üzerinde eğilme ve basınç deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.3'de görülmektedir.



Şekil 2.2 Deney yapıları a) Kemer b) Dolu duvar (Karimi et. al., 2016)

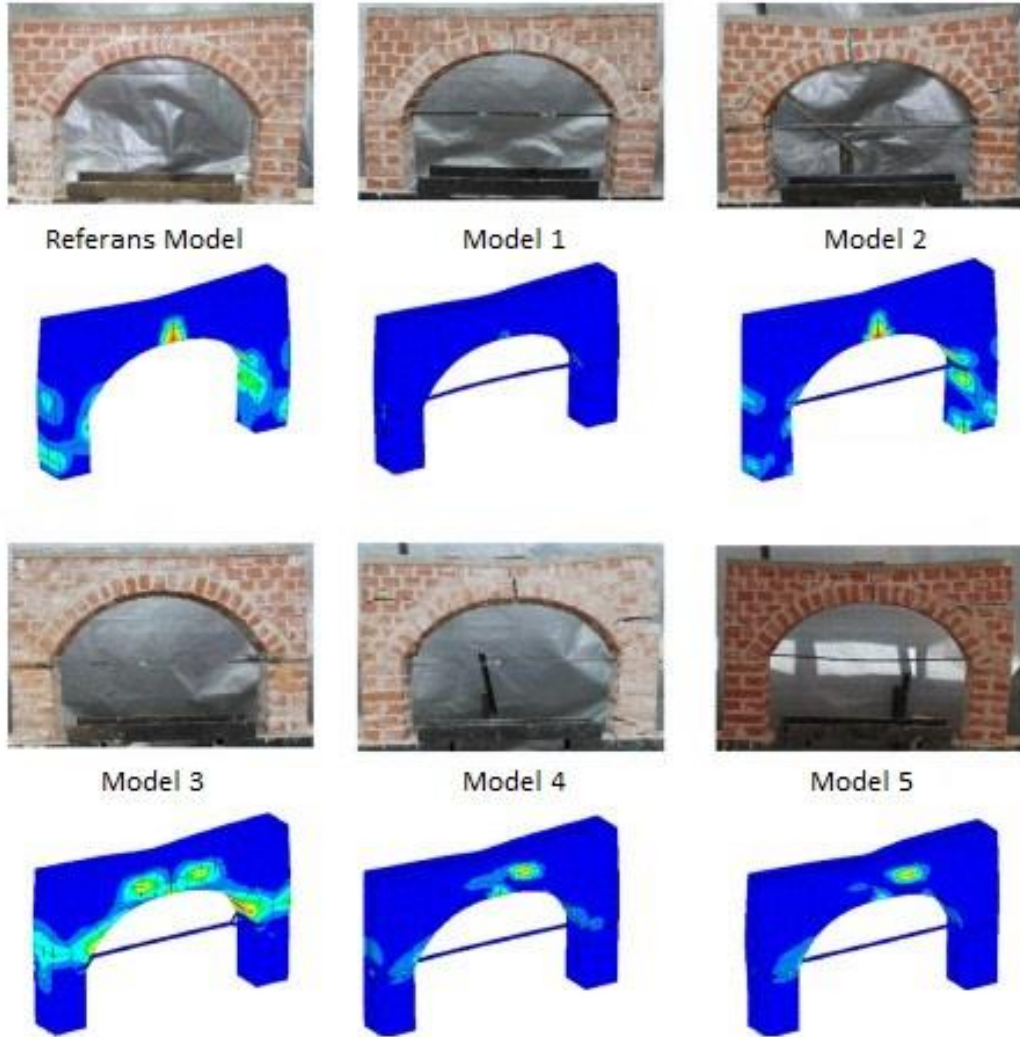


Şekil 2.3 a) Gerilme-şekil değiştirme b) Kuvvet-yer değiştirme sonuçlarını vermektedir (Karimi et. al., 2016).

Ural vd. (Ural et. al., 2016), deneysel ve nümerik olarak kemerlerdeki gergi elemanlarının sisteme bağlantı biçimine göre kemerlerde meydana getirdiği etkileri düşey basınç yüklemesi altında incelemişlerdir. Bu çalışma için biri gergisiz, diğer beş tanesi ise farklı gergi bağlantı detayına sahip olan toplam altı kemer yapısı incelenmiştir. Elde edilen deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Nümerik ve deneysel olarak elde edilen sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Şekil 2.4’de deneysel ve nümerik olarak oluşan çatlak ve gerilme yığılmalarının olduğu bölgeler görülmektedir. Deneysel çalışmada en önemli sonuç olarak gergili kemerlerin gergisiz kemerlere göre düşey yüklemeye

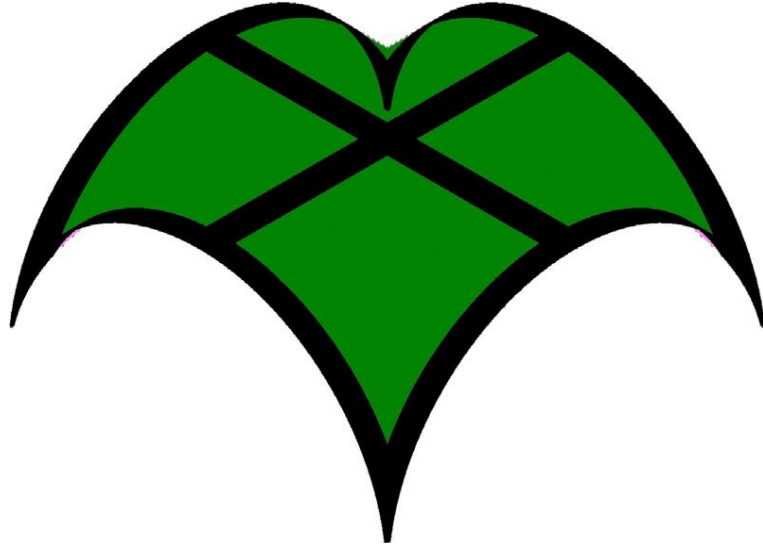
etkisinde en az %180 daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 2.4 Deneysel ve nümerik çalışmaların sonuçları (Ural et. al., 2016).

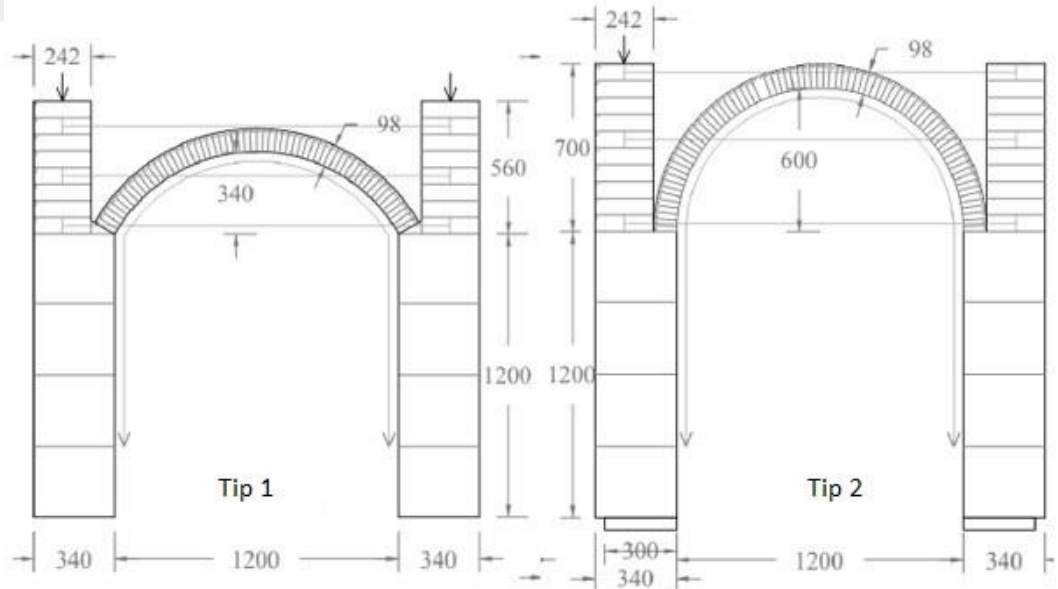
Szolomicki vd. (Szolomicki et. al., 2015), zaman içinde tarihi yapılarda kullanılan malzemenin bozulması, mesnet oturmalarının oluşması, servis yüklerinin artması gibi nedenlerle yapılarda meydana gelen hasarların güçlendirme yöntemiyle giderilmesi üzerine bir nümerik çalışma yapmıştır. Çalışmada haçvari tonoz yapısının lifli polimer malzeme (FRP) ile güçlendirilmesi incelenmiştir. Bilgisayar programı olarak LUSAS kullanılmıştır.

Analiz için oluşturulan tonoz sistem ve güçlendirme yöntemi Şekil 2.5’de görülmektedir. CFRP ve GFRP olmak üzere iki farklı güçlendirme elemanı kullanılarak elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır.



Şekil 2.5 Oluşturulan nümerik model (Szolomicki et. al., 2015).

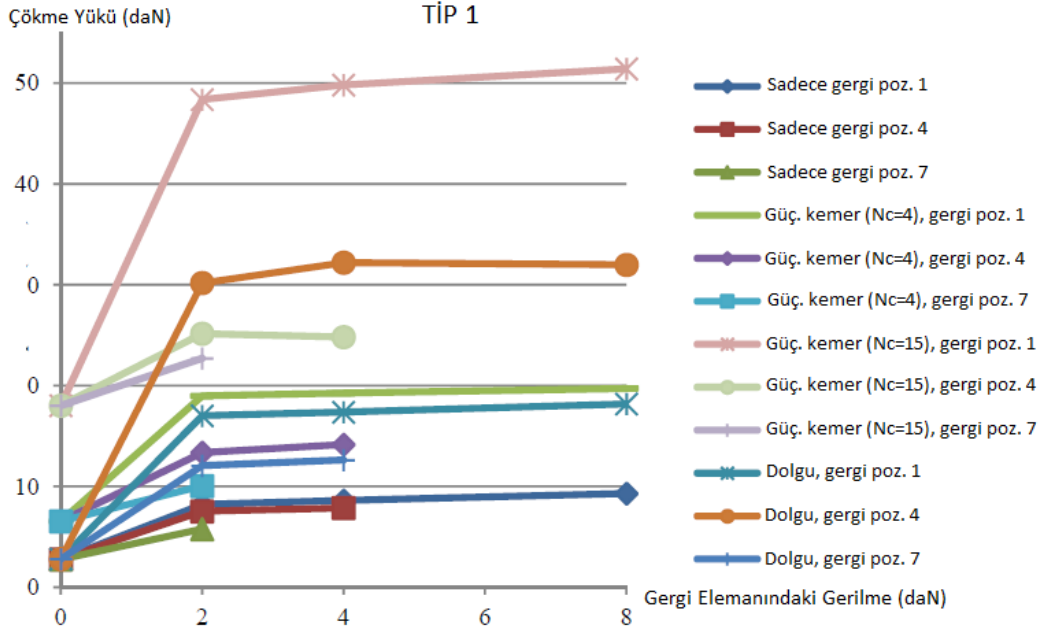
Mora-Gomez (2015), deneysel olarak oluşturulan kemerlerin, yalnız gergi veya gergi ile başka bir güçlendirme yönteminin birlikte kullanılarak yapının taşıma kapasitesindeki değişimini incelemiştir. Bunun için 2 farklı kemer tipi ve 4 grup güçlendirme yöntemi kullanmıştır. Kullanılan kemer tiplerinin geometrik boyutları Şekil 2.6’da görülmektedir.



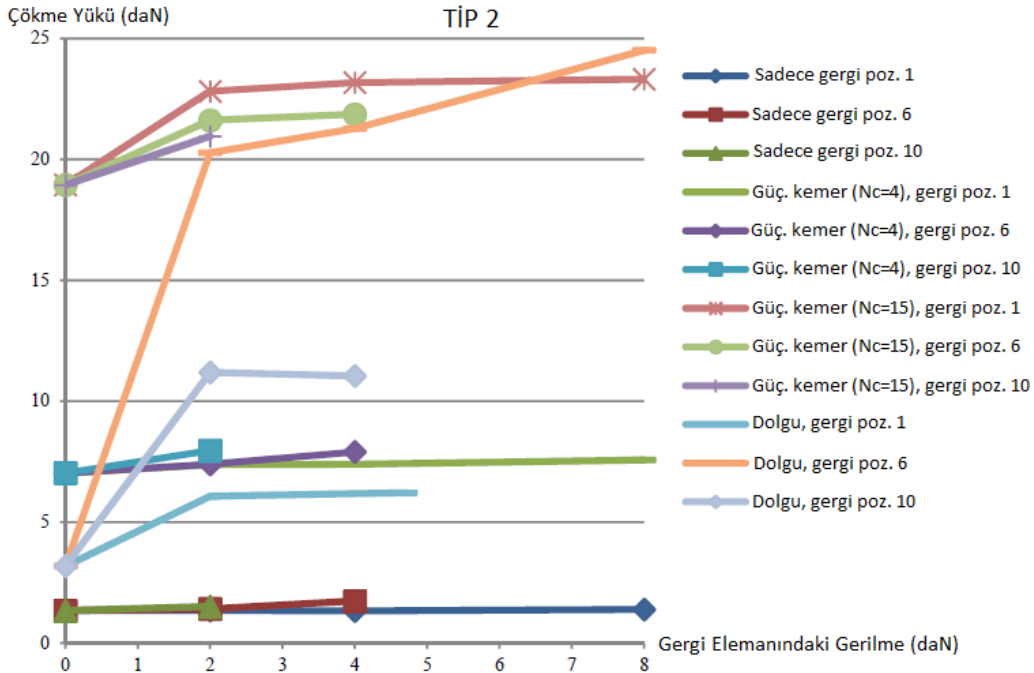
Şekil 2.6 Kemerlerin geometrik ölçüleri (Mora-Gomez, 2015).

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de görülmektedir. Verilerde görüldüğü gibi gergi elemanları yapının taşıma kapasitesini arttırsa da tek başına uygulandığında çok büyük değişiklik

sağlayamadığı görülmüştür. Gergi elemanlarının diğer güçlendirme yöntemleriyle birlikte uygulandığında ise taşıma kapasitesinde dikkate değer artışlar olduğu görülmüştür. Ayrıca uygulanan öngerme kuvvetinin büyümesi de yapının taşıma kapasitesini arttırmıştır. (1 daN = 10 N).



Şekil 2.7 Tip 1 için çökme yükleri (Mora-Gomez, 2015).



Şekil 2.8 Tip 2 için çökme yükleri (Mora-Gomez, 2015).

Corradi vd. (Corradi et. al., 2015), tarihi yığma yapılarda kemer ve tonoz sistemler özellikle düşey yüklere göre tasarlanmıştır. Bu yüzden deprem gibi dinamik etkiler altında bu yapılarda çok ciddi hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu hasarların tespiti ve güçlendirilmesi üzerine yapılan deneysel çalışmada; 3 tip gerçek boyuttaki tonoz yapısı üzerinde dinamik yükleme yapılarak güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş tonozlarda meydana gelen hasarlar tespit edilmiştir. Benzer yapılar bilgisayar ortamında da modellenerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tonozda dinamik etki oluşturmak için bir askı yardımıyla tonozun düşey olarak yükselmesi sağlanmıştır ve daha sonra askı serbest bırakılarak tonozda meydana gelen rezonans tepeleri “frekans tepki fonksiyonu” (FRF) ile belirlenmiştir. Şekil 2.9’da deneyin uygulanışı görülmektedir.



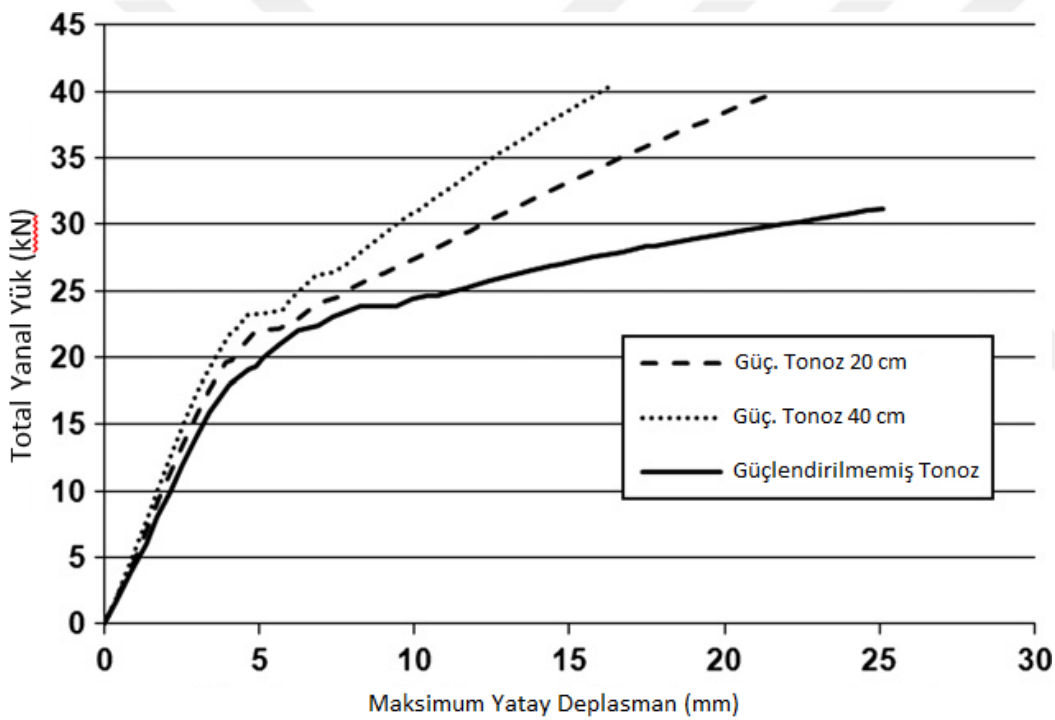
Şekil 2.9 Deneyin uygulanışı (Corradi et. al., 2015).

Laboratuvar ortamında elde edilen sonuçlar ile bilgisayar ortamında elde edilen sonuçlar kıyaslandığında hasarsız ve güçlendirilmiş sistemlerde frekans değerlerinin yakın çıktığı görülmüştür. Hasarlı sistemde ise bu farkın büyük olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise bilgisayar modelinde tonozdaki hasarların ve oluşan plastik mafsalların modellenmesinin oldukça zor olmasından kaynaklanmaktadır.

Mahini vd. (Mahini et. al., 2012), ANSYS programı yardımıyla bilgisayar ortamında modelledikleri tonoz sistemin CFRP ile iki farklı genişlikte

güçlendirilmesinin yapı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Oluşturulan bu sistemde malzeme idealize edilerek makro modelleme yöntemi kullanılmıştır. Yapıda deprem etkisini tanımlamak için non-lineer analiz türü olan artımsal yük yöntemi (pushover) kullanılmıştır.

Güçlendirilmemiş, 20 ve 40 cm CFRP ile güçlendirilmiş sistemlerden elde edilen yatay yük-yatay deplasman grafiği Şekil 2.10'da görülmektedir. 20 cm CFRP güçlendirme ile yapıda, güçlendirilmemiş yapıya göre %27'lik önemli bir dayanım artışı oluşurken, 40 cm CFRP güçlendirme uygulandığında dayanım artışı olsa bile 20 cm güçlendirme uygulamasından çok daha fazla (0,69 kN) olduğu söylenemez. İşin ekonomiklik boyutu düşünüldüğünde uygulanmasının çok mantıklı olmadığı görülmektedir.



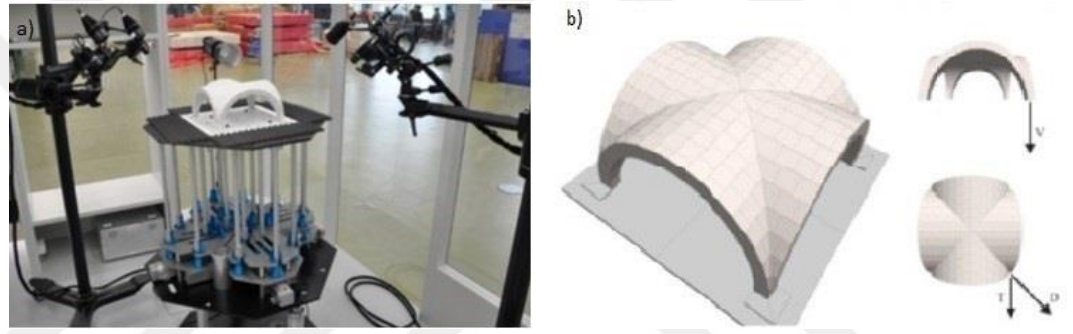
Şekil 2.10 Yatay yük - deplasman ilişkisi (Mahini et. al., 2012).

Mele vd. (Mele et. al., 2012), üç boyutlu olarak modellenen çift eğrili yığma tonoz yapısının büyük mesnet hareketlerindeki davranışı deneysel ve bilgisayar ortamında incelemiştir. Bu çalışmada özellikle üç maddeye odaklanılmıştır.

- Üç boyutlu mekanizmanın değerlendirilmesi.
- Çökmeye yol açan yer değiştirme büyüklüğünün belirlenmesi.
- Bilgisayar destekli analiz verileriyle deneysel çalışmanın sonuçlarının tahmin edilebilmesi.

Bilgisayar modelinin oluşturulmasında 3DEC programı yardımıyla ayırık elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Deneysel model ise üç boyutlu yazıcı yardımıyla üretilen parçaların birleştirilmesiyle oluşturulmuştur (Şekil 2.11b). Oluşturulan bu model farklı mesnet çökmeleri etkisi verebilen sistem üzerine yerleştirilerek deneye tabi tutulmuştur (Şekil 2.11a).

Her iki çalışmanın verileri kıyaslandığında aralarında küçük farklar olsa da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Genellikle bilgisayar ortamında yapılan çalışmanın sonuçları daha büyük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni ise bilgisayar ortamında oluşturulan modelin mükemmel malzeme özelliğine ve birleşim yüzeyine sahip olması nedeniyle sistemin birbirini daha iyi tutarak hasar oluşumunu geciktirmesidir.



Şekil 2.11 a) Deney düzeneği b) Deneysel model (Mele et. al., 2012).

Blondet vd. (Blondet et. al., 2011), deprem esnasında yığma yapıların duvarlarında büyük gerilmeler oluşmaktadır ve bu gerilmeler sonucunda yapıda taşıyıcı duvarlarında hasarlar meydana gelmektedir. Bu hasarları minimize etmek ve yapının kullanımının devamını sağlamak amacıyla yapıda bir takım güçlendirmeler yapılabilmektedir. Ne tür güçlendirmenin ne tür katkı sağladığını anlamak amacıyla laboratuvar ortamında oluşturulan kerpiç yığma yapılar üzerinde uygulanan farklı güçlendirme yöntemlerinin maliyet ve deprem performansı açısından kıyaslanması üzerine yapılan bir çalışmadır.

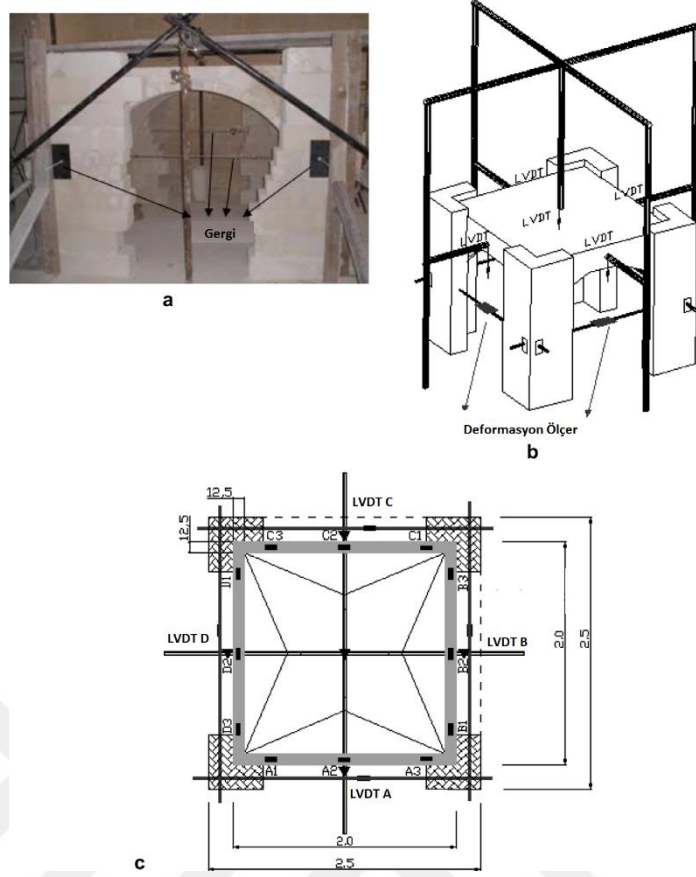
Deney sonuçlarında elde edilen veriler ışığında güçlendirme yöntemleri maliyet ve performans açısından değerlendirilmesi Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Güçlendirmelerin maliyet ve deprem performansı açısından değerlendirilmesi (Blondet et. al., 2011).

Güçlendirme Türü	Yapı Türü		İmalat Türü			Maliyet			Deprem Güvenliği		
	Yeni	Mevcut	Basit	Orta	Kompleks	Düşük	Orta	Yüksek	Düşük	Orta	Yüksek
Bambu Takviyeli	x			x		x					x
Bambu ve Halat	x	x	x			x					x
Bambu ve Tel Örgü	x	x	x			x					x
Hasır Tel Örgüyle	x	x	x				x			x	
Polimer Örgü	x	x	x				x				x
Kullanılmış Araba Lastiği	x	x		x		x				x	
Polipropilen (PP) Band	x	x		x		x					x
Tamamlayıcı Duvar Sistemi	x				x			x			x

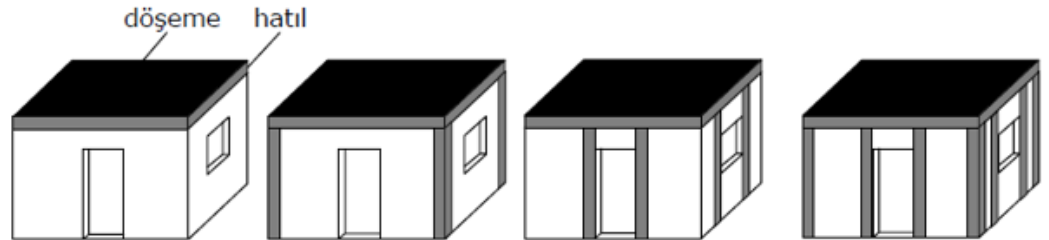
De Lorenzis vd. (De Lorenzis et. al., 2007), yığma yapıların güçlendirmesinde yaygın olarak kullanılan CFRP malzemeleri ile kemer, tonoz gibi çekme dayanımı zayıf olan taşıyıcı sistem elemanlarının çekme özelliklerini arttırılmaktadır. Bunun sonucu olarak sistemin taşıma kapasitesi artmakta ve mesnetlerde meydana gelen yanıl kuvvetler azalmaktadır. Bu çalışmada deneysel olarak CFRP elemanı ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş köşeli tonoz sistemlerinin sabit düşey yük etkisinde oluşan yanıl itki sonuçları incelenmiştir.

Oluşturulan sistemde kemerlerin arasına 4 adet 10 mm çapında ve demirden gergi çubukları yerleştirilmiştir. Bu gergi çubuklarının yardımıyla sistemde meydana gelen yanıl itkiler tespit edilmiştir. Şekil 2.12’de düşey ve yatay ölçümler için yerleştirilen tüm cihazların yerleri ve deney yapısı görülmektedir. Deney sonucunda CFRP ile güçlendirilmiş tonoz sistemde önemli derecede yanıl itkilerde azalma meydana geldiği görülmüştür. Bunun sonucu olarak da kemer dayanaklarına (payanda) giden yatay yüklerde azalmalar oluşmuştur.



Şekil 2.12 Deney düzeneği ve ölçüm cihazlarının yerleşim şeması (De Lorenzis et. al., 2007).

Ural ve Doğangün (2007), LUSAS bilgisayar programı yardımıyla basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemini kullanılarak oluşturduğu yığma modellerin deprem performansının belirlenmesi üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışma kapsamında farklı yerlere konulan düşey hatıllarla 4 tip yığma yapı modeli oluşturulmuştur (Şekil 2.13). Oluşturulan modellerin deprem etkisi altındaki davranışı incelenmiştir.



Şekil 2.13 Oluşturulan yığma yapı modelleri (Ural ve Doğangün, 2007).

Modellerin oluşturulmasında kullanılan basitleştirilmiş mikro modelleme yönteminde arayüzey elemanı için normal ve kayma rijitlikleri olarak tanımlanan k_n ve k_s değerleri denklem 2.1 ve 2.2 ile hesaplanmıştır. Burada E_u ve E_m tuğlanın

ve harcın elastisite modüllerini, G_u ve G_m ise tuğlanın ve harcın kayma modüllerini, t_m ise harcın kalınlığını göstermektedir.

$$k_n = \frac{E_u \times E_m}{t_m(E_u - E_m)} \quad 2.1$$

$$k_s = \frac{G_u \times G_m}{t_m(G_u - G_m)} \quad 2.2$$

Oluşturulan modellere uygulanan spektrum analiz ile yapının dinamik davranışı belirlenmiştir. Düşey hatılların duvarlarda meydana gelen yanal ötelenmeleri azaltması nedeniyle yapıya olumlu katkı sağladığı görülmüştür. Deplasmanlar açısından en iyi sonucun model 4’de alınması da buna örnek olarak gösterilebilir.

Torrealva vd. (Torrealva et. al., 2006), laboratuvar ortamında oluşturulan iki tonoz sistemden birinde güçlendirme yapılmazken diğerinde polimer örgü uygulamasıyla güçlendirme yapmıştır. Her iki yapıya da sarsma tablasıyla oluşturulan eş deprem yükü uygulanmıştır ve yapılarda oluşan hasarlar incelenmiştir.

Uygulanan deprem yükleri sonucunda güçlendirme yapılmamış olan tonoz sistem çökerken, güçlendirilmiş tonoz sistemde hasarlar oluşsa da tüm deney evrelerinde ayakta kalmayı başarmıştır. Şekil 2.14’de uygulanan deprem sonrası tonoz sistemler görülmektedir.



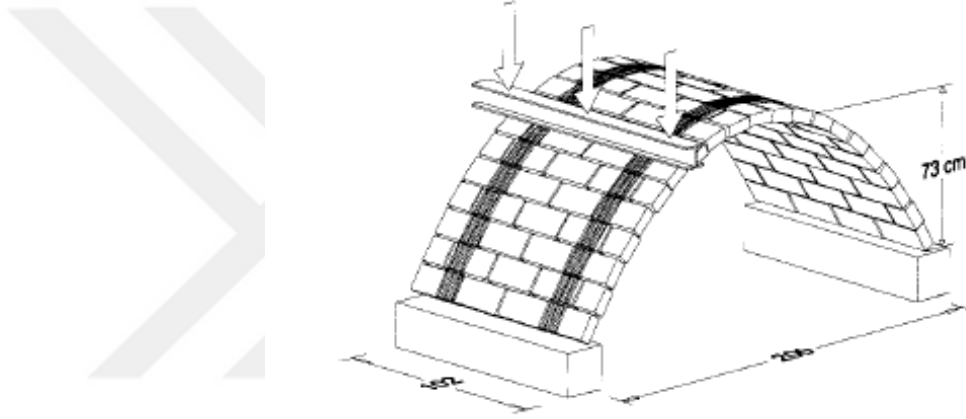
Şekil 2.14 Deprem sonrası tonoz sistemler a) Güçlendirilmemiş tonoz b) Güçlendirilmiş tonoz (Torrealva et. al., 2006).

Valluzzi vd. (Valluzzi et. al., 2001), farklı türdeki FRP malzemesinin ve yapıdaki güçlendirme bölgesinin değişmesinin sistemdeki etkisi incelenmiştir. Bu

çalışmada, CFRP ve GFRP ile içten veya dıştan güçlendirme yapılmış olan tonozlar kullanılmıştır. Deney çalışması için 6 adet test numunesi oluşturulmuştur bu test numunelerinin gruplandırılması Çizelge 2.2’de verilmiştir. Deneysel yapılara tonoz açıklığının 1/4’ünden düşey yükleme yapılmıştır. Şekil 2.15’de yükleme şekli ve oluşturulan tonoz sistemlerin geometrik ölçüleri görülmektedir.

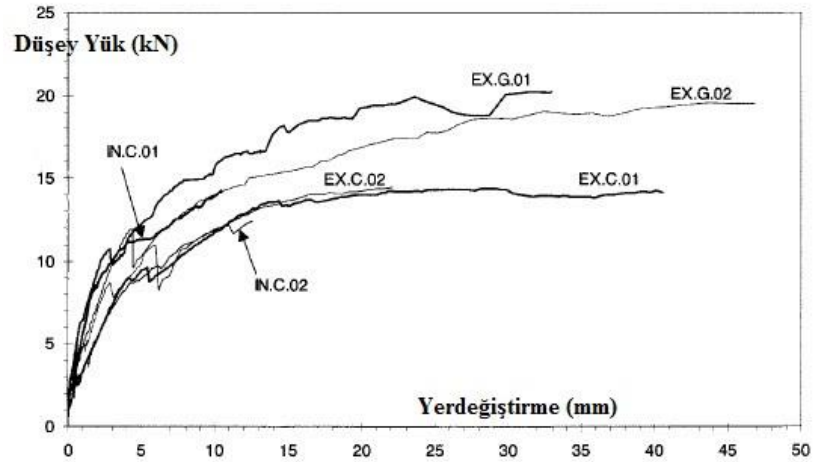
Çizelge 2.2 Deney elemanlarının gruplandırılması (Valluzzi et. al., 2001).

Güçlendirme Şekli	CFRP	GFRP
Dıştan	EX.C.01	EX.G.01
	EX.C.02	EX.G.02
İçten	IN.C.01	-
	IN.C.02	-



Şekil 2.15 Deneysel elemanın geometrik boyutları ve düşey yükleme yeri (Valluzzi et. al., 2001).

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiği karşılaştırılmalı olarak Şekil 2.16’da görülmektedir.



Şekil 2.16 Deney numunelerinin düşey yük- deplasman grafiği (Valluzzi et. al., 2001).

3. YIĞMA YAPILAR

Betonarme, çelik gibi taşıyıcı sistemlerin olmadığı dönemlerde yaygın olarak kullanılan yığma yapılar belirli bir taşıyıcı iskelete sahip değildirler. Taş, tuğla, mermer, ahşap gibi malzemelerin harç veya farklı türlerde birleştirme yöntemleriyle birbirine bağlanmasıyla oluşturulan sistemlerdir.

3.1. Taşıyıcı Sistem Açısından Yığma Yapılar

Yığma yapılar genellikle inşa edildiği bölgede temini kolay olan malzemeler kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan malzeme de yığma yapının taşıyıcı sistemini belirleyen başlıca faktördür. Ahşap, taş, tuğla veya kerpiç sık rastlanan yığma yapı türleridir.

3.1.1. Ahşap yığma yapılar

Ahşap yapılar genellikle orman alanlarının yoğunlukla bulunduğu bölgelerde yapılan yığma türleridir. Geleneksel uygulamalar ile birlikte ustanın bilgisi ve becerisine de bağlı olmak üzere farklı türde taşıyıcı sistemlerle yapı oluşturulabilir. Ahşap yapılar duvarda uygulanan taşıyıcı sistemlere ve taşıyıcı sistemin yük etkisi altında çalışma biçimine bağlı olarak dört sınıfta toplanabilir. Bunlar taşıyıcı sistemi kütüklerden oluşan ahşap yapılar (ahşap yığma), taşıyıcı sisteminde eğik elemanlar (payanda) bulunan veya eğik eleman (payanda) bulunmayan ahşap yapılar ve taşıyıcı sistemi bağdadi (yatay çiteler) güçlendirilmiş ahşap yapılar olarak sınıflandırılabilir (Yaman, 2007). Ahşap yapı uygulamalarıyla ilgili görseller Şekil 3.1’de görülmektedir.

Ahşap yapılarda kullanılan ağaç türleri genellikle çam, meşe, ceviz, kavak, selvi, kayın ve sedirdir.



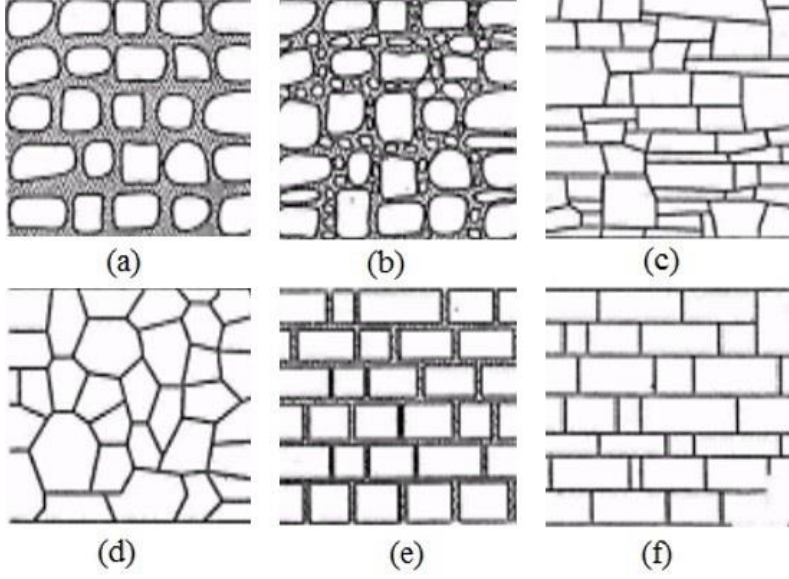
Şekil 3.1 Taşıyıcı sistemine göre ahşap yapılar a) Ahşap yığma b) Payandalı c) Bağdadi ile güçlendirilmiş d) Payandasız (Yaman, 2007).

3.1.2. Taş yığma yapılar

Taş yığma yapılar, çok eski dönemlerden günümüze kadar ulaşmış farklı taş malzemeleri ve farklı biçimlerde örülmüş duvar tipleriyle birçok örneği bulunmaktadır. Basınç dayanımı oldukça yüksek, çekme dayanımı da tam tersine oldukça düşüktür. Taş yığma taşıyıcı sisteme sahip yapılar düşey yükler altında oldukça iyi bir taşıyıcıyken deprem etkileri altında ise çekme dayanımının düşük olması nedeniyle kolaylıkla hasar meydana gelebilir. Şekil 3.2’de taş duvar yığma yapı örnekleri görülmektedir. Şekil 3.3’de duvar örgü türleri görülmektedir.



Şekil 3.2 Taş yığma yapı örnekleri (Erdoğan, 2018).



Şekil 3.3 Taş duvar örgüleri a) Toprak ile örülmüş b) Sıkıştırılarak kille harçsız örgü c) Köşeli taşlarla harçsız örgü d) Poligonal örgü e) Kesilmiş taşlarla kireç harçlı örgü f) Kesilmiş taşlarla harçsız örgü (Erdoğan, 2018).

3.1.3. Tuğla yığma yapılar

Eski zamanlardan beri yığma yapılarda kullanımı yaygın olan tuğla malzemesi, arasına bağlayıcı harç konularak tuğlaların birbirine bağlanmasıyla oluşturulan taşıyıcı yığma sistemdir. Bağlayıcı olarak kullanılan harç kalınlığı genellikle 1-2 cm civarındadır. Harç malzemesinin dayanımı tuğla malzemesinin dayanımından düşük olması nedeniyle harç kalınlığının artması durumunda yapıda dayanım kaybı meydana gelir. Şekil 3.4’de tuğla yığma duvardan yapılmış bir Ortaçağ dönemi kalesi (sol taraftaki resim) ve çamur tuğladan yapılmış Ctesiphon Sarayı (sağ taraftaki resim) görülmektedir.



Şekil 3.4 Tuğla yığma yapılar (Erdoğan, 2018).

3.1.4. Kerpiç yığma yapılar

Killi toprağın güneşte kurutulmasıyla elde edilen kerpiç malzemesi oldukça ucuz ve kolay bulunabilen bir malzemedir. Genellikle kırsal alanlarda yapılan yığma yapılarda görülmektedir. Dayanımının artması için kerpicing içine saman, saz, kum, çakıl, taş gibi malzemeler konulabilir. Şekil 3.5’de kerpiç taşıyıcı duvarlara sahip yığma yapı görülmektedir.



Şekil 3.5 Kerpiç yapı (Erdoğan, 2018).

3.2. Yığma Yapılarda Kullanılan Malzemeler

Yığma yapılarda kullanılan malzemelerin özellikleri yapının davranışında çok büyük rol oynamaktadır. Bu yüzden kullanılan malzemelerin özelliklerini iyi bir şekilde tespit edilmesi yapının ileriki süreçte deprem veya diğer yükler altında davranışının tespitini kolaylaştırmaktadır. Yığma yapılarda genellikle ahşap, doğal taş, tuğla ve harç kullanılmaktadır.

Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzuna göre yeniden yapılacak olan tarihi yığma yapılarda düşey gerilmelere bağlı olarak yapıda kullanılan malzemelerin sağlaması gereken minimum basınç dayanımları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Çizelgedeki basınç dayanımları karakteristik basınç dayanımlarıdır ve “ $f_k = f_{ort} - 1,28 \times \sigma$ ” formülüyle bulunmaktadır. f_k karakteristik basınç dayanımı, f_{ort} ortalama basınç dayanımı ve σ standart sapmadır.

Çizelge 3.1 Duvardaki gerilme düzeyine bağlı olarak kullanılacak malzemenin minimum basınç dayanımı (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2018).

Malzeme	Düşey Yük Altındaki Gerilme Düzeyi $\leq 0,5$ MPa	Düşey Yük Altındaki Gerilme Düzeyi $> 0,5$ MPa
Tuğla Basınç Dayanımı	>5 MPa	7,5 MPa
Taş Basınç Dayanımı	>10 MPa	20 MPa
Harç Basınç Dayanımı	2 MPa	3 MPa

3.2.1. Ahşap

Ahşap, tarihi yapılarda işlenme, elde edilme, kolay taşınabilme gibi özelliklerinden dolayı en çok kullanılan yapı malzemelerden biridir. Taşa oranla ömrü oldukça kısadır. Ancak; ahşap hafifliği, çekme ve eğilmeye karşı dayanımı bakımından taşa göre üstünlük göstermektedir. Bu özelliğinden yararlanılarak, taş ile geçilemeyen büyük açıklıklar ahşap malzemeyle geçilmesi mümkün olmuştur. Geleneksel yapılarda ahşabı, tavan, döşeme, duvarlarda hatıl olarak veya kemerli sistemlerde gergi elemanı olarak kullanıldığını görmek mümkündür (Yılmaz, 2006). Kullanılan ahşap malzemesinin mekanik özellikleri “Ahşap Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları” (TS 647) yönetmeliğinden alınmıştır.

3.2.2. Doğal taş

Taş, her bölgede kolaylıkla temin edilebilmesi nedeniyle tarihi yapıların inşasında en çok kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Taşların basınç değeri oldukça yüksek olmasının aksine çekme dayanımları çok düşüktür. Eski yapılarda, işlenebilme kolaylığı bakımından, daha çok metamorfik ve tortul taşlar kullanılmıştır. Çizelge 3.2’de bazı doğal taşların mekanik özellikleri verilmiştir (Yılmaz, 2006). Taşlar, genellikle tarihi yapılarda beden duvarlarında veya sütun elemanları olarak kullanılmıştır.

Çizelge 3.2 Doğal taşların ortalama mekanik özellikleri (Yılmaz, 2006).

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

3.2.3. Tuğla

Kullanımı eski zamanlara dayanan tuğla, kilin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesiyle elde edilen bir yapı malzemesidir. Tarihi yapılarda kullanılan tuğlalar saf kaolin ve kil karışımının fırınlarda yüksek ateş altında pişirilmesiyle elde edilir. Fırın teknolojisinin bulunmadığı yerlerde, bazı tarihi yapılarda kullanılan tuğlaların doğrudan güneş ısı altında üretilmiş olanlarına da rastlanmaktadır. Tuğla ne kadar iyi pişirilmişse mukavemeti ve çevresel etkilere olan direnci o kadar fazla olmaktadır. Tuğlanın ortalama mekanik özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Tuğla, daha çok ahşap ve taşın zor elde edildiği bölgelerde yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. İnsan tarafından istenilen şekillerin verilebildiği tuğlalar genellikle kemer, tonoz ve kubbe gibi büyük örtü sistemlerinin ana malzemesidir. Tuğla malzemesinin basınç dayanımı çekme dayanımına göre yüksek olması nedeniyle oluşturulan sistemlerde tuğla elemanlarının basınç etkilerine maruz kalması sağlanmıştır (Yılmaz, 2006).

Çizelge 3.3 Tuğlanın ortalama mekanik özellikleri (Yılmaz, 2006).

Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
10 - 30	2,7 – 5	10 – 20	150 – 300

TS 771-1’e göre dolu harman tuğlasının basınç dayanımı Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4 TS 771-1’e göre dolu harman tuğlası basınç dayanımı.

Dolu Harman Tuğlası	Ortalama Basınç Dayanımı (en az) N/mm ²	Basınç Dayanımı (en az) N/mm ²
Orta Dayanımlı	5	4
Az Dayanımlı	3	2,5

3.2.4. Harç

İnsanların en temel ihtiyaçlarından biri olan barınma alanlarının oluşturulmasında kullanılan taş, tuğla gibi elemanların birbirine bağlanmasında kullanılmak üzere malzeme ihtiyacı bulunmaktadır. Bu ihtiyacı gidermek için insanlar zaman içinde alçı harcı, kireç harcı, çimento harcı gibi çeşitli bağlayıcı malzemeler keşfetmiştir. Elde edilen bu bağlayıcı malzemelerde temel olarak

bulunması gereken özellikler; basınç dayanımı, doluluk, geçirimsizlik, aderans, aşınmaya ve dış etkilere karşı dayanıklılıktır.

Türkiye’de bulunan tarihi yapılarda kullanılan harçlar genellikle kireç harçlarıdır. Kireç harçları da hidrolik ve hidrolik olmayan harçlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Hidrolik olmayan harçlarda kireç, harca katılan diğer malzemelerle etkileşime girmez ve sadece kirecin havanın etkisiyle sertleşmesi sonucu dayanım kazanırlar. Hidrolik olan harçlar ise ya hidrolik kirecin kullanımıyla ya da kireçle etkileşime giren puzolanların harca katılmasıyla oluşturulur. Puzolan kullanılarak elde edilen hidrolik harçlarda ise kireç, puzolanlar ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat, kalsiyum alüminat hidrat, vb. ürünleri oluşturur. Hidrolik harçların mukavemetleri, oluşan bu ürünlerden dolayı hidrolik olmayanlardan daha büyük olduğu araştırmalarda görülmüştür. Hidrolik özellik gösteren harçlarda, harcın dayanım kazanabilmesi için su ile reaksiyona girmesi gerekmektedir (Özgen, 2012).

Horasan Harcı ve Özellikleri:

Özgen (2012) yılında yapmış olduğu çalışmadan alınan bilgilere göre, horasan harcı, kısaca yapay puzolanik (pişmiş kil) malzeme kullanılarak hazırlanan kireç harcı olarak tanımlanabilir. Bu tür harçlara Romalılar ve Bizans döneminde "Roman" harcı, Selçuklu ve Osmanlı mimarisinde de renk ve doku olarak horasan toprağına benzediği için "Horasan" harcı denilmiştir.

Horasan harcı, horasan ve belli oranlarda hava kirecinin su ile karıştırılmasından elde edilen harç olarak tanımlanır. Bazı uygulamalarda harcın içerisine kum katılırken, bazılarında nohut büyüklüğünde parçalar halinde tuğla veya kiremit kırıkları gibi seramik malzemelere rastlanmaktadır. İçine tuğla veya kiremit kırıklarının katıldığı harç karışımları diğer harçlardan farklı bir yapıya sahip olup günümüz betonuna eşdeğer, taşıyıcı bir yapı taşını meydana getirmektedir. Ayrıca horasan harcı suya karşı oldukça dayanıklı bir bağlayıcıdır. Nemli ve ıslak bölgeler için kullanılacak en uygun malzeme olduğu söylenebilir.

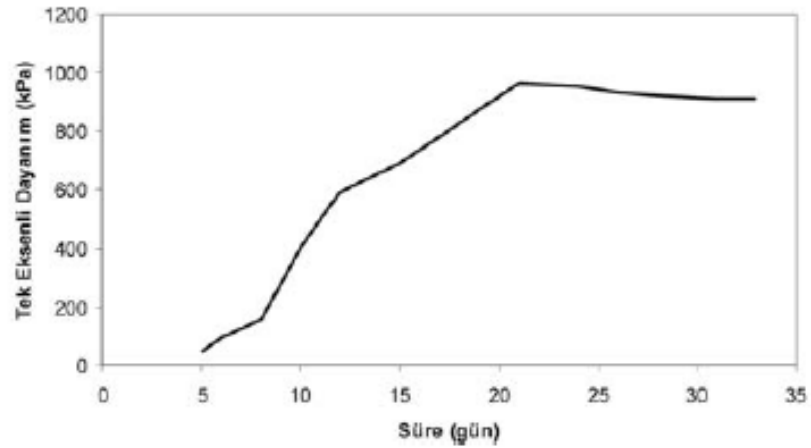
Horasan harcının kalitesi, kireç ve horasan karışımının katılaşması bir asit-baz reaksiyonu sonucu suda çözülmeyen bir tuz oluşumuna dayanır. Bu oluşacak olan tuz yavaş gelişen bir kimyasal tepkimedir. Puzolanik etki olarak adlandırılan bu reaksiyonun başarılı olabilmesi için ortamın nemli, pişmiş kilin daha aktif ve ince taneli olması gerekir.

Tarihi yapıların yenilenmesi sırasında kullanılacak olan harcın, eski harç ile benzer özellikler gösterebilmesi için yapıda mevcut bulunan harcın farklı noktalarından numuneler alarak incelenmelidir ve belirlenecek olan karışım oranlarına göre yeni harç yapılmalıdır.

Horasan harcı içine katılan çeşitli malzemelerle veya kullanılan karışım oranlarıyla çeşitli dayanımlar göstermektedir.

Pomex firması tarafından üretilen hazır horasan harcının 7 günlük basınç dayanımı 15 kg/cm^2 olarak verilmiştir. $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ harç numunesi üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilmiş veridir (Pomex, 2018).

Kanıt ve Işık tarafından 2004 yılında yapılmış bir çalışmada; 3,8 cm çaplı ve 8 cm yüksekliğindeki silindir numuneleri horasan harcıyla oluşturulmuştur. Harç numuneleri üzerinde tek eksenli basınç deneyi yapılarak dayanımları belirlenmiştir. Harç dayanımlarının zamanla olan değişimi Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6 Zamanla basınç dayanımındaki değişim (Kanıt ve Işık, 2004).

3.2.5. Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için uygulanan laboratuvar deneyleri

Yığma yapılarda kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için bir takım deneyler laboratuvar ortamında yapılmaktadır. Bu deneyler:

- Ultra ses deneyi
- Fiziksel deneyler

- Tek eksenli basınç deneyi
- XRD ve SEM-EDS testi

Ultra ses deneyi:

Yapının veya deney numunesinin dayanımını, çatlak durumunu veya çatlak yönlerinin tespiti için kullanılan yöntemdir. Ultra ses deneyinde, ses dalgalarının bir piezoelektrik transduserden diğerine ulaşana kadar geçen süreyi hesaplayarak, aradaki mesafeyi bu süreye bölerek hızı bulmaktadır. Bu hızın düşük ya da yüksek olmasına göre yapının durumu hakkında bilgi sahibi olunmaktadır. Bulunan hızın yüksek olması yapıda boşluk veya çatlak olmadığını, düşük olması ise yapıda hasarların olduğunu göstermektedir. Şekil 3.7’de ultra ses cihazı görülmektedir.



Şekil 3.7 Ultra ses cihazı.

Hesaplanan hız yardımıyla yapının elastisite modülü de tespit edilebilmektedir (denklem 3.1). Bu eşitlikte; ultra ses hızı V (m/s), numune yoğunluğu p (kg/m³), poisson oranı m , elastisite modülü E (MPa) (Ercan, 2010).

$$E = p \times V^2 \times (1 + m) \times \frac{(1-2m)}{(1-m)} \quad 3.1$$

Fiziksel deneyler:

Fiziksel deneyler için hazırlanan numunelerde kılcal su emme ve ağırlıkça su emme deneyleri yapılır, deney sonuçlarından boşluklu birim hacim ağırlık (β , gr/cm³), ağırlıkça su emme (a_s , %), hacimce su emme (h_s , %) ve kılcal su emme katsayıları (K , cm²/s) belirlenir (Aköz ve Yüzer, 2018).

Tek eksenli basınç deneyi:

Yapıdan alınan karot numuneleri veya laboratuvar ortamında yönetmeliklere göre hazırlanmış olan deney numuneleri üzerinde uygulanan bir yöntemdir. Numuneye basınç yüklemesi yapılarak, numunedeki boy değişimini, kırılma yükünü ve uygulanan yükün yükleme alanına bölünmesiyle de basınç dayanımı hesaplanabilmektedir. Bu elde edilen veriler sayesinde oluşturulan sigma-epsilon eğrisi yardımıyla numunenin elastisite modülü hesaplanabilmektedir (denklem 3.2). Şekil 3.8’de tek eksenli basınç deneyi cihazı görülmektedir.

Elastisite modülünün hesabı için:

- $\epsilon_1 = 0,0005$ değerine karşılık gelen basınç gerilme değeri (σ_1) belirlenir.
- Maksimum basınç gerilmesinin %40 alınarak σ_2 değeri belirlenir.
- σ_2 değerine karşılık gelen ϵ_2 değeri belirlenir.

$$EM = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}$$

3.2



Şekil 3.8 Tek eksenli basınç deneyi cihazı.

XRD ve SEM-EDS testi:

Taş, tuğla, harç gibi numunelerin mikroyapısal özelliklerinin belirlenmesi için XRD ve SEM-EDS analizleri kullanılır.

XRD (X-Ray Diffraction, X-Işını Kırınımı), X-ışınları tarafından oluşan kırınım desenleri sayesinde yapı hakkında atomların oluşturduğu sıralar, tek kristalin veya taneciğin yönelimi, bilinmeyen bir malzemenin kristal yapısı, tanecik boyutu, gerilme durumu, şekli ve kimyasal kompozisyonu hakkında bilgi elde edilebilmektedir (Ercan, 2010).

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikro ölçekte görüntüleme ve istenilen noktada analiz (EDS) yapılarak elementel kompozisyonlar belirlenmektedir (Aköz ve Yüzer, 2018).

3.3. Yığma Yapılarda Taşıyıcı Elemanlar

Yapıların ayakta kalmasını ve üzerine etkiyen yükleri güvenli bir biçimde zemine aktarılmasını sağlayan elemanların oluşturduğu sisteme taşıyıcı sistem denir. Tarihi yapılarda taşıyıcı sistem elemanları günümüzde inşa edilen betonarme ve çelik yapılara göre oldukça farklıdır. Kemer, tonoz, duvar, sütun gibi taşıyıcı sistemlere sahiptir.

3.3.1. Sütun

Kare, daire, çokgen gibi çeşitli formları olan mermer, taş, granit gibi malzemeler kullanılarak oluşturulan ve üzerine gelen yükleri temele veya başka bir taşıyıcı elemana aktarmada kullanılan düşey taşıyıcı elemanlardır. Sütunlar tek parça veya birkaç blok taşın merkezlerinden birbirine eritilmiş kurşun ve demir pim elemanları kullanılarak birleştirilmesiyle oluşturulur. Şekil 3.9’da farklı tipteki sütun örnekleri görülmektedir.

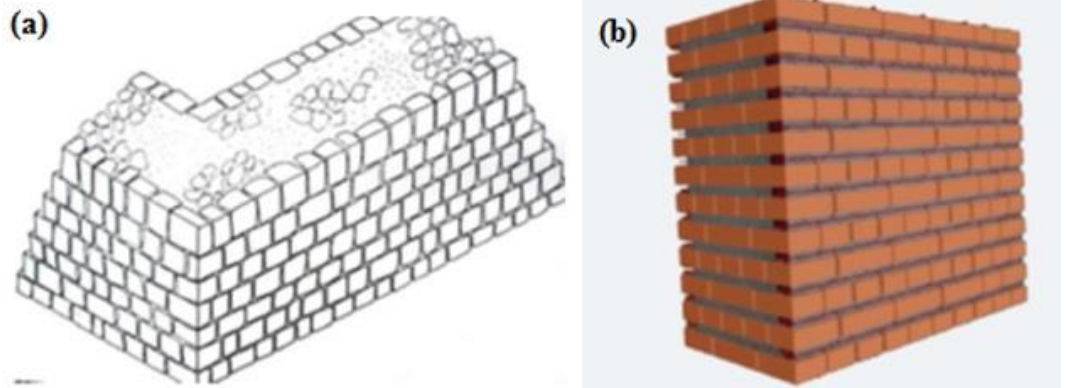


Şekil 3.9 Geometrik şekillerine göre sütun elemanlar (Tuluk, 1999).

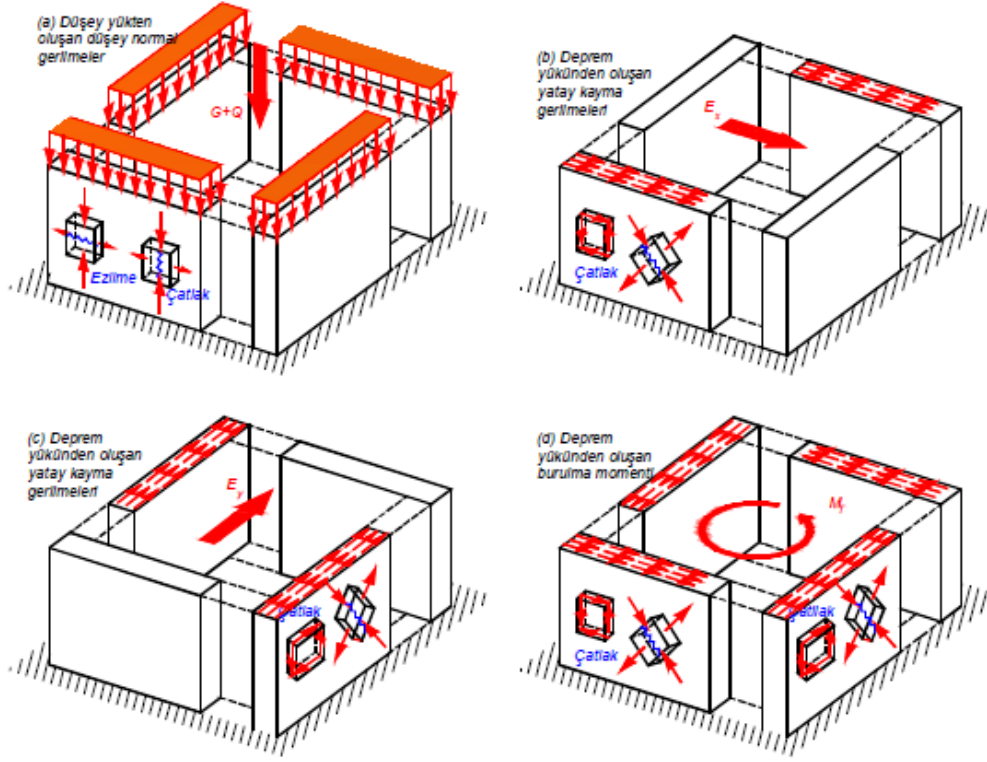
3.3.2. Duvar

Tarihi yapılarda taşıyıcı duvarlar, kesme taş, kaba yonu taş, moloz taş, tuğla ya da almasıık malzeme (taş + tuğla) ile inşa edilen ve yapıdan gelen yükleri temele ileten sürekli elemanlardır. Duvarın enkesit boyutları, üzerine gelen eğik ve deprem yüklerinin dikkate alınmasıyla belirlenir. Tarihi yığma yapılarda duvar kalınlıkları, düzlem dışı yükler duvarların öz ağırlığı ile karşılandığından, olabildiğince büyük seçilmiştir. Duvarların düşey ve yatay yükleri karşılayabilmesi için, bir bütün olarak davranması gerekir. Yapı genelinde duvarların yatay kesitlerinde oluşan gerilmeler birbirlerine eşit ya da yakın değerlerde olmalı ve kesit içinde düzgün yayılı dağılmalıdır. Tarihi yığma yapılarda duvarların bütünlüğünün sağlanması için taş ve tuğlalar birbirlerine harç, kenet veya değişik düzeylerde oluşturulan ahşap/dövme demir hatıllarla bağlanmışlardır. Bazı durumlarda duvarlar, çatıdan gelen eğik yükleri karşılayabilmesi amacıyla payandalarla desteklenmiştir (Sesigür vd., 2007).

Kalın bir kâgir duvar, dolu ya da arası boşluklu olarak yapılabilir. Kalın duvarların iki yüzünü oluşturan duvarlar aynı tip blokla yapılabildiği gibi her bir duvar ayrı tip blokla (karma) oluşturulabilir. Duvarlar arası boş bırakılır ya da moloz taş ve harçla doldurulur. Dolu duvara tek cidarlı, iki yüzü arası boşluklu yapılane; içi boş bırakıldıysa iki, doldurulduysa üç cidarlı duvar ya da sandık duvar denir (Özer, 2006). Şekil 3.10a'da üç cidarlı kâgir duvar örgüsü, Şekil 3.10b'de tuğla duvar örgüsü görülmektedir. Şekil 3.11'de yığma duvarlara etkiyen yükler ve bunun sonucunda yapıda oluşan normal ve kesme kuvvetleri görülmektedir.



Şekil 3.10 Duvar örgüsü a) Üç cidarlı (Özer, 2006) b) Tuğla (Bayraktar, 2017).

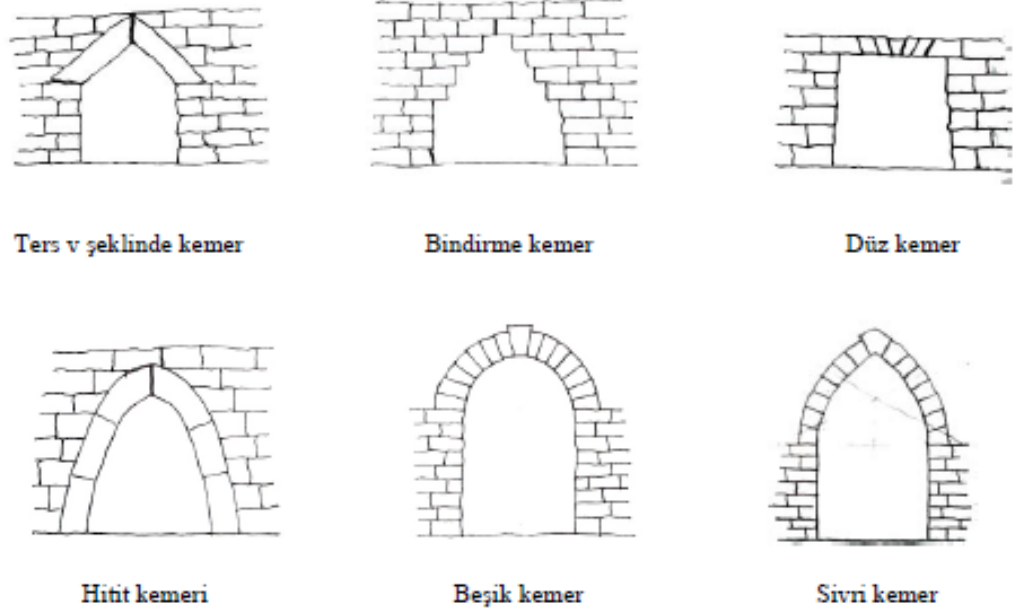


Şekil 3.11 Yığma duvarlarda meydana gelen normal ve kesme kuvvetleri (Tarihi Yapılar İçin Deprem Riskleri Yönetimi Kılavuzu, 2018).

3.3.3. Kemer

Kemerler; bir açıklığı geçmek amacıyla kullanılan ve düşey yüklerin yatayda taşınarak düşey taşıyıcı elemanlar olan duvarlar veya sütunlara aktarılması amacıyla kullanılan düşeyde funiküler form oluşturacak şekilde kavisli taşıyıcı elemanlardır. Düşey yükleri mesnetlendikleri düşey taşıyıcı elemanlara yatay ve düşey bileşenli mesnet tepkileri ile aktarırlar. Düşey taşıyıcılar yatay mesnet tepkisi bileşenini taşıyamayacak durumda iseler kemer mesnetleri metal ya da ahşap gergi ile birbirine bağlanabilirler (Bayraktar, 2017).

Üzerine gelen yükleri, basınç şeklinde ileterek açıklığın iki yanına aktaran kemer, yalnızca basınçta çalışır. Bu nedenle taş, tuğla gibi basınç direnci yüksek, çekme direnci düşük malzemelerin kemer yapımında kullanılması uygundur (Özer, 2006). Şekil 3.12’de kemer formlarının zaman içinde değişimi görülmektedir.



Şekil 3.12 Zaman içinde değişen kemer tipleri (Özer, 2006).

3.3.4. Tonoz

Tonoz, kemer elemanının kendi düzlemine dik doğrultuda ötelenmesiyle kare, dikdörtgen gibi alanların üstünün örtülmesinde kullanılan kemer ile benzer yöntemle çalışan taşıyıcı sistemdir. Basınca çalışması nedeniyle kullanımında taş, tuğla gibi basınç dayanımı yüksek malzemeler tercih edilmelidir.

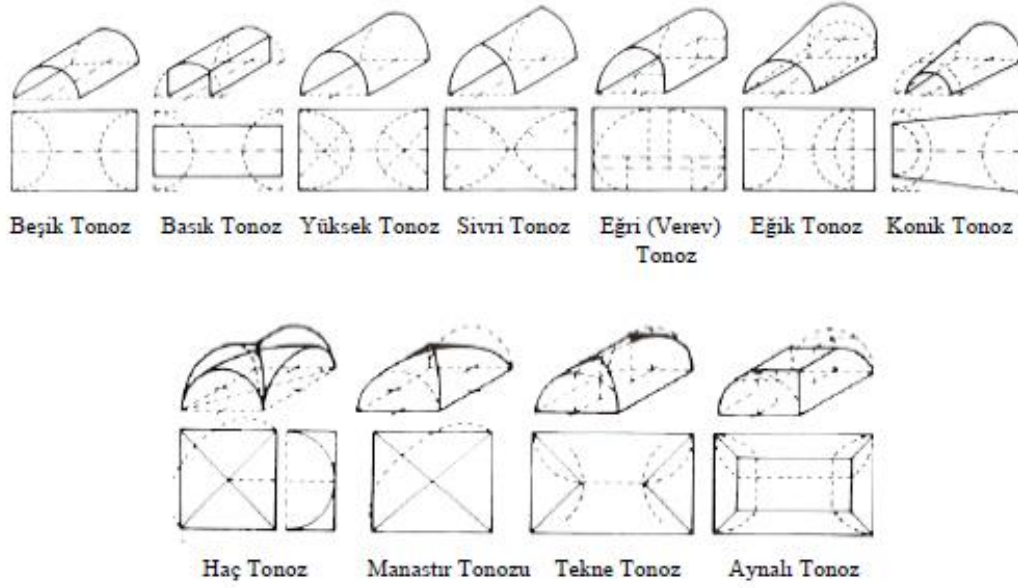
Tonozlar, tek ve çift eksenli olmak üzere iki grupta incelenebilir:

Tek Eksenli: Tek eksenli tonozlar bir kemerin merkezi yönünde ötelenmesiyle meydana gelir. Beşik tonoz, sivri tonoz, verrev tonoz, eğik tonoz, konik tonoz tipleri buna örnek gösterilebilir.

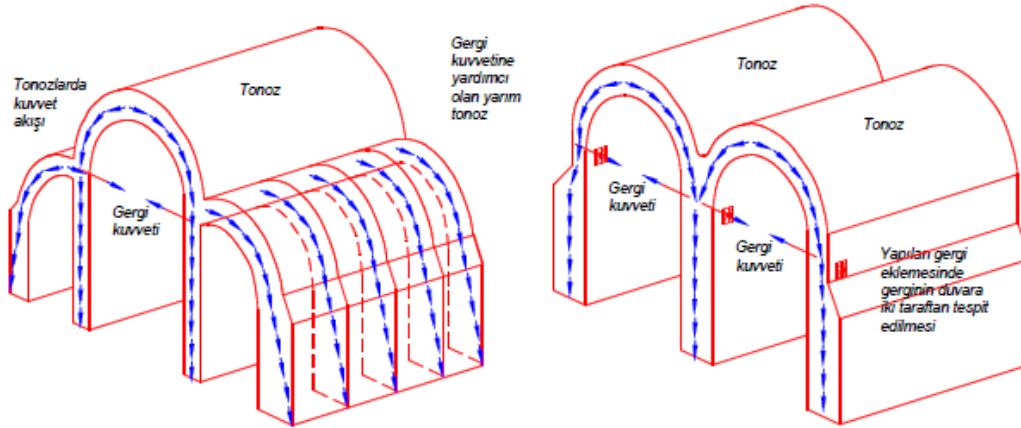
Çift Eksenli: Çift eksenli tonozlar ise birbirini dikine kesen tonozlardan oluşur. Çapraz tonozda yükler yalnızca dört köşede toplandığı için dört sütunla ayakta kalabilir.

Diğer tek eksenli ve çift eksenli tonozlar ise aldıkları yükü dört tarafındaki duvarlara veya sütunlara iletirler. Manastır tonozu, tekne tonoz, aynalı tonoz ve çokgen tonoz bu grupta değerlendirilir (Tuluk, 1999).

Şekil 3.13’de tonoz tipleri görülmektedir. Şekil 3.14’de ise tonozlarda kuvvet akışı ve gergi kuvveti görülmektedir.



Şekil 3.13 Tonoz tipleri (Özer, 2006).

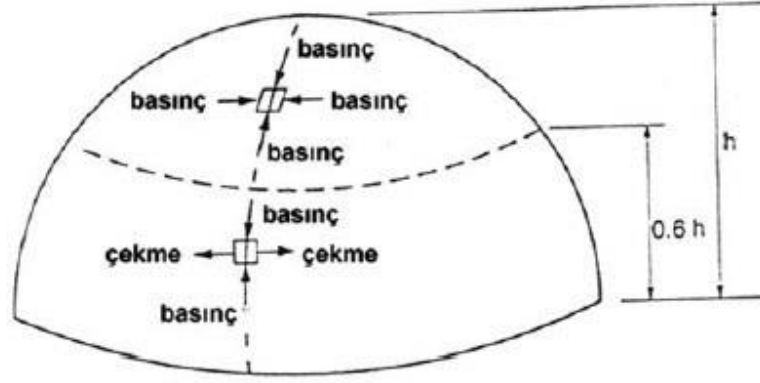


Şekil 3.14 Tonozlarda kuvvet akışı ve gergi kuvveti (Tarihi Yapılar İçin Risklerin Yönetimi Kılavuzu, 2018).

3.3.5. Kubbe

Kubbeler geniş alanların üzerinin örtülmesi için kullanılan ve düşey olarak basınca çalışan taşıyıcı sistemlerdir (Şekil 3.15). Genellikle tuğla malzemesiyle olmak üzere taş veya ahşap malzemeye de inşa edilmektedir. Kubbe bir kemerin düşey simetri eksenini etrafında döndürülmesiyle elde edilen dairesel ve tam simetrik

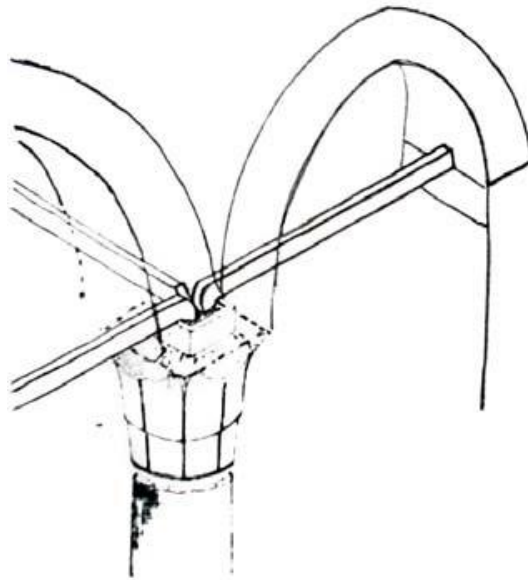
bir yapıya sahiptir. Kubbenin dairesel olması nedeniyle oturacağı alanın da dairesel olması gerekmektedir. Kubbenin oturacağı alanın kare veya dikdörtgen olması durumunda pendentif, tromp veya Türk üçgeni gibi geçiş elemanları kullanılmaktadır (Sesigür vd., 2007).



Şekil 3.15 Kubbede oluşan çekme ve basınç bölgeleri (Sesigür vd., 2007).

3.3.6. Gergi elemanı

Gergi elemanları kubbeler, kemerler ve tromplarda, kemer ya da kubbe davranışı nedeniyle oluşan yatay itkinin karşılanması amacıyla kullanılmaktadır. Tarihi yapılarda ahşap ve dövme demir gergiler yoğun olarak kullanılmıştır (Sesigür vd., 2007). Şekil 3.16'da kemerdeki gergi detayı görülmektedir.



Şekil 3.16 Kemerdeki gergi elemanlarının bağlantı detayı (Özer, 2006).

4. YIĞMA YAPILARDA YAPISAL DAVRANIŞ

Yığma yapıların dış yükler etkisindeki davranışını ve oluşan hasarlarını bilmek, yapıya en doğru şekilde güçlendirme uygulamasının yapılması açısından oldukça önemlidir. Bu bölümde dış etkiler ve dış etkiler altında yığma yapılarda yapısal davranıştan, oluşan hasarlardan ve güçlendirme yöntemlerinden bahsedilmektedir.

4.1. Yığma Yapılara Etkiyen Yükler

Yeni yapıların tasarımında veya mevcut yapıların performansının belirlenmesinde en önemli etken yapıya etkiyen yüklerin doğru bir şekilde saptanmasıdır. Belirlenen bu yüklere göre yapının taşıyıcı sisteminin değerlendirilmesi gerekmektedir.

4.1.1. Sabit (zati) yükler

Yapıda, taşıyıcı olan veya olmayan elemanların ağırlıklarından kaynaklanan yüklerdir. Bu yükler yapıda çok büyük değişiklikler olmadığı sürece aynı kalmaktadır. Bunlar döşeme, taşıyıcı duvar, sütun, kemer, tonoz, kubbe, kalıcı bölme duvarlar, tesisat, çatı, yer kaplamaları gibi yüklerdir.

Yığma yapılar özellikle taşıyıcı eleman kesitlerinin büyük olması sebebiyle zati ağırlıklar önemli bir yer tutmaktadır.

4.1.2. Hareketli yükler

Yapıyı zaman zaman etkileyen ve yapı içerisinde yer değiştiren yüklerdir. Genellikle mobilya, insan, asansör gibi dış etkiler hareketli yük sayılabilir. Fakat makine, ağır mobilya gibi özel durumlarda söz konusuysa bu yükler ayrıca değerlendirilmelidir ve yapıya bu etki düşünülerek hareketli yük uygulanmalıdır. Hesaplarda göz önüne alınacak olan hareketli yüklerinin minimum değerleri TS 498’de verilmiştir.

Tarihi yığma yapıların büyük kesitli taşıyıcı sistemlerinin zati ağırlıkları düşünüldüğünde genellikle hareketli yükler sabit yüklere göre oldukça düşük kalmaktadır.

4.1.3. Rüzgâr yükü

Yapılara etkiletilecek olan rüzgâr yükü TS 498’de verilen hesaplama şekline göre uygulanmalıdır. Rüzgâr, yapıya yatay olarak etkiyen, etkidiği yüzde basınç ters yüzde ise emme etkisi yaratan bir yüküdür. Rüzgâr yükü hafif ve çok katlı yapılarda çok ciddi etkiler yaratabilirken genellikle tek veya iki katlı olan yığma yapılarda çok fazla etkisi bulunmamaktadır.

4.1.4. Kar yükü

Yapıya etkiyen kar yükü yapının bulunduğu coğrafi bölgeye göre değişiklik göstermektedir. TS 498’e göre kar yükünün hesabında yapının bulunduğu bölge ve deniz seviyesinden yüksekliği etkilidir. Ülkemiz TS 498’e göre kar yükü dağılımı olarak dört bölgeye ayrılmıştır. Ayrıca kar yağmayan bölgelerde ise kar yükü sıfır olarak kabul edilebilmektedir.

4.1.5. Mesnet çökmesi

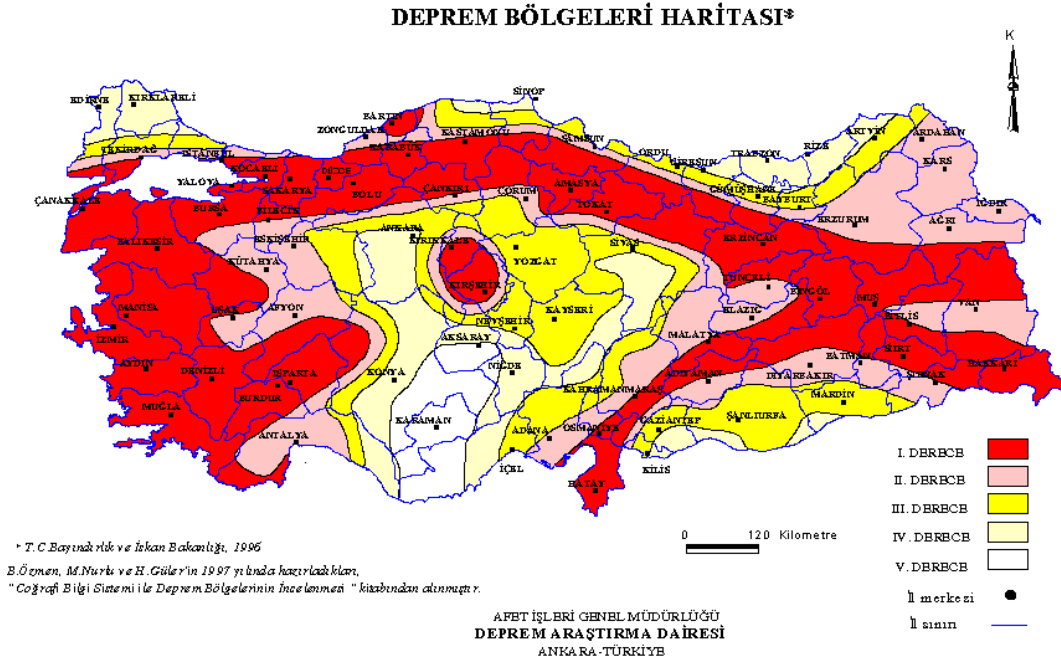
Yapılarda mesnet oturmalarının en önemli nedenleri yapının oturma alanında farklı zemin türleri olması veya taşıyıcı sistemdeki elemanlara yapısal yükün eş dağılamaması sonucu elemanlarda farklı oranlarda oturmaların oluşmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle geniş alanlara yayılmış olan yapıların bulunduğu yerlerde zemin yapısı iyi incelenmeli ve zaman içinde oluşacak oturmalar önceden tahmin edilerek gerekli önemler alınmalıdır. Tarihi yapılar çok uzun yıllar öncesinde yapıldığı için bu teknolojik imkân sahip olunamamasından ve yapı öz ağırlığının oldukça yüksek olması nedeniyle zaman içinde farklı oturmalar meydana gelmesi ve bu oturmalarla bağlı çatlakların yapılarda oluşması büyük olasılıktır. Farklı oturmalarla kaynaklı mesnet çökmesi ile ilgili görsel Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1 Zeminde farklı toprak cinsinden kaynaklanan oturma (Özer, 2006).

4.1.6. Deprem yükü

Deprem ne zaman olacağı önceden tahmin edilemeyen ve yer kabuğundaki kırılmalardan dolayı ani olarak ortaya çıkan titreşimler nedeniyle zeminin ivmesel olarak hareket etmesidir. Ülkemizin bulunduğu coğrafi konum nedeniyle oldukça etkin fay hatlarına sahiptir. Bu yüzden tasarladığımız veya güçlendirmesini yapacağımız yapılarda deprem etkisinin muhakkak göz önüne alınması önemlidir. 2007 yılında yürürlüğe giren Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmeliğe uyulması olası depremlerde yapının belirlenen ölçüde hasar alması açısından zorunludur. Deprem yönetmeliğinde ülkemiz olası deprem derecesi yönünden beş seviyeye ayrılmıştır. Birinci dereceden beşinci dereceye doğru depremsellik azalmaktadır. Şekil 4.2’de ülkemizin deprem haritası görülmektedir.



Şekil 4.2 Deprem bölgeleri haritası (AFAD, 2018).

Yer kabuğunda oluşan sismik dalgalar yapıya ulaştığında titreşim oluşturur ve yapı, bu titreşimlere karşı bir tepki oluşturur. Yapıda oluşan bu tepki kuvveti eylemsizlik (atalet) kuvvetidir ve bunun sonucunda yapıya gelen yük, dinamik yüküdür. Eylemsizlik kuvveti, deprem dalgasının yanı sıra yapının dinamik özelliklerine de bağlıdır. Yapının dinamik özellikleri ise yapının ağırlığına, yapı kütlelerinin yatay ve dikey düzlemlerdeki dağılımı, yapının genel geometrik formuna, yapı elemanlarının yapı sistemi içerisindeki düzenine ve malzeme özelliklerine göre farklılık gösterir. Bu nedenle mimari tasarım sırasında taşıyıcı

sistem ve yapının genel formu, deprem dayanımı göz önünde tutularak biçimlendirilmelidir (Özer, 2006).

Depremi tarihi yığma yapılarda etkisi incelendiğinde, yığma yapıların kütlelerinin büyük olması nedeniyle meydana gelen depremlerden oldukça fazla etkilenmektedir. Eski dönemlerde yapılan yapıların, günümüz teknolojisinde kullandığımız malzemelere sahip olmaması, bir kontrol mekanizması veya deprem yönetmeliği bulunmaması, yapılan işlerin genelde ustalar tarafından tecrübeye dayanarak inşa edilmesi bilimsel hesaplara dayandırılmaması ve zaman içinde yapılarda hasarlar oluşması nedeniyle meydana gelen depremlerde ciddi hasarlar alabilmektedirler.

Deprem ani ve hızla değişen bir etkisi olmasından dolayı dinamik bir yük türü ve hesaplarda yatay kuvvet halinde yapıya etkiletilmektedir. Yapıların deprem hesabında kullanılacak olan hesap yöntemleri deprem yönetmeliğinde belirtilmekte olup üç tanedir.

- 1) Eşdeğer deprem yükü yöntemi
- 2) Mod birleştirme yöntemi
- 3) Zaman tanım alanında hesap yöntemi

4.1.6.1. Eşdeğer deprem yükü yöntemi

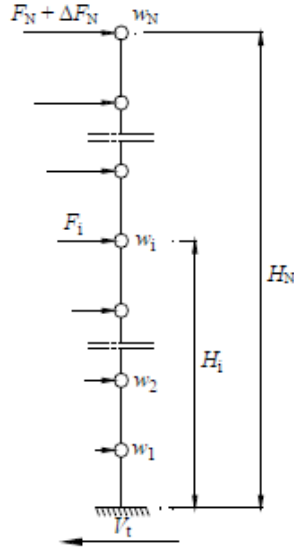
Yapıya deprem etkisinin uygulanmasında kullanılan yöntemlerden biri olan eşdeğer deprem yükü yöntemi belirli koşullarda uygulanabilmektedir (Çizelge 4.1). (H_N temel üst seviyesinden itibaren ölçülen toplam bina yüksekliğini ifade etmektedir.)

Çizelge 4.1 Eşdeğer deprem yükünün uygulanabileceği binalar (DBYBHY, 2007).

Deprem Bölgesi	Bina Türü	Toplam Yükseklik Sınırı
1 - 2	Her bir katta burulma düzensizliği katsayısının $\eta_{bi} \leq 2,0$ koşulunu sağladığı binalar.	$H_N \leq 25$ m
1 - 2	Her bir katta burulma düzensizliği katsayısının $\eta_{bi} \leq 2,0$ koşulunu sağladığı ve ayrıca B2 türü düzensizliğinin olmadığı binalar.	$H_N \leq 40$ m
3 - 4	Tüm binalar.	$H_N \leq 40$ m

Gerçekte dinamik bir etkiye sahip olan deprem, eşdeğer deprem yükü yöntemi ile yatay statik bir yüke dönüştürülerek yapıya etkiletilmesidir. Hesaplama detayları deprem yönetmeliğinde verilen eşdeğer statik deprem yükü hesabı için aşağıdaki adımlar izlenir:

- Döşemeler rijit kabul edilir ve ağırlık merkezleri belirlenir,
- Katların fiktif yükleri belirlenir,
- Fiktif yükler etkisinde katlarda oluşan deplasmanlar tespit edilir,
- Yapının birinci doğal salınım periyodu belirlenir,
- Taban kesme kuvveti hesaplanır,
- Katlara etkiyen eşdeğer deprem yükü dağıtılır (Şekil 4.3),
- Deprem yükleri yapıya her iki doğrultusunda +%5 ve -%5 eksantrisite ile uygulanır,
- A1 düzensizliği, B2 yumuşak kat, görel kat ötelemeleri ve ikinci mertebe etkileri kontrol edilir (İnşaat Mühendisleri Odası, 2017).



Şekil 4.3 Katlara etkiyen eşdeğer deprem yükünün belirlenmesi (DBYBHY, 2007).

Ayrıca kat ağırlığının belirlenmesinde kullanılan hareketli yük azaltma katsayısı Çizelge 4.2’de verilmiştir. Depremin meydana geldiği anda yapıda aynı anda tüm hareketli yüklerin bulunmayacağı göz önüne alınarak bu tür bir hareketli yükü azaltma yoluna gidilmiştir.

Çizelge 4.2 Hareketli yük azaltma katsayısı (DBYBHY, 2007).

Bina Kullanım Amacı	n
Depo, antrepo, vb.	0,80
Okul, öğrenci yurdu, spor tesisi, sinema, tiyatro, konser salonu, garaj, lokanta, mağaza, vb.	0,60
Konut, işyeri, otel, hastane, vb.	0,30

4.1.6.2. Mod birleştirme yöntemi

Dinamik bir analiz yöntemi olan mod birleştirme yöntemi maksimum iç kuvvetler ve yer değiştirmeler, binada yeterli sayıda doğal titreşim modunun her biri için hesaplanan maksimum katkıların istatistiksel olarak birleştirilmesiyle elde edilir.

Döşemelerin yatay düzlemde rijit diyafram olarak çalıştığı binalarda, her bir katta, birbirine dik doğrultularda iki yatay serbestlik derecesi ile kütle merkezinden geçen düşey eksen etrafındaki dönme serbestlik derecesi göz önüne alınmalıdır.

Hesaplamalarıyla ilgili detaylar 2007 Deprem Yönetmeliğinde verilen mod birleştirme yönteminin hesabında kullanılan işlem basamakları aşağıda verilmiştir.

- Kütle merkezi belirlenir,
- Kütle atalet momenti hesaplanır,
- Kat kütleleri, +%5 ve -%5 kaydırılmış kütle merkezinde tanımlandıktan sonra üç boyutu analiz yapılarak serbest titreşim periyodları ve modları bulunur,
- Etkin kütle oranları hesaplanır,
- Her bir mod için hesaplanan etkin kütle oranları toplamının 0,90'dan büyük olması şartı sağlanmasıyla, hesaba katılması gereken yeterli titreşim modu sayısı belirlenir,
- Spektral ivme değerleri belirlenir,
- Yapının spektrum analizi yapılarak deplasmanlar ve elemanlardaki iç kuvvet bileşenlerine her moddan gelen maksimum katkılar hesaplanır,
- Bir önceki adımda bulunan katkılar uygun bir birleştirme yöntemi ile birleştirilir (Karelerin Toplamının Kare Kökü Kuralı (SRSS) veya Tam Karesel Birleştirme Kuralı (CQC)),
- Hesaplanan iç kuvvet ve yer değiştirme büyüklükleri için alt sınır değerleri belirlenir,

- Göreli kat ötelenmeleri ve ikinci mertebe etkileri kontrol edilir (İnşaat Mühendisleri Odası, 2017).

4.1.6.3. Zaman tanım alanında hesap yöntemi

Bina ve bina türü yapıların zaman tanım alanında doğrusal elastik ya da doğrusal elastik olmayan deprem hesabı için, yapay yollarla üretilen, daha önce kaydedilmiş veya benzeştirilmiş deprem yer hareketleri kullanılabilir.

Yapay olarak oluşturulacak olan deprem yer hareketini için uyulması gereken üç kural, kaydedilmiş veya benzeştirilmiş deprem yer hareketleri ve zaman tanım alanında hesap ile ilgili bilgiler 2007 deprem yönetmeliğinde verilmektedir.

Belirli bir bölgedeki tasarım ivme spektrumuna uygun gerçek kuvvetli yer hareketi kaydının seçilebilmesi için kullanılan ölçütler jeolojik ve sismolojik şartları içermelidir. Depremin büyüklüğü, faylanma tipi, çalışma alanının faya olan mesafesi, yırtılma yönü, yerel zemin koşulları ve kaydın spektral içeriği bu şartların en önemlilerini teşkil etmektedir (Fahjan, 2008).

Ayrıca zaman tanım alanında analizde seçilen deprem hareketi ve taşıyıcı sistemin davranışı için yapılan kabullerin geçerliliği oranında sonuçlar güvenilirdir. Ancak sistemin davranışı yapısal boyutlara bağlı olduğu için, projelendirmenin ilk aşamasında kullanılabilecek bir yöntem değildir (Ağcakoca ve Elmas, 2017).

4.1.7. Diğer yükler

Yukarıda belirtilen yükler dışında yapıya ısı değişiminden, toprak itkisinden, sıvı yükünden, buz yükünden, araçların geçişi ile oluşan titreşim yüklerinden bir veya birkaçı etkiyebilir. Bunların da yapıda oluşturacağı hasarlar dikkatli bir şekilde incelenmelidir.

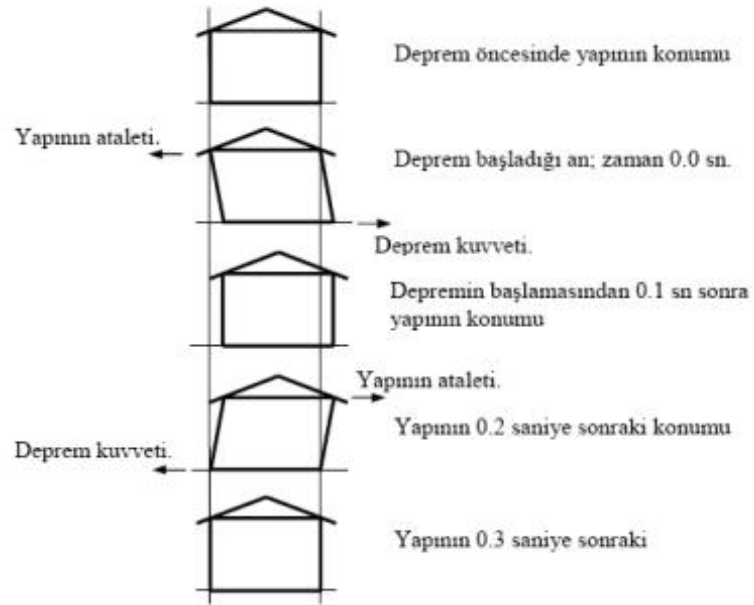
4.2. Yığma Yapılarda Dış Yükler Altında Yapısal Davranış

Yığma yapılar, yapıldığı dönemde genellikle ustaların bilgi ve beceriyle inşa edilmiştir. Taşıyıcı elemanları incelendiğinde kalın beden duvarları ve mermer sütunların üzerinin tonoz, kubbe gibi hem taşıyıcı hem de örtü elemanlarıyla geçildiği görülmektedir. Bu sistemin çalışma prensibi tamamen düşey basınç kuvvetlerinin karşılanması üzerinedir. Büyük dinamik etkiler yaratan deprem gibi

yükler altında yapıda oluşacak olan çekme gerilmeleri yığma yapının taşıyıcı sisteminde ciddi hasarlar meydana gelmesine neden olabilir.

Yığma yapılarda genellikle yüksek basınç dayanımına düşük çekme dayanımına sahip taş ve tuğla malzemesi kullanılırken aralarında bağlayıcı olarak kullanılan harç ise düşük kayma dayanımına sahiptir. Ayrıca taş/tuğla ve aradaki bağlayıcı malzeme arasındaki aderansın kolay yitirilmesi nedeniyle çekme gerilmeleri altında kolay dağılan, parçalanabilen veya yıkılabilen yapılardır.

Yığma yapıların ağır ve rijit yapılar ve ülkemizin deprem kuşağında olduğu göz önüne alındığında deprem etkisinin özellikle yığma yapılarda incelenmesi gerekmektedir. Şekil 4.4’de yığma yapının deprem altındaki davranışı benzeşim yoluyla görülmektedir. Ayrıca yapıda zaman içinde gerçekleşen farklı zemin oturması sonucu da yapılarda ciddi ayrışmalar veya çatlaklar meydana gelmektedir.



Şekil 4.4 Yığma yapının deprem davranışı (Korkmaz vd., 2014).

4.3. Yığma Yapılarda Meydana Gelen Hasarlar

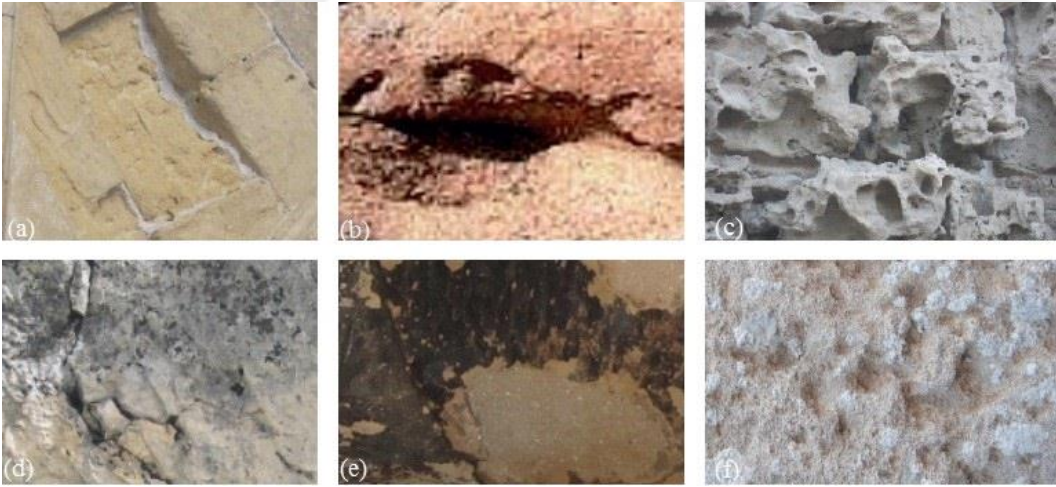
Bölüm 4.1’de bahsedilen etkiler sebebiyle yığma yapılarda zaman içinde farklı hasarlar meydana gelmektedir. Bu hasarlar malzeme ve yapısal hasarlar olmak üzere iki grupta incelenebilir.

4.3.1. Malzeme hasarları

Yağma yapılarında sıklıkla kullanılan harç, tuğla, taş ve ahşap malzemelerinde zaman içinde farklı nedenlerle farklı hasarlar meydana gelmektedir. Bu bölümde bahsedilen hasarlar Tarihi Yapılar İçin Deprem Riskleri Yönetimi Kılavuzundan (2018) alınmıştır.

Taş malzemesinde meydana gelen hasarlar; yüzey kaybı, parça kopması, oyuklanma, çatlak, kavlanma, yapraklama, yüzey kirliliği, kabuk oluşumu, çiçeklenme, şekerlenme, patina, renk değişimi, aşınma, bakterilenme, yosunlanma, mantarlanma ve likenlenmedir. Şekil 4.5’de taş malzemesinde oluşan hasarlar görülmektedir.

Tuğla malzemesinde de genel olarak taş malzemesine benzer hasarlar meydana gelmektedir. Tuğla malzemesi gözenekli ve rijit bir yapıya sahiptir. Tuğlada hasara neden olan en önemli etkenler malzemenin suyla teması ve yapısındaki boşluk oranıdır. Bu da donma-çözünme gibi atmosferik etkiler altında tuğla malzemesinde ciddi hasarların meydana gelmesine neden olur.



Şekil 4.5 Taş malzemesinde oluşan hasarlar a) Yüzey kaybı b) Parça kopması c) Oyuklanma d) Çatlak e) Kabuk oluşumu f) Çiçeklenme (Tarihi Yapılar İçin Deprem Riskleri Yönetimi Kılavuzu, 2018).

Harç malzemesi farklı türdeki malzemelerin belli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Bu yüzden içinde bulunan agrega cinsi ve doluluğu, bağlayıcının cinsi, karışım oranları ve işlenebilirliği harcın kalitesini etkilemektedir. Harçta meydana gelen hasarlar harç içerisinde kullanılan malzemelerin olumsuz yanlarının zaman içinde ortaya çıkmasıyla oluşmaktadır. Örneğin, asitli, sülfatlı, klorürlü sular

zaman içinde harcın içindeki kirece etki ederek harçta hasar meydana gelmesine neden olur.

Ahşap malzemesinde de zaman içinde fiziksel, kimyasal, biyolojik veya insan kaynaklı bozulmalar meydana gelebilmektedir.

- **Fiziksel bozulmalar:** Yağış, sıcaklık, nem gibi atmosferik etkiler sonucunda ahşapta boyutsal değişim, yıpranma, renk değişimi gibi bozulmalar meydana gelmektedir (Şekil 4.6).
- **Kimyasal bozulmalar:** Kuvvetli asitler ve bazlar, UV ışınları, korozyon ve yangın gibi etkiler sonucu ahşapta kimyasal değişimin nedenleridir.
- **Biyolojik bozulmalar:** Bakteriler, mantarlar, böcekler, kuşlar, deniz canlıları ahşapta biyolojik bozulmaya sebep vererek ahşabı çürütür. Ahşapta rutubet ve ağır çürüklük kokusu, ahşabın yüzeyinde buruşmalar, dayanımını yitirmesi, renginin değişmesi gibi bozulmalar meydana gelmektedir.
- **İnsan etkileri:** Hatalı onarım, yapıya ilave yükler eklenmesi, yapılar terk edilerek bakımsız bırakılması gibi etkenler yüzünden ahşapta bozulmalar oluşmaktadır.



Şekil 4.6 Atmosfer olayları sonucu ahşapta oluşan bozulma (Tarihi Yapılar İçin Deprem Riskleri Yönetimi Kılavuzu, 2018).

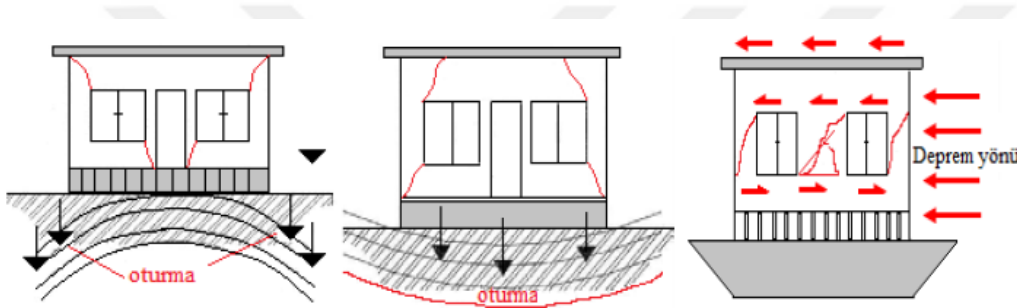
4.3.2. Yapısal hasarlar

Yığma yapılarda taşıyıcı sistem elemanları olan duvar, kubbe, kemer ve tonozda genellikle dış etkenler sebebiyle zamanla hasarlar meydana gelmektedir.

Taşıyıcı yığma duvarlarda meydana gelen hasarlar:

Taşıyıcı yığma duvarlar basınç kuvvetleri karşısında oldukça dirençli olmasına karşın çekme dayanımları çok düşüktür. Bu yüzden dış etkiler sonucunda duvarın çekme kapasitesinin aşılması durumunda duvarda çatlaklar oluşmaya başlar. Çatlakların ilerlemesi sonucu duvarlarda yıkılmalar veya taşıma kapasitesinde düşüşler meydana gelir.

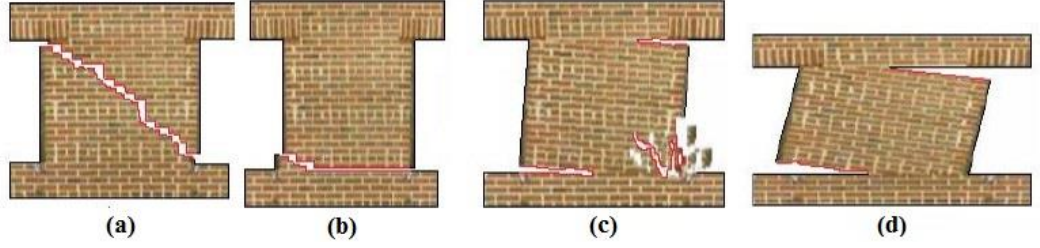
Yapıda neden kaynaklı hasarların oluştuğunu anlamının en iyi yolu duvarlarda meydana gelen çatlakların incelenmesidir. Şekil 4.7’de farklı zemin oturmalarında veya deprem etkisinde yapıda ne tür çatlakların oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.7 Farklı oturmalar ve deprem etkisinde yapıda oluşan çatlaklar (Döndüren vd., 2017).

Deprem etkisindeki yığma yapılarda, genellikle duvarların düzlem içinde kesme çatlaklarının oluşması, düzlem dışına devrilmesi, duvarların köşelerden ayrılması veya döşemelerin duvarlardan ayrılması şeklinde hasarlar oluşur (Döndüren vd., 2017).

Duvar düzlemi boyunca etkiyen kuvvetler duvar düzlemi doğrultusundaki sürtünme kuvvetleri tarafından karşılanmaktadır. Bu esnada oluşan çatlaklar başlangıçta yapı için çok ciddi sorun teşkil etmemektedir. Bu olayın birçok kez tekrarlanması sonucunda sürtünme kuvveti buna karşı koyamaz hale gelmektedir ve yapıdaki yer değiştirmeler artmaya, rijitlik ise azalmaya başlamaktadır (Arun, 2005). Şekil 4.8’de paralel yükler altında yığma duvarlarda kırılma biçimleri görülmektedir. Harç dayanımı tuğla dayanımından yüksek tuğlaları da kesen çatlaklar (Şekil 4.8a), harç dayanımı tuğla dayanımından küçük derzlerden geçen çatlaklar (kayma) (Şekil 4.8b), duvar topuklarındaki ezilmeler (Şekil 4.8c), taşıyıcı duvarların döşemelerden ayrılarak sallanması (Şekil 4.8d) gösterilmektedir (Döndüren vd., 2017).



Şekil 4.8 Yatay derzlere paralel yükler altında yığma duvarlarda kırılma biçimleri (Döndüren vd., 2017).

Yığma duvarların yıkılmasına neden olabilecek en büyük tehlike duvarda düzlem dışı yer değiştirmelerin meydana gelmesidir. Bu yüzden duvarın kalınlığı ve narınlığı (yükseklik/kalınlık) önemlidir. Duvar yüksekliğinin tabandaki duvar kalınlığına oranının 8 katını geçmediği durumlarda duvarların depreme karşı daha iyi davrandığı görülmüştür (Arun, 2005).

Kemer, kubbe ve tonozlarda meydana gelen hasarlar:

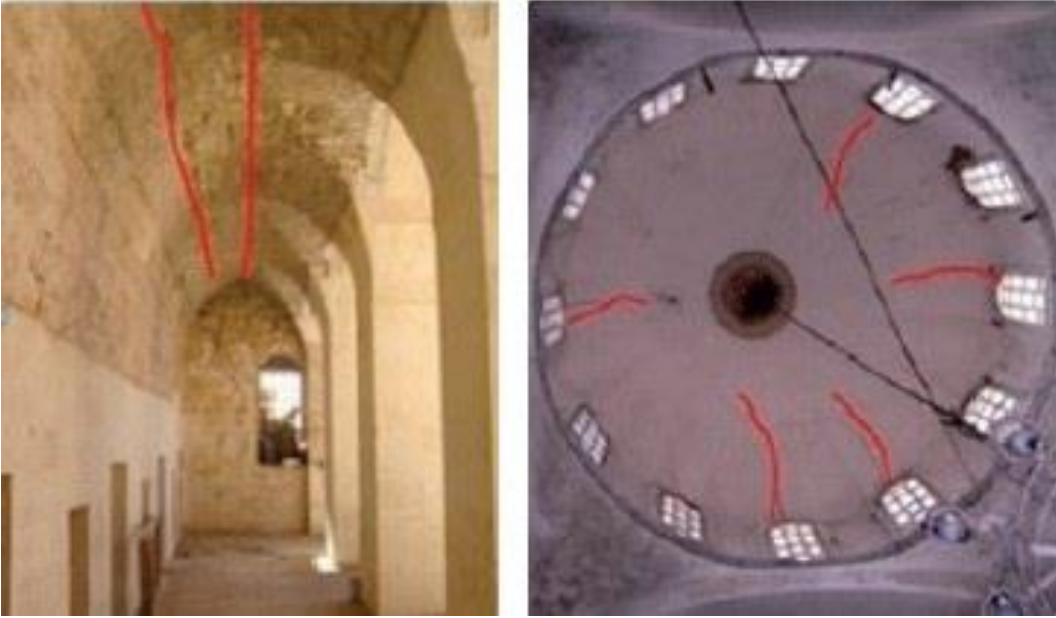
Kemerlerde düşey kuvvetlerin artması iç halka ve dış halka arasında çatlakların oluşumuna neden olabilir veya hafifletme kemerinin altında kalan duvar boşluğu çevresinde çatlaklar oluşabilir, parçalar gevşeyebilir veya düşebilir (Şekil 4.9).

Çekme gerilmesi oluşan tonozlarda, çekme bölgesindeki kalınlaştırma (ağırlık) azaldığında çekme bölgesi aktif hale gelir ve mesnetleri dışı doğru iterek mesnetlere paralel çatlaklar oluşturur (Şekil 4.10).

Çekme gerilmesi oluşan kubbelerde, çekme bölgesi aktif hale geldiğinde mesnetlere dik çatlaklar oluşturur. Kubbe çatlakları yüzeyde basınca çalışan kemer ya da kemerler sisteminden oluşuyorsa düşey kuvvetlere güvenli bir şekilde karşı koyar (Şekil 4.10) (Tarihi Yapılar İçin Deprem Riskleri Yönetimi Kılavuzu, 2018).



Şekil 4.9 Kemerde oluşan çatlaklar (Tarihi Yapılar İçin Deprem Riskleri Yönetimi Kılavuzu, 2018).



Şekil 4.10 Tonoz ve kubbede oluşan çatlaklar (Tarihi Yapılar İçin Deprem Riskleri Yönetimi Kılavuzu, 2018).

4.4. Yığma Yapılarda Güçlendirme

Kültürel varlığımız yansıtan tarihi yapıların yok olmaması ve gelecek kuşaklara miras olarak bırakılması çok önemlidir. Bu sebeple tarihi dokularına zarar vermeden ve geri dönülebilir şekilde tarihi yapılarda güçlendirme yapılması gerekmektedir.

Tarihi yapılarda gelişen teknolojinin etkisiyle de birçok güçlendirme yöntemi mevcuttur. Bu güçlendirme yöntemleri:

- Sıvaların, derzlerin veya duvarların onarılması veya yenilenmesi
- Çatlakların onarılması
- Zeminin iyileştirmesi
- Temellerin güçlendirilmesi
- Çelik eleman veya profillerle güçlendirme yapılması
- Betonarme mantolama yapılması
- Sıva, taş gibi mevcut malzemelerin dış etkilere karşı korunması
- FRP ile güçlendirme olarak sıralanabilir.

Uygulanacak olan güçlendirme yöntemi yapının durumuna, hasarın konumuna ve nedenlerine, yapılan hesaplara, uygulanabilirliğine ve ekonomikliğine bakılarak karar verilmesi gerekmektedir.

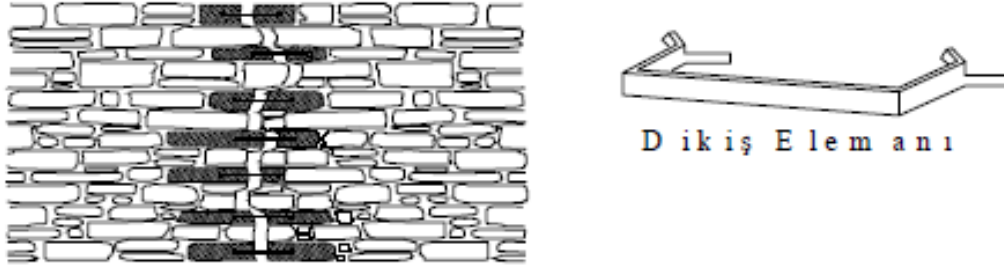
Tarihi yığma yapılarda uygulanan güçlendirme yöntemlerinden bazı örnekler verilmiştir.

Yığma yapılarda ana taşıyıcı eleman olan duvarlarda meydana gelen çatlakların giderilmesi açısından enjeksiyon yöntemi kullanılabilir. Yapının özgün duvar malzemesi ile uyumlu olmak üzere ince ve akışkan harcın sabit basınç altında çatlağın içine sıkılmasıyla uygulanır. Şekil 4.11’de enjeksiyon uygulamasının aşamaları görülmektedir.



Şekil 4.11 a) Matkapla enjeksiyon yapılacak deliklerin açılması b) Hava ile deliklerin ve çatlakların temizlenmesi c) Temizlenen bölgelerin su ile ıslatılması d) Enjeksiyonun uygulanması (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2018).

Duvardaki düşey çatlakların giderilmesi için uygulanabilecek bir diğer yöntem ise çelik dikiş elemanı veya çelik çubuklarla güçlendirme yapılmasıdır. Çatlak olan bölgenin yanlarında dayanımını yitirmiş malzemenin alınarak boşalan alana dikiş elemanı veya çelik çubukların yerleştirilir ve o alan grout harcı veya beton dökülerek kapatılır. Şekil 4.12’de dikiş elemanı ve duvarda uygulanış biçimi görülmektedir.



Şekil 4.12 Dikiş elemanı ve uygulanış biçimi (Mahrebel, 2006).

Yığma duvarlarda bir diğer güçlendirme yöntemi de duvarın çelik hasırla sarılması ve üzerine beton püskürtülerek yapının taşıyıcı duvarlarının güçlendirilmesidir (Şekil 4.13).



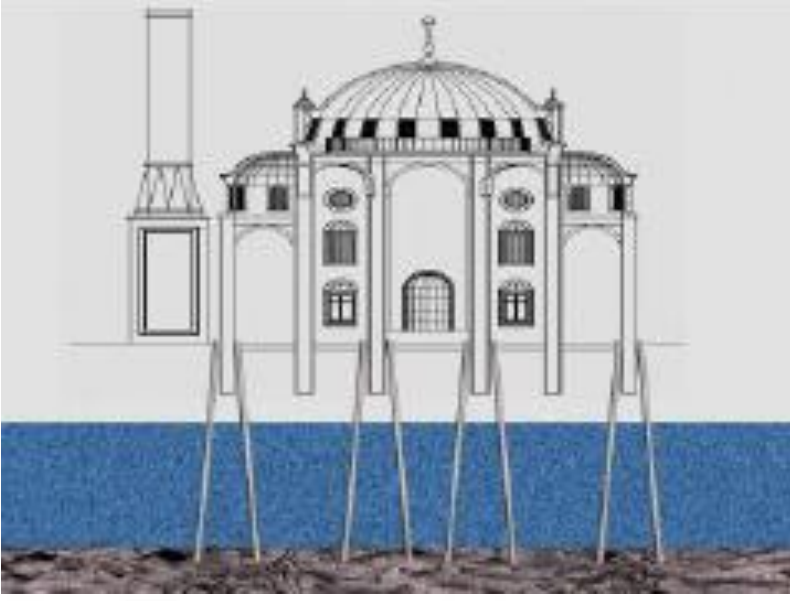
Şekil 4.13 Yığma duvarın güçlendirilmesi (Zemin Araştırma Merkezi LTD., 2018).

Başka bir güçlendirme yöntemi olan ve oldukça yüksek çekme dayanımına sahip olan FRP (Fiber Reinforced Polymers – Lif Takviyeli Polimer) malzemesi kolay uygulanabilir, hafif bir malzeme olması ve korozyona karşıda dirençli olması nedeniyle tarihi yapılarda güçlendirme elemanı olarak kullanılması oldukça uygun bir malzemedir. Fakat FRP ile ilgili yapılacak olan uygulamalarda geri dönülebilir olup olmayacağı konusunda dikkatli olunmalıdır. Farklı şekillerde üretimi ve uygulaması olan FRP malzemesinin Şekil 4.14’de uygulama örnekleri görülmektedir.



Şekil 4.14 FRP ile güçlendirme a) Izgaralarla b) Halatlarla c) Şeritlerle d) Şeritlerle (Değirmenci ve Sarıbiyık, 2015).

Yığma yapıların oldukça ağır ve geniş alanlara inşa edilen yapılar olduğu düşünüldüğünde zaman içerisinde zemindeki farklılıklardan dolayı yapının temellerinde farklı oturmalar meydana gelebilmektedir. Bu durum sünük davranış göstermeyen yığma yapılarda ciddi hasarlar meydana getirebilir. Bunun giderilebilmesi için zemin iyileştirmesi veya temellerin güçlendirilmesi yöntemleri uygulanabilir. Zemin iyileştirmesinde, jet-groud veya enjeksiyon yöntemleriyle zeminin taşıma kapasitesi arttırılabilir. Temellerde yapılacak olan iyileştirmeler ise yapının da durumu göz önünde bulundurularak temellerin genişletilmesi, derinleştirilmesi veya temelin altına yapılacak kazıklarla yüklerin daha sağlıklı dağılması sağlanabilir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 Temel zeminin güçlendirilmesi (Chamaky, 2014).

Çelik profillerle de yığma yapılarda güçlendirme yapılabilmektedir. Şekil 4.16'da Eminönü – Sirkeci Eski PTT Binası karşısında ki tarihi yapıda duvarların mevcut yükleri sağlıklı bir şekilde taşıyamaması sebebiyle çelik profillerle güçlendirme yapılarak yapıdaki yükler zemine aktarılmıştır (Chamaky, 2014).



Şekil 4.16 Çelik profillerle güçlendirme (Chamaky, 2014).

5. YIĞMA YAPILARDA STATİK VE DİNAMİK ANALİZ

Yığma yapıların bilgisayar ortamında modellenmesi oldukça zor bir işlemdir. Kullanılacak olan modelleme yöntemi, seçilecek olan parametre değerleri, yapı üzerinde uygulanacak olan analiz türleri gibi birçok konunun doğru bir şekilde değerlendirilmesi yapılarak gerçek sistem en doğru şekilde temsil edilmelidir.

5.1. Türk Deprem Yönetmeliğine (2007) Göre Yığma Yapılar

2007 yılında yürürlüğe giren Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmeliğin 5. Bölümünde bahsedilen Yığma Yapılar İçin Depreme Dayanaklı Tasarım Kurallarına göre, hesaplanacak düşey yükler ve deprem hesap yüklerinin etkisi altında oluşacak basınç ve kayma gerilmelerinin, duvarda kullanılan yığma duvar cinsine göre izin verilen basınç ve kayma gerilmelerini aşmadığı gösterilecektir.

Duvarlarda kesme dayanımı duvarlarda var olan düşey gerilmelere de bağlı olduğu için yığma yapıda öncelikle düşey gerilmeler hesaplanmalıdır. Ayrıca duvarlarda oluşan basınç gerilmelerinin yığma duvar cinsine göre izin verilen gerilmeleri aşmaması gerekmektedir. Bu hesapta duvarlardan ve döşemelerden gelen yükler göz önüne alınmalıdır. Duvardaki kapı ve pencere boşluk enkesitleri kadar azaltılmış duvar enkesit alanına bölünerek bulunacak gerilme, yığma duvar cinsine göre verilen basınç gerilmeleri sınırını aşmayacaktır.

Duvarlarda basınç emniyet gerilmeleri çeşitli yöntemlerle hesaplanabilmektedir:

- Duvar parçacıkları üzerinde yapılan basınç dayanım deneylerinden hesaplanan duvar dayanımının 0,25'i duvar basınç emniyet gerilmesi olarak alınabilir.
- Duvarlarda kullanılan harç sınıfına ve duvar malzemesinin TS-2510'da verilen ortalama serbest basınç dayanımına bağlı olarak, emniyet gerilmesi Çizelge 5.1'den alınabilir.
- Duvar parçası dayanım deneyi yapılmamışsa duvarda kullanılan bloğun deneysel olarak elde edilen serbest basınç dayanımının 0,50'si f_d duvar basınç dayanımı ve bu dayanımın 0,25'i f_{em} duvar basınç emniyet gerilmesi olarak alınabilir.

- Duvarda kullanılan kâgir birimin basınç dayanımı belli değilse veya duvar dayanım deneyi yapılmamışsa duvarda kullanılan kâgir birim basınç emniyet gerilmesi Çizelge 5.2’den alınabilir.

Çizelge 5.1 Duvar malzemesinin serbest basınç dayanımına ve harç sınıfına bağlı duvar basınç emniyet gerilmeleri (DBYBHY, 2007).

Duvar Malzemesi Ortalama Serbest Basınç Dayanımı (MPa)	Duvarda Kullanılan Harç Sınıfı (MPa)				
	A (15)	B (11)	C (5)	D (2)	E (2)
25	1,8	1,4	1,2	1,0	0,8
16	1,4	1,2	1,0	0,8	0,7
11	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6
7	0,8	0,7	0,7	0,6	0,5
5	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4

Çizelge 5.2 Serbest basınç dayanımı bilinmeyen duvarların basınç emniyet gerilmeleri (DBYBHY, 2007).

Duvarda Kullanılan Kâgir Birim Cinsi ve Harç	Duvar Basınç Emniyet Gerilmesi f_{em} (MPa)
Düşey delikli blok tuğla (delik oranı %35’den az, çimento takviyeli kireç harcı ile)	1,0
Düşey delikli blok tuğla (delik oranı %35 – 45 arasında, çimento takviyeli kireç harcı ile)	0,8
Düşey delikli blok tuğla (delik oranı %45’den fazla, çimento takviyeli kireç harcı ile)	0,5
Dolu blok tuğla veya harman tuğlası (çimento takviyeli kireç harcı ile)	0,8
Taş duvar (çimento takviyeli kireç harcı ile)	0,3
Gazbeton (tutkal ile)	0,6
Dolu beton briket (çimento harcı ile)	0,8

Duvar basınç emniyet gerilmeleri duvarın narinlik oranına göre Çizelge 5.3’de verilen oranlarda azaltılmalıdır.

Çizelge 5.3 Narinlik oranına göre emniyet gerilmeleri için azaltma katsayıları (DBYBHY, 2007).

Narinlik Oranı	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Azaltma Katsayısı	1,0	0,95	0,89	0,84	0,78	0,73	0,67	0,62	0,56	0,51

Duvara gelen deprem kuvveti duvar yatay enkesit alanına bölünerek duvarda oluşan kayma gerilmesi hesaplanacak ve “ $\tau_{em} = \tau_o + \mu\sigma$ ” denkleminde bulunacak duvar kayma emniyet gerilmesi τ_{em} ile karşılaştırılacaktır. τ_{em} = duvar kayma emniyet gerilmesi (MPa), τ_o = duvar çatlama emniyet gerilmesi (MPa), μ =

sürtünme katsayısı (0,5 olarak alınabilir), σ ise hesaplanmış olan duvar düşey gerilmesidir (MPa). τ_o değeri Çizelge 5.4'den alınacaktır.

Duvar yapımında kullanılan kâgir birimlerin elastisite modülü (E_d) verilen “ $E_d = 200 \times f_d$ ” formülü ile hesaplanacaktır.

Çizelge 5.4 Duvarların çatlama emniyet gerilmesi (τ_o) (DBYBHY, 2007).

Duvarda Kullanılan Kâgir Birim Cinsi ve Harç	Duvar Çatlama Emniyet Gerilmesi τ_o (MPa)
Düşey delikli blok tuğla (delik oranı %35'den az, çimento takviyeli kireç harcı ile)	0,25
Düşey delikli blok tuğla (delik oranı %35'den fazla, çimento takviyeli kireç harcı ile)	0,12
Dolu blok tuğla veya harman tuğlası (çimento takviyeli kireç harcı ile)	0,15
Taş duvar (çimento takviyeli kireç harcı ile)	0,10
Gazbeton (tutkal ile)	0,15
Dolu beton briket (çimento harcı ile)	0,20

5.2. Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu (Taslak)

Tarihi yapıların varlığını tehdit eden deprem risklerinin yönetimi için deprem öncesi risk analizi, zarar azaltma ve hazırlık, olay sırasında acil müdahale ve olay sonrasında iyileştirme aşamasında hasar tespiti, ara müdahale ve kapsamlı müdahale çalışmalarını stratejik, taktik ve operasyonel seviyede tanımlanarak oluşturulan teknik bir belgedir.

Afet öncesinde, tarihi yapıların restorasyonlarında taşıyıcı sistemin deprem güvenliğinin belirlenmesi, yapısal sorunlarının doğru tespiti için; yapılacak inceleme ve araştırmaların tanımlanması, deprem ve düşey yükler altında hesaplama temel ilkeleri belirlenmesi, buna bağlı olarak çıkan sonuçlara göre yapıya koruma ilkeleri doğrultusunda doğru müdahalenin projelendirilip uygulanmasının sağlanması hedeflenmektedir. Afet sonrasında ise bu kılavuzda tanımlanan geçici acil müdahale yöntemlerinin uygulanmasıyla kültürel miras yapılarındaki hasarın ve/veya göçmenin engellenmesi hedeflenmektedir.

Bu kılavuz temel olarak bütün afetleri içermesine karşılık özellikle deprem afetinin ülkemizde sıklıkla yaşanması nedeniyle depreme yönelik teknik bilgiler içermektedir.

5.3. Tarihi Yapının İdealleştirilmesi

Mevcut tarihi yapıların modellenmesi sırasında maliyet, süre gibi konulardan tasarruf edebilmek amacıyla bir takım idealleştirmeler ve düzeltmeler yapılmaktadır.

5.3.1. Geometrinin idealleştirilmesi

Tarihi yapılar oldukça karmaşık yapılar olması ve taşıyıcı sistem üzerinde yapılan mimari çalışmalar veya taşıyıcı sistem ile dekoratif elamanın aynı olması nedeniyle modellenmesi oldukça zor yapılardır. Yapıyı taşıyan sistemin doğru şekilde oluşturulmasını sağlamak amacıyla modelleme yapılırken yapıda bazı sadeleştirilmelere gidilmesi gerekmektedir. Geometride yapılan bu idealleştirme sırasında bazı hususlara dikkat edilmelidir:

- Mümkün olduğunca basit modellerle oluşturulmalıdır.
- 3 boyutlu elemanlar yerine daha hızlı analiz alınabilen 2 boyutlu elemanlar tercih edilebilir.
- Kabuk elemanların kalınlık boyunca gerilme değişimi oluşmaması sebebiyle kullanımında dikkat edilmelidir.
- Yapı elemanlarının gerçek konumlarına uygun, davranışını etkilemeyecek, geometrik idealleştirmeler yapılmalıdır.
- Yapı davranışını en iyi temsil edebilecek model seçilmelidir (Dabanlı, 2008).

5.3.2. Malzemenin idealleştirilmesi

Malzeme davranışı gerilme-şekil değiştirme bağıntısını ifade eden bir matematik model ile tanımlanır. Malzemeye ait matematik modeller, uygun bir analiz modelinin kurulmasında en önemli kısmı teşkil eder. Bu matematik modele ‘esas model’ adı verilir. Esas model, gerçek davranışın basitleştirilmiş bir şekilde temsil edilmesidir. Bir yapının gerçek davranışını anlamak için karmaşık ve detaylı kurulacak malzeme modelleri kullanılabilir. Fakat bu modellerin göçme yükünü yakınsayan sonuçlar vermediği tespit edilmiştir. Günümüzün yaygın olarak kullanılan yaklaşımı ise, lineer elastik davranıştan, yapının gerçek davranışını tahmin etme kapasitesine sahip sağlam sayısal araçların kullanılmasıdır. Bu araçların kullanılması, tamamen güç tükenmesine ulaşmadan önce meydana gelecek olan çatlak ve kırılmaların tespitiyle, kullanılabilirlik seviyesi, göçme

mekanizmaları ve yapısal güvenliğin değerlendirilmesine imkân tanımaktadır (Dabanlı, 2008).

Yığma yapılarda kullanılan malzemelerin homojen olmaması ve farklı tip malzemelerin bir arada kullanılmasıyla ortaya çıkan yığma yapıların mekanik özelliklerinin tespit edilmesi kolay değildir. Yığma yapıların mekanik özellikleriyle ilgili aşağıdaki maddeler söylenebilir.

- Mekanik davranış homojen değildir.
- Malzeme izotropik değildir.
- Uzun vadeli yükler için çekme mukavemeti sıfır kabul edilir.
- Basınç gerilmeleri altında davranışı gevrektiler.
- Kayma gerilmeleri altında belli oranda süneklik gösterir.
- Elemanların gerçek rijitlik hesabında çatlaklar ve elemanlar arası bağlar dikkate alınmalıdır.
- Mekanik davranış lineer değildir ve sıklıkla elastik değildir (Dabanlı, 2008).

Yığma yapılarda malzeme idealize edilirken bazı basitleştirmeler yapılabilir:

- Malzeme homojen kabul edilebilir.
- Yapının lineer-elastik davranış gösterdiği kabul edilebilir. Zati yükler altında yığma yapılarda oluşan gerilmelerde bu kabul oldukça doğru sonuç vermesine karşın çekme gerilmelerinde çatlaklar oluşabilmektedir.
- Yığma yapıların çekme mukavemeti taşıdığı da kabul edilebilir. Çekme gerilmesi oluşan bölgeleri tespit etmek bize yapıdaki olası çatlakların yerleri hakkında bilgi vermektedir. Ayrıca, çekme gerilmesi meydana gelen bölgedeki malzemeleri modelden çıkarmak suretiyle, lineer olmayan davranışın belirlenmesi de mümkündür.
- Doğrusal olmayan davranışı, yüksek gerilme seviyelerinde dikkate almak gerekir. Doğrusal olmayan (nonlineer) davranış genellikle Mohr-Cloumb veya Drucker-Prager kriteriyle modellenir (Dabanlı, 2008).

5.3.3. Farklı yapı malzemelerin homojenize edilmesi

Yığma yapıların modellenmesinde kullanılan makro modelleme yönteminde, harç ve taş/tuğladan oluşan yapının tek bir malzeme gibi modellenmesi yani yapının homejenleştirilmesi yapılmaktadır. Bu iki malzemenin tek bir malzeme gibi düşünülmesiyle kullanılacak olan elastisite modülü için denklem 5.1’de görülen formülü önermektedir (Lourenço vd., 2001).

$$E = \frac{t_m + t_u}{\frac{t_m}{E_m} + \frac{t_u}{E_u}} \times \rho \quad 5.1$$

Formülde t_m , t_u , E_m , E_u sembolleri sırasıyla, harç kalınlığını, tuğla yüksekliğini, harcın elastisite modülü, tuğlanın elastisite modülünü temsil etmektedir. ρ sembolü ise bir sabittir ve harç ile tuğlanın arasındaki aderansa göre değişmektedir. Genellikle 0,5 alınabilir.

Yığma sistemlerin basınç dayanımının belirlenmesi için Eurocode 6 (1996) denklem 5.2’de görülen formülü önermektedir.

$$f_k = K \times f_b^\alpha \times f_m^\beta \quad 5.2$$

f_b ; taş veya tuğlanın basınç mukavemetini (MPa), f_m ; harcın basınç mukavemetini ifade etmektedir. K , α ve β birer sabittir. K sabitinin değeri, yığma sistemin morfolojik yapısına göre 0,4 ile 0,6 arasında 0,05’lik farklarla değişen değerler alır. α ve β sabitleri için ise düzgün şekilli yığmalarda sırasıyla 0,7 ve 0,3, kaba örülmüş yığmalarda ise 0,65 ve 0,25 değerleri önerilmiştir. f_m için alınabilecek en büyük değer 20 MPa veya f_b değerinin iki katıdır (Ercan, 2010).

5.4. SAP2000 Bilgisayar Programı

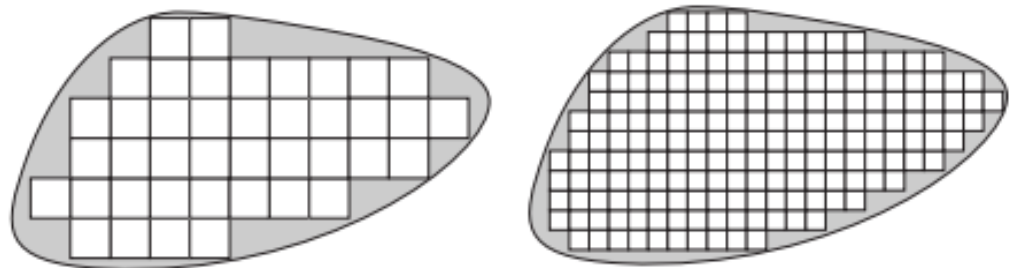
SAP2000, sonlu eleman yöntemiyle çalışan her türlü yapının üç boyutlu olarak modellenmesine imkân sağlayan, statik ve dinamik etkilerde yapının doğrusal veya doğrusal olmayan analizleri yapan, çözümleyen ve boyutlandıran yapısal analiz programıdır. Yapının tasarımı, analizlerinin kolaylığı ve genellikle gerçeğe yakın sonuçlar vermesi nedeniyle karayolu yapıları, endüstri yapıları, köprü yapıları, konut yapıları gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

5.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, uçak, köprü, manyetik akım, yapıların gerilme deformasyon analizleri gibi birçok mühendislik probleminde nümerik çözüm üreten bir yöntemdir. Karmaşık geometriye sahip olan yapıların daha basit geometrilere indirgenerek ve malzeme özelliklerinin bu oluşturulan elemanlara tanımlanmasıyla oluşturulan sistemdir. Yapıya etkiyen yükleme ve sınırlamalar da hesaba katılarak bu denklemler bir arada toplandığında bir denklem seti oluşturulur. Bu oluşturulan denklem setinin çözümünden elde edilen sonuç yaklaşık olarak ilk sistemin davranışını verir (Aktaş ve Teomete, 2004).

Yapı mühendisliğinde ise sonlu elemanlar yöntemi, yapıların 3 boyutlu statik ve dinamik analizlerine imkân tanıyan, doğrusal ve doğrusal olmayan çözümlemelerin yapılabilirdiği ve sonuçların sayısal veya grafik olarak görüntülenebildiği bir analiz yöntemidir. Zaman ve ekonomi yönünden tercih edilen bu yöntemde çubuk, kabuk, plak, solid gibi çeşitli yapı eleman modelleme yöntemlerini bir arada kullanmak mümkün olmaktadır (Dabanlı, 2008).

Sonlu elemanların birbirleriyle olan etkileşimi düğüm noktaları üzerinden gerçekleşmektedir. Bu yüzden eleman sayısı arttırmak yani düğüm noktası sayısını arttırmak bilinmeyen sayısını arttırarak işlemlerin daha fazla büyümesine neden olsa da hassasiyeti arttırması sebebiyle daha doğru sonuca gitmesi muhtemeldir. Ama sonlu elemanlarda sadece eleman sayısını arttırarak doğru sonucu elde etmemiz mümkün değildir. Bununla birlikte problemin çözümü için kullanılacak olan sonlu eleman tipi veya tipleri, oluşturulan sonlu eleman ağı gibi konulara dikkat edilmelidir. Şekil 5.1’de bir sistemin farklı boyutlarda sonlu elemanlara bölünmüş hali görülmektedir.



Şekil 5.1 Farklı boyutlarda sonlu elemanlarla tanımlanmış sistem (Hutton, 2004).

Modelleme konusunda oldukça kolaylıklar sağlaması nedeniyle yığma yapıların modellenmesinde sıkça kullanılan bir yöntem olan sonlu elemanlar yönteminin sağladığı kolaylıklar şöyle sıralanabilir:

- Eğriliği bulunan, düzgün olmayan geometriye sahip elemanlar ve amorf yapı elemanlarının kolaylıkla modellenebilir.
- Yapı istenilen boyutlardaki elemanlara bölünebilir. Önemli değişiklik beklenen yerlerde daha küçük elemanlar kullanılarak hassasiyet artırılırken aynı parçanın diğer bölgelerinde daha büyük elemanlar kullanılabilir.
- Aynı yapıda uygun bir sonlu eleman ağı kullanmak suretiyle farklı malzeme özelliklerinin kullanılmasına imkân sağlar.
- Farklı özelliklere sahip, farklı malzemelerden oluşan yapı elemanlarının birleştirilmesine olanak sağlar.
- Sınır şartlarını tanımlamak ve kontrol etmesi kolaydır.
- Sonlu eleman metodunun çok yönlülük ve esnekliği karmaşık yapılarda, sürekli ortam, alan ve diğer problemlerde sebep sonuç ilişkilerini hesaplamak için etkin bir şekilde kullanılabilir (Dabanlı, 2008).

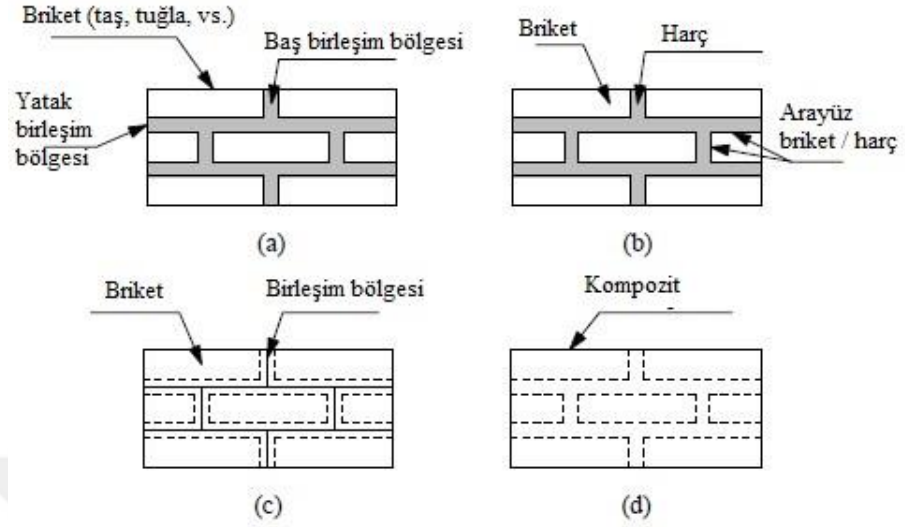
5.6. Yığma Yapıları Modelleme Yöntemleri

Bilgisayar kullanımının artması ile birlikte yığma yapıların nümerik olarak modellenmesi konusunda da gelişmeler olmuştur. Yığma yapıların modellenmesinde genellikle Lourenço'un (1996) önerdiği 3 tip modelleme yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemler:

- Detaylı Mikro modelleme
- Basitleştirilmiş mikro modelleme
- Makro modelleme

Mikro modellemede, yapıdaki harç ve tuğla/taş malzemesi ayrı ayrı modellenerek oluşturulmaktadır. Bu sayede her malzeme için kendine ait mekanik özellikler kullanılmaktadır. Basitleştirilmiş mikro modellemede, bir harç ve iki yığma blok harç ara yüzeyinden oluşmakta olan her bağlantı noktasında kütle yoğunlaştırması yapılmış ve ortalama ara yüzey çizgisinde meydana gelebileceği kabul edilmiştir. Makro modellemede, taş/tuğla ile harcın özelliklerinde

homojenleştirme yapılarak yığma duvar kompozit malzeme olarak düşünülmüştür (Ercan, 2010). Şekil 5.2’de yığma yapı modelleme türleri görülmektedir.



Şekil 5.2 Yığma yapıların modellenmesi a) Yığma yapı b) Detaylı mikro modelleme c) Basitleştirilmiş mikro modelleme d) makro modelleme (Lourenço, 1996).

Tarihi bir yapının modellenmesinde kullanılacak olan bu yöntemlerden hangisinin seçileceği; yapının büyüklüğü ve önemi, istenilen sonuçların hassasiyeti, maliyet, güvenli modelleme gibi etkenler göz önünde bulundurularak seçilmektedir. Mikro modelleme hassas sonuçlar verirken oldukça zaman alan ve maliyetli bir iş iken makro modelleme ise daha hızlı ve kolaydır ama daha kaba bir hesap vermektedir. Çizelge 5.5’de makro ve mikro modelin kıyaslaması görülmektedir (Ercan, 2010).

Çizelge 5.5 Mikro ve makro modelin kıyaslanması (Ercan, 2010).

Kriter	Mikro Model	Makro Model
Süre - maliyet	Yüksek	Düşük
Kullanım yeri	Laboratuvar boyutlu	Büyük boyutlu
Hassasiyet	Çok	Az
Modelin oluşturulması	Zor	Kolay
Sonuçların detayları	Detaylı	Az detaylı
Kırılma mekanizması	Detaylı	Az detaylı
Yükleme	Statik	Dinamik

5.6.1. Mikro modelleme

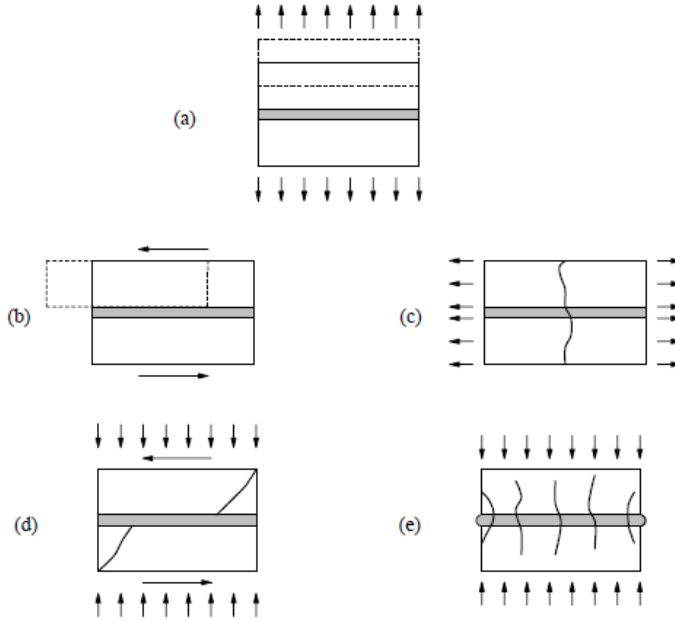
Yığma yapıyı oluşturan elemanların (taş, tuğla, harç vb.) ayrı ayrı modellenmesiyle yapının oluşturulmasına mikro modelleme denir. Mikro

modellemede, her malzemeye ait elastisite modülü, yoğunluk ve poisson oranı vardır. Ayrıca malzemelerin elastik olmayan davranışları göz önüne alınmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında her bir elemanın ayrı ayrı modellenmesi ve her biri için ayrı ayrı parametrelerin belirlenmesi oldukça zor bir işlem olması nedeniyle pratik bir yöntem değildir.

Lourenço'un mikro modelinde yığma yapının modellenmesinde göçme mekanizmasının tayini en önemli unsurlardan biridir. Laourenço göçme mekanizmasını:

- Bağlantıların çatlaması,
- Düşük normal gerilme değerlerinde bağlantılarda kayma,
- Direkt çekme gerilmesinde birim ünitelerde çatlama,
- Bağlantılarda sürtünme yaratacak seviyedeki normal gerilme altında, birim ünitelerde diyagonal çekme çatlakları,
- Yüksek normal gerilme altında harç dilatasyonu yüzünden çekme etkisindeki birimlerin ayrılması (Aktaş ve Teomete, 2004).

Tanımlanan bu beş madde ile ilgili görseller Şekil 5.3'de görülmektedir.



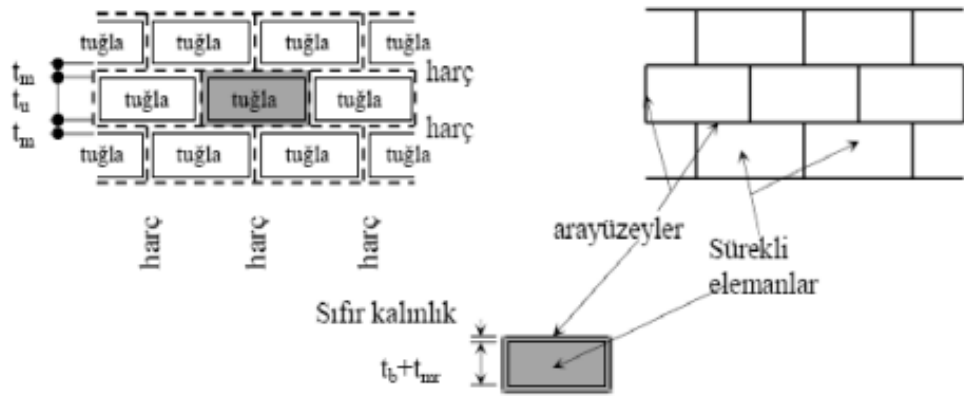
Şekil 5.3 Kırılma mekanizması a) Bağlantı çekme çatlağı b) Bağlantı kayması c) Birim direkt çekme çatlaması d) Birim diyagonal çekme çatlağı e) Yığma ezilmesi (Lourenço, 1996).

5.6.2. Basitleştirilmiş mikro model

Yığma yapıların lineer olmayan analizlerinde kullanılan bu modelleme tekniğinde, tuğla/taş ile harç arasında yer alan ara yüzey bölgesi, sonlu elemanlarla diğer kısımlar ise rijit veya şekil değiştirebilen ayırık elemanlarla modellenmektedir. Rijit elemanlar, bir tuğla/taş ve iki yarım harçtan meydana gelmektedir. Böylece rijit elemanların boyutları tuğla/taş boyutlarından harç ölçüleri kadar büyük olmaktadır. Rijit elemanlar, açılma ve kayma yapabilen ara yüzey sonlu elemanlar ile birbirine bağlanmaktadır (Şekil 5.4) (Doğan, 2016).

Basitleştirilmiş mikro modellemesinde muhtemel göçme mekanizmalarının tamamının dikkate alınamaması önemli sorunlardan birisidir. Çatlakların ara yüzeylerde meydana geldiği kabul edilmekte olup sadece açılma ve kayma etkileri için dikkate alınmaktadır. Aynı zamanda rijit elemanlardaki çatlakların ise sadece eleman orta bölgesinde oluşabileceği kabulü vardır (Doğan, 2016).

Bu tekniğin avantajları ise büyük yer değiştirmelerin, çatlak yörüngesinin ve kırılma yükünün yeterli bir yaklaşımla elde edilebilmesidir. Aynı zamanda, mikro modele göre daha az düğüm noktası, eleman ve hafızaya ihtiyaç duyulmaktadır. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğinin dezavantajları ise modelde kullanılan blok elemanlar arasında çok sayıda ara yüzey elemanı gerektirmesi ve üç boyutlu problemler için çok zaman harcanmasıdır (Doğan, 2016).

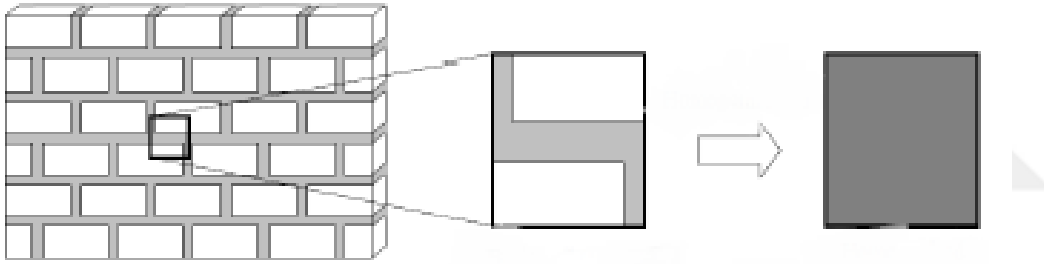


Şekil 5.4 Basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi (Doğan, 2016).

5.6.3. Makro modelleme

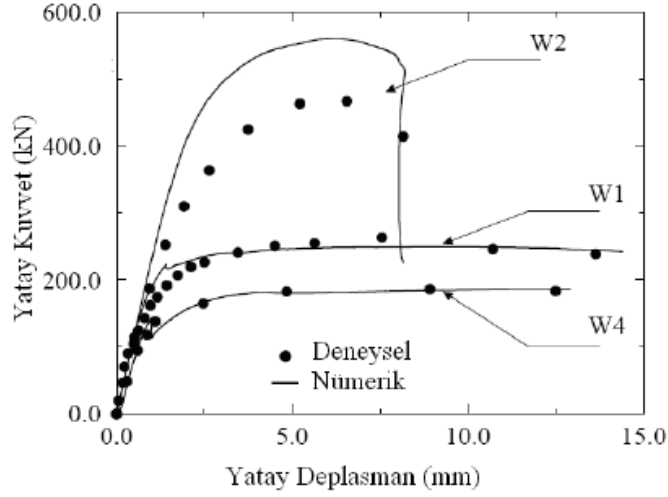
Büyük yapıların, mikro veya basitleştirilmiş mikro model ile modellenmesi oldukça zor ve zaman alan bir iştir. Aynı zamanda kullanılacak olan eleman ve düğüm noktası sayısının fazla olması nedeniyle bilgisayarlarda analizinin yapılması zorlaşmaktadır. Bu nedenle büyük yapıların modellenmesinde daha kabaca ama gerçeklikten uzak olmayan makro modelleme yöntemi ile modellenme yapılmaktadır.

Makro modellemede yapıyı tek bir homojen malzemeden yapılmış gibi düşünülmektedir. Harç ve taş/tuğla gibi yapı malzemelerinin belli formülasyon ile idealize edilmesiyle elde edilen tek tip ve homojen malzeme değerlerinin kullanılmasıyla uygulanmaktadır. Makro modelleme ile analizde, gevrek kırılmanın yapışık (smeared) yaklaşımı kullanılarak yapılır (Ercan, 2010). Şekil 5.5’de malzemenin homojenize edilmesi görülmektedir.



Şekil 5.5 Malzemenin homojenize edilmesi (Doğan, 2016).

Lourenço (1996) yapmış olduğu çalışmada, makro modellemeyi yapışık yaklaşım ile oluşturduğu yapıda hasar meydana geldikçe yapıyı oluşturan malzemenin sürekliliği korunmuş fakat rijitliği azaltılmıştır. Malzeme özellikleri tek eksenli ve iki eksenli deneyler yapılarak elde edilmiştir. Yaptığı modelin geçerliliğini göstermek için Ganz ve Thürlimann tarafından yapılmış olan 4 deneyden 3 tanesinin sonuçlarını kullanmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, modelinin gerçeğe oldukça yakın sonuçlar verdiğini göstermiştir (Şekil 5.6) (Ercan, 2010).

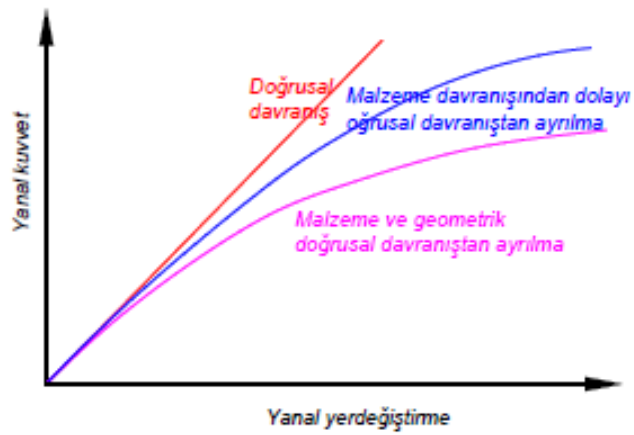


Şekil 5.6 Lourenço'nun modelinde nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması (Ercan, 2010).

5.7. Analiz Türleri

2007 Türk Deprem Yönetmeliğine göre yapıların deprem performansını belirlemek için kullanılan analiz türlerini doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan analiz olmak üzere iki grupta toplanmıştır. Doğrusal elastik analizde “Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi” ve “Mod Birleştirme Yöntemi” bulunmaktadır. Doğrusal elastik olmayan analiz yönteminde ise “Artımsal Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi”, “Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi” ve “Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi” yer almaktadır.

Tarihi yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan yapısal analiz türlerinde yanal kuvvet-yanal yer değiştirme eğrisi görsel olarak Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.7 Tarihi yapılarda doğrusal ve doğrusal olmayan yapısal analiz (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2018).

5.7.1. Doğrusal elastik (lineer) analiz

Doğrusal elastik yöntemin temelini oluşturan ve dayanım (kuvvet) esaslı değerlendirmede, yapı elemanlarının dayanım kapasiteleri elastik deprem yüklerinden oluşan ve doğrusal teoriye göre hesaplanan etkilerle karşılaştırılmaktadır. Yapı elemanlarının hasar sınırlarının açıklanmasında, etki/kapasite oranları (r) cinsinden ifade edilen sayısal değerler kullanılmaktadır. Elde edilen değerlerin sınır değerler ile kıyaslanmasıyla yapı elemanlarının kesit hasar bölgelerinin bulunması ve bunlardan yararlanarak bina düzeyinde performans değerlendirmesi yapılır (Demir vd., 2013).

Tarihi yapılarda deprem etkisinin belirlenmesi için elastik hesap kullanılması durumunda, deprem yükü azaltma katsayısı (R_a) olarak kullanılacak olan değer belirlenmesinde yapının süneklik davranışının göz önüne alınması önemlidir. Yığma yapılarda genellikle elastik ötesi davranışın kısıtlı olması nedeniyle $R_a=3$ olarak önerilir. Minare gibi taşıyıcı sistemin izostatik olduğu durumlarda $R_a=2$ olarak önerilir. Yapıda doğrusal elastik analiz yapılması nedeniyle, genellikle gerilmeler büyük değerlere ulaşabilir. Ancak, yapının doğrusal olmayan davranışı sebebiyle ortaya çıkan yerel ezilmeler, gerilmelerin sınırlı kalması sağlar. Meydana gelmesi beklenen gerilmeler azaltılmış deprem etkilerinden, yer değiştirmeler ise azaltılmamış deprem etkilerinden elde edilir (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2018).

5.7.2. Doğrusal elastik olmayan (non-lineer) analiz

Deprem etkileri altındaki mevcut binaların yapısal performanslarının belirlenmesi ve güçlendirme analizleri için kullanılacak doğrusal elastik olmayan hesap yöntemlerinin amacı, verilen bir deprem etkisinde sünek davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme istemleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet istemlerinin hesaplanmasıdır. Bu istem büyüklükleri, yönetmelikle verilen şekil değiştirme ve iç kuvvet kapasiteleri ile karşılaştırılarak, kesit ve bina düzeyinde yapısal performans değerlendirmesi yapılır (Duman, 2012).

Tarihi yapılarda doğrusal elastik olmayan yöntem kullanılırken dikkatli olunmalıdır. Bunun iki sebebi bulunmaktadır. Bu sebeplerden ilki yapıda yeterli elastik ötesi şekil değiştirme kapasitesinin, yani sünekliğin, bulunması gerekmektedir. Diğer sebep ise doğrusal olmayan analiz sonuçlarının, analiz ve malzeme parametrelerine bağlılığının yüksek olması nedeniyle sayısal sonuçların

kullanılabilir olması için, bu parametrelerin olabildiğince gerçekçi olarak belirlenmesi ve analizde bu parametrelerin değişim aralığının da incelenmesi gerekmektedir (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2018).



6. ARDIŞIK KEMERLİ TONOZ TİPİNDEKİ BİR YIĞMA YAPININ DENEYSEL ANALİZİ

Bu bölümde, laboratuvar ortamında oluşturulan deneysel yapının oluşturulma aşamaları, oluşturulan yapıya gergili ve gergisiz olarak uygulanan tekrarlı statik yatay yükleme altında elde edilen sonuçlardan bahsedilmiştir. Ayrıca yapının elastisite modülü ve birim hacim ağırlığını tahmin edebilmek amacıyla hazırlanan harç, tuğla ve duvar numuneleri üzerinde tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır.

6.1. Manisa Ulu Camii

Manisa Ulu Camii, Spil Dağı'nın kuzey eteklerinde, şehre hâkim bir konumda yer alan külliye cami, medrese ve türbe ile kuzeydoğusundaki hamamdan meydana gelmektedir. Saruhan Bey'in torunu İshak Çelebi tarafından 1366 yılında Mimar Emet Bin Osman'a yaptırılmıştır. İnşasında kaba yonu taş, tuğla ve bazı antik mimari unsurlar kullanılmıştır. Şekil 6.1'de Manisa Ulu Camiinin dış görünüşü görülmektedir (Manisa İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, 2017).



Şekil 6.1 Manisa Ulu Camii.

Deney yapısının oluşturulmasında Manisa Ulu Caminin avlu kısmındaki taşıyıcı sistemden esinlenilmiştir. Dış taraflarda taş beden duvarları, iç taraflarda ise sütunlar üzerine oturan ardışık kemerli tonozlu sistemden oluşan bir taşıyıcı

sisteme sahiptir. Laboratuvar modelinin oluşturulmasında iki kemer aksı ve arasındaki tonoz sistem dikkate alınarak yaklaşık olarak 1/6 ölçekle ön çizimler yapılmıştır. Ön çizimlerden sonra laboratuvar şartları da göz önüne alınarak bazı değişiklikler yapılmıştır. Şekil 6.2’de deney yapısı için baz alınan avlu kısmının taşıyıcı sistemi görülmektedir.

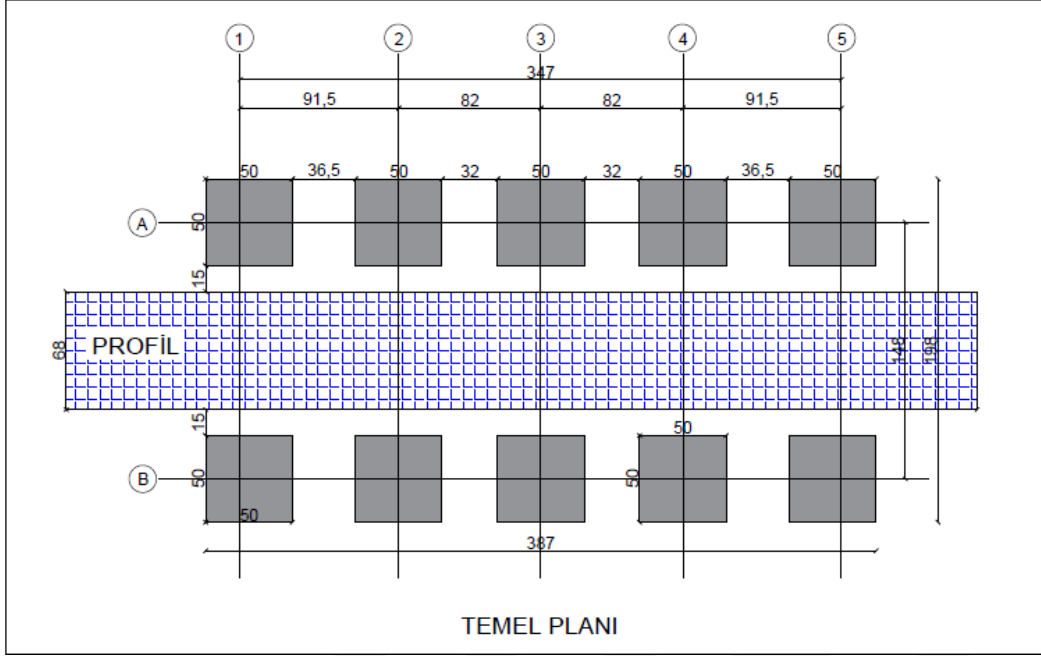


Şekil 6.2 Deney yapısı içi baz alınan avlu kısmının taşıyıcı sistemi.

6.2. Laboratuvar Modelinin Çizimlerinin Oluşturulması

Laboratuvar ortamında oluşturulacak olan model için yapılan ilk çizimler üzerinden laboratuvar şartları, yükleme koşulları, malzemenin temin edilebilir boyutları, uygulanabilirlik, maliyet gibi birçok kistas göz önüne alınarak çizimler üzerinde bazı revizeler yapılarak son hali oluşturulmuştur.

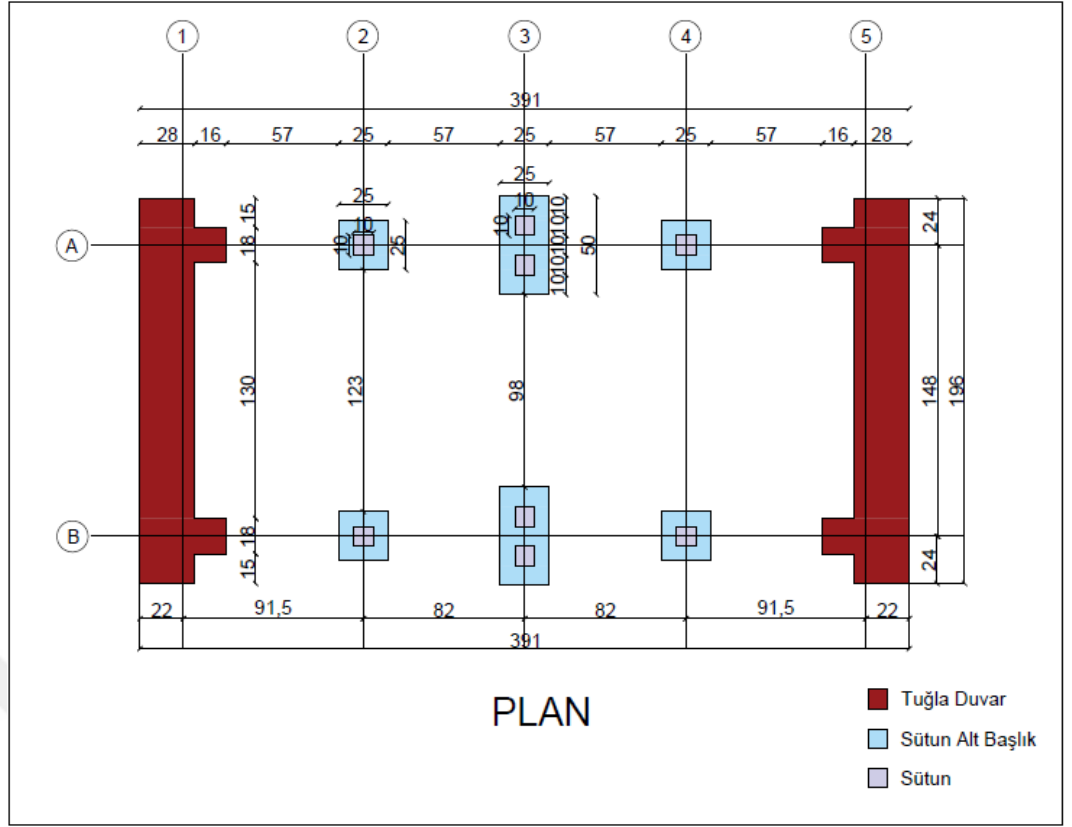
Oluşturulan sistemin temel yerleşim planı Şekil 6.3’de görülmektedir. Kullanılan tekil temellerin her biri 50x50x50 cm boyutlarındadır. Ortadan geçen profil yükleme çerçevesine aittir.



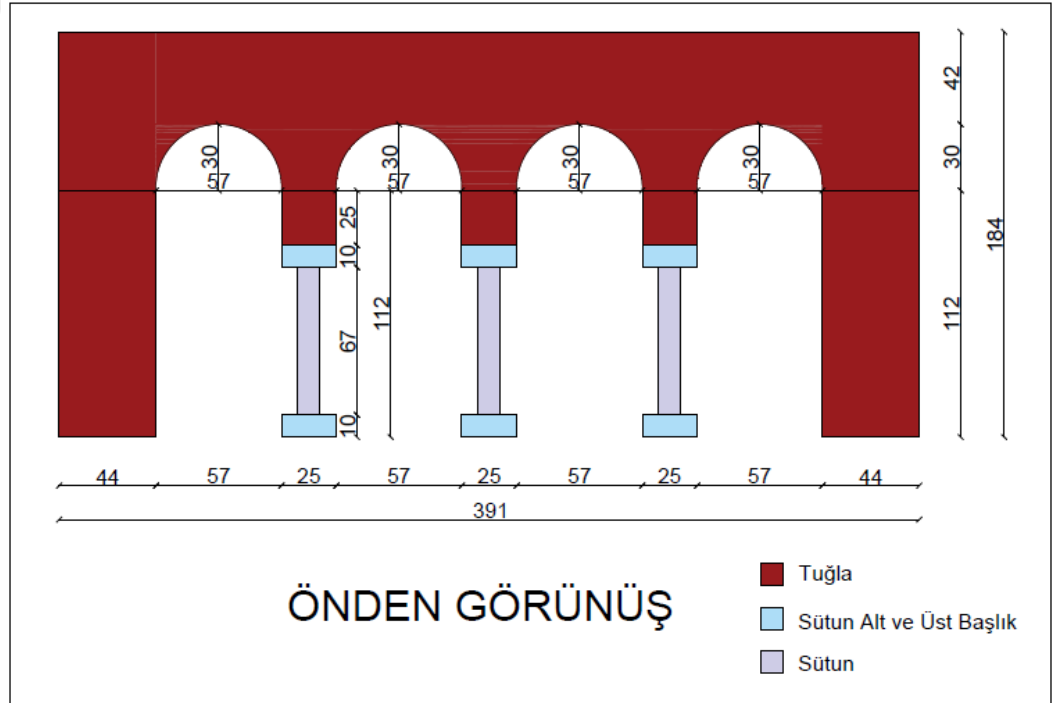
Şekil 6.3 Temel planı.

Yapının plandan görünüşü Şekil 6.4’de verilmiştir. Sağ ve sol köşelerde tuğla beden duvarları iç kısımlarda ise mermer sütun ayaklar bulunmaktadır. Orta kısımlara çift sütun ayağı yerleştirilmiştir. Yapı tamamen orta noktaya göre çift taraflı (aşağı-yukarı, sağ-sol) simetrik olarak projelendirilmiştir. Ayrıca yapıda kullanılan alt ve üst başlık mermerleri aynı ölçüdedir.

Plandan bakıldığında uzun doğrultuda 4 sıra yan yana kemer açıklığı bulunmaktadır. Dış taraftaki (en sağ ve en sol) beden duvarları tamamen kapalı olarak örülmüştür. Kısa doğrultuda iç tarafta kalan sütunların üzerinden karşılıklı 3 adet kemer uzanmaktadır. Oluşturulan bu taşıyıcı sistemin üzeri tonoz sistem ile kapatılmıştır. Şekil 6.5’de gergisiz yapının önden yani uzun doğrultusundaki çizim detayı görülmektedir. Sütun üst başlığı ile kemer başlangıcı arasındaki 25 cm’lik mesafede çift tarafları olarak gergilerin yeri takıp çıkarılabilecek şekilde uygulamada bırakılmıştır. Gergi elemanı olarak 5x5 cm enkesite sahip ahşap malzemesi kullanılmıştır.



Şekil 6.4 Yapıdaki sütun ayaklarının yerleşim planı.



Şekil 6.5 Yapının önden görünüşü (uzun doğrultu).

6.3. Laboratuvar Modelinin Hazırlanış Aşamaları

Deney yapısının oluşturulma aşamalarıyla ilgili görsellere bu bölümde yer verilmiştir.

Şekil 6.6’da kalıp planına göre yerleştirilmiş 50x50x50 cm boyutlarındaki temel kalıplarının içine beton dökümü yapılmıştır. Kullanılan beton sınıfı C30/35’dir. Temeller birbiriyle demir çubuklar ile birbirine bağlanarak farklı oynamalar veya hareket etmeleri engellenmiştir.



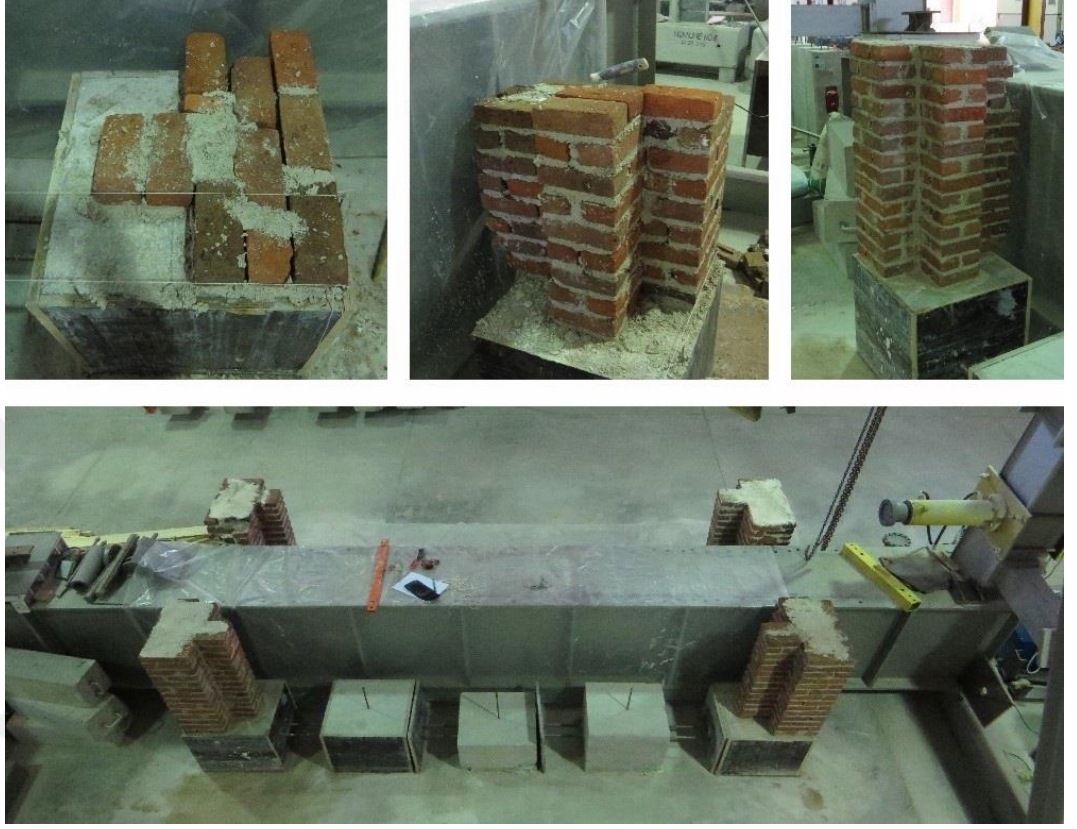
Şekil 6.6 Temel kalıp yerleşimi ve beton dökümü sonrası.

Duvarlarda bağlayıcı malzeme olarak yapının gerçeğinde olduğu gibi horasan harcı kullanılmıştır. Harç malzemesinin içinde mıcır tozu, hidrolik kireç, hamur kireç ve su bulunmaktadır. Bu karışıma ilaveten az miktarda beyaz çimento yapının daha hızlı priz alabilmesi için karışıma eklenmiştir. Şekil 6.7’de harcın hazırlanış aşamasına ait görseller görülmektedir.



Şekil 6.7 Horasan harcının hazırlanışı.

Şekil 6.8’de sağ ve sol dış köşelerdeki beden duvarlarının yapımına ait görseller görülmektedir. Aradan yükleme çerçevesinin profili geçmesi nedeniyle beden duvarları profilin üstünden birbirine bağlanmıştır. Yapının tamamında harman tuğlası kullanılmıştır.



Şekil 6.8 Dış beden duvarlarının oluşumu.

Şekil 6.9’da mermer alt başlık, sütun ve üst başlık parçalarının yerlerine yerleştirilmesi ile ilgili görseller görülmektedir. Mermerler ve beton temeller birbirine mermer yapıştırıcısı ve içlerinden geçen demir çubuk vasıtasıyla birleştirilmiştir. A2, B2, A4 ve B4 akslarındaki mermer alt ve üst başlıklar 25x25 cm genişliğinde 10 cm yüksekliğindedir. A3 ve B3 akslarında yani yapının orta kısmında çift sütun bulunmasından dolayı sütun alt ve üst başlıkları 50x25 cm genişliğinde 10 cm yüksekliğindedir. Kullanılan tüm sütunlar tek tiptir. 10x10 cm genişliğinde 67 cm yüksekliğindedir.



Şekil 6.9 Mermerlerin yerleştirilmesi ve bağlantı şekli.

Şekil 6.10’da kısa ve uzun doğrultudaki kemer kalıpları görülmektedir. Kalıp malzemesi olarak eğilebilen bir malzeme olması nedeniyle yaş kavak kullanılmıştır.



Şekil 6.10 Kemer kalıpları a) Uzun doğrultudaki b) Kısa doğrultudaki.

Şekil 6.11’de dış beden duvarlarının birleştirilmesi ve mermer üst başlıklarının üstüne tuğla duvar örgüsü yapılarak kemer başlangıç kotuna getirilmesi ile ilgili görseller görülmektedir.



Şekil 6.11 Beden duvarlarının birleştirilmesi ve tuğla örgüsünün kemer başlangıç kotuna çıkarılması.

Deney yapısı önce gergisiz daha sonra gergili olarak test edileceği için gergi elemanlarının yerlerine geçici olarak ahşap gergi parçaları bırakılmıştır. Daha sonra bu ahşap parçalar çıkarılarak gergi elemanları buralara yerleştirilmiştir. Yapıda çift yönlü gergi bulunmaktadır. Gergi elemanı olarak 5x5 cm kesitinde ahşap malzemesi kullanılmıştır. Şekil 6.12’de gergi elemanları için bırakılan ahşap parçaları görülmektedir.



Şekil 6.12 Gergi elemanı için yapıda bırakılan yerler.

Şekil 6.13'deki görsellerde uzun doğrultuda ki kemer kalıpları yerine yerleştirilmiştir ve kemer formları oluşturulmaya başlanmıştır. A ve B aksları için oluşturulan kemer formlarıyla birlikte dış beden duvarları da yükseltilmiştir. A ve B aksları boyunca oluşturulan kemer formlarının tamamlandıktan sonraki hali Şekil 6.14'de görülmektedir.

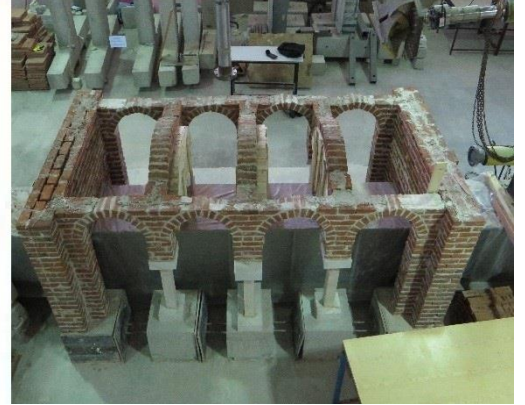
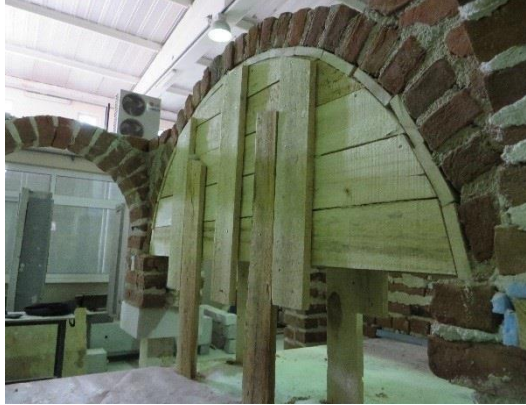


Şekil 6.13 Dış kemer formlarının oluşturulması.



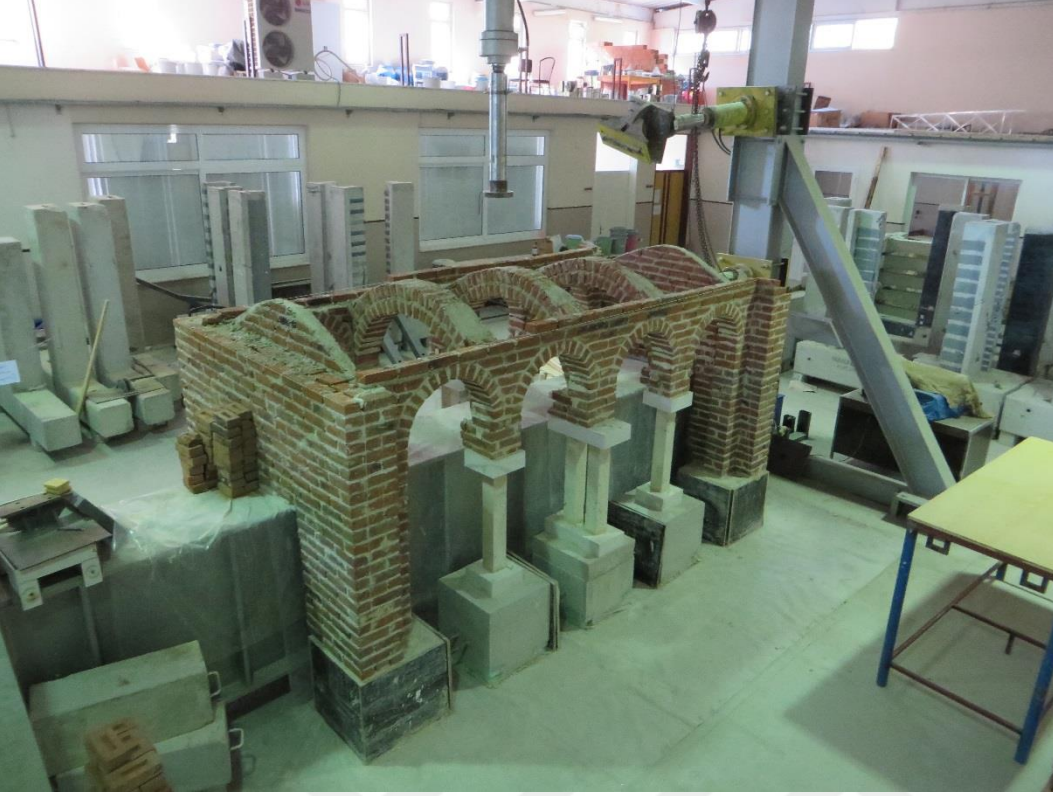
Şekil 6.14 Uzun doğrultudaki kemerlerin tamamlanmış hali.

Kısa doğrultuda iç kısımlarda oluşturulan 3 kemerin görseli Şekil 6.15’de görülmektedir.



Şekil 6.15 Kısa doğrultudaki iç kemerlerin tamamlanmış hali.

Şekil 6.16’da yapının iç kemerlerinin ve beden duvarlarının aynı hizaya getirilmiş hali görülmektedir. İç kemerlerde yüksekliğin açıklığa oranı daha az olması nedeniyle çift sıra tuğla örgüsü yapılarak kemer formu güçlendirilmiştir. Yapı, bu aşamadan sonra tonoz kısmının örülmesine başlanarak üstü kapatılmıştır (Şekil 6.17).



Şekil 6.16 Dış kemer ve beden duvarlarının aynı kota getirilmiş hali.



Şekil 6.17 Yapının tonoz kısmının oluşturulması.

Yapının üstünün kapatılması ve beden duvarlarının yükseltilmesiyle laboratuvar ortamında oluşturulan deney yapısı gergisiz olarak tamamlanmıştır. Şekil 6.18’de gergisiz deney yapısının son hali görülmektedir.



Şekil 6.18 Gergisiz deney yapısının son hali.

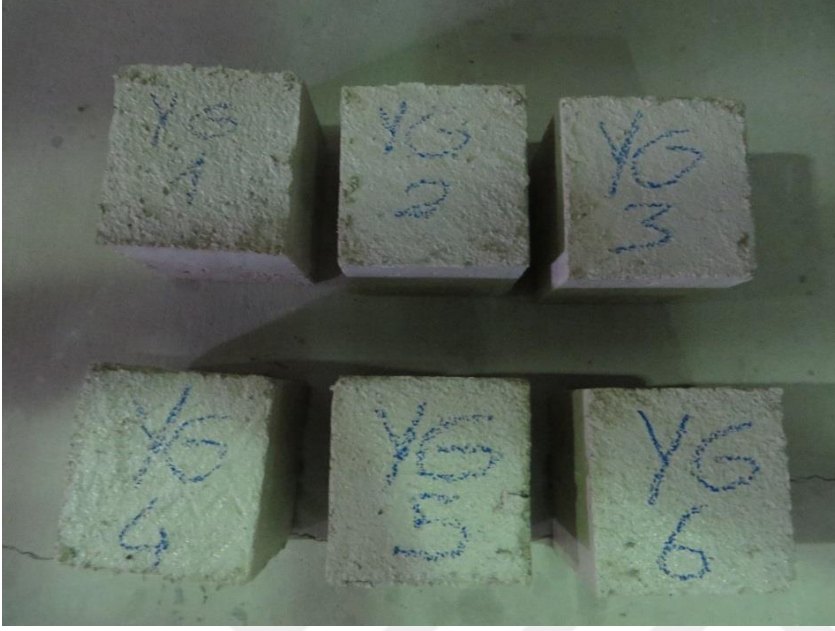
6.4. Deney Numuneleri

Yığma yapılar harç, tuğla, taş gibi farklı malzemelerle inşaa edilmesi sebebiyle homojen yapılar değildir. Aynı zamanda kullanılan malzeme özellikleride bulunduğu bölgelere göre farklılık göstermektedir. Bu nedenle malzeme açısından sabit mekanik özelliklere sahip değildir. Bu değerler her yapı için farklılık gösterebilmektedir. Oluşturulan yapının tahmini elastisite modülü ve birim hacim ağırlığını belirleyebilmek amacıyla harç, tuğla ve duvar numuneleri üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmıştır.

6.4.1. Harç

Yapının oluşturulmasında kullanılan harçtan alınan 6 adet 15x15x15 cm boyutundaki küp numuneler tek eksenli basınç dayanım deneyine tabi tutularak basınç gerilmesi birim deformasyon eğrisi oluşturulmuştur. Bu grafik sayesinde Bölüm 3.2.5’de belirtilen yöntem ile harcın elastisite modülü belirlenmiştir. Ayrıca numunelerin ağırlık ve boyutları yardımıyla birim hacim ağırlığı hesaplanmıştır.

Şekil 6.19’da alınan numuneler örnekleri görülmektedir. YG1, YG2 ve YG3 numuneleri yapı ile eşdeğer koşullarda bekletilirken, YG4, YG5 ve YG6 numuneleri 28 gün su içerisinde bekletilmiştir.



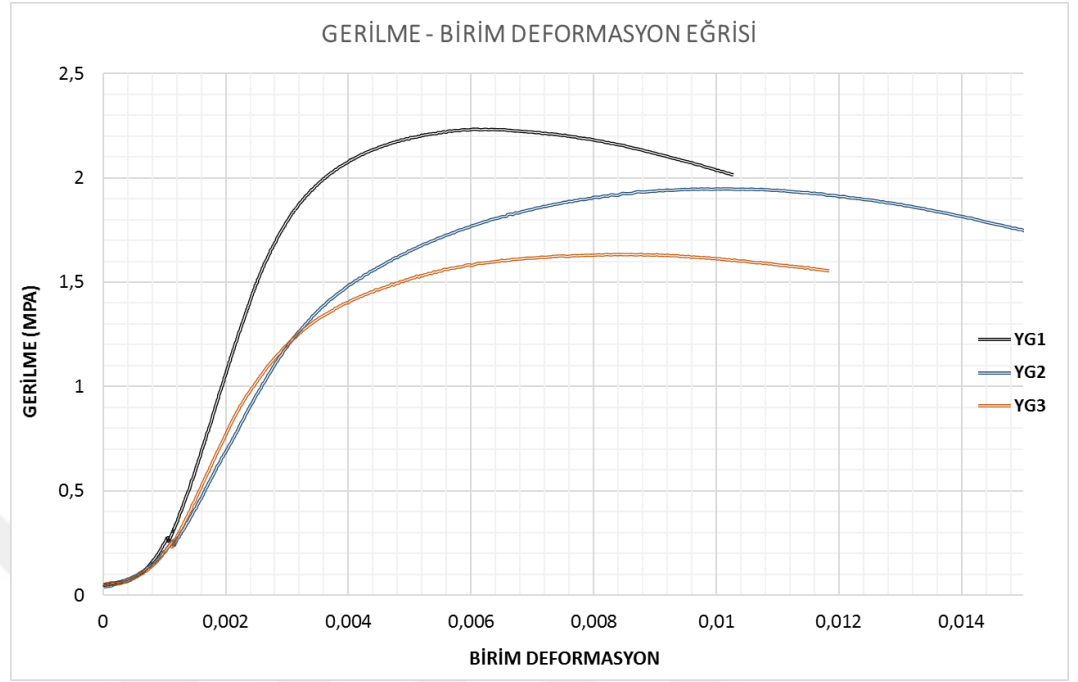
Şekil 6.19 Harçtan alınan numuneler.

Şekil 6.20’de harç numuneleri üzerinde uygulanan tek eksenli basınç deneyi sonucunda numunelerde oluşan çatlaklar görülmektedir.

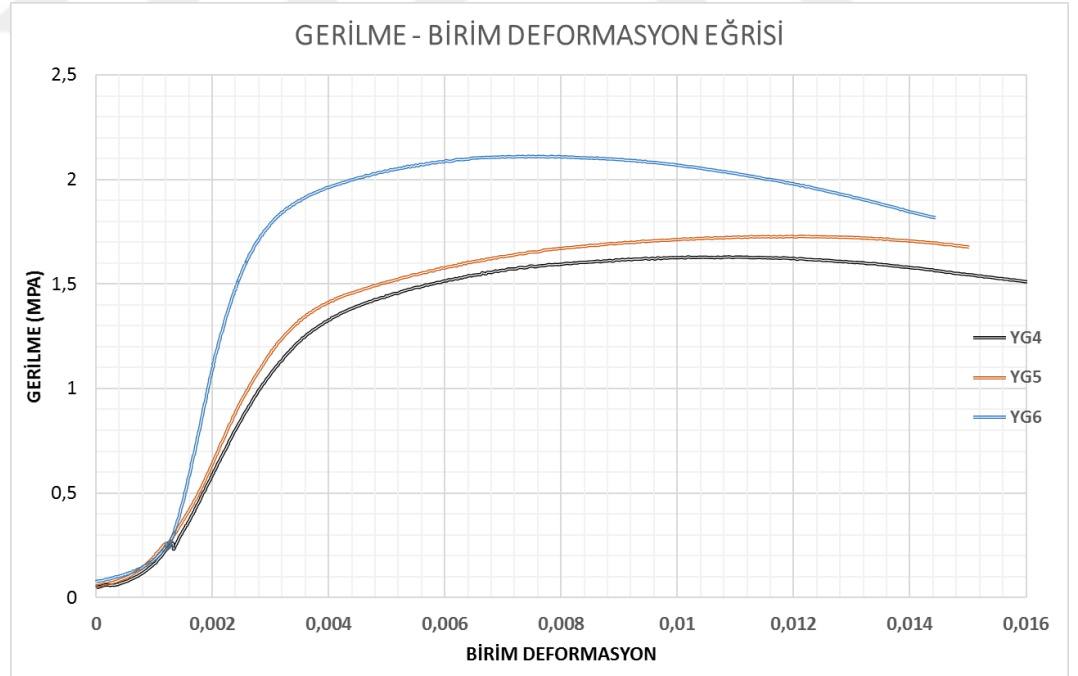


Şekil 6.20 Tek eksenli basınç deneyi altında harç numunelerinde oluşan çatlaklar.

Basınç deneyi sonucunda elde edilen harç numunelerinin gerilme-birim deformasyon eğrileri Şekil 6.21 ve 6.22’de görülmektedir.



Şekil 6.21 Dışarıda bekleyen harç numunelerinin gerilme-birim deformasyon eğrisi.



Şekil 6.22 Suda bekleyen harç numunelerinin gerilme-birim deformasyon eğrisi.

Harç numuneleri üzerinde yapılan deneylerden elde edilen tüm deney sonuçları Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Dışarıda bekleyen harç numunelerinin deney sonuçları.

Numune	Maksimum Gerilme (MPa)	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	Elastisite Modülü (MPa)
YG1	2,23	1,98	618
YG2	1,95	1,87	413
YG3	1,63	1,92	434
ORT.	1,937	1,923	488,3

Çizelge 6.2 Su içerisinde bekleyen harç numunelerinin deney sonuçları.

Numune	Maksimum Gerilme (MPa)	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	Elastisite Modülü (MPa)
YG4	1,63	1,91	356
YG5	1,73	1,90	380
YG6	2,11	1,94	560
ORT.	1,823	1,917	432

6.4.2. Tuğla

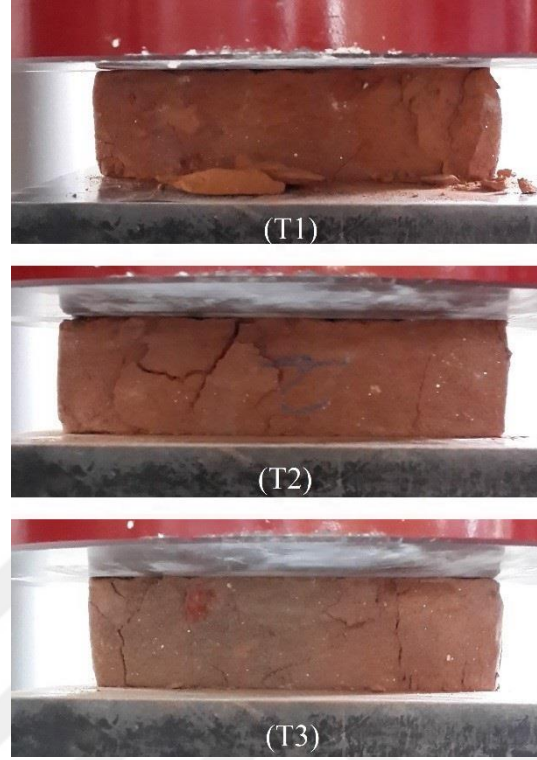
Harç için uygulanan tek eksenli basınç ve birim hacim ağırlık deneyleri 3 adet harman tuğlası içinde yapılmıştır. Harman tuğlasının boyutları yaklaşık olarak 5x8x17.5 cm'dir. Şekil 6.23'de deney için kullanılan harman tuğlası görülmektedir.



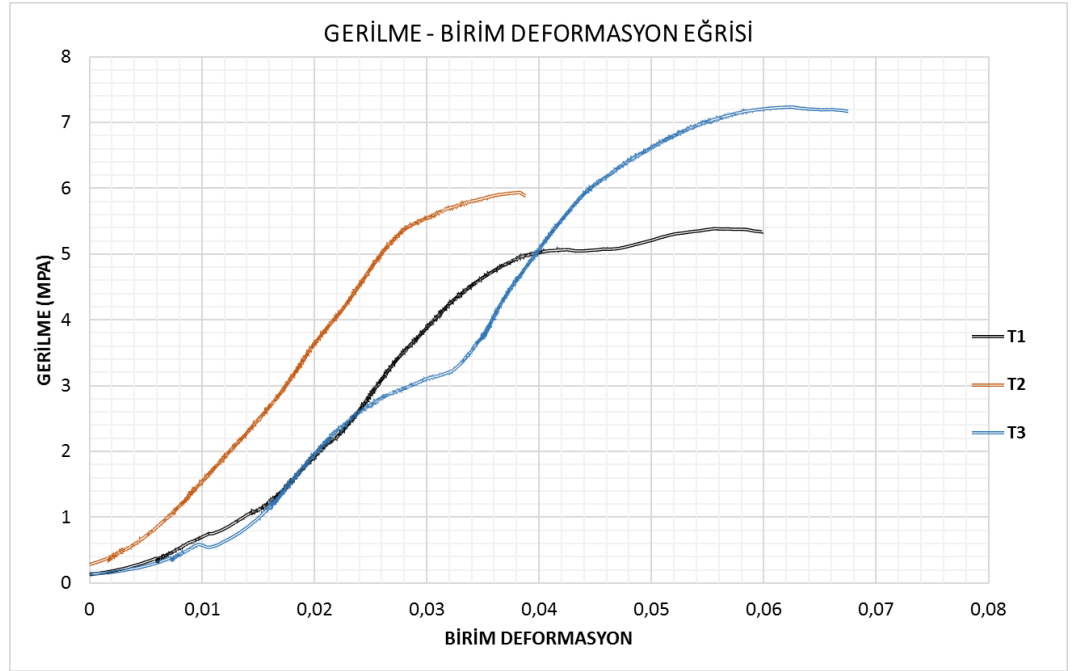
Şekil 6.23 Harman tuğlası.

Şekil 6.24'de tuğla üzerinde yapılan tek eksenli basınç deneyi altında tuğlada oluşan çatlaklar görülmektedir. Şekil 6.25'de tuğla numunelerinin gerilme-birim

deformasyon eğrileri görülmektedir. Harman tuğlası üzerinde yapılan tüm deney sonuçları Çizelge 6.3’de verilmiştir.



Şekil 6.24 Tek eksenli basınç deneyi altında tuğla numuneleri üzerinde oluşan çatlaklar.



Şekil 6.25 Tuğla numuneleri için gerilme-birim deformasyon eğrisi.

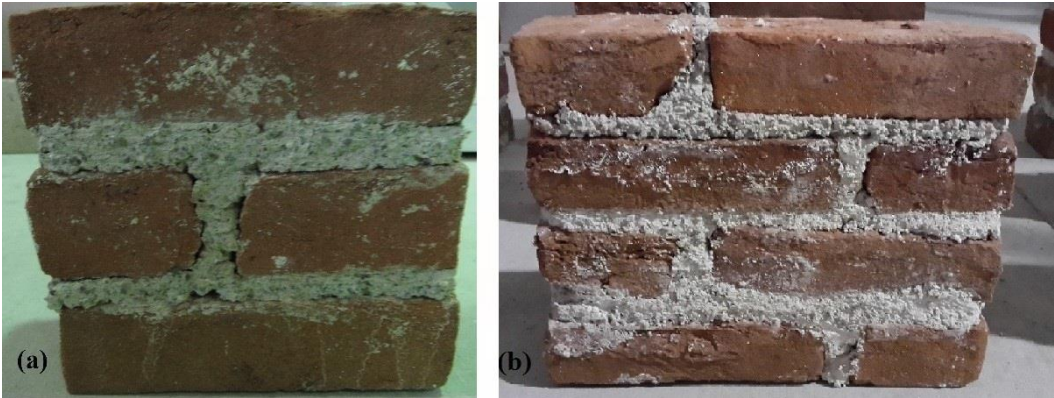
Çizelge 6.3 Tuğla numunelerinin deney sonuçları.

Numune	Maksimum Gerilme (MPa)	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	Elastisite Modülü (MPa)
T1	5,39	1,78	97
T2	5,94	1,66	148
T3	7,24	1,78	104
ORT.	6,19	1,74	116,3

6.4.3. Duvar

Malzeme özellikleri yardımıyla sistemin elastisite modülü tahmin edilebilmesi dışında tuğla ve harç malzemelerinden oluşturulan küçük duvar numuneleri üzerinde deney yapılarakta sistemin elastisite modülünü tahmin edilebilmektedir. Bu amaçla 2 farklı tipte duvar numuneleri oluşturulmuştur. Boyutları farklı olan bu duvar numunelerinden elde edilen veriler ile sistemin elastisite modülü ve birim hacim ağırlığı tespit edilmiştir. Her bir duvar numunesinden 3'er adet yapılmıştır ve Şekil 6.26'da duvar numuneleri görülmektedir. Birinci tip duvar numunesi 3 sıra tuğla ve 8x17x17,5 cm (genişlik-boy-en) boyutlarındadır. İkinci tip duvar numunesi 4 sıra tuğla ve 8x24x27 cm (genişlik-boy-en) boyutlarındadır.

Duvar numuneleri basınç deneyine tabi tutulmadan önce basınç uygulanacak olan bölgede düz bir zemin olması ve basınç kuvvetinin eş dağılabilmesi için numunelerin üzerine yaklaşık 0,8 cm kalınlığında alçı başlık yapılmıştır.



Şekil 6.26 Duvar numuneleri a) 1. tip duvar (küçük) b) 2. tip duvar (büyük).

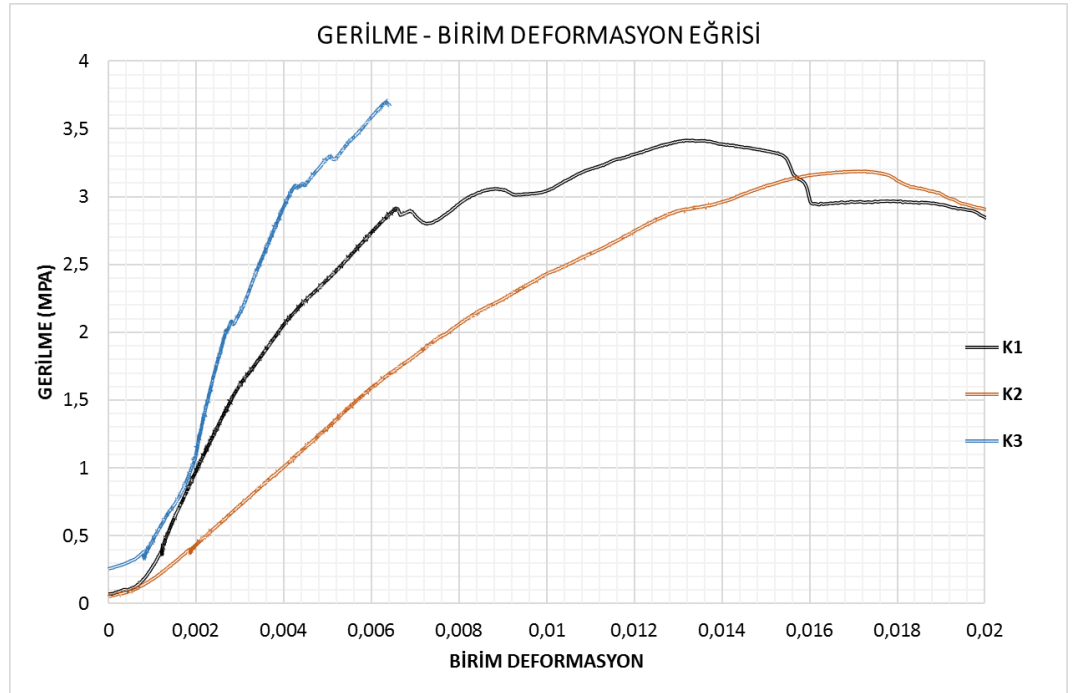
Şekil 6.27 ve 6.28'de tek basınç deneyi sonucunda duvar numunlerinde oluşan çatlaklar görülmektedir. Şekil 6.29 ve 6.30'da tuğla duvarlar üzerinde uygulanan tek eksenli basınç deneyi sonuçları görülmektedir.



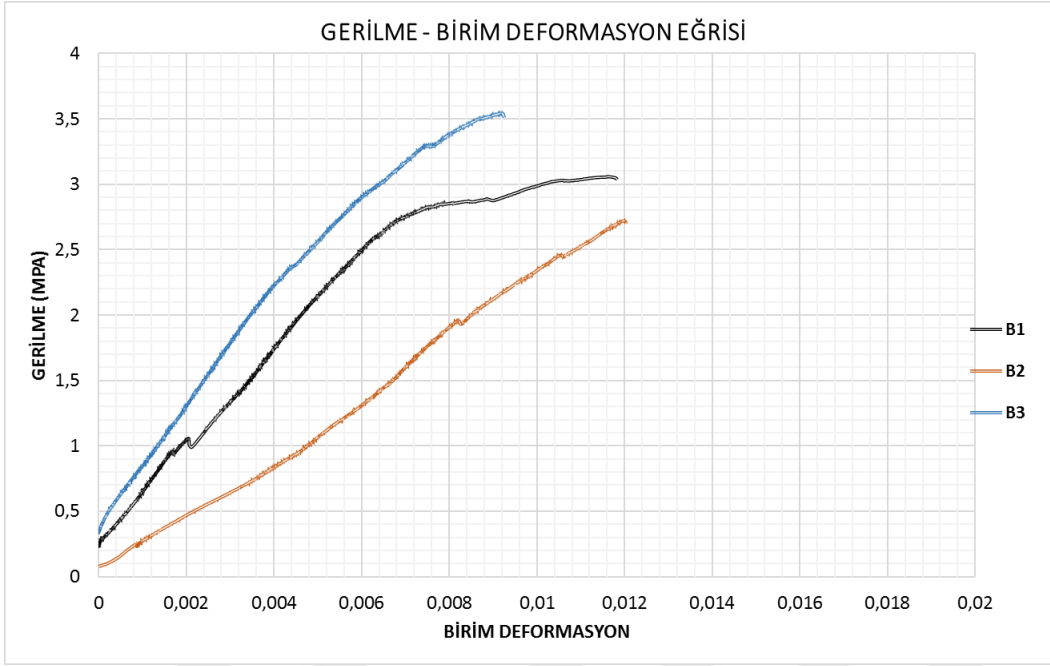
Şekil 6.27 Tek eksenli basınç deneyi altında tuğla duvar (3 sıra) numunelerinin üzerinde oluşan çatlaklar.



Şekil 6.28 Tek eksenli basınç deneyi altında tuğla duvar (4 sıra) numunelerinin üzerinde oluşan çatlaklar.



Şekil 6.29 Tuğla duvar (3 sıra - küçük) numunelerinin gerilme-birim deformasyon eğrisi.



Şekil 6.30 Tuğla duvar (4 sıra - büyük) numunelerinin gerilme-birim deformasyon eğrisi.

Çizelge 6.4’de küçük tuğla duvar numuneleri, Çizelge 6.5’de büyük tuğla duvar numuneleri üzerinde yapılan tüm deney sonuçları görülmektedir.

Çizelge 6.4 Küçük tuğla duvar (3 sıra) numunelerinin deney sonuçları.

Numune	Maksimum Gerilme (MPa)	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	Elastisite Modülü (MPa)
K1	3,42	1,83	604
K2	3,18	1,85	268
K3	3,70	1,89	664
ORT.	3,43	1,86	512

Çizelge 6.5 Büyük tuğla duvar (4 sıra) numunelerinin deney sonuçları.

Numune	Maksimum Gerilme (MPa)	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	Elastisite Modülü (MPa)
B1	3,10	1,78	356
B2	2,72	1,88	203
B3	3,50	1,73	454
ORT.	3,11	1,80	337,7

6.5. Yapının Elastisite Modülünün Belirlenmesi

Bölüm 5.3.3’de belirtilen harç ve tuğla malzemelerinin özelliklerinden yararlanılarak sistem elastisite modülü tahmin edilmiştir. 6 harç numunesi için hesaplanan ortalama elastisite modülü 460,15 MPa’dır. 3 tuğla numunesi için

hesaplanan ortalama elastisite modülü 116,3 MPa'dır. Harç kalınlığı 1,5 cm, tuğla kalınlığı ise 5 cm'dir. ρ ise 0,5 olarak alınmıştır.

$$E = \frac{\frac{t_m + t_u}{\frac{t_m}{E_m} + \frac{t_u}{E_u}}}{\frac{1,5}{460,15} + \frac{5}{116,3}} \times \rho = \frac{1,5 + 5}{\frac{1,5}{460,15} + \frac{5}{116,3}} \times 0,5 = 70,27 \text{ MPa}$$

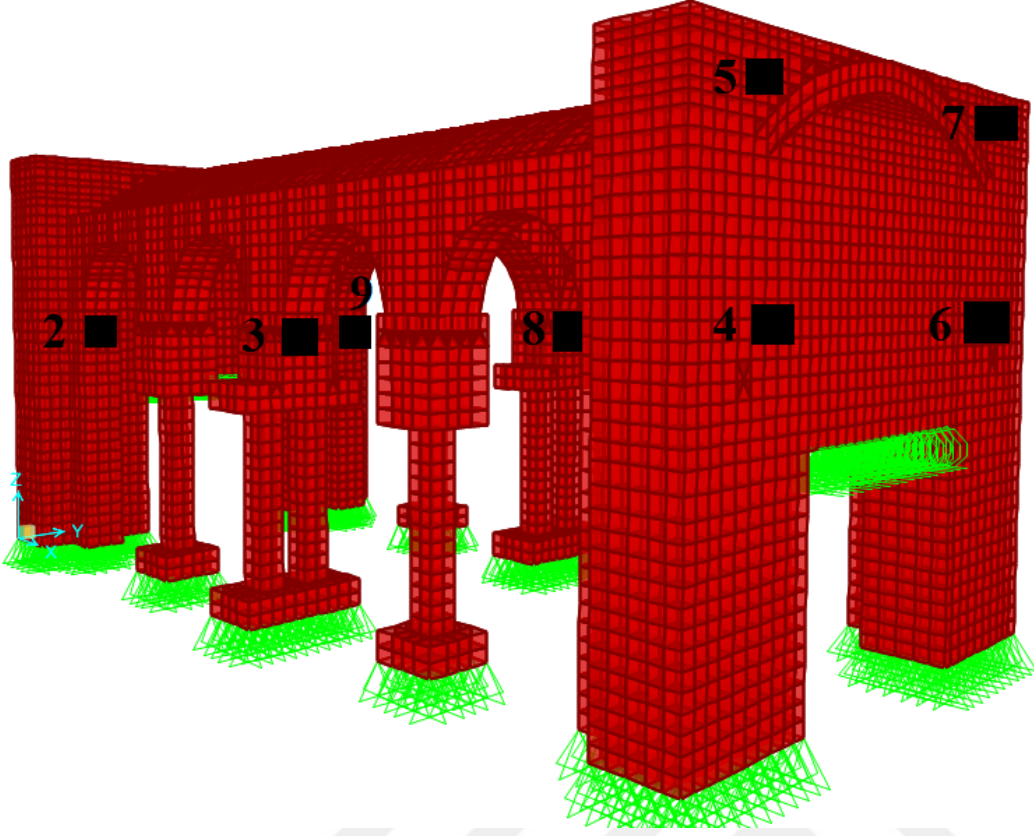
6.6. Deneysel Yapı Üzerinde Yatay Yükleme Deneyi

Laboratuvar ortamında oluşturulan yapı üzerinde gergili ve gergisiz olmak üzere kademeli olarak artan tekrarlı statik yatay yükleme yapılmıştır. İlk olarak gergisiz yüklenen yapı akmaya başladığında yükleme durdurularak sistem üzerindeki yük kaldırılmıştır. Daha sonra gergiler takılarak sisteme tekrar benzer yükleme yapılmıştır. Bu yükleme sırasında yapıda meydana gelen şekil değiştirmeler, çatlak oluşum bölgeleri ve çatlakların büyüklüğü tespit edilmiştir. Şekil 6.31'de yükleme şekli görülmektedir.

Yapıda yükleme sırasında oluşan deplasmanlar yapı üzerine yerleştirilen potansiyometreler yardımıyla ölçülmüştür. Şekil 6.32'de yapıdaki potansiyometre yerleşim planı görülmektedir. 1 numaralı deplasman ölçer yük hücresidir. 5 ve 7 numaralı deplasman ölçerler yapının en sağında üst kısımda kullanılırken diğer deplasman ölçerler yapının orta kısımlarına yerleştirilerek oluşan deplasmanlar ölçülmüştür.



Şekil 6.31 Yapıya uygulamam yükleme şekli.



Şekil 6.32 Potansiyometre yerleşim planı.

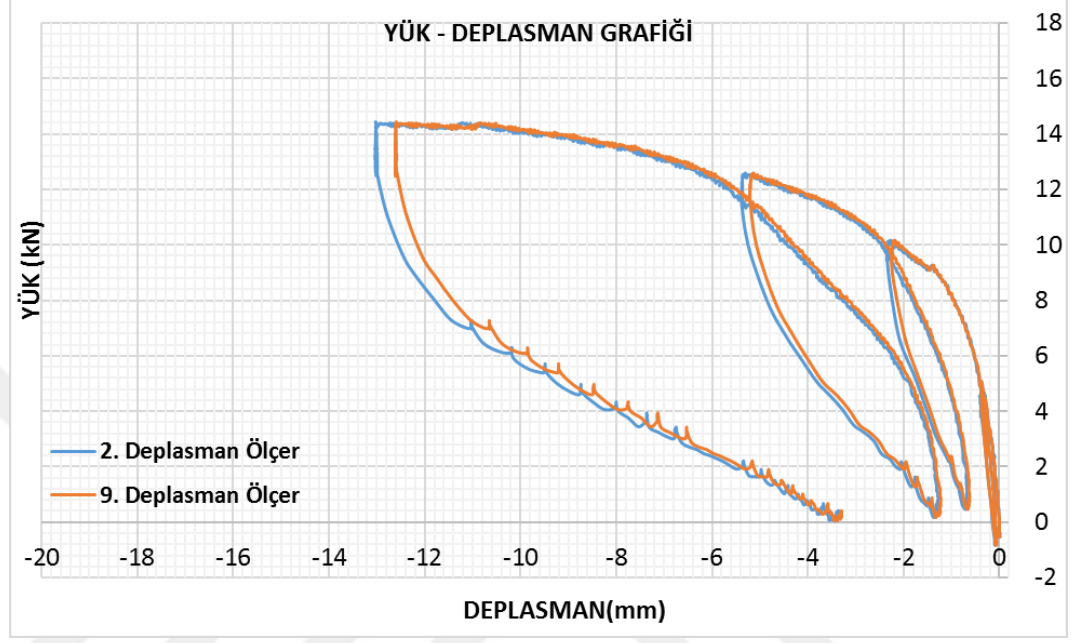
6.6.1. Gergisiz sistem yatay yükleme deneyi

Sistem ilk olarak gergisiz yüklemeye tabi tutulmuştur. Potansiyometrelerin gergisiz sistem üzerine yerleştirilmiş hali Şekil 6.33’de görülmektedir.

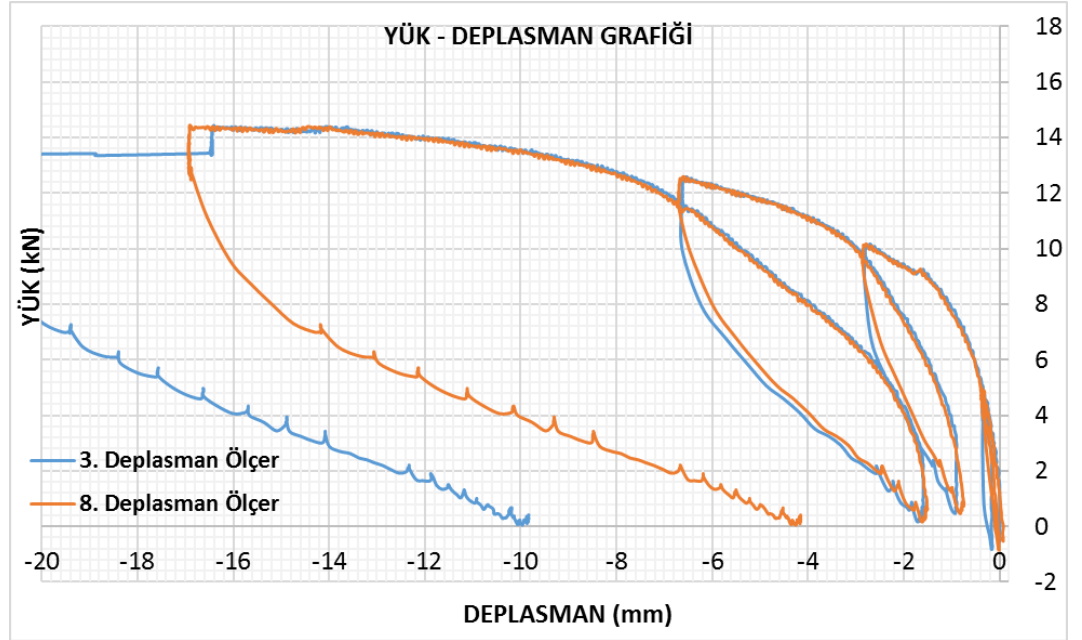


Şekil 6.33 Potansiyometrelerin gergisiz yapı üzerine yerleştirilmiş hali.

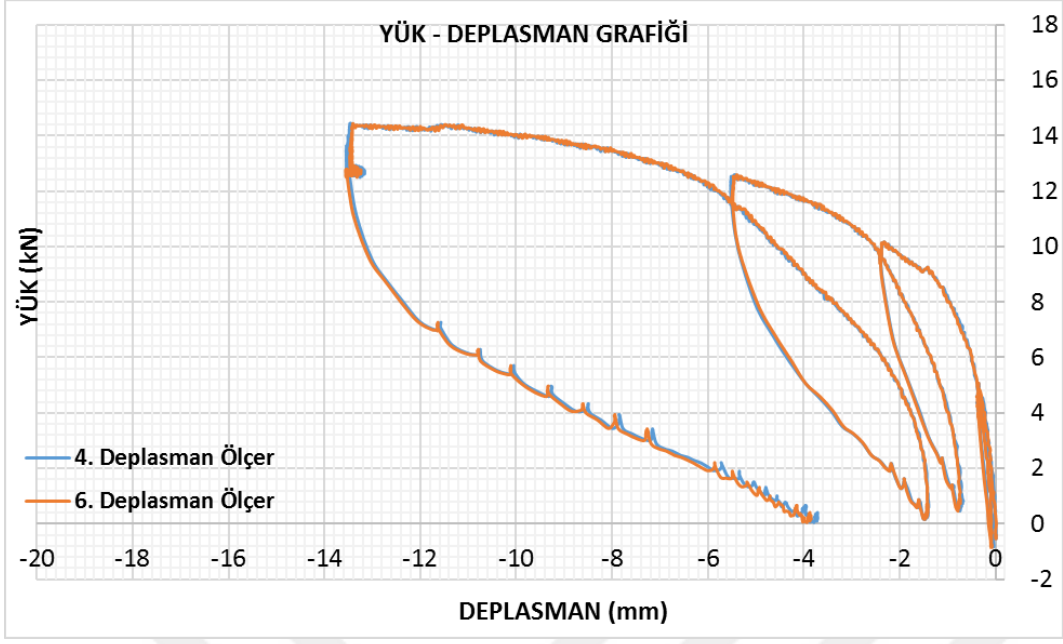
Uygulanan yatay yükleme sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri Şekil 6.34 ile Şekil 6.37 arasında verilmiştir. Simetrik potansiyometreler aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Şekil 6.35’de 3 numaralı potansiyometrede yükleme tamamlandıktan sonra sorun oluşması nedeniyle simetriğinden farklılık göstermektedir.



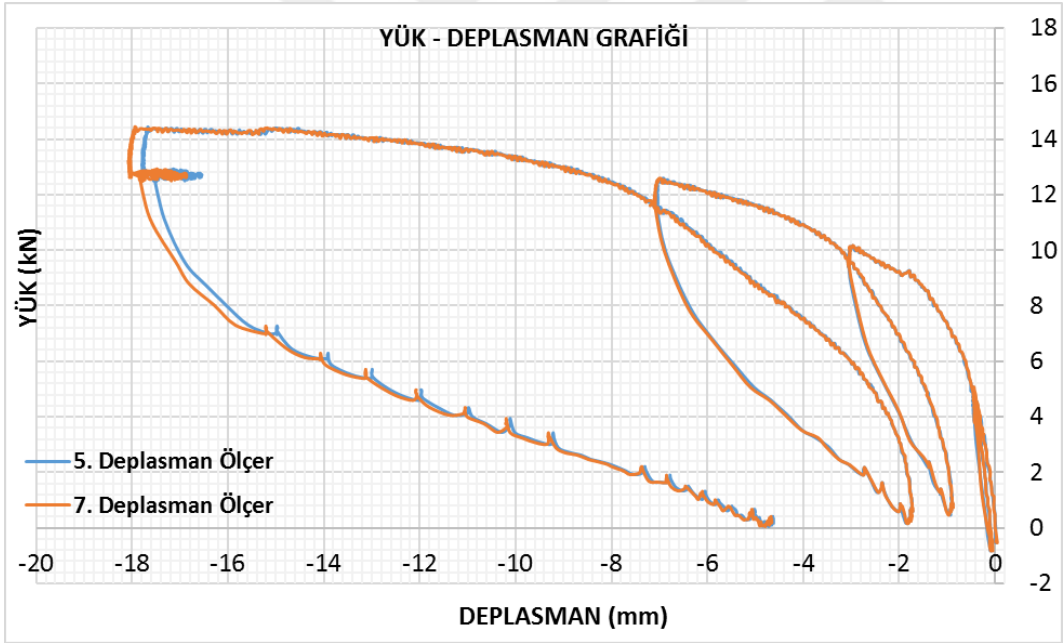
Şekil 6.34 Gergisiz sistem 2 ve 9 numaralı deplasman ölçerlerin yük-deplasman grafiği.



Şekil 6.35 Gergisiz sistem 3 ve 8 numaralı deplasman ölçerlerin yük-deplasman grafiği.



Şekil 6.36 Gergisiz sistem 4 ve 6 numaralı deplasman ölçerlerin yük-deplasman grafiği.



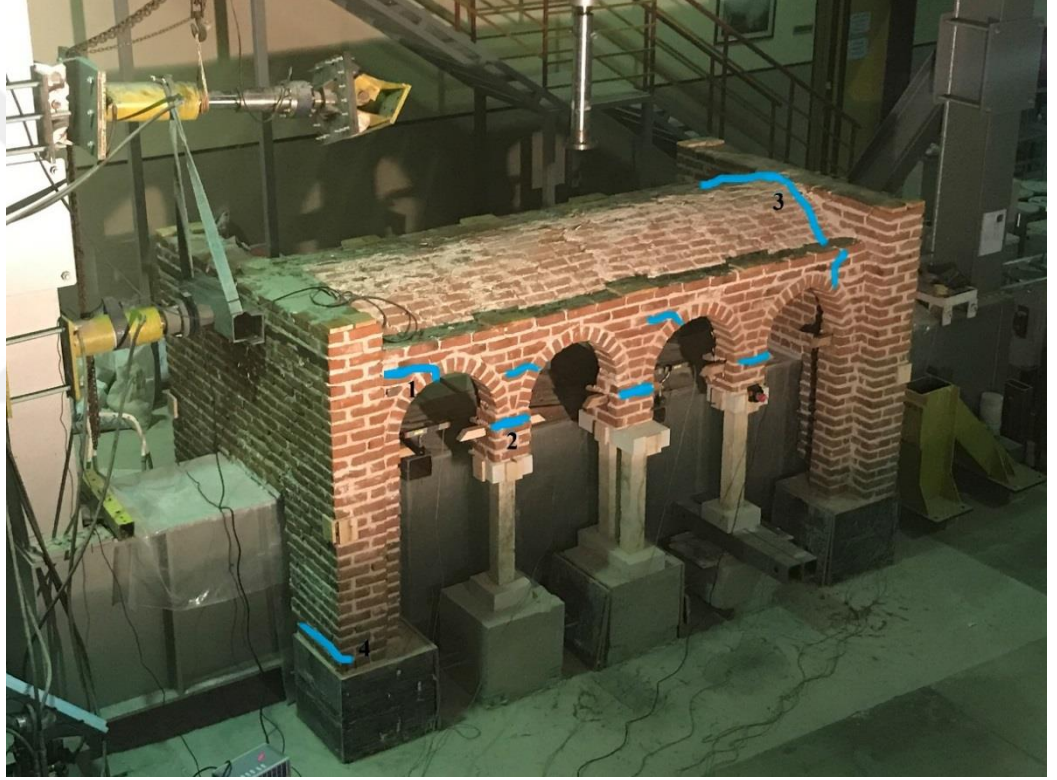
Şekil 6.37 Gergisiz sistem 5 ve 7 numaralı deplasman ölçerlerin yük-deplasman grafiği.

Tekrarlı yüklemeler sırasında özellikle elastik eşik aşıldıktan sonra yapıda yavaş yavaş hasarlar oluşmaya başlamıştır. Yükleme sırasında oluşan belirgin hasarlar:

- Kemer bölgelerinde açılmalar oluşmuştur.

- Yaklaşık olarak gergeri hizasından sistem birbirinden ayrılmaya başlamıştır.
- Tonozun, arka kısım beden duvarıyla birleşim bölgesinden en sondaki kemerlere doğru diyagonal çatlaklar oluşmuştur.
- Beden duvarlarının çekme alan alt kısımlarında açılmalar meydana gelmiştir.

Yapıda meydana gelen hasarlar simetrik olarak oluşmuştur. Şekil 6.38’de hasar bölgeleri mavi renkle belirtilmiş ve numaralandırılmıştır. Numaralandırılmış olan hasar bölgelerinde oluşan çatlakların daha yakın görseli Şekil 6.39’da verilmiştir.



Şekil 6.38 Yapıda meydana gelen hasar bölgeleri.



Şekil 6.39 Yapıda oluşan hasarların yakın görünümü.

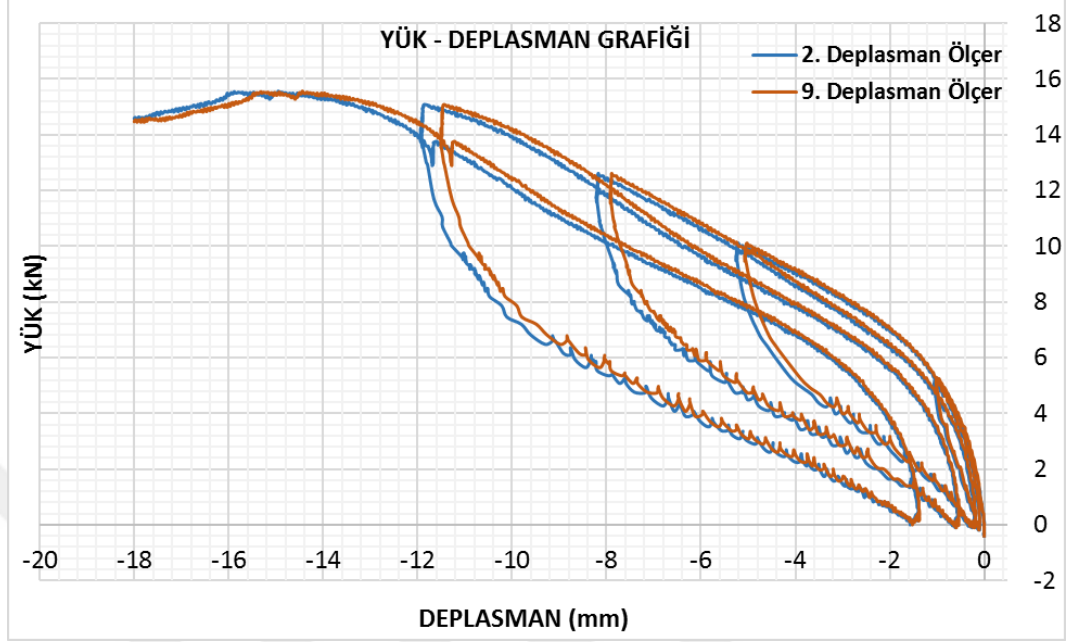
6.6.2. Gergili sistem yatay yükleme deneyi

Gergisiz olarak uygulanan yatay yükleme deneyinden sonra sistem üzerindeki tüm yükleme tamamen kaldırılarak sisteme gergi elemanları bağlanmıştır. Sistemin tekrar hazır hale gelmesiyle potansiyometreler aynı yerlerine tekrar yerleştirilmiştir ve sistem, gergisiz yapıda olduğu gibi benzer yüklemeye tabi tutulmuştur. Şekil 6.40’da gergili sistem görülmektedir.

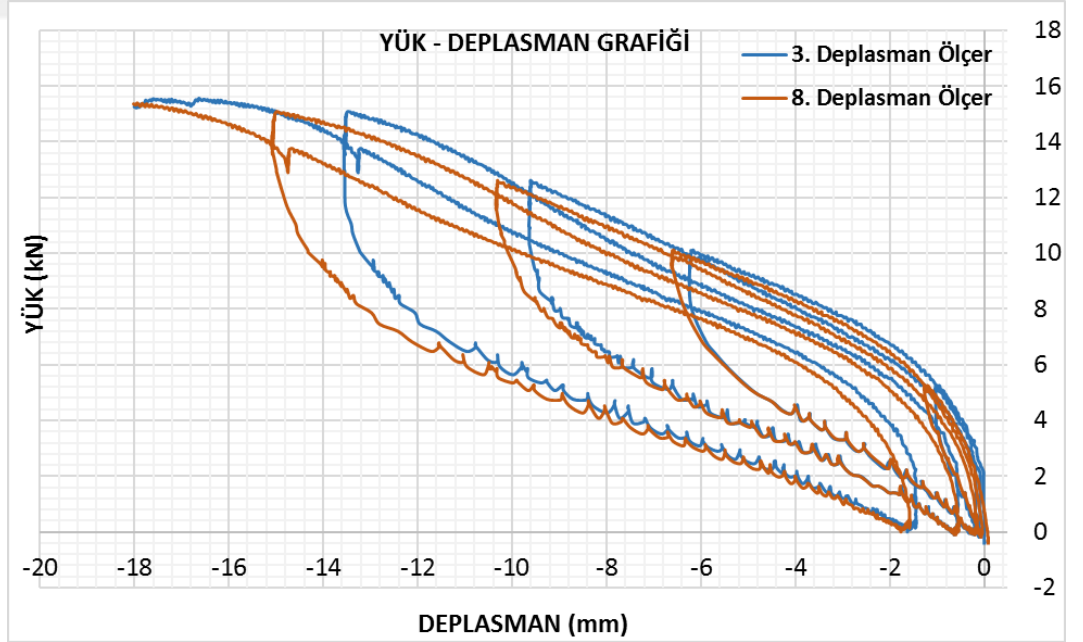


Şekil 6.40 Gergili sistem.

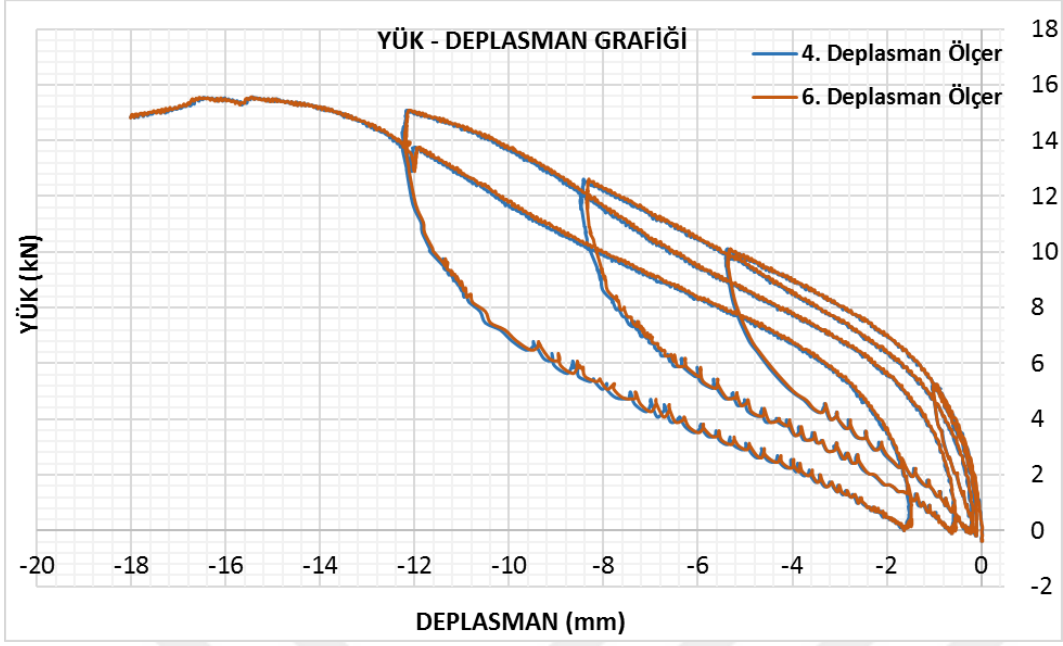
Gergili olarak yapılan yatay yükleme sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri Şekil 6.41 ile Şekil 6.44 arasında verilmiştir. Simetrik potansiyometreler aynı grafik üzerinde gösterilmiştir.



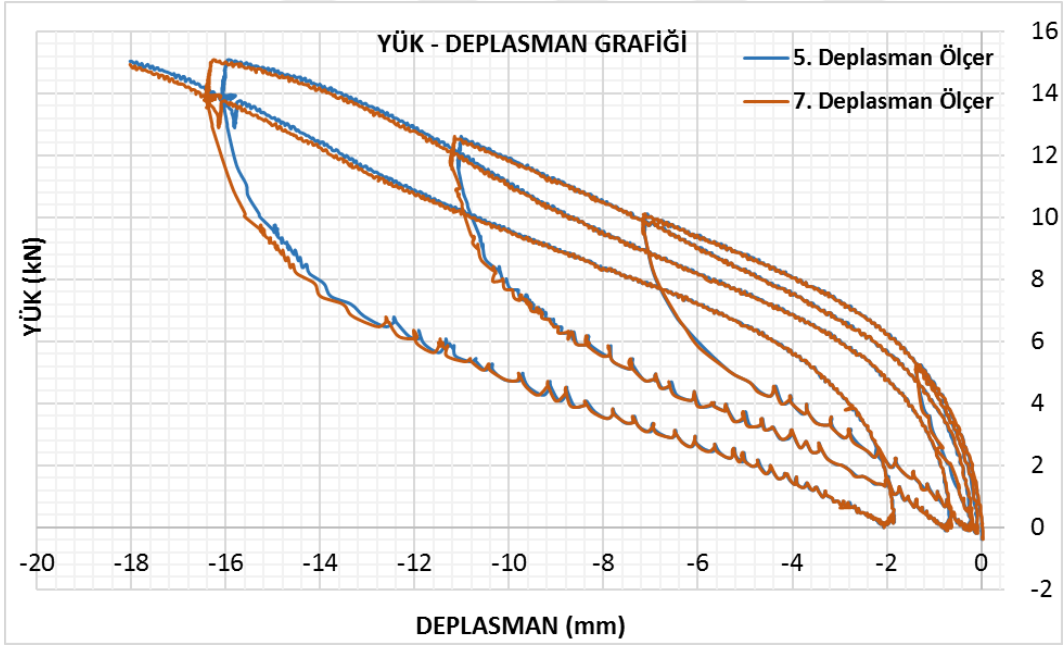
Şekil 6.41 Gergili sistem 2 ve 9 numaralı deplasman ölçerlerin yük-deplasman grafiği.



Şekil 6.42 Gergili sistem 3 ve 8 numaralı deplasman ölçerlerin yük-deplasman grafiği.



Şekil 6.43 Gergili sistem 4 ve 6 numaralı deplasman ölçerlerin yük-deplasman grafiği.



Şekil 6.44 Gergili sistem 5 ve 7 numaralı deplasman ölçerlerin yük-deplasman grafiği.

Gergili sistemde de gergisiz sisteminkine benzer şekilde çatlakların aynı bölgelerde olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 6.45’de yatay yükleme altında gergili sistemin yatay doğrultudaki hareketi ve yapıda oluşan çatlaklar görülmektedir.



Şekil 6.45 Gergili sistemde meydana gelen çatlaklar ve sistemin yatay hareketi.

Şekil 6.46'da yatay yükleme sebebiyle gergi elemanında oluşan eğilme görülmektedir.



Şekil 6.46 Gergi elemanında meydana gelen eğilme.

7. ARDIŞIK KEMERLİ TONOZ TİPİNDEKİ BİR YIĞMA YAPININ NÜMERİK ANALİZİ

Bu bölümde, SAP2000 bilgisayar programı ile deneysel modelin oluşturulma aşamaları ve bu model üzerinde gergili ve gergisiz olarak yatay yükleme, mesnet çökmesi ve spektrum analizleri yapılmıştır. Bu analiz sonucunda elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

7.1. Bilgisayar Modelinin Oluşturulması

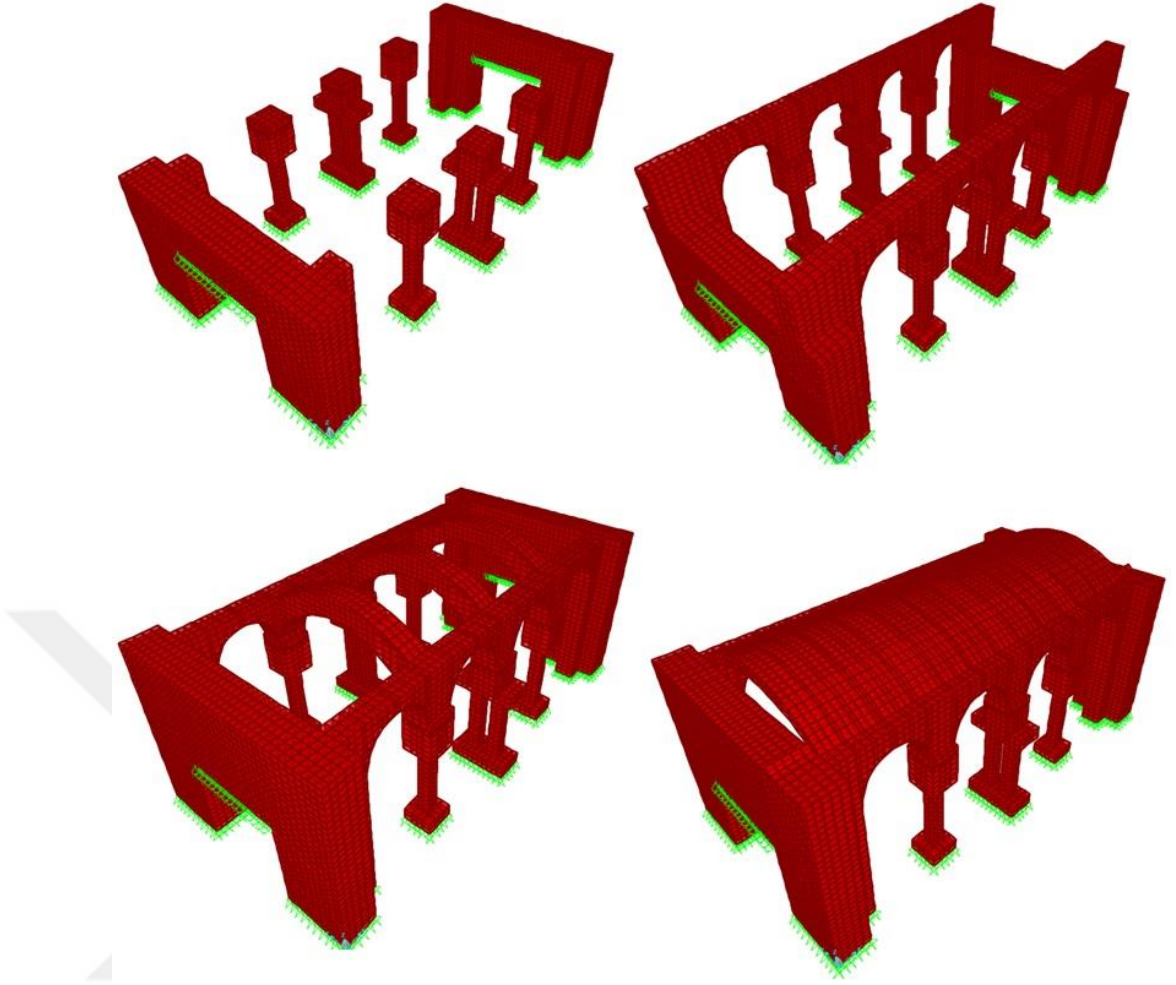
Laboratuvar ortamında oluşturulan deneysel yapı aynı zamanda SAP2000 programı yardımıyla bilgisayar ortamında da oluşturulmuştur. Yapının oluşturulmasında sonlu elemanlar yöntemiyle makro modelleme yapılmıştır. Yapının tamamı (gergi elemanları hariç) 3 boyutlu sonlu elemanlar (solid eleman) olarak modellenmiştir. Gergi elemanları çubuk eleman (frame eleman) olarak modellenmiştir.

Bilgisayar modelinde kullanılan malzeme tanımları:

- Duvar, kemer ve tonozda tuğla ve harç malzemelerinin,
- Sütun, alt ve üst başlıklarda mermer malzemesinin,
- Gergi elemanı olarak ise ahşap malzemesinin özellikleri kullanılmıştır.

Yapının modellenmesinde olabildiğince eş ve 5x5x5 cm boyutunda küp solid elemanlar kullanılmıştır. Gerekli kısımlarda üçgen solid elemanlar kullanılarak sistemin sağlıklı bir şekilde düğüm noktalarından birbirine aktarım yapması sağlanmıştır. Yapı, 24138 solid eleman ve 31238 düğüm noktasından oluşmaktadır. Gergili sistemde gergi elemanı olarak tanımlanan 11 tane 5x5 cm enkesitinde ahşap çubuk eleman bulunmaktadır.

Yapıda, laboratuvardaki gibi beton temeller oluşturmak yerine sütun alt başlığının altından sabit mesnetleme yapılmıştır. Yapı laboratuvardaki modelle birebir aynı ölçülerde olduğu için beden duvarlarının yükleme çerçevesinin üstüne oturan kısmı modelde de aynı şekilde oluşturulmuştur. Beden duvarlarının birleşim kısmı çerçeve profil yüksekliğinin üstünden bağlanmıştır ve mesnetleme olarak sadece düşey yönde tutulmuştur. Nümerik modelin oluşturulma aşamaları Şekil 7.1’de görülmektedir.



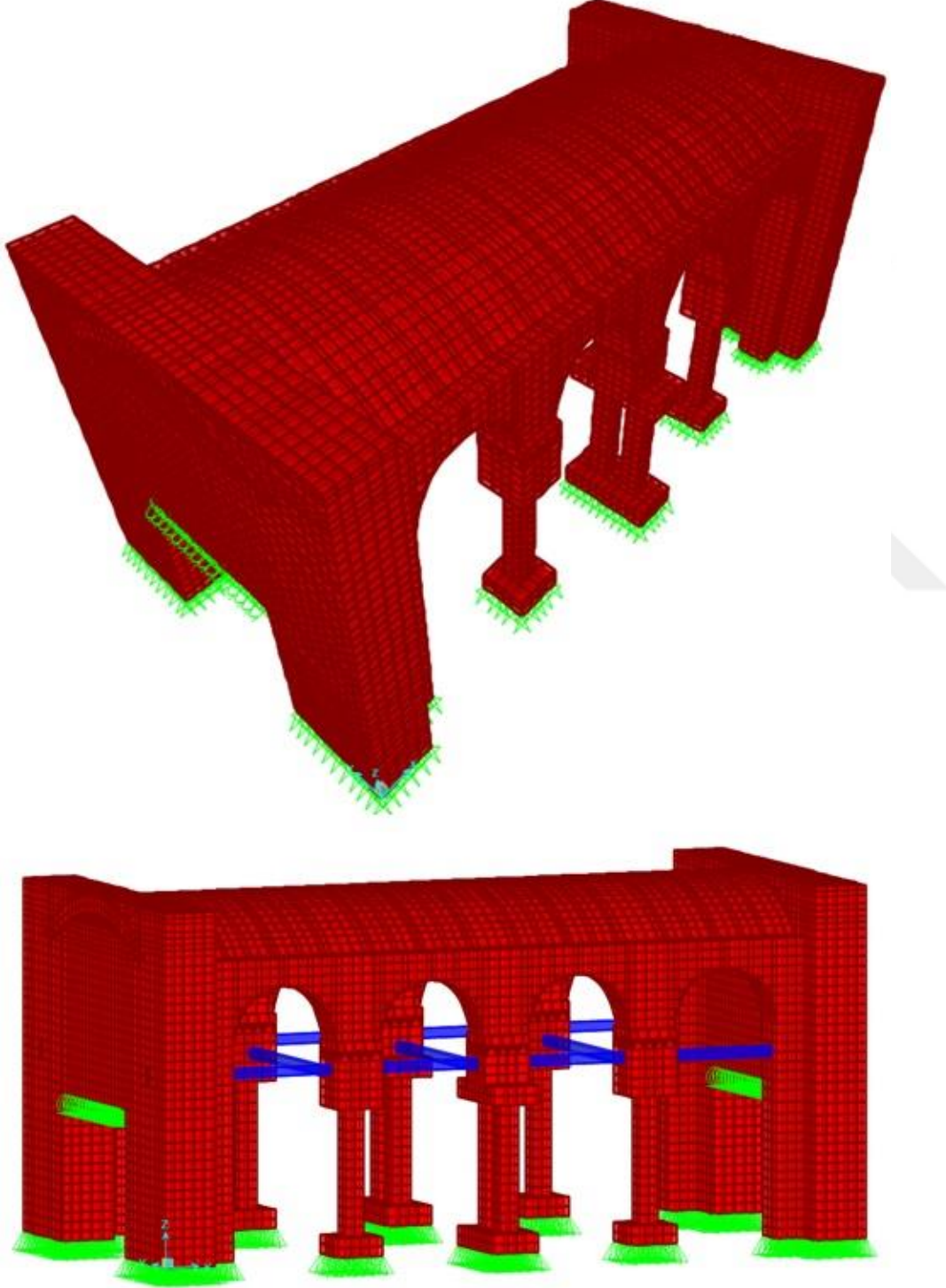
Şekil 7.1 Nümerik modelin oluşturulma aşamaları.

Şekil 7.2’de yapının gergili ve gergisiz olarak modellenmiş sistemlerin üç boyutlu görselleri görülmektedir.

Yapı modelinde tanımlanan ahşap, mermer ve tuğla-harç elemanlarının malzeme özellikleri Çizelge 7.1 verilmiştir. Tuğla-harç malzemesi sistemde makro modelle yöntemi kullanılması sebebiyle tek bir eleman olarak düşünülmüştür. Bu sebeple tek bir birim hacim ağırlık ve elastisite modülü kullanılmıştır. Tuğla-harç malzemesinin birim hacim ağırlık ve elastisite modülü ve mermer malzemesinin birim hacim ağırlığı laboratuvar ortamında yapılan deney sonuçlarına göre belirlenmiştir. Tuğla-harç malzemesinin elastisite modülü belirlenirken yük-deplasman grafiği kullanılmıştır. Mermerin elastisite modülü için ortalama bir dayanım değeri baz alınmıştır. Ahşap için kullanılan değerler ise TS647’den alınmıştır. Analiz sonuçlarında verilen tüm değerler birim olarak aksi belirtilmedikçe kilogram ve santimetre olarak kullanılmıştır.

Çizelge 7.1 Nümerik modelde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.

Malzeme	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	Elastisite Modülü (kg/cm ²)
Tuğla - Harç	1,83	1500
Mermer	2,46	300000
Ahşap	0,60	100000



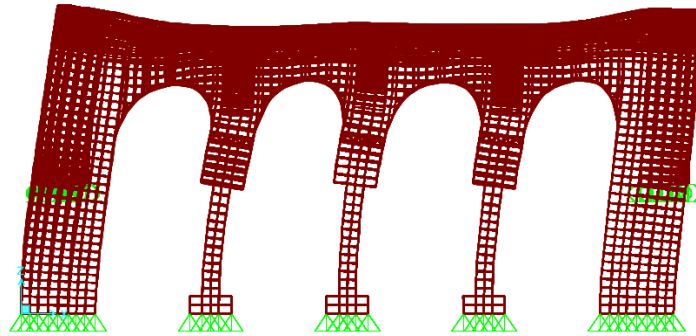
Şekil 7.2 Gergili ve gergisiz yapının üç boyutlu tamamlanmış görseli.

7.2. Nümerik Modelde Yatay Yükleme Analizi

Oluşturulan bilgisayar modeline laboratuvar ortamındakine benzer şekilde yatay yükleme yapılmıştır. Yatay yüklemenin yanı sıra yapı ağırlığı da bilgisayar tarafından hesaplanarak yükleme içine dâhil edilmiştir. Yatay yüklemede tüm deplasman ölçerlerin elastik bölgede kaldığı ortak bir yük değeri seçilerek sisteme etkiletilmiştir. Yük değerleri gergisiz sistem için 6,03 kN (614 kg), gergili sistem için 4,046 kN (412 kg) olarak belirlenmiştir. Bilgisayar modelinde lineer analiz uygulanarak elde edilen deplasman değerleri laboratuvar modelinden elde edilen deplasman değerleriyle kıyaslanmıştır.

7.2.1. Gergisiz sistem yatay yükleme analizi

Gergisiz sistemde yatay yükleme altında oluşan şekil değiştirmiş geometri Şekil 7.3’de görülmektedir. Deplasman ölçerlerin yerleştirildiği yerlere karşılık gelen düğüm noktalarındaki yatay deplasmanlar belirlenmiştir. Bu değerler 2 numaralı deplasman ölçere göre görel olarak karşılaştırılmıştır. Çizelge 7.2’de görel ötelenmeler ve değişim yüzdeleri görülmektedir.

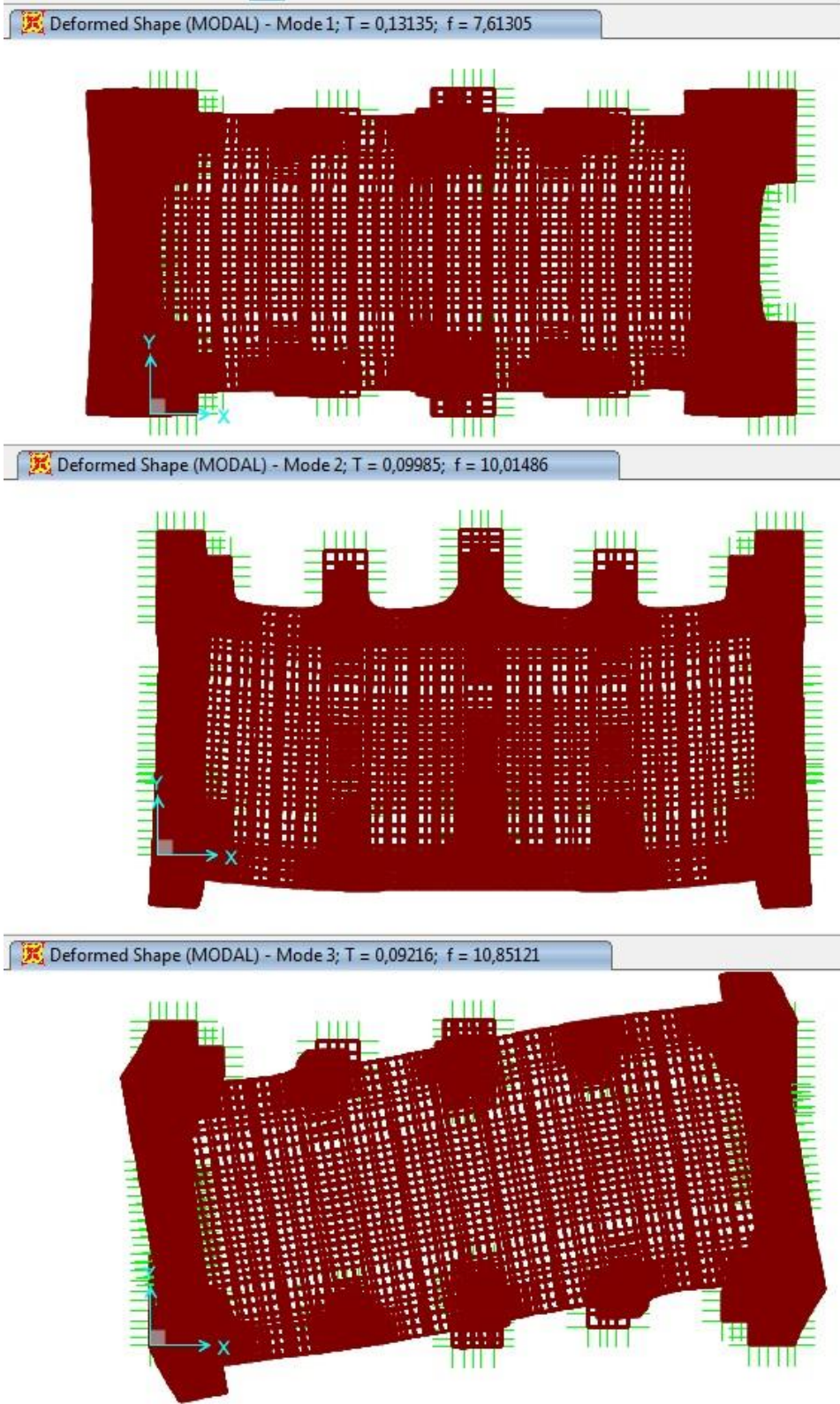


Şekil 7.3 Gergisiz sistem yatay yükleme etkisinde şekil değiştirmiş geometri.

Çizelge 7.2 Gergisiz sistem 2 numaralı deplasman ölçere göre görel ötelenmeleri (deplasman ölçer yerleşim planı için Şekil 6.32’e bakınız).

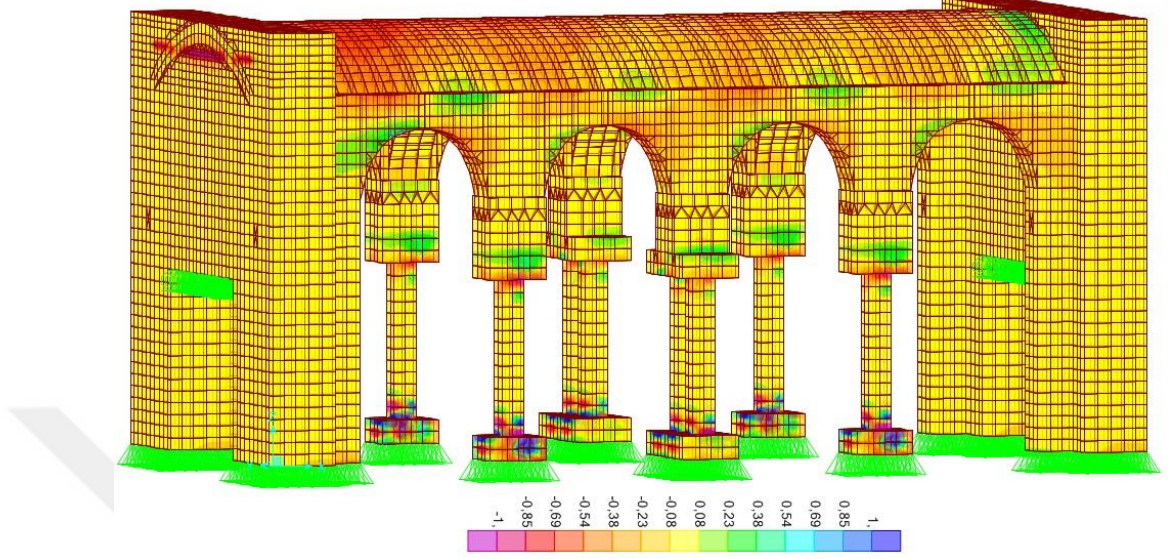
	MODEL			
	Laboratuvar		Nümerik	
	Değer (mm)	Yüzde (%)	Değer (mm)	Yüzde (%)
2. Deplasman Ölçer	0	0	0	0
3. Deplasman Ölçer	0	0	-0,076	-13
4. Deplasman Ölçer	-0,024	-5	-0,045	-8
5. Deplasman Ölçer	0,123	23	0,112	20
6. Deplasman Ölçer	-0,037	-7	-0,045	-8
7. Deplasman Ölçer	0,086	16	0,112	20
8. Deplasman Ölçer	0	0	-0,076	-13
9. Deplasman Ölçer	0	0	0	0

Şekil 7.4’de yapıya hâkim olan ilk 3 mod değerleri görülmektedir. 1. mod x doğrultusunda, 2. mod y doğrultusunda ve 3. mod burulma olarak oluşmuştur.

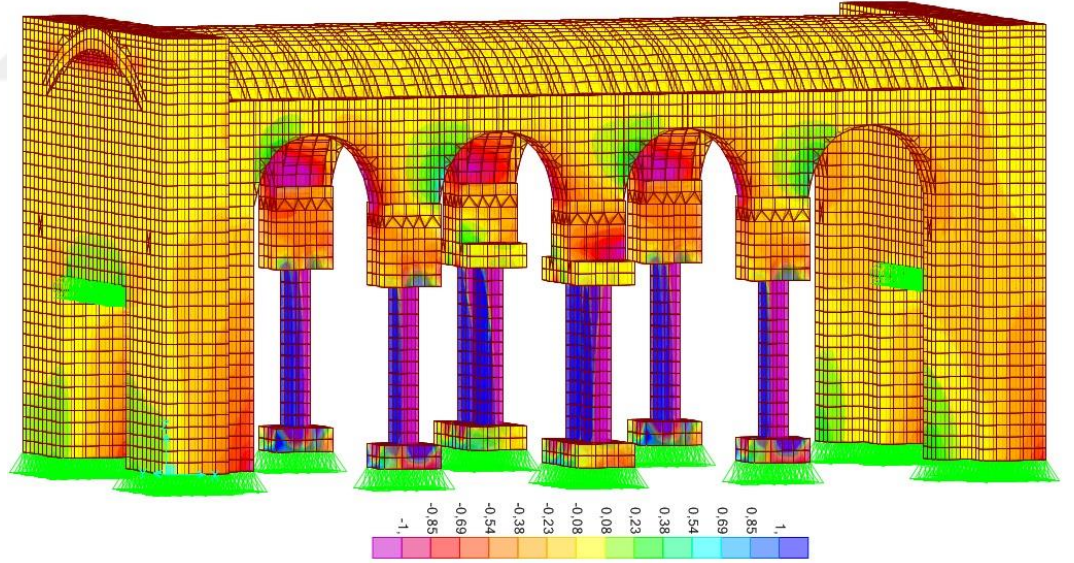


Şekil 7.4 Gergisiz sistem ilk 3 mod şekli.

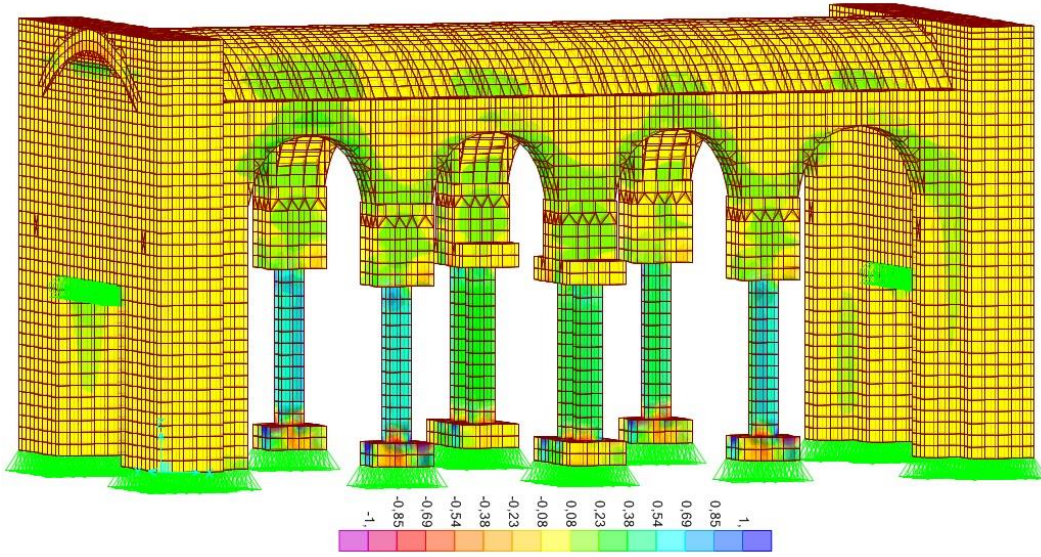
Yatay yükleme altında etkin gerilme değerlerinin oluştuğu yatayda S11, düşeyde S33 ve kesme değeri olarak S13 ile ilgili gerilme dağılımları Şekil 7.5 ile Şekil 7.7 arasında verilmiştir.



Şekil 7.5 Gergisiz sistem yatay yükleme S11 gerilme dağılımı.



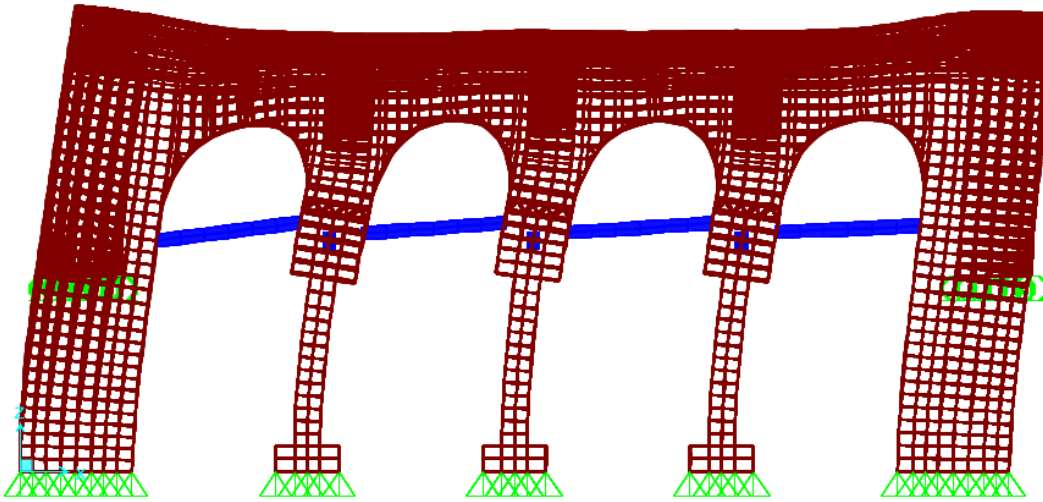
Şekil 7.6 Gergisiz sistem yatay yükleme S33 gerilme dağılımı.



Şekil 7.7 Gergisiz sistem yatay yükleme S13 gerilme dağılımı.

7.2.2. Gergili sistem yatay yükleme analizi

Gergili sistemde yatay yükleme altında oluşan şekil değiştirmiş geometri Şekil 7.8’de görülmektedir. Deplasman ölçerlerin yerleştirildiği yerlere karşılık gelen düğüm noktalarındaki yatay deplasmanlar belirlenmiştir. Bu değerler 2 numaralı deplasman ölçere göre göreceli olarak karşılaştırılmıştır. Çizelge 7.3’de göreceli ötelenmeler ve değişim yüzdeleri görülmektedir.

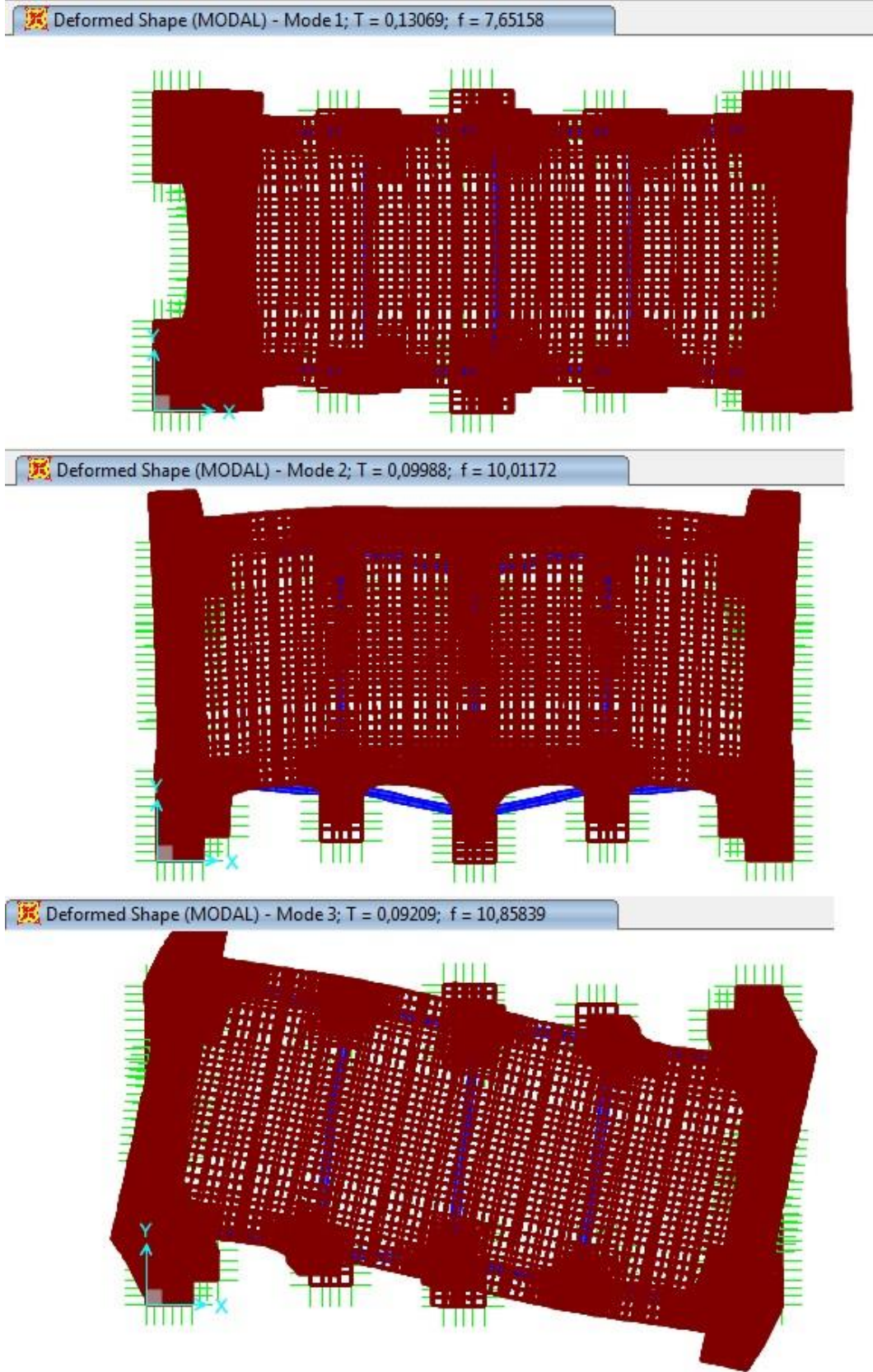


Şekil 7.8 Gergili sistem yatay yükleme etkisinde şekil değiştirmiş geometri.

Çizelge 7.3 Gergili sistem 2 numaralı deplasman ölçere göre görelî ötelenmeleri (deplasman ölçer yerleşim planı için Şekil 6.32'e bakınız).

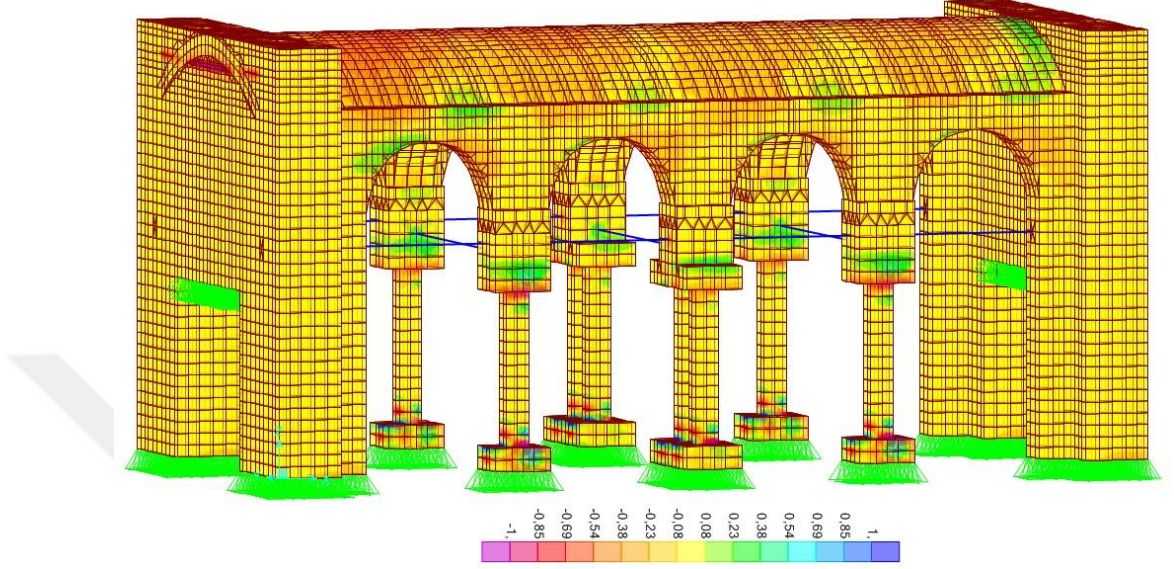
	MODEL			
	Laboratuvar		Nümerik	
	Değer (mm)	Yüzde (%)	Değer (mm)	Yüzde (%)
2. Deplasman Ölçer	0	0	0	0
3. Deplasman Ölçer	-0,122	-21	-0,010	-3
4. Deplasman Ölçer	0	0	-0,001	0
5. Deplasman Ölçer	0,160	27	0,094	26
6. Deplasman Ölçer	-0,036	-6	-0,001	0
7. Deplasman Ölçer	0,160	27	0,094	26
8. Deplasman Ölçer	0,086	15	-0,010	-3
9. Deplasman Ölçer	-0,024	-4	0	0

Şekil 7.9'da yapıya hâkim olan ilk 3 mod değerleri görülmektedir. 1. mod x doğrultusunda, 2. mod y doğrultusunda ve 3. mod burulma olarak oluşmuştur.

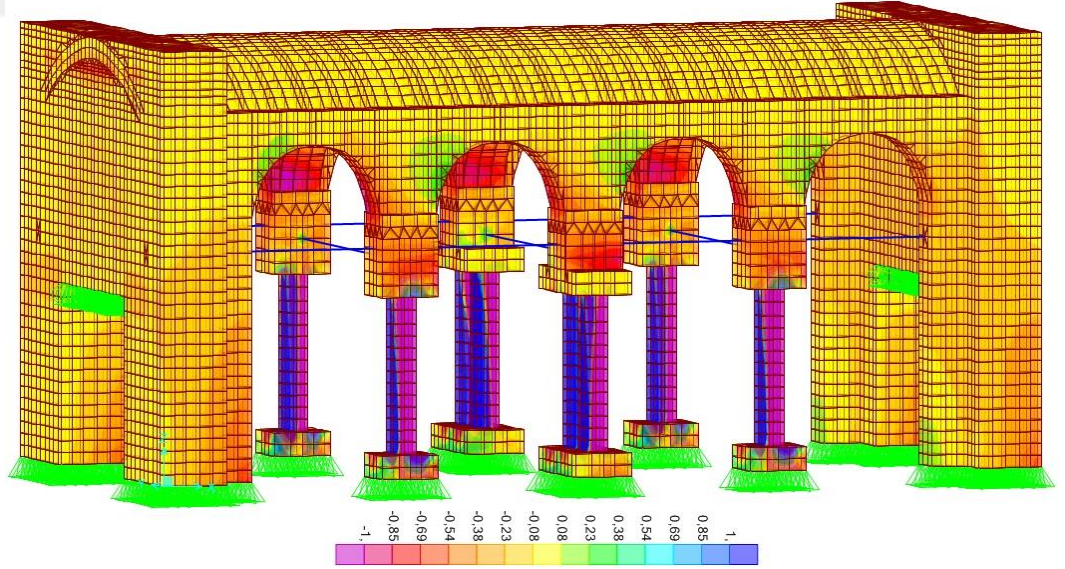


Şekil 7.9 Gergili sistem ilk 3 mod şekli.

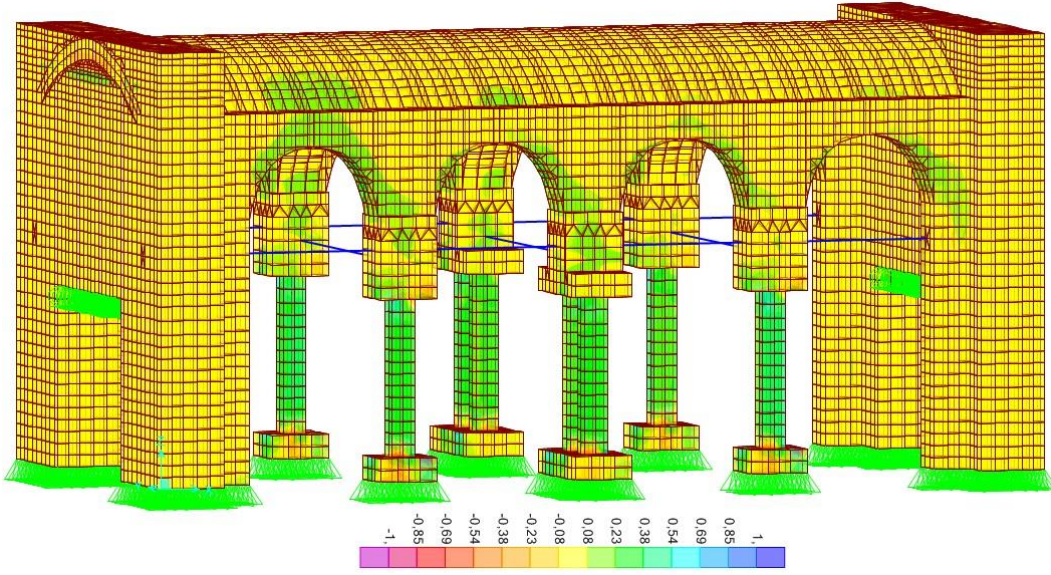
Yatay yükleme altında etkin gerilme değerlerinin olduğu yatayda S11, düşeyde S33 ve kesme değeri olarak S13 ile ilgili gerilme dağılımları Şekil 7.10 ile Şekil 7.12 arasında verilmiştir. Şekil 7.13’de gergi elemanlarında oluşan aksenal kuvvet değerleri görülmektedir.



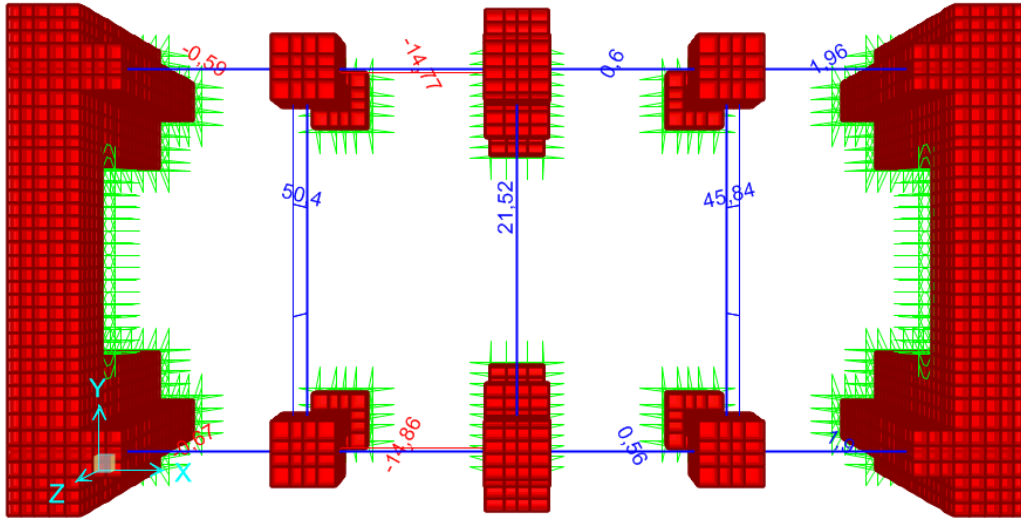
Şekil 7.10 Gergili sistem yatay yükleme S11 gerilme dağılımı.



Şekil 7.11 Gergili sistem yatay yükleme S33 gerilme dağılımı.



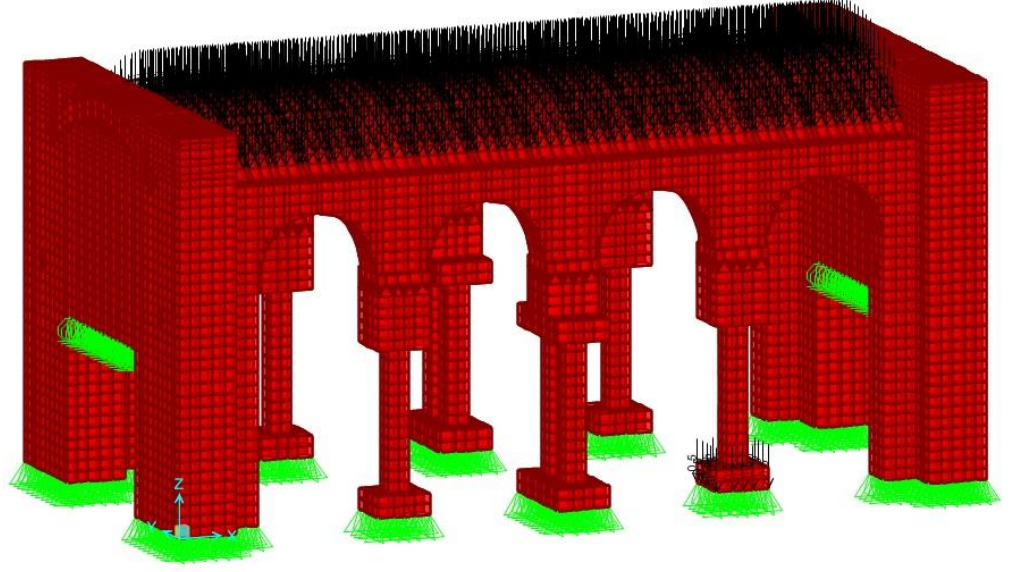
Şekil 7.12 Gergili sistem yatay yükleme S13 gerilme dağılımı.



Şekil 7.13 Gergili sistem yatay yükleme gergi elemanlarında oluşan eksenel kuvvet değerleri.

7.3. Mesnet Çökmesi Analizi

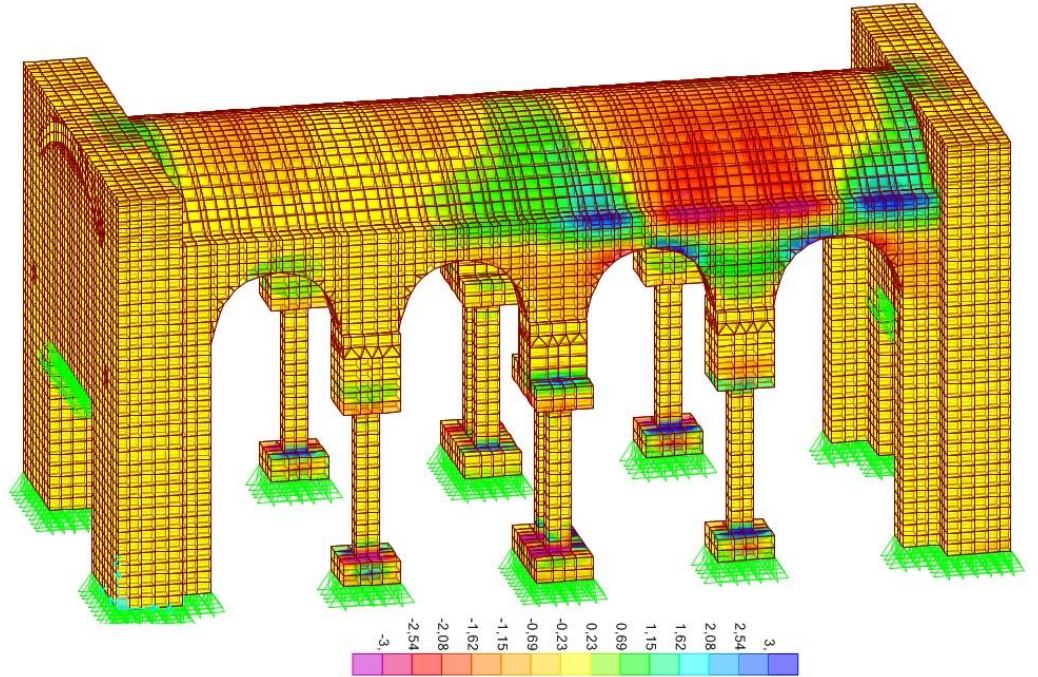
Bilgisayar modeline B4 mesnetinde 5 mm düşey çökme ve tonozun üst kısmındaki düğüm noktalarına toplam 1950 kg düşey yük yapı ağırlığına ilave olarak etkiletilmiştir. Şekil 7.14’de mesnet çökmesi ve ilave etkiletilen düşey yük görülmektedir. Gergili ve gergisiz sistemler için benzer yükleme koşulları uygulanmıştır.



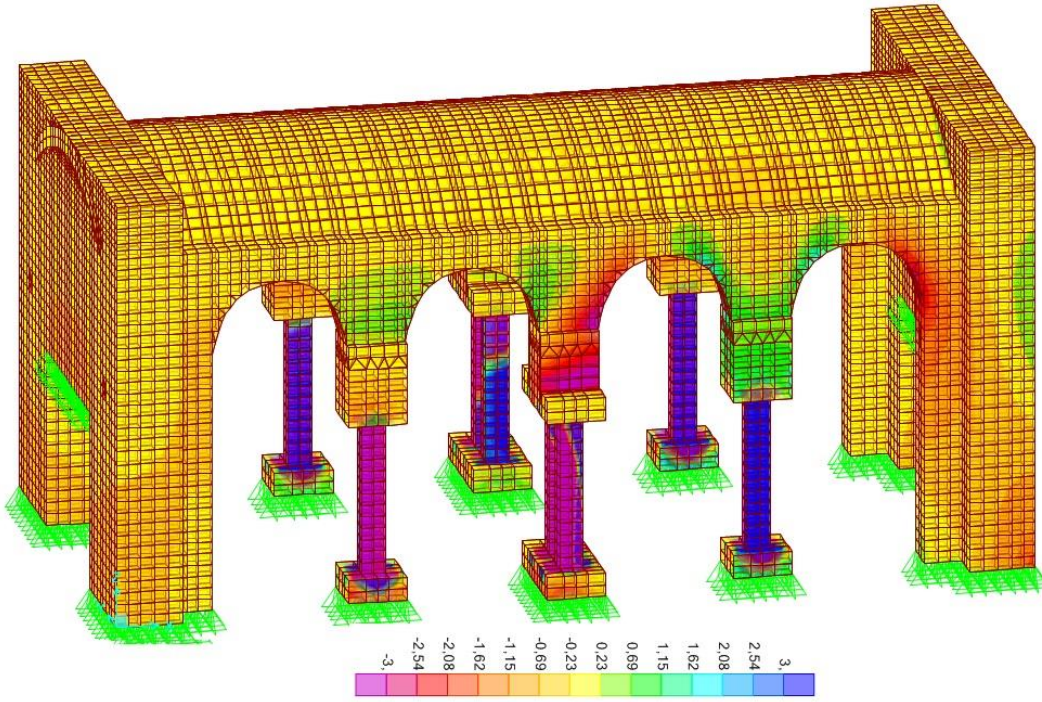
Şekil 7.14 Mesnet çökmesi ve ilave düşey yük.

7.3.1. Gergisiz sistemde mesnet çökmesi analizi

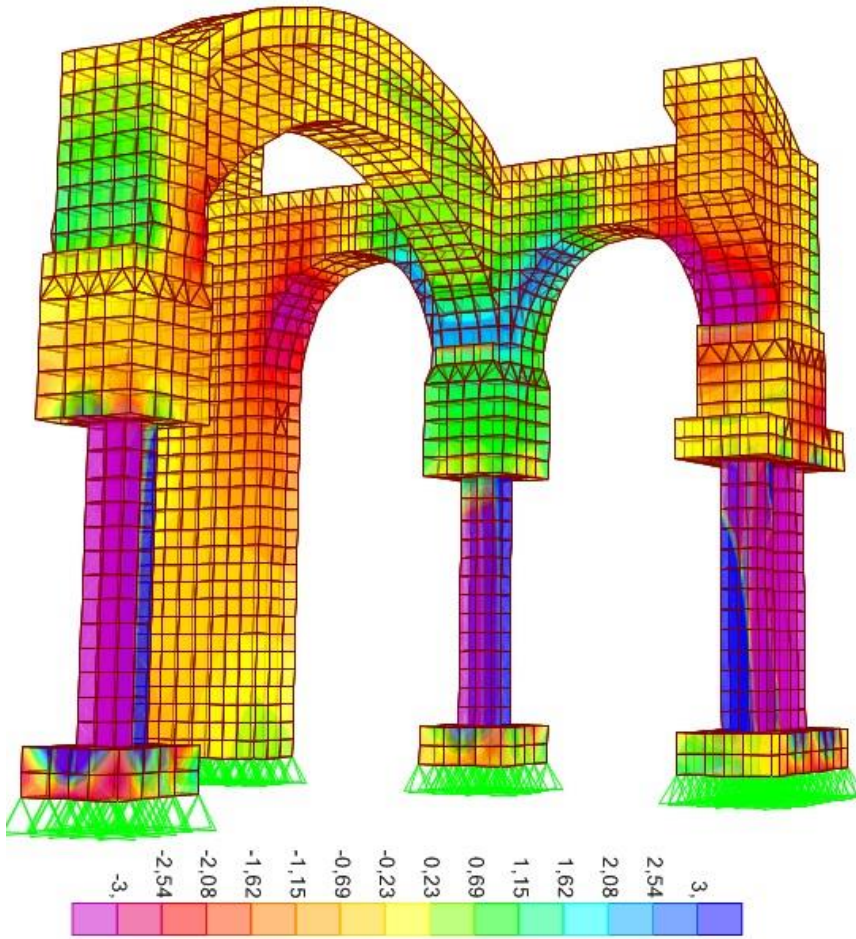
Gergisiz sisteme mesnet çökmesi altında yapıda meydana gelen gerilme dağılımları Şekil 7.15 ile Şekil 7.17 arasında verilmiştir. Şekil 7.15’de yatay doğrultuda S11, Şekil 7.16’da düşey doğrultuda S33 ve Şekil 7.17’de S33’de sadece mesnet çökmesinin uygulandığı sütun çevresindeki 3 kemerin gerilme dağılımları görülmektedir.



Şekil 7.15 Gergisiz sistem mesnet çökmesi S11 gerilme dağılımı.



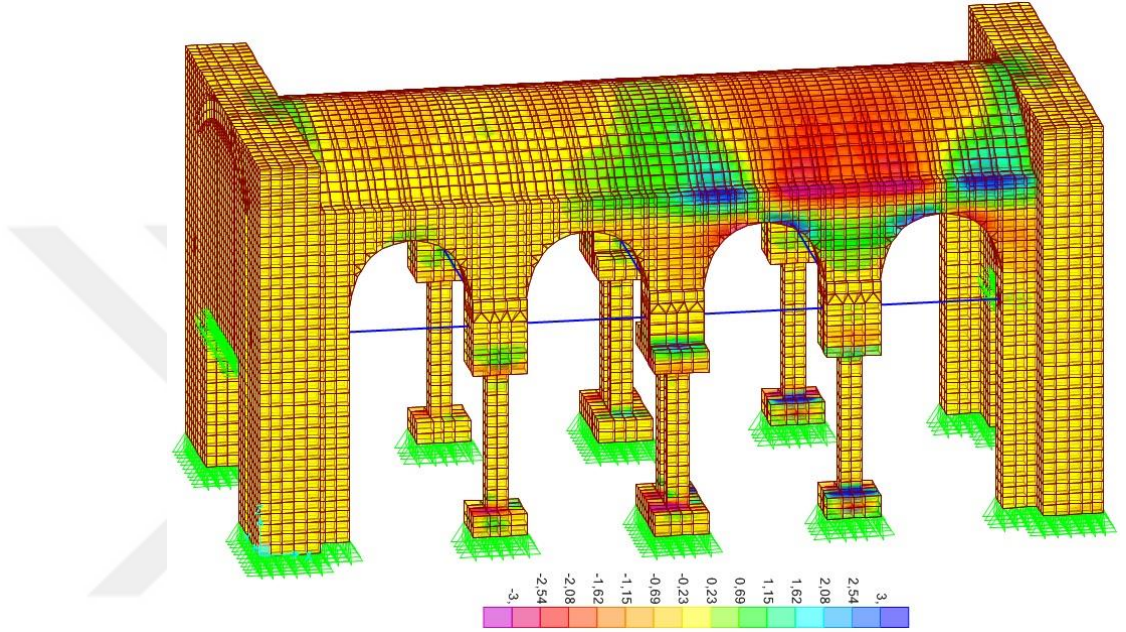
Şekil 7.16 Gergisiz sistem mesnet çökmesi S33 gerime dağılımı.



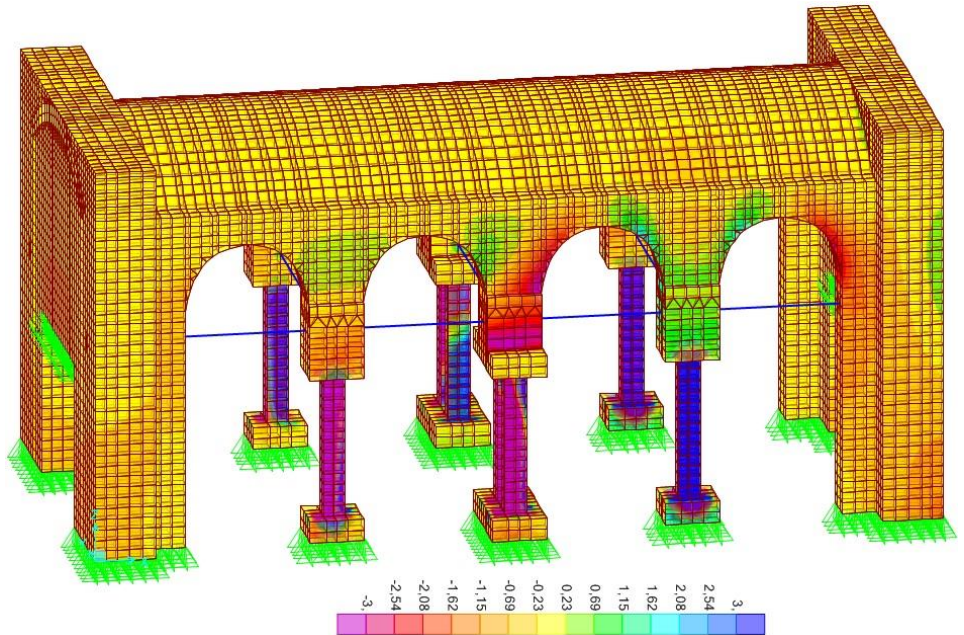
Şekil 7.17 Gergisiz sistem mesnet çökmesi etrafındaki 3 kemerin S33 gerilme dağılımı.

7.3.2. Gergili sistem mesnet çökmesi analizi

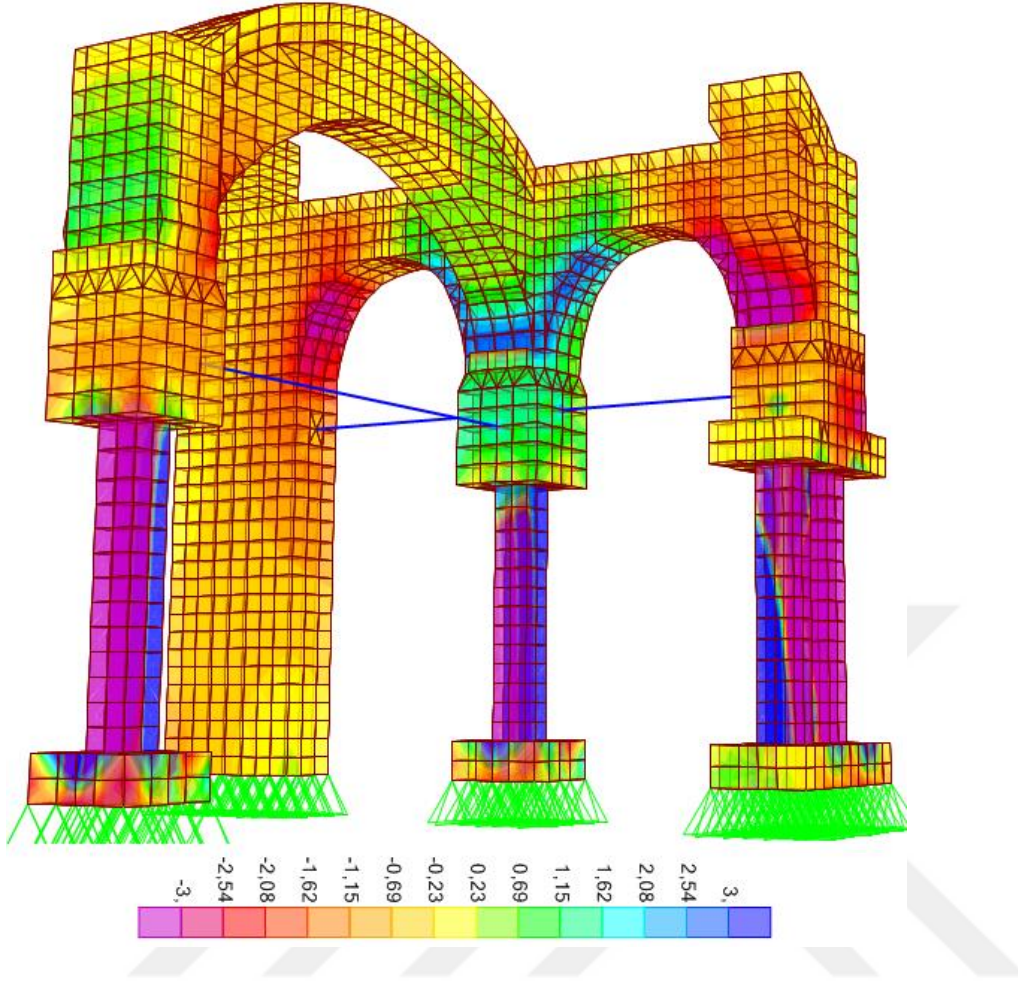
Gergili sisteme mesnet çökmesi altında yapıda meydana gelen gerilmeler Şekil 7.18 ile Şekil 7.20 arasında verilmiştir. Şekil 7.18’de yatay doğrultuda S11, Şekil 7.19’da düşey doğrultuda S33 ve Şekil 7.20’de S33’de sadece mesnet çökmesinin uygulandığı sütun çevresindeki 3 kemerin gerilme dağılımları görülmektedir.



Şekil 7.18 Gergili sistem mesnet çökmesi S11 gerilme dağılımı.

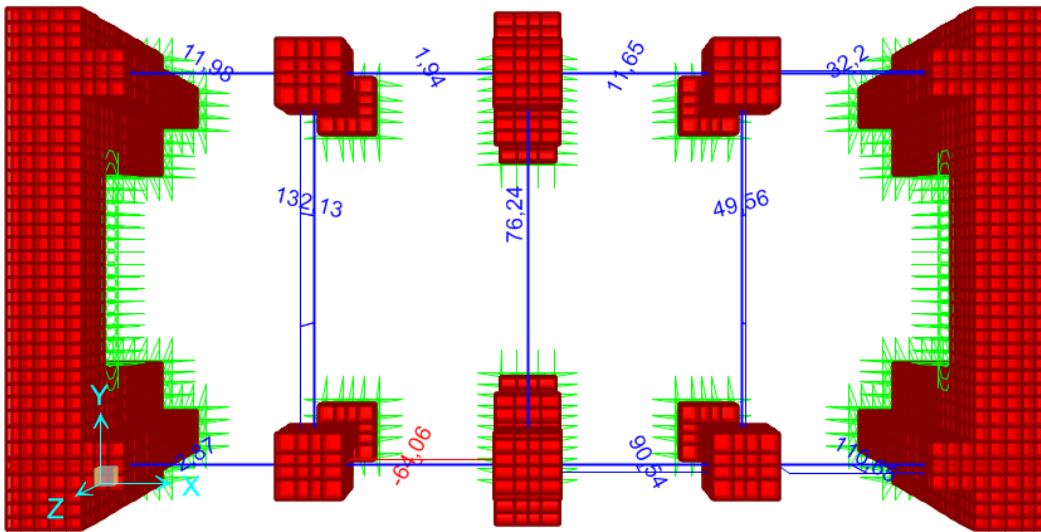


Şekil 7.19 Gergili sistem mesnet çökmesi S33 gerilme dağılımı.



Şekil 7.20 Gergili sistem mesnet çökmesi etrafındaki 3 kemerin S33 gerilme dağılımı.

Şekil 7.21’de gergi elemanlarında meydana gelen eksenel kuvvet değerleri görülmektedir.



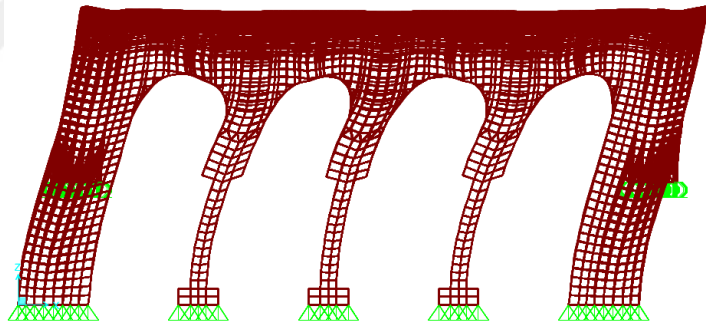
Şekil 7.21 Gergili sistem mesnet çökmesi gergi elemanlarında oluşan eksenel kuvvet değerleri.

7.4. Spektrum Analizi

Bilgisayar modelinin deprem etkisi altındaki davranışını incelemek amacıyla spektrum analizi yapılmıştır. Yapılan bu spektrum analizinde kullanılan değerler yapının bulunduğu il ve bölge koşulları dikkate alınarak belirlenmiştir. Deprem bölgesi 1. bölge, yerel zemin sınıfı Z3, yapı önem katsayısı 1,5 ve deprem yükü azaltma katsayısı 3 olarak alınmıştır. Ayrıca deprem etkisinin daha gerçekçi olarak görülebilmesi için tonoz kısmının üstüne mesnet çökmesinde olduğu gibi her bir düğüm noktasına 1 kg olmak üzere toplam 1950 kg yapı ağırlığına ilave olarak düşey yük etkiletilmiştir (Şekil 7.14).

7.4.1. Gergisiz sistem spektrum analizi

Gergisiz sistemde spektrum analizi altında oluşan şekil değiştirmiş geometri Şekil 7.22’de görülmektedir. Yatay yükleme altında deplasmanların belirlenmesi için kullanılan düğüm noktalarının aynıları spektrum analizi içinde kullanılmıştır ve 2 numaralı deplasman ölçerin olduğu noktaya göre diğer deplasman ölçerlerin görelî ötelenmeleri ve değişim yüzdeleri çizelge 7.4’de verilmiştir.

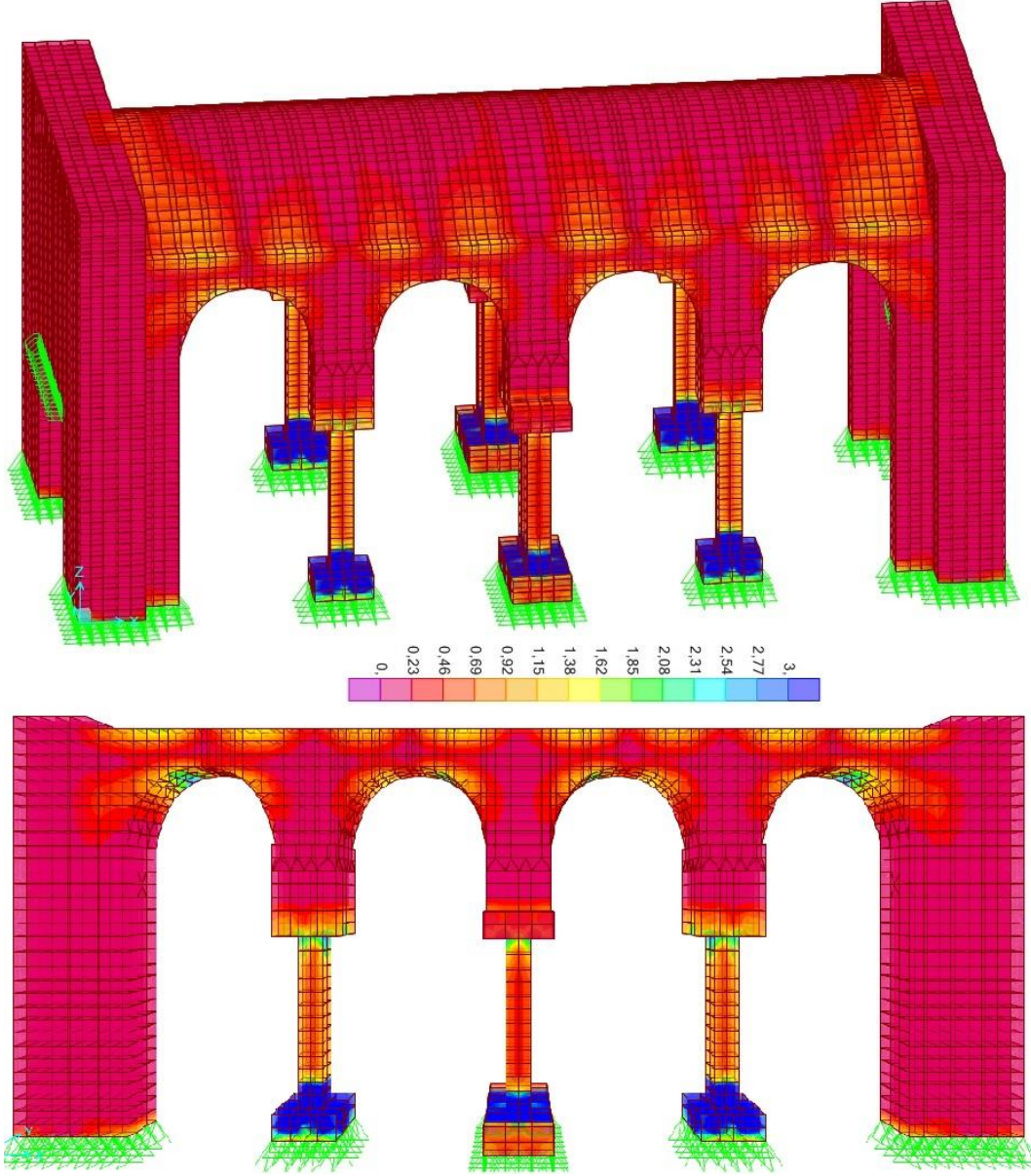


Şekil 7.22 Gergisiz sistem spektrum analizi şekil değiştirmiş geometri.

Çizelge 7.4 Gergisiz sistem 2 numaralı deplasman ölçere göre görelî ötelenmeleri (deplasman ölçer yerleşim planı için Şekil 6.32’e bakınız).

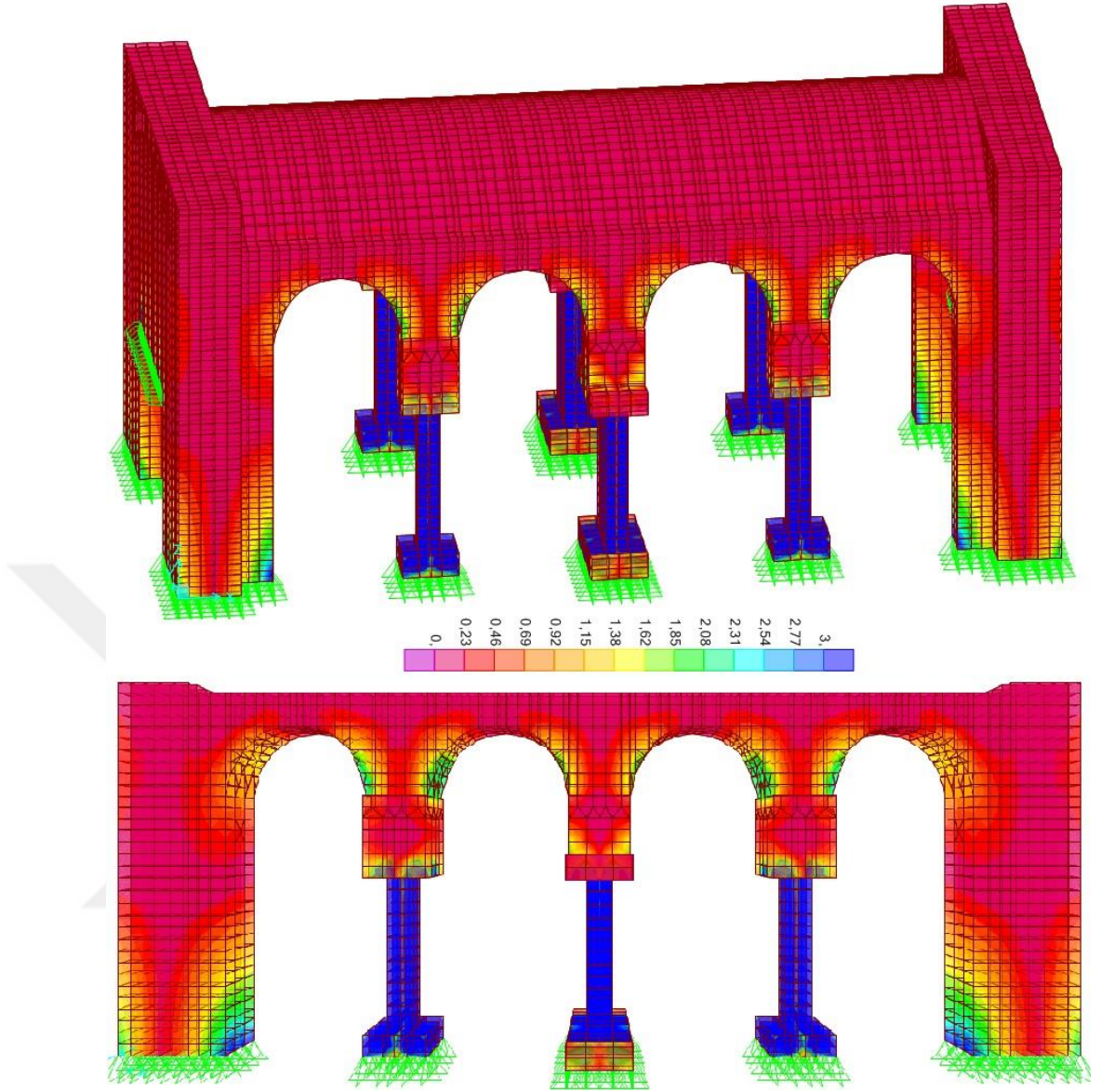
Deplasman Ölçer Numarası	SONUÇLAR		
	Deplasman (mm)	Görelî Deplasman (mm)	Değişim Yüzdesi (%)
2. Deplasman Ölçer	2,595	0	0
3. Deplasman Ölçer	2,292	-0,303	-12
4. Deplasman Ölçer	2,714	0,119	5
5. Deplasman Ölçer	3,708	1,113	43
6. Deplasman Ölçer	2,714	0,119	5
7. Deplasman Ölçer	3,708	1,113	43
8. Deplasman Ölçer	2,292	-0,303	-12
9. Deplasman Ölçer	2,595	0	0

Gergisiz sistem spektrum analizinde etkin olarak çekme gerilmelerinin olduğu görülmüştür. Spektrum analizi altında etkin gerilme değerlerinin olduğu yatayda S11, düşeyde S33 ve kesme değeri olarak S13 ile ilgili gerilme dağılımları Şekil 7.23 ile Şekil 7.25 arasında görülmektedir. Şekil 7.23’de nümerik modelin üç boyutlu halinin ve B aksının S11 gerilme dağılımları görülmektedir.



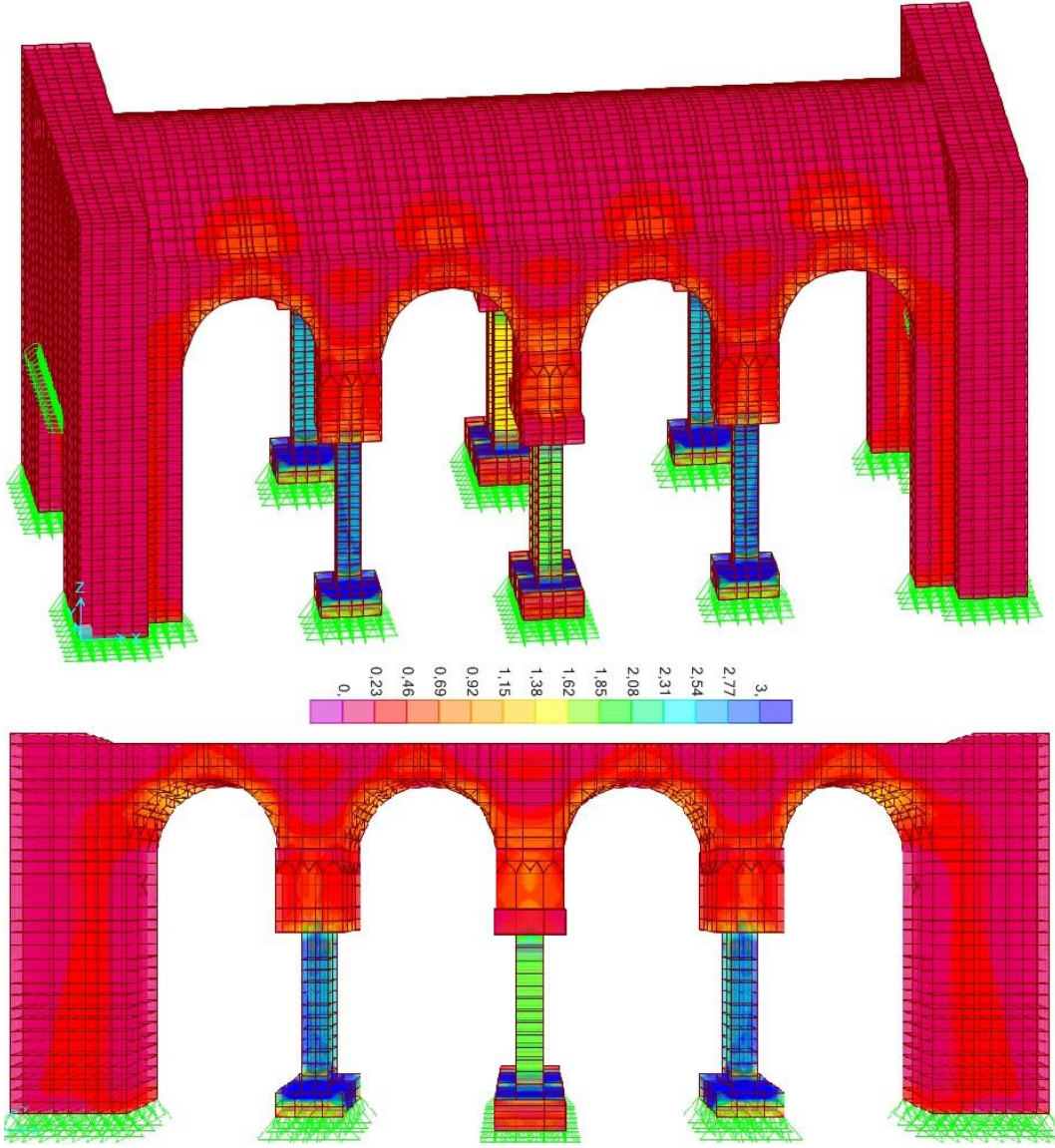
Şekil 7.23 Gergisiz sistem spektrum analizi S11 gerilme dağılımı.

Şekil 7.24’de modelin üç boyutlu halinin ve B aksının S33 gerilme dağılımları görülmektedir.



Şekil 7.24 Gergisiz sistem spektrum analizi S33 gerilme dağılımı.

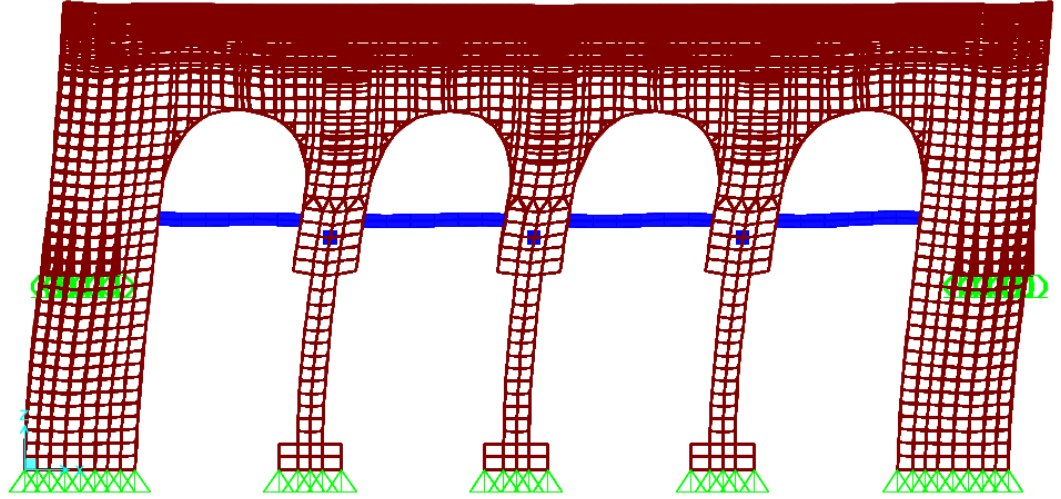
Şekil 7.25’de modelin üç boyutlu halinin ve B aksının S13 gerilme dağılımları görülmektedir.



Şekil 7.25 Gergisiz sistem spektrum analizi S13 gerilme dağılımı.

7.4.2. Gergili sistem spektrum analizi

Gergili sistemde spektrum analizi altında oluşan şekil değiştirmiş geometri Şekil 7.26’da görülmektedir. Yatay yükleme altında deplasmanların belirlenmesi için kullanılan düğüm noktalarının aynıları spektrum analizi içinde kullanılmıştır ve 2 numaralı deplasman ölçerin olduğu noktaya göre diğer deplasman ölçerlerin göreceli ötelenmeleri ve değişim yüzdeleri Çizelge 7.5’de verilmiştir.

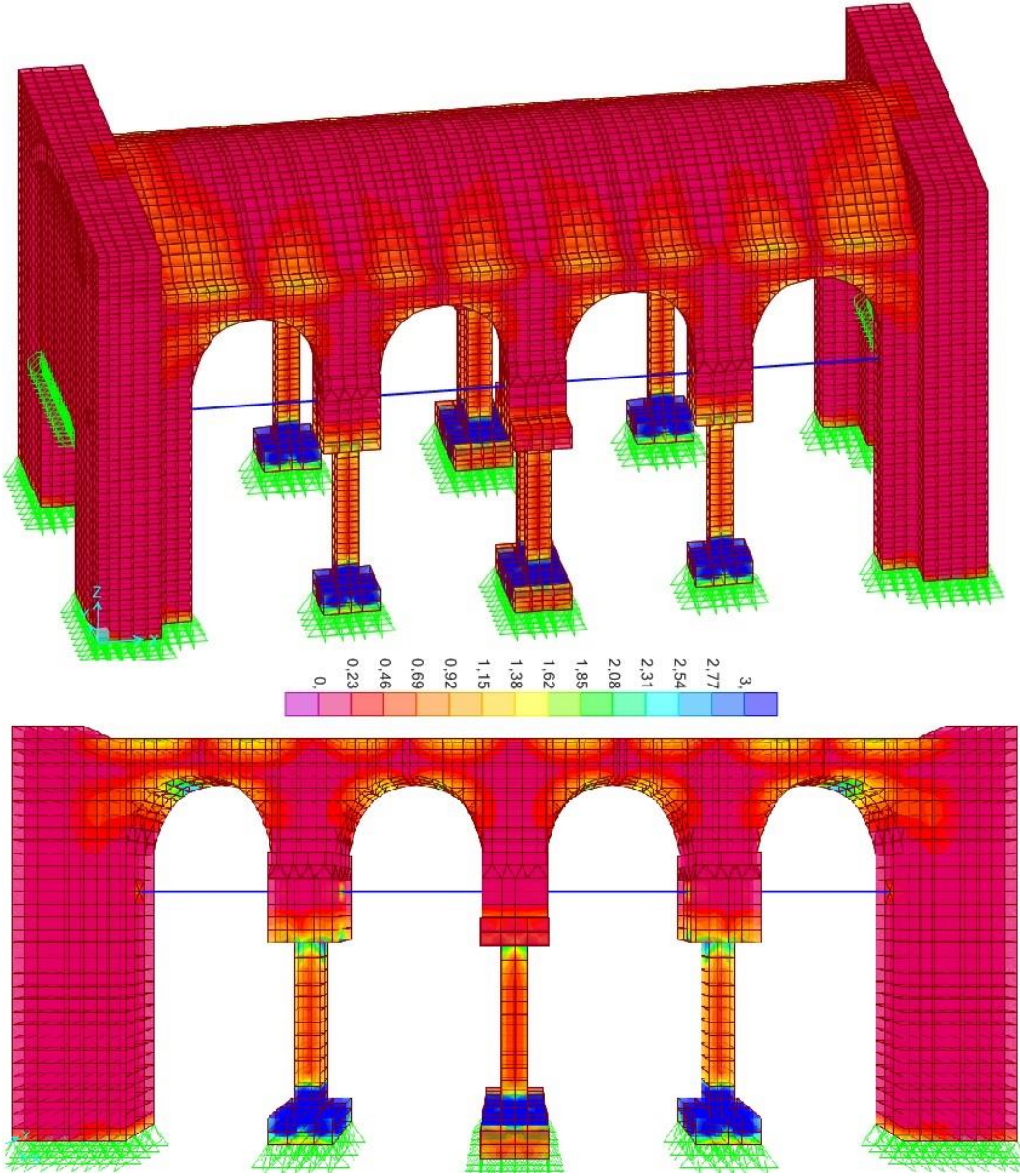


Şekil 7.26 Gergili sistem spektrum analizi şekil değiştirmiş geometri.

Çizelge 7.5 Gergili sistem 2 numaralı deplasman ölçere göre göreceli ötelenmeleri (deplasman ölçer yerleşim planı için Şekil 6.32'e bakınız).

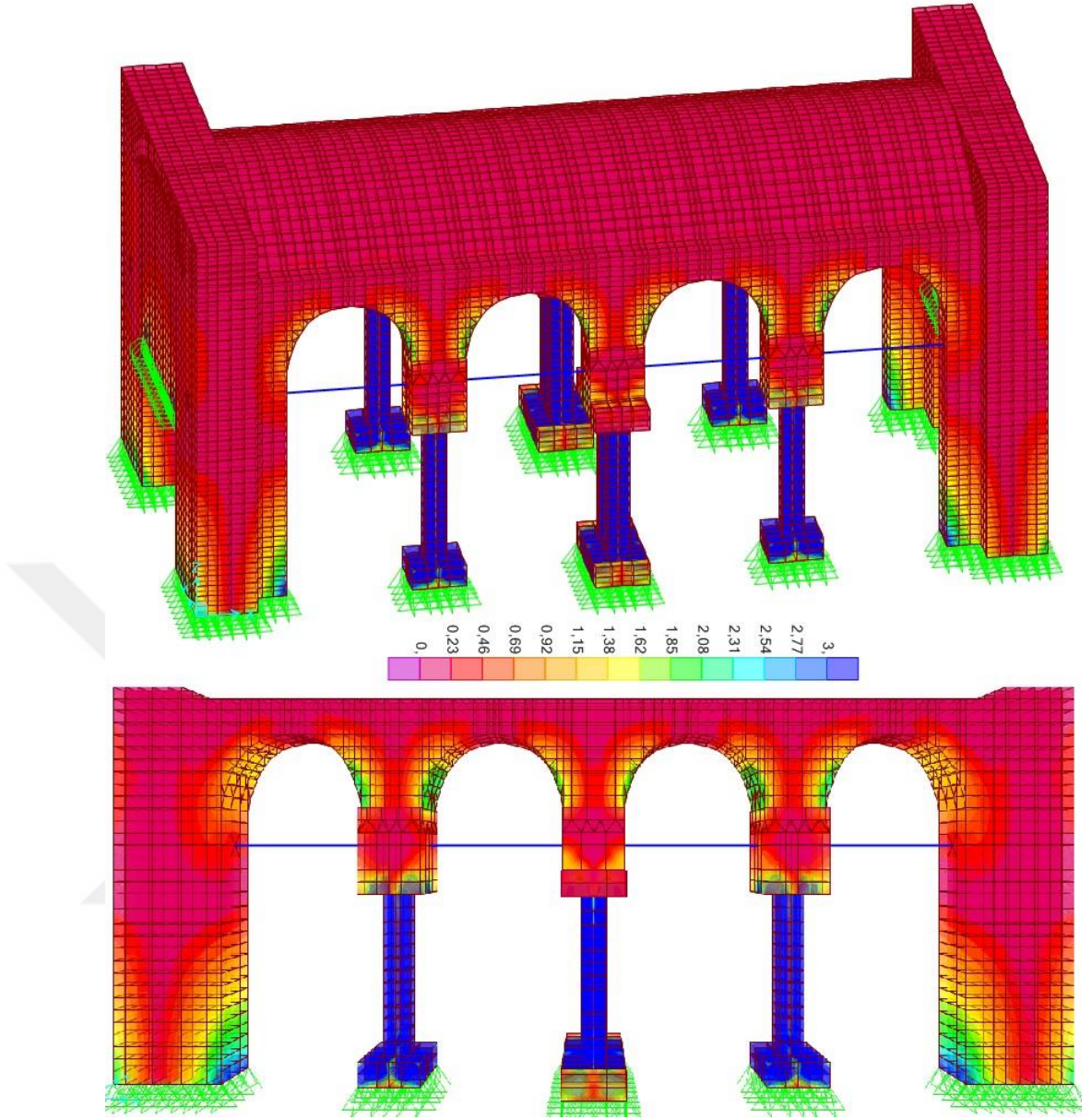
Deplasman Ölçer Numarası	SONUÇLAR		
	Deplasman (mm)	Göreceli Deplasman (mm)	Değişim Yüzdesi (%)
2. Deplasman Ölçer	2,557	0	0
3. Deplasman Ölçer	2,451	-0,106	-4
4. Deplasman Ölçer	2,681	0,124	5
5. Deplasman Ölçer	3,675	1,118	44
6. Deplasman Ölçer	2,681	0,124	5
7. Deplasman Ölçer	3,675	1,118	44
8. Deplasman Ölçer	2,451	-0,106	-4
9. Deplasman Ölçer	2,557	0	0

Gergisiz sistem spektrum analizinde etkin olarak çekme gerilmelerinin oluştuğu görülmüştür. Spektrum analizi altında etkin gerilme değerlerinin oluştuğu yatayda S11, düşeyde S33 ve kesme değeri olarakta S13 ile ilgili gerilme dağılımları Şekil 7.27 ile Şekil 7.29 arasında verilmiştir. Şekil 7.27'de modelin üç boyutlu halinin ve B aksının S11 gerilme dağılımları görülmektedir.



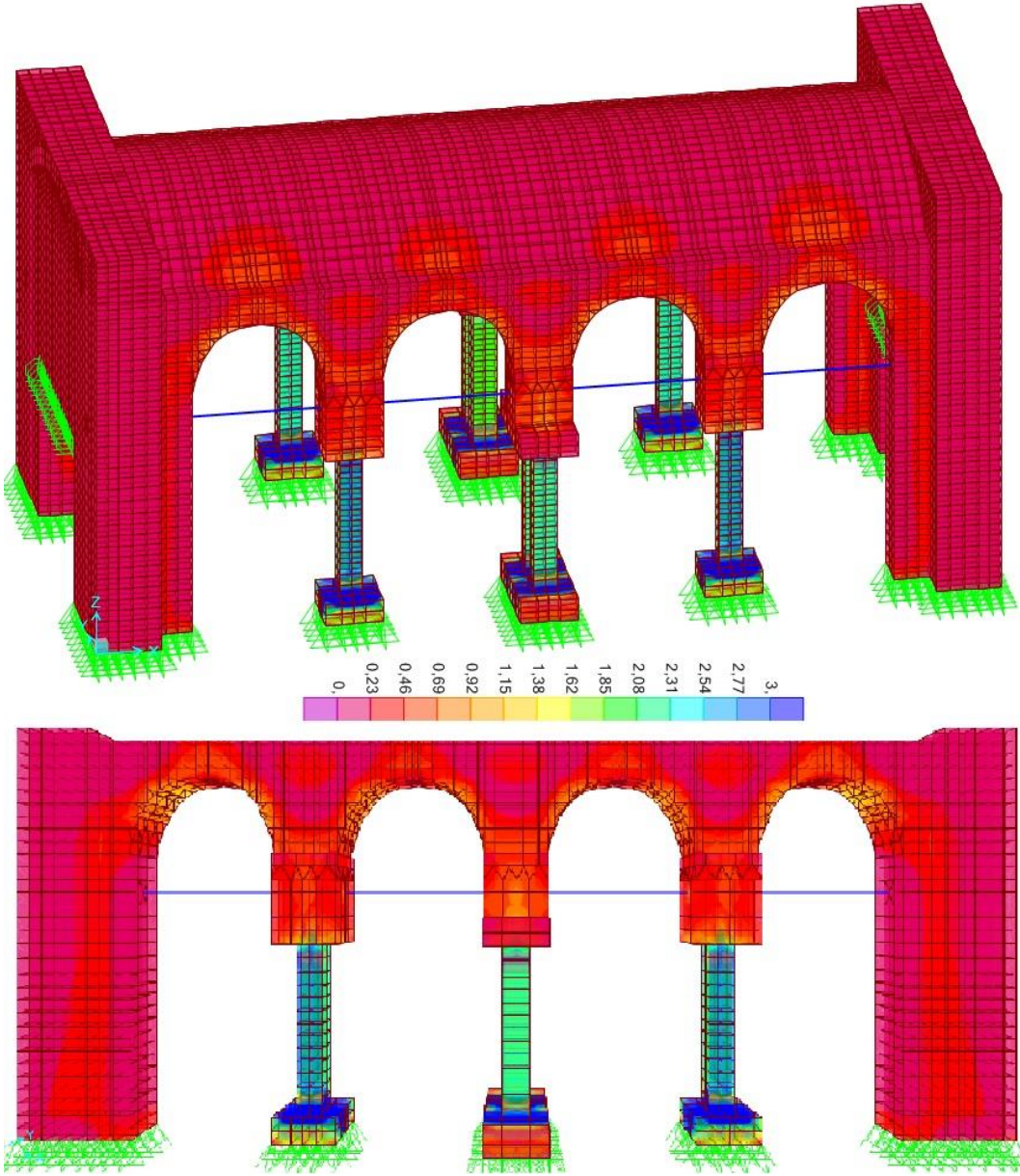
Şekil 7.27 Gergili sistem spektrum analizi S11 gerilme dağılımı.

Şekil 7.28’de modelin üç boyutlu halinin ve B aksının S33 gerilme dağılımları görülmektedir.



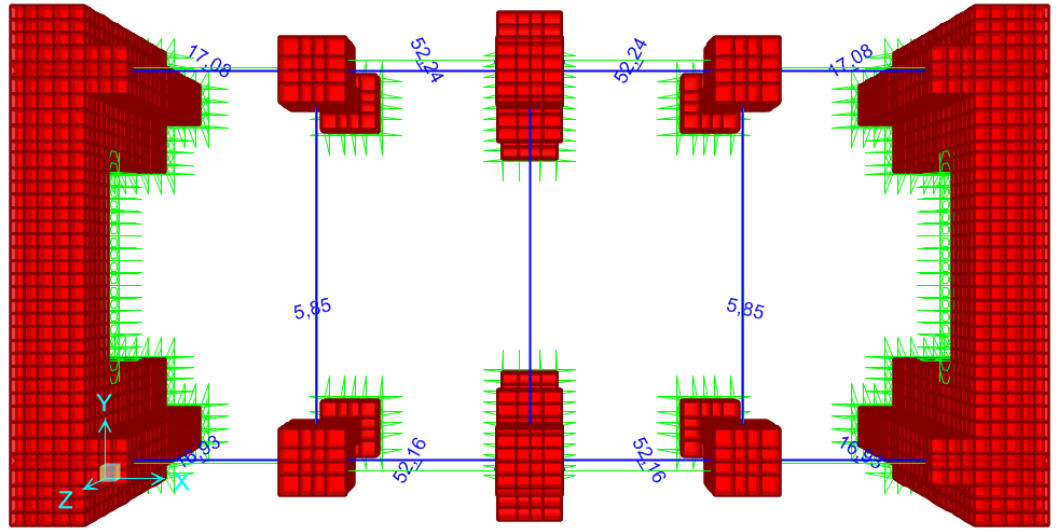
Şekil 7.28 Gergili sistem spektrum analizi S33 gerilme dağılımı.

Şekil 7.29’da modelin üç boyutlu halinin ve B aksının S13 gerilme dağılımları görülmektedir.



Şekil 7.29 Gergili sistem spektrum analizi S13 gerilme dağılımı.

Şekil 7.30’da ise gergi elemanlarında meydana gelen eksenel kuvvet değerleri görülmektedir.



Şekil 7.30 Gergili sistem spektrum analizi gergi elemanlarında oluşan aksenal kuvvet değerleri.

8. DENEYSEL VE NÜMERİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMALI DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, deneysel ve nümerik olarak yapılmış olan çalışmalardan elde edilen veriler ışığında çeşitli yaklaşımlarla değerlendirilmelerde bulunulmuştur.

Elastisite modülü yapısal davranışına doğrudan etki etmesi sebebiyle yapılar için oldukça önemli bir parametredir. Bu durum yığma yapılar içinde geçerlidir fakat yığma yapılar diğer tip yapılara kıyasla daha heterojen özelliklerdeki taşıyıcı sistem elemanlarına sahip olmaları nedeniyle elastisite modüllerinin belirlenmesi oldukça zor ve karmaşık çalışmalar gerektirir. Bu tez çalışmasında yapının elastisite modülünü yaklaşık olarak tahmin edebilmek için üç farklı yöntem izlenmiştir.

Bu yöntemlerden ilki harç ve tuğla malzemelerinin özellikleriyle Lourenço'un formülü kullanılarak elastisite modülünün belirlenmesidir. İkinci yöntem ise oluşturulan duvar numuneleri üzerinden doğrudan sistemin elastisite modülünün tahmin edilebilmesidir. Son yöntem ise yapının yük-deplasman grafiği kullanılarak nümerik sistem üzerinden elastisite modülünün belirlenmesidir. Çizelge 8.1'de numunelerin ve hesaplanan elastisite modülleri verilmiştir. Lourenço'un önerdiği formül yardımıyla elde edilen değer duvar numunelerinden elde edilen değerlere göre çok daha küçük olduğu görülmektedir. Büyük duvar numunesinin (4 sıra) elastisite modülü küçük duvar numunesinin (3 sıra) elastisite modülüne göre kıyaslandığında yaklaşık olarak %34'lük bir azalma olduğu görülmektedir. Bu azalma göz önüne alındığında oluşturulan duvar numunesinin boyutlarının büyümesiyle Lourenço'un formülünden ve yük-deplasman grafiğinden elde edilen elastisite modülü değerlerine yaklaşılabileceği düşünülebilir. Bu durumun doğruluğunun daha farklı boyutlarda duvar numuneleri üzerinde yapılacak çalışmalar ile test edilmesi gerekmektedir.

Çizelge 8.1 Malzemelerin elastisite modülleri.

	MALZEME TÜRÜ					
	Harç	Tuğla	Küçük Duvar	Büyük Duvar	Lourenço Formülü	Nümerik Model
Elastisite Modülü (MPa)	460,15	116,3	512	337,7	70,27	147,1

Nümerik modelde kullanılan malzemelerin özellikleri Çizelge 7.1'de verilmiştir. Tuğla ve harç malzemesi için kullanılan tek bir elastisite modülü, deney

sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiği dikkate alınarak “ $F = K \times \Delta$ ” formülündeki mantık kullanılarak bulunmuştur. F, K ve Δ sembolleri sırasıyla yük, rijitlik ve deplasmanı temsil etmektedir. Nümerik modelde, sabit yatay yük etkisinde rijitlik yani elastisite modülü değeri değiştirilerek elde edilen nümerik deplasmanların deney sonuçlarından elde edilen deplasman değerleriyle karşılaştırılmasıyla sistemin elastisite modülü belirlenmiştir. Kullanılan elastisite modülü deneysel olarak elde edilen elastisite modüllerinden (Çizelge 8.1) biraz daha farklı olmasına karşın ortalama bir değerdir. Yapılan deney sayısı ve numune çeşitliliği artırılarak sonuçların yeniden irdelenmesi daha doğru ve güvenilirliği yüksek sonuçların elde edilmesi açısından önemlidir.

Harç, tuğla ve duvar numuneleri ortalama maksimum basınç dayanımı açısından değerlendirilirse (Çizelge 8.2) en yüksek değere tuğlanın, en düşük değere ise harç numunesinin sahip olduğu görülmüştür. Duvar numunelerinin basınç dayanımları ise tuğla ve harç malzemelerinin basınç dayanımları arasında yer almıştır. Yapının gerilme dayanımının kendisini oluşturan malzemelerin gerilme dayanımları arasında olduğu görülmüştür. Ayrıca numunenin boyutları büyüdükçe daha zayıf olan malzemenin basınç dayanım değerine yaklaştığı görülmektedir. Bu durumda yığma yapıları için zayıf malzeme genellikle harçtır. Önceki çalışmalar kısmında verilen Şekil 2.3’de görülen Karimi vd. (Karimi et. al., 2016) tarafından yığma malzemeler üzerinde yapılan tek eksenli basınç deneyinde üç ve beş sıradan oluşan duvar numunelerinin harç gerilmesine daha yakın değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bu iki deney çalışması ve dayanımlarla ilgili genel kanı göz önüne alındığında yığma yapılarda yapının gerilme dayanımının doğru bir şekilde belirlenmesi için harç malzemesinin özelliklerinin doğru saptanmasının oldukça önemli olduğu söylenebilir.

Çizelge 8.2 Malzemelerin ortalama maksimum basınç gerilmeleri.

	MALZEME TÜRÜ (MPa)			
	Harç	Tuğla	Küçük Duvar	Büyük Duvar
Maksimum Gerilme (MPa)	1,88	6,19	3,43	3,11

Laboratuvar ortamında tekrarlı statik yatay yükleme, ilk olarak gergisiz sistem daha sonrada gergili sistem için benzer şekilde uygulanmıştır. Her iki sistemde de benzer bölgelerde yapısal çatlaklar ve ayrılmalar olduğu görülmüştür. Her iki sistem içinde oluşturulan yük-deplasman grafikleri incelendiğinde gergili sistem grafiklerinde yatıklaşmanın gergisiz sistem grafiklerine göre daha erken

başladığı ve daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, ilk olarak gergisiz sistem üzerinde uygulanan yükleme sırasında yapıda hasarların meydana gelmesiyle dayanım kaybı oluşmasıdır. Bu durum sonucunda her ne kadar sistem gergi elemanlarıyla takviye edilerek daha stabil hale getirilmiş olsa da çatlak bölgeleri tamir edilmediğinde yapının tekrar benzer dış etkiye maruz kalması durumunda önceki duruma göre çok daha fazla deplasman yaptığı görülmüştür. Çizelge 8.3’de gergili ve gergisiz sistem için 8 kN yatay yük etkisinde oluşan deplasman değerleri verilmiştir. Gergili sistemde oluşan deplasman değerleri gergisiz sisteme göre yaklaşık olarak 3 kat daha fazladır.

Çizelge 8.3 Gergili ve gergisiz sistemde 8 kN yatay yük altında oluşan deplasman değerleri (deplasman ölçer yerleşim planı için Şekil 8.1’e bakınız).

	DEPLASMAN DEĞERLERİ (mm)							
Deplasman Ölçer Numarası	2	3	4	5	6	7	8	9
Gergisiz Sistem	0,97	1,07	0,97	1,29	1,01	1,25	1,13	0,98
Gergili Sistem	2,92	3,32	2,95	3,90	2,89	3,92	3,63	2,82

Gergi elemanlarının etkisi ise yatay yükleme değeri arttıkça daha net olarak görülebilmektedir. Yapıdaki maksimum yatay yükleme değeri gergisiz sistem için 14,44 kN iken gergili sistemde bu değer yaklaşık olarak %8 artarak 15,57 kN’a çıkmıştır. Ayrıca bu iki sistem 14,44 kN yatay yük etkisinde deplasman değerleri karşılaştırıldığında gergili sistemin gergisiz sisteme göre daha az ve daha düzenli bir deplasman dağılımı olduğu görülmektedir. Özellikle doğrudan beden duvarları veya tonoz ile bağlantısı bulunmayan noktalar olan orta sıradaki 3 ve 8 numaralı potansiyometrelerin yerleştirildiği bölgelerde oluşan deplasman değerleri gergili ve gergisiz sistem açısından diğer noktalara göre kıyaslandığında farklılık olduğu görülmektedir. Bu fark 3 numaralı deplasman ölçerde net bir şekilde görülebilmektedir. Bu durum bize gergi elemanları sayesinde sistemin daha iyi birlikte hareket ettiğini göstergesidir. Çizelge 8.4’de 14,44 kN altında oluşan deplasman değerleri görülmektedir.

Çizelge 8.4 Gergili ve gergisiz sistemde 14,44 kN yatay yük altında oluşan deplasman değerleri (deplasman ölçer yerleşim planı için Şekil 8.1’e bakınız).

	DEPLASMAN DEĞERLERİ (mm)							
Deplasman Ölçer Numarası	2	3	4	5	6	7	8	9
Gergisiz Sistem	13,02	16,41	13,47	17,67	13,40	17,94	16,91	12,60
Gergili Sistem	12,43	14,03	12,83	16,83	12,76	17,18	15,71	11,99

Deneysel ve nümerik olarak oluşturulan modeller çatlakların ve ayrılmaların olduğu bölgeler açısından kıyaslandığında deneysel sistemde oluşan çatlak ve ayrılma bölgeleri eş yükleme altında nümerik modelde çekme gerilmelerinin yığıldığı bölgelere denk geldiği görülmektedir. Laboratuvar modelinde oluşan hasar bölgeleri genelde çekme gerilmelerinden kaynaklı olarak harç ve tuğla malzemesinin birbirinden ayrılmasıyla meydana gelmiştir.

Laboratuvar ve nümerik olarak oluşturulan modeller gerilmelerin yanı sıra meydana gelen deplasmanlar yönünden de kıyaslanmıştır (Çizelge 8.5 ve Çizelge 8.6). Bu karşılaştırma yapılırken 2 numaralı deplasman ölçere göre diğer tüm noktaların göreceli değişimi incelenmiştir. Aradaki farklar yüzde olarak verilmiştir. Bilgisayar modelinde lineer elastik analiz yapılması nedeniyle laboratuvar modelinde de lineer bölgede kalacak şekilde bir yük-deplasman noktası seçilerek kıyaslamalar yapılmıştır. Bu yatay yük değerleri gergisiz sistem için 6,03 kN, gergili sistem için 4,046 kN'dur. Nümerik ve laboratuvar modelleri kendi içlerinde gergili ve gergisiz olmak üzere ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Çizelge 8.5 Gergisiz sistem 6,03 kN yatay yük altında 2 numaralı deplasman ölçere göre göreceli deplasman değişim oranları (deplasman ölçer yerleşim planı için Şekil 8.1'e bakınız).

	DEPLASMAN DEĞİŞİM ORANLARI (%)							
Deplasman Ölçer Numarası	2	3	4	5	6	7	8	9
Laboratuvar	0	0	-5	23	-7	16	0	0
Nümerik	0	-13	-8	20	-8	20	-13	0

Çizelge 8.6 Gergili sistem 4,046 kN yatay yük altında 2 numaralı deplasman ölçere göre göreceli deplasman değişim oranları (deplasman ölçer yerleşim planı için Şekil 8.1'e bakınız).

	DEPLASMAN DEĞİŞİM ORANLARI (%)							
Deplasman Ölçer Numarası	2	3	4	5	6	7	8	9
Laboratuvar	0	-21	0	27	-6	27	15	-4
Nümerik	0	-3	0	26	0	26	-3	0

Çizelge 8.5 ve 8.6'daki değişim yüzdeleri incelendiğinde deneysel modelle nümerik modelin ufak farklılıklar olmasında rağmen birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Özellikle 3 ve 8 numaralı deplasman ölçerlerin olduğu bölgede biraz daha fazla farklılıkların olmasının nedeni bilgisayar modelinin kusursuz iken laboratuvar modelinde ufakta olsa da yapısal kusurlar, malzeme farklılıkları, ölçüm hataları gibi sorunlar olabilmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca laboratuvar modelinde yük altında çekme bölgelerinde açılmalar meydana geldikçe sistemin yaptığı deplasman değerleri artarken nümerik modelde bunu

sağlamak mümkün olamamaktadır. Tüm bunlara rağmen elastik bir analizde bilgisayar modelinin laboratuvar modelini genel anlamıyla iyi bir şekilde temsil ettiği söylenebilir.

Gergili ve gergisiz sistemlerin doğal salınım frekans değerleri (ilk üç mod) karşılaştırmalı olarak Çizelge 8.7’de verilmiştir. Sisteme gergi elemanlarını eklemenin doğal salınım frekans değerlerine ilk moddaki ufak etkisi dışında dikkate değer başka bir değişikliğe neden olmadığı görülmüştür.

Çizelge 8.7 Gergili ve gergisiz sistemlerin nümerik analizden elde edilen doğal salınım frekans değerleri.

	Frekans Değerleri (1/s)		
Mod Değerleri	1. Mod	2. Mod	3. Mod
Gergisiz Sistem	7,61	10,01	10,85
Gergili Sistem	7,65	10,01	10,85

Zemin hareketinin yapı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla nümerik modelde uygulanan mesnet çökmesi sonucunda yapıda oluşan gerilme dağılımları incelenmiştir. Mesnet çökmesinin uygulandığı mesnet etrafındaki üç kemerde de benzer durum oluşmuştur. Üç kemer elemanında kemer açıklığının orta kısmından ikiye bölündüğü düşünülürse çöken mesnet tarafında kalan kısımlarında çekme gerilmelerinin, karşı taraflarında ise basınç gerilmelerinin yoğunlaştığı görülmektedir. Bu gerilme dağılımı sonucunda gerçek bir yapıda mesnet çökmesi durumunda çöken bölgeyi çevreleyen kemer veya kemerlerin orta açıklıklarında çatlaklar veya ayrılmalar olması muhtemeldir. Özellikle yığma yapıların sünek davranış göstermediği düşünüldüğünde mesnet çökmeleri ciddi sorunlar doğmasına neden olabilmektedir.

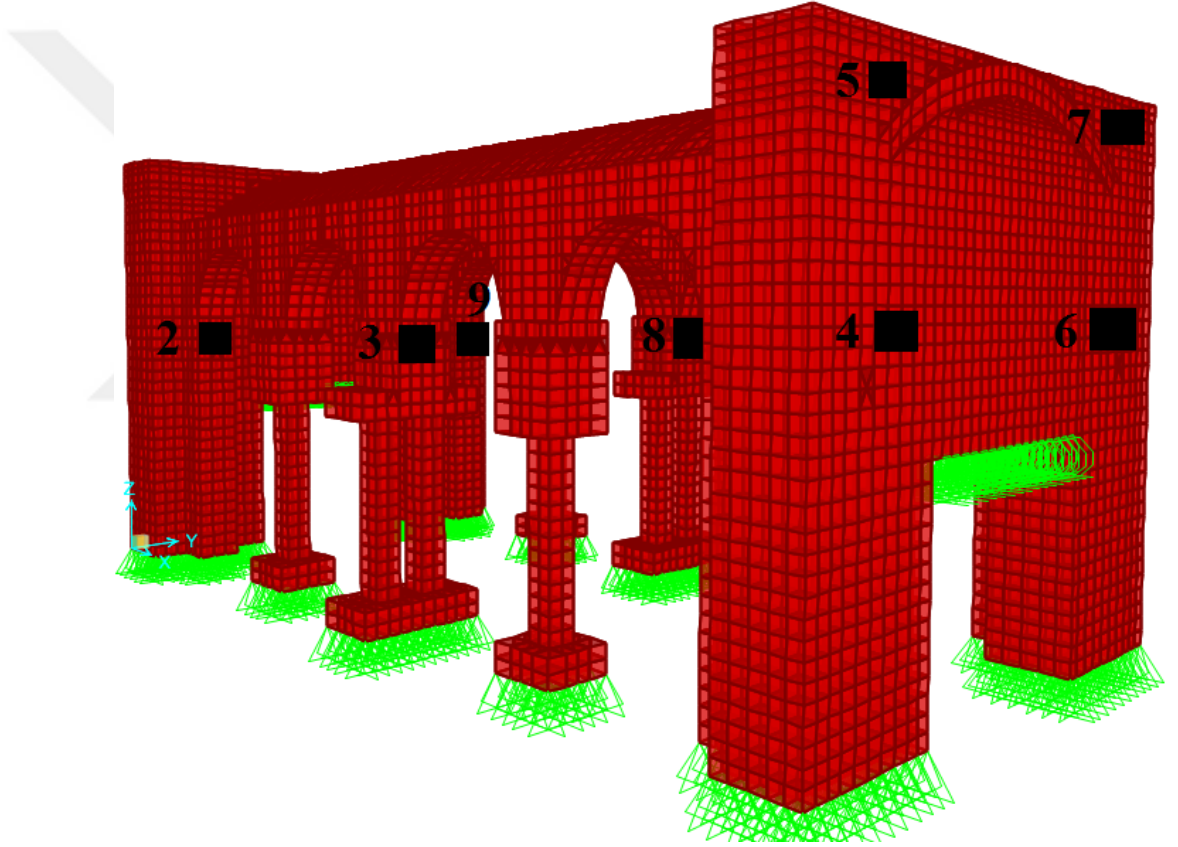
Nümerik modelde planda X eksen yönünde spektrum x yükleme yapılarak yapının deprem etkisi altındaki yer değiştirmesi ve gerilme dağılımları incelenmiştir. Yer değiştirme değerleri incelendiğinde (Çizelge 8.8) gergi elemanlarının etkisi daha önceden Çizelge 8.4’de belirtildiği gibi net bir şekilde görülmektedir. Gergisiz sistemde 2 ve 3 numaralı deplasman ölçerler arasında ki fark 0,303 mm iken bu değer gergili sistemde 0,106 mm’ye düşmektedir. Bu durumda bize yapının gergili sistemde daha iyi birlikte çalıştığını göstermektedir. Model, oluşan gerilmeler açısından incelendiğinde genellikle çekme gerilmelerinin hâkim olduğu görülmektedir. Çekme gerilmeleri özellikle sütun elemanlarında, kemerlerde ve beden duvarlarının mesnetlendiği bölgelerde yoğunluk

göstermektedir. Gerçek bir yapı düşünüldüğünde öncelikle çekme yığılmalarının yoğunlaştığı bölgelerden çatlamların ve ayrılmaların başlaması muhtemeldir.

Çizelge 8.8 Gergili ve gergisiz sistemde spektrum x yüklemesi altında oluşan maksimum deplasman değerleri (deplasman ölçer yerleşim planı için Şekil 8.1'e bakınız).

Deplasman Ölçer Numarası	DEPLASMAN DEĞERLERİ (mm)							
	2	3	4	5	6	7	8	9
Gergisiz Sistem	2,595	2,292	2,714	3,708	2,714	3,708	2,292	2,595
Gergili Sistem	2,557	2,451	2,681	3,675	2,681	3,675	2,451	2,557

Şekil 8.1'de potansiyometre (deplasman ölçer) yerleşim planı görülmektedir.



Şekil 8.1 Potansiyometre (deplasman ölçer) yerleşim planı.

9. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, laboratuvar ortamında dolu harman tuğlalarıyla oluşturulan ardışık kemerli tonoz yığma sistemin tekrarlı yatay yükleme altındaki yapısal davranışı incelenmiştir. Aynı zamanda, benzer sistem bilgisayar ortamında da üç boyutlu sonlu elemanlarla modellenerek nümerik analizleri yapılmış ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca nümerik modelde kullanılan mekanik parametrelerin belirlenebilmesi amacıyla harç, tuğla ve küçük duvar numuneleri üzerinde deneyler yapılmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular ve değerlendirilmeler aşağıda sıralanmıştır.

1. Farklı malzemelerin bir arada kullanılmasından inşa edilen yığma yapıların dayanımı, yapıyı oluşturan malzemelerden en düşük dayanıma sahip olana yakındır. Genellikle bu durum yığma yapılarda taş ve tuğlaya göre daha düşük dayanıma sahip olan harç malzemesiyle ilişkilendirilir. Bu sebeple yapıdaki harcın dayanımının doğru bir şekilde belirlenmesi nümerik modelin doğru sonuçlar vermesi açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada kireç harçlı yığma tuğladan imal edilmiş ardışık kemerli tonoz yığma yapı modelinde gerçekleştirilen deneysel ve nümerik analiz sonuçlarına bakıldığında, hasar oluşumlarının harç ve/veya harç-tuğla birleşim bölgelerinden kaynaklandığı görülmüştür. Basınç dayanımı tuğladan çok daha düşük olan kireç harcı, gerek çekme gerilmeleri gerekse tuğla malzemesi ile yeterli düzeyde aderans davranışı sergileyememesi nedenleriyle yapının hasar görmesinde başlangıç rolü almıştır.

2. Önceden deprem veya diğer dış etkiler sonucu herhangi bir oranda hasar görmüş mevcut yığma yapıların onarılmadan benzer dış etkilere maruz kalması durumunda, önceki durumuna göre çok daha büyük yatay ötelenme davranışı sergilediği görülmüştür. Bu çalışmada da görülmektedir ki, laboratuvar ortamında imal edilen yığma yapı üzerinde gerçekleştirilen tekrarlı yüklemeler sonucunda, eş dış yükler etkisinde oluşan yatay deplasman değerleri gitgide artmaktadır. Çatlak oluşan bölgelerin tamamen veya kısmen mukavemetlerini yitirdiği, diğer bir değişle plastik şekil değiştirme yaptığı ve sistemin gözle görülemese de yapısal anlamda rijitliğini kısmen de olsa kaybettiği anlaşılmaktadır.

3. Kemer bölgelerinde gergi elemanlarının sisteme takılması yapıyı yatay yükler altında daha stabil hale getirerek gergisiz sisteme göre deplasman değerlerini hem azaltmakta hem de sistemin daha bütüncül davranış sergilemesini sağlamaktadır. Bu sayede gergi çubukları sistemin farklı bölümlerinin birbirinden

bağımsız olarak büyük deplasmanlar yaparak ciddi hasarlar almasının önüne geçmektedir. Buna karşılık sisteme ilave edilen gergi çubukları doğal salınım frekansı üzerinde yani yapının mevcut rijitliğinde kayda değer bir etkisi olmamaktadır.

4. Deneysel modelde oluşan çatlak ve ayrılmaların beklenildiği gibi genellikle çekme gerilmelerinin yoğunlaştığı bölgelerden kaynaklandığı görülmektedir. Buna bağlı olarak da çekme gerilmeleri etkisinde harç ve tuğla malzemesinin birbirlerine temas ettikleri yüzeyde aderansın kaybolmasıyla iki malzemenin birbirinden ayrıldığı görülmüştür. Bu sebeple iki malzemenin birbirlerine iyi bir şekilde bağlanmasının sağlanabilmesi hususu yapının dayanımı açısından oldukça önemlidir.

5. Nümerik modelde oluşan çekme gerilmelerinin yığıldığı bölgeler deneysel modelde oluşan çatlak ve ayrılma bölgeleriyle karşılaştırıldığında, her iki modelin birbirine çok ciddi derecede benzerlik gösterdiği görülmüştür. Aynı şekilde her iki modelde yatay yük etkisi altında yer değiştirmeler yönünden incelendiğinde de birbirine benzerlik göstermektedir. Bu bilgiler sonucunda nümerik modelin deneysel modeli iyi bir şekilde temsil ettiği değerlendirilmiştir. Sonraki çalışmalarda mikro sonlu elemanlar ile modellenecek olan nümerik analiz modelleri üzerinde analizler yapılması konusu önerilmiştir.

6. Yığma yapılarda kullanılan taşıyıcı elemanların malzeme yönünden hetorejen olması sebebiyle nümerik analizlerde kullanılacak elastisite modülünün doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi oldukça karmaşık ve zor bir konudur. Bu tez çalışmasında ele alınan yığma yapının elastisite modülünü belirlenebilmesi amacıyla uygulanan farklı yöntemler sonucunda yaklaşık olarak 70 MPa ile 512 MPa gibi geniş bir aralıkta değişen değerler elde edilmiştir. Nihayetinde nümerik analizlerde kullanılan değer ise 147,1 MPa'dır. Bu tip bir yapı için "Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda (2018)" kireç harçlı tuğla yığma duvarın ortalama elastisite modülü 1800 MPa – 2400 MPa arasında (Tablo 6.1) verilmiştir. Bu veriler genel olarak değerlendirildiğinde, elastisite modülünün her bir yığma yapı için farklı değerlere sahip olmasının yanı sıra belirlenmesinde kullanılan yönteminde doğrudan elastisite modülü değerini etkilediği söylenebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- AFAD**, 2018, “Deprem Bölgeleri Haritası”, <https://deprem.afad.gov.tr/deprem-bolgeleri-haritasi#> (Erişim tarihi: 11.04.2018).
- Ağcakoca, E. ve Elmas, M.**, 2017, “Binaların düşey deprem etkisinin zaman tanım alanında hesap yöntemi ile incelenmesi”, <http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/11080.pdf> (Erişim tarihi: 31.07.2017).
- Aköz, F. ve Yüzer, N.**, 2018, “Tarihi Yapılarda Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesinde Uygulanan Yöntemler”, <http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/11142.pdf> (Erişim tarihi: 18.01.2018).
- Aktaş, E. ve Teomete, E.**, 2004, Tarihi Yığma Yapıların Yapısal Davranışlarının İncelenmesinde İncelenecek Esasların Belirlenmesi; Örnek Çalışma: Urla Kamanlı Camii, TÜBİTAK, Proje No:102I065, 162 s.
- Arun, G.**, 2005, Yığma kagir yapı davranışı, Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı – YDGA2005, O. D. T. Ü., Ankara, 8 s.
- Bayraktar, A.**, 2017, “Tarihi yığma yapıların depreme karşı güçlendirilmesi”, www.sismik-guclendirme.com (Erişim tarihi: 16.07.2017).
- Blondet, M., Medina, G. V. G., Brzev, S. And Rubinos, A.**, 2011, Earthquake-resistant construction of adobe buildings: A tutorial, Earthquake Engineering Research Institute, 37 p.
- Chamaky, R.Y.**, 2014, Tarihi Yığma Yapıların Deprem Analizi ve Uygun Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 309 s.
- Corradi, M., Borri, A., Castori, G. and Coventry, K.**, 2015, Experimental analysis of dynamic effects of FRP reinforced masonry vaults, Materials, 8:8059-8071 pp.
- Dabanlı, Ö.**, 2008, Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 185 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- DBYBHY**, 2007, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 26511, Ankara.
- De Lorenzis, L., Dimitri, R. and La Tegola, A.**, 2007, Reduction of the lateral thrust of masonry arches and vaults with FRP composites, *Construction and Building Materials*, 21:1415-1430 pp.
- Değirmenci, İ. ve Sarıbiyık, M.**, Tarihi Yapıların Güçlendirilmesinde Yenilikçi Yaklaşımlar ve FRP Malzemelerin Kullanımı, *ISITES2015*, 338-347 s.
- Demir, F., Erkan, K.T., Dilmaç, H. ve Tekeli, H.**, 2013, Mevcut betonarme binaların doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan hesap yöntemleri ile incelenmesi üzerine bir değerlendirme, 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Hatay, 10 s.
- Doğan, H.N.A.**, 2016, Yığma Duvarların Mikro ve Makro Modelleme Teknikleri ile Lineer Olmayan Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 71 s.
- Döndüren, M.S., Şişik, Ö. ve Demiröz, A.**, 2017, Tarihi yapılarda görülen hasar türleri, *Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi*, 13, 45-58 s.
- Duman, N.**, 2012, 2007 Deprem Yönetmeliğine Göre Tasarlanan Betonarme Yapıların Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Yöntemlerle Deprem Performansının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 185 s.
- Ercan, E.**, 2010, Tarihi Yapıların Güvenliklerinin Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi, 253 s.
- Erdoğan, E.**, 2018, “Yığma Yapılar”, https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/11672/mod_resource/content/1/Mimarlik%20Bilgisi%207.2.%20Hafta%20Y%C4%B1%C4%9Fma%20Yap%C4%B1lar.pdf (Erişim Tarihi: 17.01.2018).
- Eurocode 6**, 1996, European Committee for Standardization, Brussels.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Fahjan, Y. M.**, 2008, Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007) tasarım ivme spektrumuna uygun gerçek deprem kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklenmesi, İMO Teknik Dergi, 292:4424 ss.
- Hutton, D. V.**, 2004, Fundamentals of Finite Element Analysis, The McGraw-Hill Companies, New York, 505 p.
- İnşaat Mühendisleri Odası**, 2017, “Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi”, <http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/12601.pdf> (Erişim tarihi: 31.07.2017).
- İnşaat Mühendisleri Odası**, 2017, “Mod birleştirme yöntemi”, <http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/12602.pdf> (Erişim tarihi: 31.07.2017).
- Kanıt, R. ve Işık, N.S.**, 2004, Horasan Harcı Kullanılarak Yapılan Model Kemerin Performansının Deneysel ve Sayısal Olarak Belirlenmesi, Politeknik Dergisi, 7 (2):180 – 181 s.
- Karimi, A.H., Karimi, M.S., Kheyroddin, A. and Shahkarami, A.A.**, 2016, Experimental and numerical study on seismic behavior of an infilled masonry wall compared to an arched masonry wall, Structure, 8:144-153 pp.
- Korkmaz, K.A., Çarhoğlu, A.I., Orhon, A.V. ve Nuhoglu, A.**, 2014, Farklı yapısal malzeme özelliklerinin yığma yapı davranışına etkisi, Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 3 (1): 70 s.
- Lourenço, P. B.**, 1996, Computational Strategies For Masonry Structures, PhD Thesis, Delft University, 220 p.
- Lourenço, P. B., Vasconcelos, G. and Ramos, L.**, 2001, Assessment of the stability conditions of a Cistercian Cloister, ResearchGate, 10 p.
- Mahini, S.S., Eslami, A. and Ronagh, H.R.**, 2012, Lateral performance and load carrying capacity of an unteinfomed, CFRP-retrofitted historical masonry vault – a case study, Construction and Building Materials, 28:146-156 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mahrebel, H.A.**, 2006, Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Özellikleri, Hasarlar, Onarım ve Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 127 s.
- Manisa İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü**, 2017, “Ulu Camii ve Külliyesi”, <http://www.manisakulturturizm.gov.tr/TR,73021/ulu-camii-ve--kulliyesi-manisa-merkez.html> (Erişim tarihi: 23.09.2017).
- Mele, T.V., McInerney, J., DeJong, M.J. and Block, P.**, 2012, Physical and computational discrete modelling of masonry vault collapse, 8th International Conference on Structural Analysis of Historical Construction, Poland, 9 p.
- Mora-Gomez, J.**, 2015, Historical iron tie-rods in vaulted structures: parametrical study through a scaled model, Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture, 14:669-680 pp.
- Pomex**, 2018, “Pomex Horasan Harcı”, http://www.eilepomex.com/dosia/eile_katalog/ONARIM%20G%C3%9C%C3%87LEND%C4%B0RME/TAR%C4%B0H%C4%B0%20ESER%20ANRIM/HORASAN%20HARCI.pdf (Erişim tarihi: 18.01.2018).
- Rossi, M., Barentin, C. Calvo, Mele, T. Van and Block, P.**, 2017, Experimental study on the behaviour of masonry pavilion vaults on spreading supports, Structures, 11:110-120 pp.
- Özgen, Ö.**, 2012, Horasan Harcı Üzerine Deneysel Çalışmalar, Uzmanlık Tezi, Kültür ve Turizm Bakanlığı İstanbul Rölöve ve Anıtlar Müdürlüğü, 61 s.
- Özer, S. S.**, 2006, Geleneksel yığma yapılarda strüktürel elemanların analizi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 117 s.
- Ural, A. ve Doğangün, A.**, 2007, Mikro modelleme tekniği kullanılarak yığma yapıların deprem performanslarının incelenmesi, International Earthquake Symposium, Kocaeli, 9 s.
- Ural, A., Fırat, F.K., Tuğrülelçi, Ş. and Kara, M.E.**, 2016, Experimental and numerical study on effectiveness of various tie-rod systems in brick arches, Engineering Structures, 110:209-221 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Torrealva, D. Neumann, J.V. and Blondet, M.,** 2006, Earthquake resistant design criteria and testing of adobe building at Pontificia Universidad Catolica del Peru, 8 p.
- Tuluk, Ö. İ.,** 1999, Mekana Bağlı Strüktür Analizi: Osmanlı Dini Mimarisinde Örnekleme (15- 17. yy), Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 393 s.
- Türk Standardları Enstitüsü,** 1979, Ahşap Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Ankara, 77 s.
- Türk Standardları Enstitüsü,** 1997, Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri, Ankara, 24 s.
- Türk Standardları Enstitüsü,** 2005, Kâgir Birimler – Özellikler – Bölüm 1: Kil Kâgir Birimler (Tuğlalar) (TS EN 771-1), Ankara, 48 s.
- Sesigür, H., Çelik, O. C. ve Çılı, F.,** 2007, Tarihi yapılarda taşıyıcı bileşenler, hasar biçimleri, onarım ve güçlendirme, Yapı Dergisi, 303, 12 s.
- Szolomicki, J., Berkowski, P. And Baranski, J.,** 2015, Computer modelling of masonry cross vaults strengthened with fiber reinforced polymer strips, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 15:751-766 pp.
- Vakıflar Genel Müdürlüğü,** 2018, “Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu”, <https://www.vgm.gov.tr/organizasyonlar/Documents/Sablon+.pdf> (Erişim Tarihi: 25.01.2018).
- Valluzzi, M.R., Valdemarca, M. and Modena, C.,** 2001, Behavior of brick masonry vaults strengthened by FRP laminates, Journal of Composites for Construction, August 2001:163-169 pp.
- Yaman, F.Z.,** 2007, Geleneksel Ahşap Yapılarda Kullanılan Ahşap Yapı Elemanlarının Uzun Dönem Performansı – Giresun Zeytinlik Mahallesinde Örnek Yapı İncelemesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 112 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Yılmaz, P.**, 2006, Tarihi Yapıların Modellenmesi ve Deprem Güvenliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 74 s.
- Zemin Araştırma Merkezi LTD.**, 2018, “Shot Crete İle Duvar Güçlendirme”, <http://www.zeminarastirma.com/shotcrete-puskurtme-beton-blon/shotcrete-ile-duvar-guclendirme/> (Erişim Tarihi: 22.01.2018).



ÖZGEÇMİŞ

Yunus GÜNER, 1991 yılında İzmir’de doğdu. İlköğretimini Osmangazi İlkokulu ve Kaymakam Özgür Azer Kurak İlkokulunda, ortaöğretimini Suphi Koyuncuoğlu Anadolu Lisesinde tamamladı.

2010 yılında kazandığı Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü 2015 yılında bölüm birincisi olarak tamamladı. Aynı sene Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2018 yılında Adnan Menderes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı.

