

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEPREM ETKİSİ ALTINDAKİ TARİHİ YIĞMA
YAPILARIN ONARIM VE GÜÇLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. – Mimar A. Hakan AKÖZ

Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı: YAPI MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2008

**DEPREM ETKİSİ ALTINDAKİ TARİHİ YIĞMA
YAPILARIN ONARIM VE GÜÇLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. – Mimar A. Hakan AKÖZ
(501051004)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 5 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih: 11 Haziran 2008**

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Kadir GÜLER

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Zekai CELEP (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Feridun ÇILI (İ.T.Ü.)

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Öncelikle yüksek lisans tezimin danışmanlığını üstlenen, teşvik edici yönetimi ve olumlu eleştirileriyle bana yol gösteren hocam Prof. Dr. Kadir Güler'e teşekkür ederim.

Değerli çalışma arkadaşım, çok sevgili dostum Ömer Dabanlı'ya, tecrübelerinden ve değerli bilgilerinden faydalandığım İnş. Yük. Müh Ferhat Pakdamar'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimimi destekleyen TÜBİTAK'a, Projem İstanbul kapsamında tezime katkı sağlayan İBB'ne ve cami çizimlerini veren Bimtaş A.Ş.'ye de ayrıca teşekkürü bir borç bilirim.

Öğrenimim süresince beni maddi ve manevi sürekli destekleyen aileme ve bilhassa ablama şükranlarımı sunarım.

Mayıs, 2008

A. Hakan AKÖZ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tarihi Yığma Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi	1
1.2. Onarım ve Güçlendirme Kavramları	2
1.3. Tarihi Yapılarda Onarım ve Güçlendirme İlkeleri	3
2. TARİHİ YIĞMA YAPILARDA ONARIM VE GÜÇLENDİRME ÖNCESİ MEVCUT DURUM TESPİTLERİ	6
2.1. Hasar Biçimlerinin Belirlenmesi	7
2.1.1. Taşıyıcı Duvarlarda Oluşan Hasarlar	7
2.1.2. Kemer ve Tonozlarda Deformasyonlar	9
2.1.3. Kubbe Hasarları	14
2.1.4. Zeminden Kaynaklanan Hasarlar	16
2.2. Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi	17
2.2.1. Arazi Çalışmaları	17
2.2.2. Zemin İndeks Özellikleri ve Sınıflandırma Deneyleri	20
2.2.3. Zeminin Sıvılaşma Olasılığının Belirlenmesi	22
2.3. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi	22
2.3.1. Sertlik Ölçümü	23
2.3.2. Ultrases Ölçümü	24
2.3.3. Yerinde Basınç Deneyi	24
2.3.4. Yerinde Kayma Deneyi	26
2.3.5. Laboratuarda Yapılan Fiziksel ve Mekanik Deneyler	26
2.4. Yapı Güvenliğinin Belirlenmesi	28
3. TARİHİ YIĞMA YAPILARDA ONARIM VE GÜÇLENDİRME YÖNTEMLERİ	29
3.1. Onarım ve Güçlendirme Yönteminin Belirlenmesi	29
3.2. Çatlakların Onarımı	30
3.2.1. Küçük Çatlakların Onarımı	30
3.2.2. Geniş Çatlakların Onarımı	31
3.3. Taşıyıcı Elemanların Güçlendirilmesi	32
3.3.1. Temellerin Güçlendirilmesi	32
3.3.2. Duvarların Güçlendirilmesi	34
3.3.3. Sütunların ve Minarelerin Güçlendirilmesi	35
3.3.4. Ahşap Döşemelerin Güçlendirilmesi	37
3.3.5. Kemerlerin / Tonozların Güçlendirilmesi	37

3.3.6. Kubbelerin Güçlendirilmesi	38
3.4. Zeminin Güçlendirilmesi	40
3.5. Sismik Yalıtım	44
3.5.1. Elastomer Mesnetli Sistemler	46
3.5.2. Kayıcı Mesnetli Sistemler	48
3.6. Karbon Esaslı Lif Takviyeli Polimerlerle (FRP) Güçlendirme	49
3.7. Fazla Kütlelerin Kaldırılması	50
3.8. Yapının Kısmen veya Tamamen Yenilenmesi	50
3.9. Acil Müdahaleler	51
3.9.1. Geçici Takviyeler	51
3.9.2. Yapının Askıya Alınması	52
3.10. Onarım / Güçlendirmede Kullanılacak Malzemeler	52
4. ÖRNEK ÇALIŞMA: MURAT PAŞA CAMİİ	53
4.1. Yapının Tanıtılması	53
4.1.1. Tarihçe	53
4.1.2. Mimari ve Geometrik Özellikleri	54
4.1.3. Taşıyıcı Sistem ve Malzeme Özellikleri	56
4.1.3.1. Küfeki Taşı	56
4.1.3.2. Tuğla	57
4.1.3.3. Horasan Harcı	58
4.1.4. Yapının Mevcut Durumu	59
4.2. Yapının Sonlu Elemanlar Metodu İle Modellenmesi	60
4.2.1. Model Özellikleri	60
4.3. Yapının Analizi	66
4.3.1. Ölü Yükler Altında Analiz	66
4.3.2. Modal Çözümleme	80
4.3.3. Modal Spektral Çözümleme	85
4.3.3.1. G + Ex Yükleme	87
4.3.3.2. G + Ey Yükleme	98
4.3.4. Deprem Yönetmeliğine Göre Kontrol	109
5. SONUÇ	111
KAYNAKLAR	113
EKLER	117
EK A: Murat Paşa Camii Rölöve Çizimleri	117
ÖZGEÇMİŞ	124

KISALTMALAR

CPT	: Cone penetration test
ASTM	: American Society for Testing and Materials
TS	: Türk Standartları
CFRP	: Carbon Fibre reinforced polymers
FRP	: Fibre reinforced polymers
CAD	: Computer Aided Design
CQC	: Complete Quadratic Combination
ABS	: Absolute Summation
SRSS	: Square Root of Sum of Squares

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1: Birleşik Zemin Sınıflandırılması.....	20
Tablo 4.1: Tuğlanın Ortalama Mekanik Özellikleri	58
Tablo 4.2: Modelde kullanılan elemanlar ve sayıları	61
Tablo 4.3: Modelde kullanılan malzemeler ve özellikleri.....	61
Tablo 4.4: Serbest Titreşim Peryotları ve Kütle Katılım Oranları	81
Tablo 4.5: Modal Spektral Çözümlemede Kullanılan Değerler	86
Tablo 4.6: Kayma gerilmeleri Kontrolü (G+Ex).....	109
Tablo 4.7: Kayma gerilmeleri Kontrolü (G+Ey).....	110

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Tuğla duvarda göçme biçimleri	8
Şekil 2.2: Yığma duvarda kesme ve eğilme etkisiyle oluşan çatlaklar	8
Şekil 2.3: Yığma duvarın yatay ve düşey eksen etrafında dönmesi.....	9
Şekil 2.4: Zincir eğrileri ve bunların tersinden oluşan basık ve yüksek kemer.	10
Şekil 2.5: Kemerde itki çizgisinin yeri	10
Şekil 2.6: Yarım daire kemerde min ve max yatay kuvvete göre itki çizgisi	11
Şekil 2.7: Tepe noktasından yüklü kemerin stabilitesi	11
Şekil 2.8: Yarım daire kemer a:Kararlı b,c:Zincir eğrisinin yerleşebildiği en az genişlik	12
Şekil 2.9: Yarım daire kemer: a.Yetersiz kalınlıkta: kararlı değil b.Yeterli kalınlıkta: kararlı	12
Şekil 2.10: Kemer mesnedinin stabilitesi	12
Şekil 2.11: Tekil yüklü kemerin göçmesi	13
Şekil 2.12: Demir gergide hasar biçimleri a. Burkulma (Atik Ali Paşa Camisi) b. Kopma (Edirne sarayı mutfakları)	13
Şekil 2.13: 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminden sonra Edirnekapı Mihrimah Sultan Camii kemerinde oluşan hasar	14
Şekil 2.14: Kubbede oluşan kuvvetler	14
Şekil 2.15: Kubbede tipik hasar biçimleri	15
Şekil 2.16: Kubbede hasar oluşumu	15
Şekil 2.17: Koni penetrasyon deney cihazı	19
Şekil 2.18: Koni ve sürtünme gömleği	19
Şekil 2.19: P tipi Schmidt çekici testi uygulaması.....	23
Şekil 2.20: (a) Ultrasonic test işlemi (b), (c) kolon üzerindeki test sonuçları.....	24
Şekil 2.21: Yerinde basınç deneyi: a. Tek Plak ile Ölçüm b. Çift Plak ile Ölçüm	25
Şekil 2.22: Flat-jack uygulaması	25
Şekil 2.23: Yerinde kayma deneyi.....	26
Şekil 2.24: Yapıdan numune alınması	26
Şekil 2.25: a. Numunenin kodlanması b.Tuğla numunesinde basınç deneyi.....	27
Şekil 2.26: Bu çalışmada incelenen Murat Paşa Camii'nin sonlu eleman modeli perspektif görüntüleri	28
Şekil 3.1: Çatlakların enjeksiyon yöntemi ile onarımı.....	30
Şekil 3.2: Çatlak duvarın dikilerek onarılması	31
Şekil 3.3: Çatlak duvarın dikilerek onarılması	32
Şekil 3.4: Küçük Ayasofya Camii'nde mini kazıklarla temel takviyesi	33
Şekil 3.5: Çelik hasır - püskürtme beton duvar detayları (Sultan Abdülaziz Av Köşkü, İzmit)	34
Şekil 3.6: Duvar ayrılmalarının ankraj plakaları ile onarılması	35
Şekil 3.7: 12 Kasım 1999 Düzce Depremi'nde İmaret Camii minaresinde oluşan hasar.	35
Şekil 3.8: Sütunlarda güçlendirme örneği.....	36
Şekil 3.9: Minarede güçlendirme.....	36
Şekil 3.10: Kemerlerde gergi düzenlemesi ve mesnetlerin sabitlemesi (Roma Forumu'nda Yapı)	37
Şekil 3.11: İstanbul II. Beyazid Camii kemerinde Mimar Sinan tarafından yapılan güçlendirme	38
Şekil 3.12: Ahi Çelebi Camii kubbe eteğinde çekme çemberi oluşturulması	38

Şekil 3.13: Kubbe eteğinde çekme çemberi düzenlemesi.....	38
Şekil 3.14: Küçük Ayasofya Camii kubbe kasnağında hasar	39
Şekil 3.15: Kubbe kasnağında FRP uygulaması (Küçük Ayasofya Camii, İstanbul).....	39
Şekil 3.16: Kubbede değişik seviyelerde CFRP uygulaması (El-Eini Kubbesi, Mısır).....	40
Şekil 3.17: Sırasıyla (a) Deep Mixing (b) Jet Grouting (c) Taş Kolon yöntemleri uygulamaları.....	41
Şekil 3.18: Deprem hareketine yapının muhtemel tepkisi	44
Şekil 3.19: Elastik ivme spektrumu	45
Şekil 3.20: Sismik yalıtım uygulaması	45
Şekil 3.21: Yapının bodrum katında elastomer mesnetli sismik yalıtım uygulaması.....	46
Şekil 3.22: Kauçuk izolatörde şekildeğiştirme	47
Şekil 3.23: Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör modeli.....	47
Şekil 3.24: Taban Yalıtım Sistemleri: a. Kauçuk mesnet b. Kayıcı Mesnet	49
Şekil 3.25: a.Ağır çatı (Arastalı Bedesten, Tokat) b.Çatıda toprak dolgu (Arastalı Bedesten, Tokat).....	50
Şekil 3.26: Geçici takviyeler (Mihrimah Sultan Camii).....	51
Şekil 3.27: Kemerin askıya alınması (Saint Christ Kilisesi).....	52
Şekil 4.1: Murat Paşa Camii giriş cephesinden görünüş.....	53
Şekil 4.2: Murat Paşa Camii minaresi'nden üst örtü sisteminin görünüşü	54
Şekil 4.3: Murat Paşa Camii plan ve kesit.....	54
Şekil 4.4: Murat Paşa Camii son cemaat mahalli	55
Şekil 4.5: a. Murat Paşa Camii yan cephe duvarı: tuğla-taş almalı örgü sistemi b. Son cemaat mahallinde yeşil eğriboz taşından sütun	56
Şekil 4.6: Edirnekapi'dan alınan numunelere basınç deneyi uygulaması öncesi-sonrası	59
Şekil 4.7: Murat Paşa Camii büyük kemerdeki çatlak	59
Şekil 4.8: Murat Paşa Camii duvarlarında çatlak oluşumu.....	60
Şekil 4.9: a. Heksahedral b. Pentahedral c. Tetrahedral katı elemanlar	62
Şekil 4.10: Katı elemanlardaki gerilmeler	62
Şekil 4.11: Murat Paşa Camii sonlu eleman modeli plan görünüşü	63
Şekil 4.12: Murat Paşa Camii sonlu eleman modeli üstten görünüş (katı elemanlar).....	63
Şekil 4.13: Murat Paşa Camii sonlu eleman modeli üstten görünüş	64
Şekil 4.14: Murat Paşa Camii sonlu eleman modeli ön, arka ve yan görünüşler	64
Şekil 4.15: Murat Paşa Camii sonlu eleman modeli aşamaları	65
Şekil 4.16: Murat Paşa Camii minaresi sonlu eleman modeli aşamaları.....	66
Şekil 4.17: Ölü yükler altında yapının şekil değiştirmiş hâli.....	67
Şekil 4.18: Ölü yükler altında büyük kubbelerdeki şekildeğiştirme	68
Şekil 4.19: Ölü yükler altında kabuk elemanlarda şekildeğiştirme diyagramı ($10^{-3} \times \text{cm}$).....	68
Şekil 4.20: Ölü yükler altında büyük kemerdeki yerdeğiştirme	69
Şekil 4.21: Ölü yükler altında şekil değiştirmiş kemerde S11 gerilme dağılımı	70
Şekil 4.22: Kemerde çatlak oluşumu	70
Şekil 4.23: Ölü yükler altında S11 (X doğrultusu) gerilme dağılımı – Kemerde çatlak oluşumu.....	71
Şekil 4.24: Ölü yükler altında S22 (Y doğrultusu) gerilme dağılımı.....	72
Şekil 4.25: Ölü yükler altında S33 (Z doğrultusu) gerilme dağılımı	73
Şekil 4.26: Ölü yükler altında S12 gerilme dağılımı	74
Şekil 4.27: Ölü yükler altında S13 gerilme dağılımı	75
Şekil 4.28: Ölü yükler altında S23 gerilme dağılımı	76
Şekil 4.29: Ölü yükler altında Smax gerilme dağılımı	77
Şekil 4.30: Ölü yükler altında S11 (X doğrultusu) gerilme dağılımı.....	78
Şekil 4.31: Ölü yükler altında S22 (Y doğrultusu) gerilme dağılımı.....	79
Şekil 4.32: Ölü yükler altında S12 gerilme dağılımı	79
Şekil 4.33: 1.Mod: Minarenin Y doğrultusundaki yanal hareketi (0.565 s)	82
Şekil 4.34: 2.Mod: Minarenin X doğrultusundaki yanal hareketi (0.551 s)	82
Şekil 4.35: 3.Mod: Yapının bütününde X doğrultusunda yanal hareket (0.175 s)	82
Şekil 4.36: 4.Mod: Yapının bütününde Y doğrultusunda yanal hareket (0.127 s)	83

Şekil 4.37: 5.Mod: Minarenin Y doğrultusunda farklı yanal hareketi (0.119 s).....	83
Şekil 4.38: 6.Mod: Minarenin X doğrultusunda farklı yanal hareketi (0.115 s).....	83
Şekil 4.39: 7.Mod: Burulma modu (0.106 s)	84
Şekil 4.40: 8.Mod: Büyük kubbenin açılma hareketi (0.102 s)	84
Şekil 4.41: 9.Mod: Yapının bütününde dönme ve burulma (0.090 s).....	84
Şekil 4.42: 10.Mod: Kubbelerin birlikte açılma hareketi yapması (0.084 s).....	85
Şekil 4.43: G + Ex yüklemesi altında yapıdaki şekildeğiştirme	87
Şekil 4.44: G + Ex yüklemesi altında büyük kemerde ve kubbelerdeki yerdeğiştirmeler	88
Şekil 4.45: G + Ex yüklemesi altında S11 ve S33 maksimum gerilme dağılımı	88
Şekil 4.46: G + Ex yüklemesi minarede oluşan gerilme dağılımı	89
Şekil 4.47: G + Ex yüklemesi S11 (X doğrultusu) maksimum gerilme dağılımı	90
Şekil 4.48: G + Ex yüklemesi S22 (Y doğrultusu) maksimum gerilme dağılımı	91
Şekil 4.49: G + Ex yüklemesi S33 (Z doğrultusu) maksimum gerilme dağılımı.....	92
Şekil 4.50: G + Ex yüklemesi S12 maksimum gerilme dağılımı.....	93
Şekil 4.51: G + Ex yüklemesi S13 maksimum gerilme dağılımı.....	94
Şekil 4.52: G + Ex yüklemesi S23 maksimum gerilme dağılımı.....	95
Şekil 4.53: G + Ex yüklemesi S11 (X doğrultusu) gerilme dağılımı.....	96
Şekil 4.54: G + Ex yüklemesi S22 (Y doğrultusu) gerilme dağılımı.....	97
Şekil 4.55: G + Ex yüklemesi S12 gerilme dağılımı	97
Şekil 4.56: G + Ey yüklemesi altında yapıdaki şekildeğiştirme	98
Şekil 4.57: G + Ey yüklemesi altında büyük kemerde ve kubbelerdeki yerdeğiştirmeler	99
Şekil 4.58: G + Ey yüklemesi S11 ve S33 maksimum gerilme dağılımı	99
Şekil 4.59: G + Ey yüklemesi minarede oluşan gerilmele dağılımı	100
Şekil 4.60: G + Ey yüklemesi S11 (X doğrultusu) maksimum gerilme dağılımı	101
Şekil 4.61: G + Ey yüklemesi S22 (Y doğrultusu) maksimum gerilme dağılımı	102
Şekil 4.62: G + Ey yüklemesi S33 (Z doğrultusu) maksimum gerilme dağılımı.....	103
Şekil 4.63: G + Ey yüklemesi S12 maksimum gerilme dağılımı.....	104
Şekil 4.64: G + Ey yüklemesi S13 maksimum gerilme dağılımı.....	105
Şekil 4.65: G + Ey yüklemesi S23 maksimum gerilme dağılımı.....	106
Şekil 4.66: G + Ey yüklemesi S11 (X doğrultusu) maksimum gerilme dağılımı	107
Şekil 4.67: G + Ey yüklemesi S22 (Y doğrultusu) maksimum gerilme dağılımı	108
Şekil 4.68: G + Ey yüklemesi S12 maksimum gerilme dağılımı.....	108
Şekil 4.69: Yapının şematik gösterimi ve duvarların numaralandırılması.....	109
Şekil A.1: Murat Paşa Camii Planı	117
Şekil A.2: Murat Paşa Camii A-A Kesiti.....	118
Şekil A.3: Murat Paşa Camii B-B Kesiti	119
Şekil A.4: Murat Paşa Camii Kuzey Batı Cephesi	120
Şekil A.5: Murat Paşa Camii Kuzey Doğu Cephesi	121
Şekil A.6: Murat Paşa Camii Güney Batı Cephesi	122
Şekil A.7: Murat Paşa Camii Güney Doğu Cephesi.....	123

SEMBOL LİSTESİ

γ	: Birim hacim ağırlığı
ρ	: Özkütle
p	: Porozite
w	: Su emme
t	: Zaman
f	: Basınç dayanımı
f_{em}	: Basınç emniyet gerilmesi:
τ_0	: Çatlama Emniyet gerilmesi
E	: Elastisite modülü
ν	: Poisson oranı:
$S(T)$	: Spektrum katsayısı
R_s	: Deprem yükü azaltma katsayısı
A_0	: Etkin yer ivmesi katsayısı
I	: Bina Önem katsayısı

DEPREM ETKİSİ ALTINDAKİ TARİHİ YIĞMA YAPILARIN ONARIM VE GÜÇLENDİRİLMESİ

ÖZET

Kültürel ve tarihi mirasımız olan yapıları korumak ve gelecek nesillere en iyi şekilde aktarmak ihmal edilemeyecek görevimizdir. Zira tarihi yapılar, binlerce yıllık kültür ve medeniyetimizin izlerini taşıyan en önemli nişanelerdir. Çoğu yığma olarak inşa edilen bu yapıların mevcut halleriyle korunması ve depreme karşı güvenli duruma getirilmeleri gerekir. En önemli husus, bu hedefe eserin aslını bozmadan ulaşmaktır ki, bu da disiplinler arası çalışmayı gerekli kılar.

Bu çalışmada, tarihi yığma yapıların onarım ve güçlendirilmesi konusu incelenmiş, örnek olarak tarihi bir yığma yapının üç boyutlu sonlu eleman modeli hazırlanarak statik ve dinamik çözümlemesi yapılmış, deprem güvenliği belirlenip güçlendirme ihtiyacı ve yöntemi tartışılmıştır.

Beş bölümden oluşan bu çalışmanın giriş bölümünde tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesi konusu genel olarak ele alınmış, onarım ve güçlendirme kavramlarından bahsedilmiş ve daha sonra da tarihi yapıların güvenliğinin sağlanması yanında kültürel ve sembolik değerlerinin de korunabilmesi için güçlendirme çalışmalarında bağlı kalınması gereken ilkeler ortaya konulmuştur.

İkinci bölümde, onarım ve güçlendirmeye başlamadan önce yapılması gereken mevcut durum tespitleri açıklanmıştır. Bu başlık altında, hasar biçimlerinin, zemin ve malzeme özelliklerinin ve yapı güvenliğinin belirlenmesi incelenmiş, malzeme ve zemin özelliklerinin belirlenebilmesi için yapılacak deneyler detaylı olarak ele alınmıştır.

Üçüncü bölümde, tarihi yığma yapılarda onarım ve güçlendirme yöntemleri incelenmiştir. Öncelikle uygun yöntemin belirlenmesi için dikkate alınması gereken hususlar sıralanmış, daha sonra onarım yöntemleri ve yapı elemanları bazında güçlendirme yöntemleri gerekli çizimler ve örnek resimlerle detaylıca açıklanmıştır. Bu bölümde ayrıca, geleneksel yöntem ve malzemelere alternatif olarak kullanılabilecek, son zamanlarda uygulama alanı artan yeni yöntemlerden bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde, 1400'lü yıllarda yapılmış Murat Paşa Camii'nin kısa tarihçesi verilmiş, taşıyıcı sistem ve mimari özellikleri tanıtıldıktan sonra üç boyutlu sonlu eleman modeli üzerinde yapılan analizler ve sonuçları, elde edilen diyagramlarla anlatılmış, mevcut güvenlik düzeyi irdelenmiş ve güçlendirme yöntemleri tartışılmıştır.

Beşinci bölümde, çalışmadan elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

REPAIR AND STRENGTHENING OF HISTORICAL MASONRY STRUCTURES THREATED BY EARTHQUAKE; CASE STUDY: MURAT PASA MOSQUE

SUMMARY

Conservation of historical monuments and carrying them to the future are our inevitable duty, because, historical monuments that has thousands of years background are our historical heritage and the signs of culture and civilization. Conservation of these structures, strengthen them against earthquakes and making these without changing the originality of structure requires detailed inter-discipliner studies is the most important matter.

In this study, repair and strengthening of historical masonry structures has been investigated, a historical masonry structure modeled by finite element method, analyzed statically and dynamically, examined the level of safety against earthquake then requirement of strengthening were discussed.

In the first chapter of this study which has totally five chapters, repair and strengthening of historical masonry structures has been investigated, definition of repair and strengthen were explained, then the principles that must be taken into consideration in repair and strengthen studies to preserve cultural and symbolic values of historical monuments were discussed.

In the second chapter of this study, determinations of existing conditions of historical structures, which must been completed before repair and strengthen works, were explained. Under this topic, determining damage forms, material and foundation characteristics and structure safety were researched. Laboratory works and in-situ experiments were explained in detail for the same reason.

In the third part, methods of repair and strengthening of historical masonry structures were given. Firstly, criterions were suggested which must taken into consideration to determine the appropriate method, then repair and strengthen methods for each structural components were explained with required drawings and applicated pictures. Furthermore, new methods were researched which alternate to the traditional methods and materials.

In the fourth part, historical background of Murat Pasha Mosque, built in 15th century was explained, structural system and architectural characteristics were introduced and analysis results by using 3D dimensional finite element model illustrated by tables and diagrams, and level of safety examined then finally strengthening methods was discussed finally.

In the fifth part, results of this study were summarized.

1. GİRİŞ

1.1. Tarihi Yığma Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi

Birçok medeniyete ev sahipliği yapmış olan topraklarımız tarihi eserler yönünden çok zengindir. Perslerden Selçuklulara, Asurlulardan Bizanslılara, Hititlilerden Osmanlılara birçok medeniyetin bu topraklarda izlerine rastlamak mümkündür. Köprüler, surlar, kaleler, saraylar, kiliseler, camiler, su kemerleri, medreseler vb birçok tarihi yapı, eski medeniyetlerden günümüze ulaşmış tarihi mirastır. Bu tarihi mirasın korunması ve geleceğe en iyi şekilde aktarılması, üzerinde hassasiyetle durulması gereken bir konudur. Bunun için yapıların her birinin titizlikle ele alınıp depreme karşı güvenli duruma getirilmeleri gerekir.

Yurdumuzdaki tarihi yapıların büyük bir kısmı yığma, ahşap veya bunların karışımı şeklindedir. Bunların taşıyıcı sistem güvenliklerinin belirlenmesinde doğrudan doğruya kullanılabilecek bir yönetmelik mevcut değildir. Yığma ve ahşap yapılar için hazırlanan yönetmeliklerin hepsi yeni yapılar düşünülerek hazırlandığı için, tarihi yapılara uygulanması zor ve hatta mümkün değildir. Bunun gibi, deprem yükleri altında mevcut veya güçlendirilmiş yapının davranışının belirlenmesinde Deprem Yönetmeliği'ni de doğrudan bütün maddeleri ile kullanmak mümkün olmamaktadır. Bu yönetmeliğin yığma yapılar ile ilgili bölümü yakın tarihte yapılan yapılar esas alınarak hazırlanmıştır. Yeni yapılar için öngörülen kuralların tarihi yapılarda uygulanması mümkün değildir. Ayrıca, her birinin kendine has özellikleri bulunan tarihi yapıların güçlendirilmesinde mevcut yeni betonarme, yığma ve ahşap yapılarda olduğu gibi ayrıntılı kurallar verilmesi zor, hatta imkânsızdır [1].

Tarihi yığma yapıların onarım ve güçlendirilmesinde dikkat edilmesi gereken en önemli husus, yapının aslının bozulmaması ve müdahalenin en az düzeyde tutulmasıdır. Yapının güvenliğinin sağlanması yanında tarihi özelliğinin de korunması gerekir. Bu da özel teknikler geliştirilmesini gerektirebilir. Bilinçli biçimde uygulanmayan güçlendirme işlemleri, bu yapılara faydadan çok zarar verecektir.

1.2. Onarım ve Güçlendirme Kavramları

Yapılar çeşitli amaçlarla onarılır veya güçlendirilir. Yapıda meydana gelen hasarın ortaya çıkardığı dayanım kaybının giderilmesi, hasarın bir daha olmaması için gerekli tedbirlerin alınması, hasar nedenlerinin ortadan kaldırılması, yapının mevcut durumundan daha iyi duruma getirilmesi vb. amaçlara yönelik yapılan müdahaleler onarım, güçlendirme ve iyileştirme şeklinde tanımlanır.

Onarım, yapısal kusur, deprem veya diğer afetler nedeniyle hasar gören ve taşıma gücü azalan yapı elemanlarının yük taşıma kapasitesinin eski konumuna getirilmesidir.

Deprem gibi yapının kısa süreli ve seyrek olarak karşılaştığı geçici yüklemeler, hasara neden olarak, yapının sürekli maruz kaldığı düşey yükleri taşımadaki emniyetini azaltabilirler. Zaten yetersiz olan taşıma gücü, depremde meydana gelen hasar ile daha da yetersiz hale gelir. Bu durumda yapının, en azından deprem öncesi dayanımına getirilmesi gerekir. Yapının onarılarak, hasar öncesi dayanımının geri kazandırılması suretiyle düşey yükleri taşımadaki güvenlik sorunu ortadan kaldırılmış olur.

Güçlendirme, bir yapının yük taşıma kapasitesini, rijitliğini, sünekliğini ve stabilitesini mevcut durumun üzerine çıkarmak veya hasarlı bir yapının taşıyıcı elemanlarını hasar öncesi durumdan daha iyi seviyeye getirmek amacıyla yapılan müdahalelerdir. Güçlendirmede hedef hasarın önlenmesi, durdurulması veya yinelenmemesidir. Onarımın hasar görmüş bir yapıda yapılmasına karşılık, güçlendirme için yapının hasar görmesi gerekmemektedir.

Depremde hasar gören, buna karşılık uzun yıllar ayakta kalması istenen tarihi yapıların sadece onarılmaları durumunda ömürleri boyunca benzer bir depremde yeniden hasar görmeleri kaçınılmazdır. Hâlbuki depremin yapıda hasar meydana getirmiş olması yapının taşıma gücünün yetersiz olduğunu kanıtlamış olur. Bu durum özellikle yatay kuvvetlere karşı yapının taşıma gücünün artırılmasını zorunlu kılar. Bu nedenle depremden zarar görmüş tarihi yapıların hasarlı bölgelerinin onarılmasıyla birlikte; yük taşıma kapasitesinin hasar görmeden önceki değerinden daha yüksek bir düzeye taşınması amacıyla güçlendirilmesi, tekrar karşılaşma olasılığı yüksek olduğu tahmin edilen benzer bir depremden yeniden hasar görmemesi için elzemdir.

Tarihi yapıların mevcut durumları üzerinde yapılan ayrıntılı analizlerde yapıların düşey yükler ve depreme karşı yeterli dayanım ve rijitliğe sahip olduğu gösterilebilirse, ancak o takdirde onarım işleminin yeterli olacağı söylenebilir.

İyileştirme, yapının mevcut durumundan daha iyi konuma getirilmesiyle birlikte deprem etkilerinin tamamının karşılanmadığı durumdur. Bazı kısıtlamalar dolayısıyla yapıların kısmen güçlendirilmesi halidir.

Herhangi bir yapıda yapılacak müdahalenin çeşidine karar vermek için önce yapıdaki hasar ve bunun nedenleri araştırılır daha sonra onarımın veya güçlendirmenin maliyetine bakılarak teknik ve ekonomik açıdan mümkün olup olmadığı belirlenir. Bununla beraber tarihi değer taşıyan yapılarda mühim olan tarihi mirasın korunmasıdır bu yüzden işin maliyeti düşünülemez.

Yapılarda genel olarak mevcut hasarın onarılması, hasarın ortaya çıkış sebebinin ortadan kaldırılması ve bir daha hasar meydana gelmeyecek şekilde yapının güçlendirilmesi gibi amaçlar birlikte hedeflenir. Zeminden kaynaklanan oturma hasarlarında olduğu gibi hasarın ortaya çıkış sebebinin zemini sıkılaştırarak ortadan kaldırmak, hasar görmüş bir yapıda çatlak vb. hasarların enjeksiyon vb yöntemlerle onararak kaybedilen dayanımı geri kazandırmak ve yapının bir daha hasar görmemesini sağlayacak kalıcı güçlendirme tedbirlerini almak, örnek olarak gösterilebilir.

1.3. Tarihi Yapılarda Onarım ve Güçlendirme İlkeleri

Tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesi, aslında birçok disiplinin birlikte çalışmasını zorunlu kılan kültürel ekonomik ve sosyal boyutları olan koruma kavramının bir parçasıdır. Yapının korunması amacıyla yapılacak ilave ya da değişiklikler ile ilgili en doğru kararlara ancak mimarlık, mühendislik, restorasyon, sanat tarihi gibi farklı meslek gruplarındaki uzmanların işbirliği sonucunda varılabilir. Sorun sadece tarihi yapıların depreme karşı güvenli olması değil, bir kültür ve tarih belgesi olarak özgün nitelikleriyle birlikte gelecek nesillere aktarılmasıdır.

Tarihi yapılarla ilgili yapılan çalışmalarda iki önemli soruyla karşılaşılmaktadır:

- Bu tür yapıların tarihi ve estetik görüntülerinin nasıl ve nereye kadar korunacağı,
- Tarihi binaların yapısal takviyesinin nasıl yapılacağıdır.

Konulardan birincisi yapının görüntüsü ile ilgili olduğundan mimarlık, arkeoloji, sanat tarihi vb disiplinlerin alanına girmekte, ikinci konu onarım ve güçlendirme olduğundan mühendislik disiplininin alanına girmektedir. Esas olan, bu tarihi yapıların emniyeti ile kültürel ve sembolik değerleri arasındaki dengenin korunmasıdır [2]. Bu da ancak en az müdahale ile en fazla koruma sağlayacak yöntemlerin geliştirilmesi ve uygulanması ile sağlanabilir.

Tarihi yapılarla ilgili yapılacak çalışmalarda yapıların güvenliğinin sağlanması yanında kültürel ve sembolik değerlerinin de korunabilmesi için bir takım ilkelere bağlı kalınmalıdır. Bu ilkelere biri, Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Yüksek Kurulu, 660 sayılı İlke Kararı'dır. II. Bölümdeki Esaslı Onarım ilkeleri şu şekilde sıralanmaktadır:

- a. Yapının günümüze ulaşmış sosyo-kültürel ve tarihi kimliğini oluşturan mekânsal, biçimsel ve yapısal özellikleri ve çevre içindeki özgün konumu korunacaktır.
- b. Yapıların yıkılmadan korunmaları esastır. Yıkılma tehlikesi gösteren yapıların yıkılma kararları ancak koruma kurulunca alınabilir.
- c. Yapılara çeşitli dönemlerde eklenmiş ancak, tarihsel ve sosyo-kültürel değer taşıyan ekler korunur.
- d. Yeni işlev verilecek kültür varlığı niteliğindeki yapılara ek yapılması isteniyorsa, bu yapının niteliğini ve kültür varlığı ile nasıl bütünleştiğini anlatan bir avan proje hazırlanarak koruma kurulu görüşüne sunulacaktır.
- e. Restorasyon projesine temel olacak restitüsyon çalışması, yapının daha iyi tanınması için hazırlanacaktır.

Tarihi yapılarda yapılacak her türlü işlemde, 25-31 Mayıs 1964 tarihlerinde Venedik'te düzenlenen "Tarihi Anıtların Mimar ve Teknik Elemanları II. Uluslararası Kongresi"nde kabul edilen ve "Venedik Tüzüğü" olarak bilinen belgedeki ilkelerin de dikkate alınması gerekir. Bu ilkeler kısaca şu şekilde sıralanabilir:

- a. Tarihi eserlerin korunması ve onarımı için, mimari mirasın incelenmesine ve korunmasına yardımcı olabilecek bütün bilim ve tekniklerden yararlanılmalıdır.
- b. Tarihi eserlerin korunmasında ve onarılmasındaki amaç, onları bir sanat eseri olduğu kadar, bir tarihi belge olarak da korumaktır.

c. Tarihi eserlerin korunmasındaki temel tutum, korumanın kalıcı olması, sürekliliğinin sağlanmasıdır.

d. Kütle ve renk ilişkilerini değiştirecek hiçbir yeni eklentiye, yok etmeye, ya da değiştirmeye izin verilmemelidir

e. Onarım uzmanlık gerektiren bir iştir. Amacı, eserin estetik ve tarihi değerini korumak ve ortaya çıkarmaktır. Onarım, kendine temel olarak aldığı özgün malzeme ile güvenilir belgelere saygıyla bağlıdır. Faraziyenin başladığı yerde onarım durmalıdır; yapılması gerekli herhangi bir ekleme, mimari kompozisyonundan farkı anlaşılabilir ve gününün damgasını taşımalıdır. Herhangi bir onarım işine başlamadan önce ve bittikten sonra, eserin arkeolojik ve tarihi bir incelemesi yapılmalıdır.

f. Geleneksel tekniklerin yetersiz kaldığı yerlerde, koruma ve inşa için bilimsel verilerle ve deneylerle geçerliliği saptanmış herhangi çağdaş bir teknik kullanılarak eser sağlamlaştırılabilir.

g. Tarihi esere mal edilmiş farklı dönemlerin geçerli katkıları saygı görmelidir; zira onarımın amacı üslup birliği değildir.

h. Eksik kısımlar tamamlanırken, bütünle uyumlu bir şekilde bağdaştırılmalıdır. Eklemelere, ancak yapının ilgi çekici bölümlerine, geleneksel konumuna, kompozisyonuna, dengesine ve çevresiyle olan bağıntısına zarar gelmediği durumlarda izin verilebilir.

Özetle ifade edilecek olursa, tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesinde ana ilke müdahalenin en az olması ve eserin aslının bozulmadan onarılmasıdır. Hedef, onları tarihi bir belge olarak korumak ve özgün niteliklerini oluşturan mekân, biçim, estetik, yapısal özellikleri ve çevre içindeki özgün konumu ile birlikte gelecek nesillere aktarmaktır.

2. TARİHİ YIĞMA YAPILARDA ONARIM VE GÜÇLENDİRME ÖNCESİ MEVCUT DURUM TESPİTLERİ

Tarihi nitelikte olan yığma yapıların onarım ve güçlendirilmesiyle ilgili kararlar alınmadan önce yapının taşıyıcı sistem rölövesinin hazırlanması, mevcut hasarların tespit edilmesi, yapının zemin ve malzeme özelliklerinin çeşitli deneylerle belirlenmesi, taşıyıcı sistemin sonlu eleman modeli kurularak statik ve dinamik analizlerinin yapılması, bu veriler ışığında hasar nedenlerinin tanımlanması ve taşıyıcı sistem güvenliğinin belirlenmesi gerekmektedir. Yapının taşıma gücünün istenilen düzeyde olmaması durumunda yapının kimliğine, tarihi geçmişine en az müdahale edecek bir anlayış ile yasa ve yönetmeliklere uygun olarak güçlendirme projesi hazırlanmalıdır [3].

2004 Deprem Şurası, Mevut Yapıların İncelenmesi ve Yapı Denetimi Komisyonu Raporu'nda tarihi yapının mevcut durumunun tespiti aşamasında aşağıdaki hususlara uyulması gerektiği belirtilmiştir [1]:

- a. Mevcut durumun tespiti geniş katılımlı grup tarafından yapılmalıdır. Oluşturulan bu grubun faaliyeti güçlendirme projesinin hazırlanması ve güçlendirme müdahalesi bitirilmesine kadar devam etmelidir.
- b. Mevcut durumda yapıdaki hasar gibi hususlar ve malzeme türü ve kullanılan yapım tekniği belirlenmelidir. Yapıdaki orijinal durum ve daha sonra yapılan eklemeler ayırt edilmelidir.
- c. Kullanılan malzemede zamana bağlı bozulma ve hasar tespit edilmelidir. Malzeme karakteristikleri için gerektiğinde mukavemet deneyleri yapılmalıdır.
- d. Meydana gelen hasarların sebebi ve mevcut durumda düşey ve muhtemel deprem yükleri için taşıyıcı sistem güvenliği tespit edilmelidir.
- e. Mevcut durum için yapılan bu tespitleri içeren bir rapor hazırlanmalıdır.

2.1. Hasar Biçimlerinin Belirlenmesi

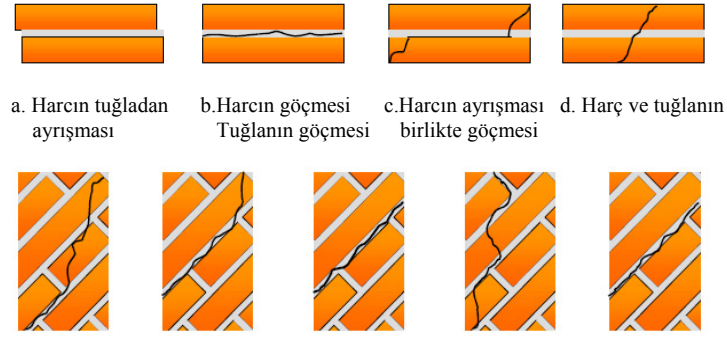
Günümüzden yıllar önce yapılan yığma yapılarda zamanın da etkisiyle birçok sebepten dolayı hasar oluşabilir. Tarihi yığma yapılarda sağlıklı onarım ve güçlendirme kararlarının alınabilmesi ve hasarın tekrar etmemesi için öncelikle hasar sebeplerinin belirlenmesi gerekir. Onarım ve güçlendirme, hasarın kendisinden çok sebebine yönelik olacağından hasarlı olan tarihi yapının hasar sebebinin kesin olarak belirlenmesi gerekir.

Hasarın başta gelen sebepleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- a. Yapımdan kaynaklanan hasarlar: Taşıyıcı eleman kesitlerinin beklenen yüklerin oluşturacağı etkileri taşıyabilecek durumda olmaması ve taşıyıcı sistemde yükün iletilmesinde ve taşınmasındaki eksikliklerden kaynaklanan hasarlar,
- b. Zeminden kaynaklanan hasarlar: Zeminin taşıma gücünün düşük olması, farklı oturumların ortaya çıkması, zemin sıvılaşması ve yeraltı su seviyesinin değişimi sonucu oluşan hasarlar,
- c. Malzemedan kaynaklanan hasarlar,
- d. Diğer sebepler: Sel, yangın ve deprem gibi doğal afetlerin yanında bakımsızlık, terk ve kasıtlı tahrip sonucu ortaya çıkan hasarlar [1].

2.1.1. Taşıyıcı Duvarlarda Oluşan Hasarlar

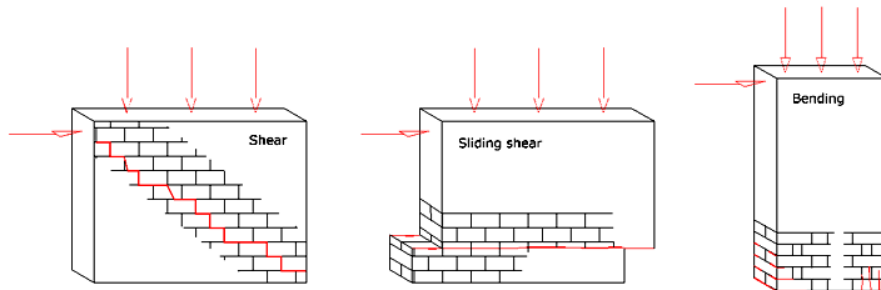
Yığma yapılarda düşey yükler ve deprem yükleri taşıyıcı duvarlarla karşılanır. Genellikle, yığma yapılarda kullanılan duvar malzemesinin çekme dayanımı ve harcın da kayma dayanımı düşüktür. En önemli hasar nedeni, deprem etkisiyle duvarlarda oluşan kayma gerilmeleri dolayısıyla çekme gerilmelerinin meydana getirdiği çatlak, ayrılma ve dağılmadır. Şekil 2.1’de tuğla ve harçtan oluşan bir yığma duvarda kayma gerilmeleri ve çekme gerilmeleri sebebiyle oluşabilecek göçme biçimleri verilmiştir. Üstteki ilk şekilde tuğla ve harcın ayrışması, ikinci şekilde harcın göçmesi, üçüncü şekilde tuğlanın göçmesi ile birlikte harçla ayrışmanın gerçekleşmesi, son şekilde ise çapraz olarak harcın ve tuğlanın göçmesi gösterilmiştir. Alttaki şekillerde ise duvar yüzeyinde bu göçme biçimlerinin birlikte olduğu çeşitli durumlar gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Tuğla duvarda göçme biçimleri

Yığma yapılar ağır ve rijit olup, büyük deprem kuvvetinin oluşmasına sebep olurlar. Yığma yapının çekme ve basınç altındaki sünek olmayan davranışı, yapının önemli bir plastik şekil değiştirme göstermeden ani göçmesine sebep olur. Duvarlar arası bağlantı gibi, duvarların örtü sistemi ile bağlantısının zayıf olması, yapının zayıf bir bölgesinden başlayan hasarın kolayca yayılmasına ve yıkımın meydana gelmesine sebep olabilir. Büyük pencere ve kapı boşlukları ve planda duvar düzeninin simetriden ayrılması, ilave gerilme yığılmalarına dolayısıyla hasarın artmasına sebep olur. Bunun yanında yapım kusurları ve duvarların düşeyden ayrılması da önemli hasar nedenlerindendir [4].

Taşıyıcı duvarlarda oluşan en sık oluşan hasarlardan bir tanesi çatlak oluşumudur. Yapıdaki çatlakların oluşum nedenlerinin bilinmesi onarım ve güçlendirme kararlarının doğru alınması bakımından çok önemlidir. Çatlak yerleri ve yapı üzerindeki dağılımı, yapıdaki gerilme dağılışı ile çatlak oluşumunun nedeni hakkında fikir verecektir. Yapıda çatlaklar izlenebiliyorsa çatlak rölövesinin çıkarılması önerilir. Şekil 2.2’de kesme ve eğilme etkisiyle duvarda oluşan çatlaklar gösterilmektedir.

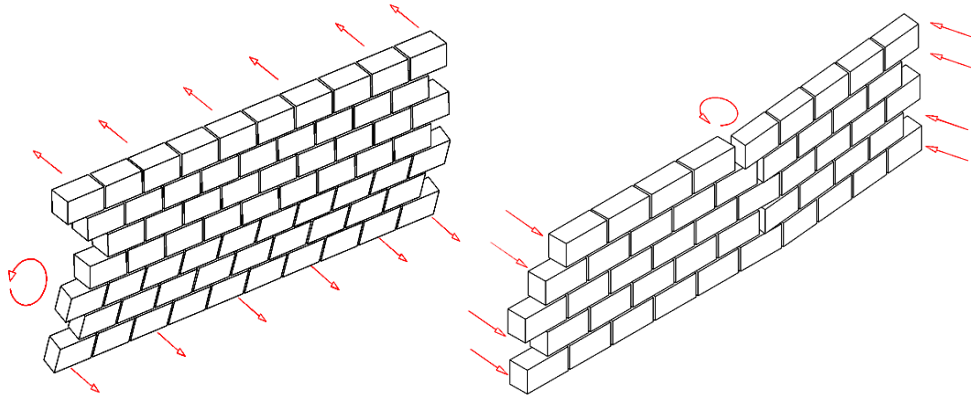


Şekil 2.2: Yığma duvarda kesme ve eğilme etkisiyle oluşan çatlaklar

Çatlağın onarım işlemlerine geçmeden önce çatlağın yeni ya da eski olduğuna karar verilmelidir. Yeni çatlaklar daha net ve keskin kenarlı olup eski çatlaklar daha kirli

ve yuvarlak kenarlıdır. Bundan sonra çatlak oluşumunun devam edip etmediği tespit edilmelidir. Çatlak genişliği, hareketli yük ve sıcaklık değişimine bağlı olarak artıp eksilebilir. Bu sebeple çatlak genişlikleri en az bir yıl boyunca belli aralıklarla ve günün belli saatlerinde ölçülmelidir. Çatlak oluşumu devam eden yapılarda öncelikle çatlağı oluşturan sebepler ortadan kaldırılmalıdır [5].

Duvarların eksenlerinden saparak, dönmesi bir başka önemli hasar biçimidir. Çatlaklar gibi yığma duvarlardaki dönmeler de yapı taşıyıcı sisteminin hareketi yönünde açık ipuçları verir. Duvardaki bu şekildeki dönmeler gerekiyorsa fotogrametrik yöntemlerle belirlenmelidir. Bu konuda unutulmaması gereken bir nokta da dönmenin bazen yapım hatasından kaynaklandığıdır [5]. Yığma bir duvarın yatay ve düşey eksen etrafında nasıl dönebileceği şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Yığma duvarın yatay ve düşey eksen etrafında dönmesi

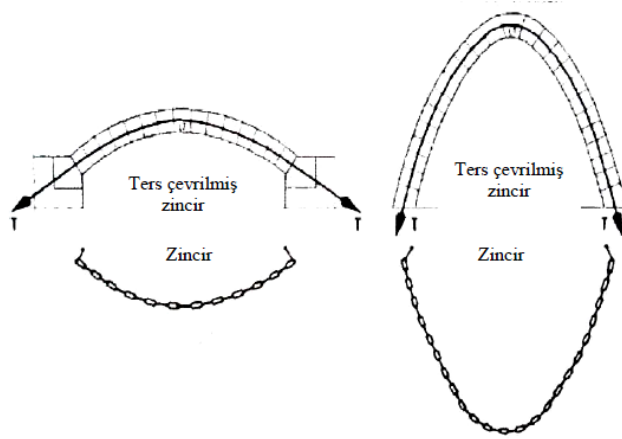
Duvardaki bir başka hasar biçimi, zemin farklılıklardan yada duvar üzerindeki düşey yüklerin duvar boyunca büyük değişiklikler göstermesi sebebiyle duvarın farklı oturmasıdır. Duvarda hasara neden olan farklı oturmalar, genelde duvar düzlemi içinde oluşan eğik çatlaklarla kendini gösterir. Oturmanın hangi tarafa olduğu bu çatlağın doğrultusunun belirlenmesi ile kolayca saptanabilir [5].

2.1.2. Kemer ve Tonozlarda Deformasyonlar

Bu bölümde genel olarak kemerden söz edilecektir, ancak kemer üzerindeki bütün kabuller, yan yana gelen kemerlerden oluşan tonoz için de geçerlidir.

Eğilme momenti etkisinin oluşturacağı çekme gerilmelerine yığma yapı malzemeleri dayanıklı olmadığından kemerin sadece basınç gerilmeleri oluşturacak geometride olması gerekir. Bütün kesitlerinde eğilme momentinin sıfır olması kemer biçimini belirler. Bu biçim aynı zamanda doğal yük aktarımını gösteren zincir eğrisinin ters

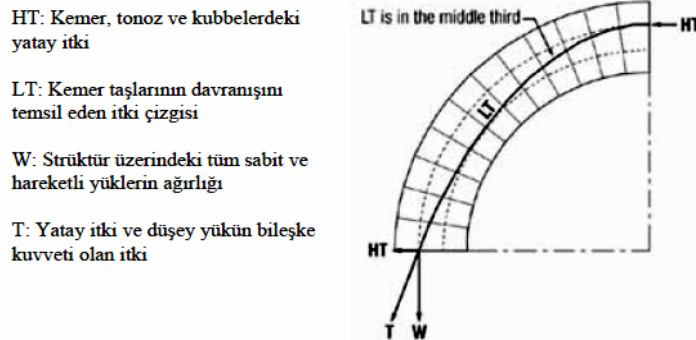
çevrilmiş şeklidir. Zincir eğrisi, iki ucundan serbest olarak asılmış zincir ya da esnek kablounun yerçekimi etkisi altında aldığı biçimdir. Kendi ağırlığı altındaki ters zincir eğrisi biçimindeki kemerin bütün kesitlerinde eğilme momenti sıfırdır ve kesitlerde hiçbir şekilde çekme kuvveti oluşmaz. Kendi ağırlığı altındaki bir kemer için en ideal şekil ters zincir eğrisi biçimidir. Şekil 2.4’de zincir eğrisi biçiminde teşkil edilmiş biri basık diğeri yüksek iki farklı kemer gösterilmiştir. Bu şekilde yapılan kemerler çok sağlamdır ve kesitlerinin ince olmasında bir sakınca yoktur. Kemerin biçimi, zincir eğrisinden uzaklaştıkça, kemerde çekme kuvvetleri meydana gelmeye, çatlak ve deformasyonlar oluşmaya başlar.



Şekil 2.4: Zincir eğrileri ve bunların tersinden oluşan basık ve yüksek kemer.

Kemerde itki çizgisinin yeri, kemerin ağırlığı ve kemer eğrisinin biçimi, kemerin genişliği, kemerin oturduğu duvar ya da ayağın genişliği, kemerin üzerindeki yükün etkisi ve kemerin açılmasını önleyen gerginin durumu kemerin stabilitesini dolayısıyla kemerdeki deformasyonları etkiler.

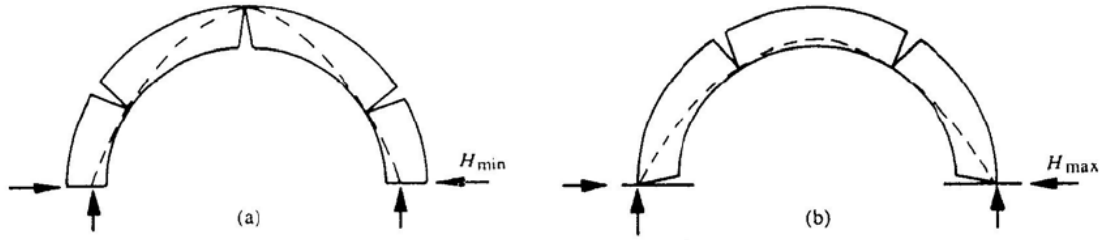
Kemerde itki çizgisinin yeri: Kemerin ağırlığı ve yatay itkinin bileşkesi olan itki çizgisi şekil 2.5’de görüldüğü gibi kemerin orta üçte birlik kısmının içinde kalırsa kemer ya da tonoz kararlıdır.



Şekil 2.5: Kemerde itki çizgisinin yeri

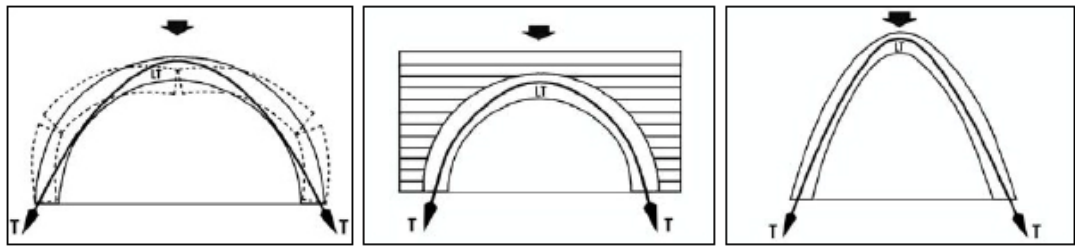
İtki çizgisinin kemerin yüzeyine temas etmesi neticesinde kesişim noktasında mafsall oluşur ve kemer çatlar. Üç mafsall oluşan kemer izostatik ve kararlı olmasına karşılık, daha fazla mafsall oluşumu kemeri mekanizma durumuna getirir.

İtki çizgisi, şekil 2.6'da birinci resimde görüldüğü gibi kemerin dışa bakan yüzeyiyle kesişirse kemerin iç yüzeyinde çekme gerilmeleri oluşur ve kemer içe doğru göçer. İtki çizgisi, ikinci resimdeki gibi kemerin içe bakan yüzeyi ile kesişirse kemerin dış yüzeyinde çekme gerilmeleri oluşur ve kemer dışa doğru göçer.



Şekil 2.6: Yarım daire kemerde min ve max yatay kuvvete göre itki çizgisi [26]

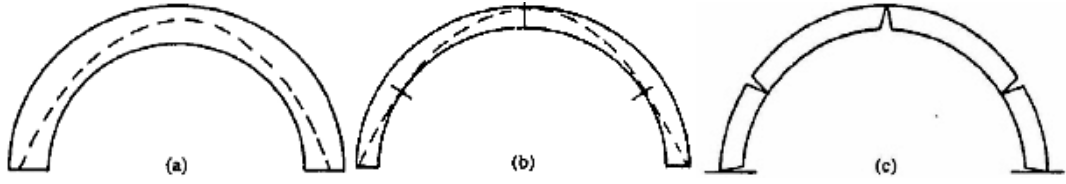
Kemerin ağırlığı ve kemer eğrisinin biçimi: Şekil 2.7'de birinci şekildeki kemerin tepe noktasına ağır bir merkezi yük uygulandığında itki çizgisi iç kısımdan geçtiği için kemerde bozulmalar olur. İkinci şekilde, kemerin tepe noktasındaki yük aynı olduğu halde, kemerin üzerine kenarlarda daha fazla olacak şekilde ek yükleme yapıldığında itki çizgisi kemerin iç kısmında kaldığı için hasar oluşmadığı görülmektedir. Üçüncü şekilde tepe noktasındaki yük değiştirilmediği halde kemerin formu zincir eğrisiyle örtüştüğü için yine hasar meydana gelmemektedir.



Şekil 2.7: Tepe noktasından yüklü kemerin stabilitesi

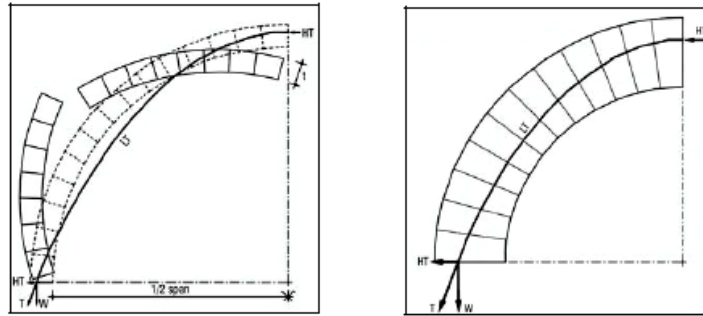
Kemerin genişliği: Şekil 2.8'de birinci şekildeki kemerin itki çizgisi, kemerin içinde olduğu için kemer güvenlidir. Kemerin genişliği, kemerin içerisine ancak bir zincir eğrisinin yerleşebildiği limit duruma kadar azaltılabilir. Bu durumda ikinci ve üçüncü şekilde de görüldüğü gibi itki çizgisi beş noktadan kemerin yüzeyi ile kesişir, bundan sonra kemerde çatlaklar oluşur, oluşan beş mafsall, sistemi mekanizma durumuna

getirir ve kemer göçer. Kemerin güvenliği, kemer genişliğinin limit durumdaki genişliğe oranı olarak kabul edilebilir [26].



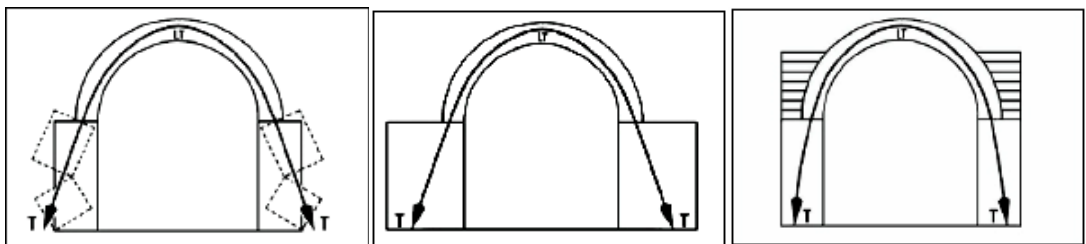
Şekil 2.8: Yarım daire kemer a: Kararlı b,c: Zincir eğrisinin yerleşebildiği en az genişlik [26]

Yarım daire biçimindeki ince bir kemerde itki çizgisi kemerin merkezinden uzakta olacağından büyük gerilmeler oluşur ve şekil 2.9'ta gösterildiği gibi kemer göçer. Ancak kalınlığın artırılması neticesinde itki çizgisi kemerinde merkezinde kalacak ve stabilite sağlanacaktır. Aynı açıklığı geçmek için yarım daire kemer zincir eğrisi kemere göre yaklaşık iki kat daha kalın olmak durumundadır.



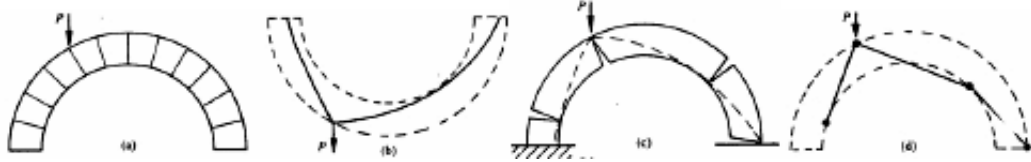
Şekil 2.9: Yarım daire kemer: a. Yetersiz kalınlıkta: kararlı değil b. Yeterli kalınlıkta: kararlı

Kemerin oturduğu duvar ya da ayağın genişliği: Şekil 2.10'da birinci şekildeki kemerin itki çizgisi, kemerin içinde kaldığı halde kemerin oturduğu ayağın orta üçte birlik kısmında olmadığından ve ayak genişliği de yetersiz olduğundan kemer ayağında bozulmalar olur. İkinci şekilde itki çizgisinin açısı değişmemekle birlikte kemerin oturduğu ayak daha büyük olduğundan hasar önlenmiştir. Üçüncü şekilde ise kemer ayağı aynı kalınlıkta olmasına karşılık kemerin üzerindeki yükler sayesinde itki çizgisinin açısı değiştirilmiş, itki çizgisi mesneden içine düşürülerek hasar önlenmiştir.



Şekil 2.10: Kemer mesnedinin stabilitesi

Kemerin üzerindeki yükün etkisi: Yığma kemer davranışının anlaşılabilmesi için öncelikle kemerin yük altındaki göçme durumları incelenmelidir. Kemerin yapıldığı malzeme ve mesnetler sağlam olsa bile aşırı şekilde değişen kemer göçer. Şekil 2.11’de tekil yük altındaki kemerde itki çizgisinin limit durumda kemer yüzeyine değmesi ve mafsallı oluşumu görülmektedir. Yükteki artış neticesinde kemerde dört mafsallı oluşması sistemi mekanizma durumuna getirerek göçmeye sebep olur [26].



Şekil 2.11: Tekil yüklü kemerin göçmesi

Gergideki bozulmalar: Basınç etkisiyle çalışan kemer ve tonozların kesitlerinde çekme gerilmelerinin oluşmasının yanında mesnetlerin açılmasını önleyen gergi demirlerinin paslanması, burkulması vb sebepler de kemer ve tonozlarda hasara neden olur.

Demir gergilerdeki en yoğun bozulma biçimi gergide oluşan aşırı korozyondur. Gergiler dövme demirden yapıldığından bozulmanın yoğun olduğu bölgede katmanlar arasında açılmalar / çözülmeler gözlenmektedir. Yapıdaki hareketler sonucu gergilerde burkulma ve kopma sıkça izlenen hasar biçimleridir. Şekil 2.12’de kemerlerde oluşan burkulma ve kopmaya örnekler görülmektedir. Ahşap gergilerde ise çoğunlukla çürüme, mantarlaşma gibi bozulmalar vardır [5].



Şekil 2.12: Demir gergide hasar biçimleri a. Burkulma (Atik Ali Paşa Camisi) b. Kopma (Edirne sarayı mutfakları) [5]

Geometrisi gereği düşey yüklerde kararlı davranış sergileyen kemer ve tonozlarda deprem gibi yanal yük etkisinde çeşitli deformasyonlar meydana gelebilmektedir. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminden sonra Edirnekapı Mihrimah Sultan Camii’nde

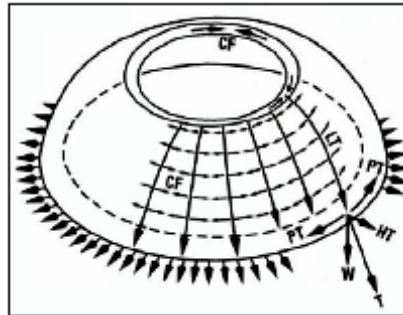
kible ana kemeri dış cephesinde, anahtar kesitine yakın bir noktada büyük bir kemer taşı yerinden koparak düşmüştür (Şekil 2.13). Ayrıca aynı kemerde bir kilit taşı da yerinden oynamıştır.



Şekil 2.13: 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminden sonra Edirnekapi Mihrimah Sultan Camii kemerinde oluşan hasar [42]

2.1.3. Kubbe Hasarları

Bir kemerin düşey aksı çevresinde döndürülmesiyle oluşan kubbede düşey yükler, kilit taşından başlayarak komşu taşlara aktarılıp kubbenin tabanına kadar iletilir. Taşlara düşey olarak etkiyen ağırlık kuvveti, komşu taşlara çapraz olarak iletilir. Böylece kubbe tabanında toplanan yükün yatay ve düşey iki bileşeni ortaya çıkar. Kubbede hasara genellikle bu yatay kuvvet sebep olur. Kubbede oluşan kuvvetler şekil 2.14’de gösterilmiştir.



Şekil 2.14: Kubbede oluşan kuvvetler

Yükün düşey bileşeni, kubbeyi taşıyan kemer, duvar vs elemanlara aktarılırken, yatay kuvvet de, payandalar ve gergilerle karşılanarak kubbenin açılması önlenir. Kubbede açılmaya sebep olan yatay kuvvet kalın beden duvarlarıyla karşılanabileceği gibi ağırlık kuleleri yardımıyla kuvvetin aşağıya doğru yönlendirilmesiyle daha ince duvarlarla da taşınabilir. Bu yatay kuvvet, kubbeye

mesnetlik yapan ve kubbenin açılmasını önleyen kasnak kısmında yatay doğrultuda çekme, düşey doğrultuda kayma gerilmeleri oluşturur.



Şekil 2.15: Kubbede tipik hasar biçimleri [26]

Kasnağın kubbeden gelen yükleri taşıyamaması neticesinde kubbede çekme gerilmeleri oluşur. Kubbeler basınç altında çalışan elemanlardır, kubbede oluşabilecek çekme kuvveti düşeyde çatlak oluşumuna dolayısıyla kubbenin hasar görmesine sebep olur. Şekil 2.15’de şematik olarak gösterilen kubbedeki tipik hasar biçiminin gerçekleşmiş örneği bir sonraki şekilde gösterilmektedir. Şekil 2.16’da kubbede oluşan çekme kuvvetlerinin sebep olduğu merkezden kubbe eteğine kadar uzanan çatlak oluşumu görülmektedir. Çok kararlı bir yapıya sahip olan kubbe biçiminin böylesine ciddi bir çatlakla bile geçmediği dikkati çekmektedir.



Şekil 2.16: Kubbede hasar oluşumu

2.1.4. Zeminden Kaynaklanan Hasarlar

Zeminden kaynaklanan hasarlarda, oturma, yer altı suyunun etkisi, taşıma gücü sorunu, zeminin sıvılaşması etkili olmaktadır.

Oturma: Zeminden kaynaklanan hasarların başında oturma gelir. Zeminin yapısına göre oturma süreci uzun bir zamanda tamamlanır. Siltli zeminlerde oturmaların birkaç sene içinde, killi zeminlerde ise, altmış – yetmiş senelik zaman içinde tamamlandığı düşünülmektedir.

Tarihi yapılarda zemin sorunları genelde yapının inşa edilmesinden hemen ya da bir süre sonra ortaya çıkmaktadır. Yapıda ve çevrede önemli ve ani bir değişiklik olmaksızın yıllarca yerinde durmuş bir yapının temel zemininde son yıllarda bir sorun çıkması olasılığı yoktur. Bu tür yapılarda olası oturmalar yıllar önce tamamlanmış durumdadır [5]. Ancak temel kazıklarının çürümesi, yeraltı suyunun alçalıp yükselmesi, yapı altında veya çevresinde kazılarak açılan boşluklar ve deprem etkilerinde yeni oturmaların olması mümkün olmaktadır [6].

Yeraltı suyunun etkisi: Yumuşak zeminlere oturan yapılarda, yeraltı suyunun alçalması ve yükselmesi yapıda hasara neden olabilir. Yeraltı suyunun alçalması sonucu, su içinde yüzen zemin danelerinin ağırlıkları artacağından, daha alttaki zemin tabakalarına ilave yük getirir. Bu ilave yük etkisiyle zemin tabakaları tekrar oturmaya başlar. Bu oturmaların belli değerlere ulaşması sonucunda yapıda hasar oluşabilir. Yeraltı suyunun alçalması sonucu kuruyan zemin tabakalarında ayrıca rötre de oluşur. Rötre sonucu, özellikle killi zeminlerde, aşırı bir hacim küçülmesi olacağından, oturmalar bir önceki duruma göre daha büyük boyutlara ulaşır. Yeraltı suyunun yükselmesi sonucunda ise, zemin boşlukları tamamen su ile dolacağından, doygun hale geçer. Bu durumda zemin yumuşayarak, zeminin kayma direncinin azalması ile taşıma gücü azalır, oturmalar gerçekleşir ve bu, yapıda hasarlara neden olabilir [6].

Taşıma gücü sorunu: Her zeminin taşıyabileceği maksimum bir yük vardır. Zeminin cinsine göre, zemine yüklenecek limit yükler söz konusudur. Bu limit değerlerin aşılması sonucunda zemin hareketleri, hatta göçmeler yaşanır. Özellikle kohezyonsuz zeminlerde, aşırı yükleme sonucunda, zemin göçmeleri meydana gelir [6].

Zeminin sıvılaşması: Yeraltı su seviyesinin altındaki tabakaların mukavemetini kaybederek, katı yerine sıvı gibi davranmalarıdır. Özellikle, kil bulunmayan kum ve

silt ve bazen çakıl tabakaları sıvılaşma potansiyeline sahiptir. Deprem sırasında, özellikle kayma dalgalarının suya doymuş daneli tabakalardan geçerken, dane yerleşim düzenini değiştirir ve gevşek olarak bulunan danelerin göçerek yerleşmesine ve sıkılaşmasına sebep olur. Bu yerleşme sırasında daneler arasında su yol bulup kaçamazsa boşluk suyu basıncı yükselir. Eğer bu basınç üstte bulunan tabakaların ağırlığına yakın bir seviyeye ulaşırsa, daneli tabaka geçici olarak sıvı gibi davranarak sıvılaşma ortaya çıkar. Zeminin sıvılaşması sonucu yapı, zemine batma veya hafif yapılarda yukarı doğru hareket ederek yüzme eğilimi gösterebilir. Sıvılaşarak kayma dayanımı kaybolan zeminde, yön değiştiren küçük kayma gerilmeleri büyük şekildeğiştirmelere sebep olur ve yapılarda zemin göçmesi hasarları meydana gelir. Zemin sıvılaşması esas olarak, gevşek bir yerleşime sahip olmasına, daneler arasındaki bağa, kil miktarına ve boşluk suyunun drenajının engellenmesine bağlıdır. Zemin sıvılaşmasında ortaya çıkan büyük yerdeğiştirmeler, ayrıca sıvılaşan tabaka kalınlığına, yüzey eğimine ve yükleme durumuna bağlıdır [6].

2.2. Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi

Onarım ve güçlendirme çalışmaları öncesi mevcut durumun tespitinde zemin özelliklerinin belirlenmesi ayrı bir öneme sahiptir. Bunun için arazide bir takım çalışmaların yapılmasıyla birlikte laboratuvar deneylerine de ihtiyaç duyulur.

2.2.1. Arazi Çalışmaları

Zemin özelliklerinin belirlenebilmesi için arazide yeterli sayıda gözlem çukuru ve sondajlar açılıp numuneler alınmalı, yeraltı su seviyesi belirlenmeli ve zemin üzerinde birtakım deneyler yapılmalıdır.

Gözlem çukurları: Yapıların temel durumlarının ve derinliklerinin belirlenmesi için yapı kenarında gerekli sayıda kontrol kuyuları açılır. Yüzeysel temellerde temelin biçimi ve derinliği hakkında yeterli bilgi edinildiği kadar, kazıklı temellerde de kazığın başlık kotu ve yeraltı suyunun başladığı yer belirlenir. Bu şekilde yapının çevresinde yapılması olası kazı çalışmalarının hangi derinlikte ve mesafede yapıya olumsuz etkisi olabileceği belirlenir. Gözlem çukurları genellikle 3.5-4.0 m. derinliğe kadar açılır. Uygun zemin şartlarında kazı makineleri ile 8.0 m. derinliğe kadar muayene çukuru açmak mümkündür. Muayene kuyuları düşey, muayene galerileri

ise yatay açılır. Açılan muayene çukurlarına tüp çakılarak deney yapılmak üzere örselenmiş ve örselenmemiş numuneler alınır [6].

Sondaj çalışmaları: Sondaj sayısı yapı alanı, derinliği ise temel genişliği ile orantılıdır. Kabaca 100 m² için bir sondaj yapılması, sondaj derinliğinin temel altında en az 5m olacak şekilde seçilmesi uygun olmaktadır [5].

Zemin sondajları genellikle 3.0m'den daha derin incelemelerde, muayene çukurları ile ulaşılamayan derinliklerde ya da muayene çukuru için elverişsiz zemin şartlarında, yeraltı su seviyesi altındaki derinliklerde kullanılırlar. Sondaj çapları genel olarak 50 mm ile 250 mm arasında değişir. Sıkı zeminlerde sondaj deliği desteksiz durabilir. Fakat yumuşak kil veya yeraltı su seviyesinin altındaki kum zeminlerde kaplama borusu ile veya sondaj deliği içi viskoz çamur süspansiyonu betonit kil ile doldurularak, sondaj çukurunun yıkılması veya kapanması önlenir. Zemin içinde sondaj ile delik açılması burgu, darbeli yıkama veya dönel sondaj tekniklerinden biri ile yapılabilir. Sondajlar yapılara yakın fakat sınırları dışında yapılır [6].

Yeraltı su seviyesinin belirlenmesi: Yeraltı su seviyesi, foraj ve sondaj delikleri yardımı ile her ne kadar saptanırsa da, seviyenin zamanla değişiminin gözlenmesi için özel kontrol kuyularının açılması gerekir. Yeterli bilgi edinilebilecek bir diğer yöntem de mevcut su kuyularının gözlenmesidir. Bu tür bilgileri yeraltı sularının durumunu inceleyen bürolardan da temin etmek mümkündür [6].

Arazi deneyleri: Özellikle çok hassas kil ve silt zeminlerde veya bazı iri daneli kohezyonsuz zeminlerde örselenmemiş numune almak zordur. Bu nedenle zeminin özelliklerini belirlemek için bazı arazi deneyleri kullanılır. Bu deneyler laboratuvar sonuçları kadar sağlıklı sonuç vermediğinden birçok kez tekrarlanmalıdır. Arazi deneyleri ile laboratuvar deneylerinin birlikte değerlendirilmesi gerekir. Standart penetrasyon deneyi arazide en yaygın olarak uygulanan deneydir. 50 mm dış çaplı özel standart ucun, kaplama borusu çakılmış sondaj çukuru tabanından itibaren zemine çakılması ile yapılır. Standart uç aynı zamanda numune alıcı kaşıktır. Deney sırasında 635 N'luk ağırlık 0.76 m den standart uç tij üzerine düşürülerek sondaj deliği tabanından itibaren 0.15 m girmesi için gerekli düşüş sayısı bulunur. Kohezyonsuz zeminlerin yerleşim sıklığı, kohezyonlu zeminlerin kıvamı hakkında

bilgi verir. Bu deney ince çakıl, kum, silt ve kil zeminlerde uygulanır. Düşüş sayısının büyük olması, zeminin sağlam olduğunun göstergesidir [6].

Arazide uygulanan bir diğer deney ise Veyn deneyidir. Veyn deneyi ile özellikle yumuşak normal konsolide killerin drenajsız kayma mukavemeti belirlenebilir. Veyn deney aleti zemin içine batırılarak, zemin içinde dönmeye zorlanır ve zeminin direncinin aşılmasına karşılık gelen burulma momentinden zeminin drenajsız kayma mukavemeti belirlenir.

Arazide uygulanan diğer deneyler koni penetrasyon deneyi, Becker penetrasyon deneyi ve arazi kayma dalga hızının ölçülmesidir.

Koni penetrasyon deneyi (CPT), gelişen teknoloji ile birlikte zemin profili ve özelliklerinin yerinde, operatör müdahalesi minimum düzeyde ve sürekli olarak belirlenmesini sağlayabilen bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Deney; kısa zamanda istenilen sayıda tekrarlanabilmekte, zemin parametreleri numune alınmasına ve laboratuvar çalışmasına gerek duyulmadan elde edilebilmekte, deneyin yapılmasının ve sonuçların yorumlanmasının diğer yöntemlere göre daha az zaman alması işgücü ve maliyet açısından avantaj sağlamaktadır [7].

Koni penetrasyon deneyi ucu koni şeklinde olan bir silindirik borunun zemine itilmesi sırasında beliren dirençlerin ölçülmesi esasına dayanmaktadır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17: Koni penetrasyon deney cihazı [7]

Deney sırasında 1 m uzunluğundaki tijler zemine 20 ± 2 mm/s hızla itilirken uç direnci, çevre sürtünmesi ve boşluk suyu basıncı değerleri sürekli olarak kaydedilmektedir [7]. Deneyde kullanılan koni ve sürtünme gömleği şekil 2.18’de görülmektedir.



Şekil 2.18: Koni ve sürtünme gömleği [7]

2.2.2. Zemin İndeks Özellikleri ve Sınıflandırma Deneyleri

Arazi çalışmalarından sonra yapılacak iş zeminin sınıflandırılması ve mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için gerekli görülen deneylerin laboratuarda yapılmasıdır.

Dane çapı dağılımı: Standart metot (elek analizi) ile ince kum boyutunda ve çakıl gibi daha iri danelerin dane çapı dağılımı belirlenir. Zemindeki kil ve siltin toplam miktarı deney sonuçlarından hesaplanabilir. Hidrometre analizi ile de kil ve silt gibi ince daneli zeminlerin dane çapı dağılımı bulunur. Tablo 2.1’de dane çapı dağılımı esasına göre yapılan ve zeminlerin sınıflandırılmasında en çok kullanılan sistem, birleşik zemin sınıflandırılması görülmektedir.

Tablo 2.1: Birleşik Zemin Sınıflandırılması

Zemin Cinsi	Dane Çapı (mm)
Blok – iri taş	> 75.6
Çakıl	75.6 - 4.76
Kum	4.76 - 0.074
Silt	0.074 - 0.002
Kil	<0.002

Su muhtevası: Zemin içindeki su kütlesinin zeminin kuru kütlesine oranıdır. Su muhtevası; zeminin plastik, likit ya da katı gibi hangi kıvamda olduğunun belirlenmesinde kullanılır.

Kıvam limitleri deneyi: İnce daneli zeminlerin mühendislik özellikleri boşluklarında yer alan su miktarına bağlı olarak değişir. İnce daneli zeminlerin su muhtevası değiştikçe kıvamı da değişmektedir. Zeminin daha fazla su muhtevasında kendi ağırlığı ile viskoz bir sıvı gibi aktığı su muhtevası değerine likit limit denilmektedir. Laboratuarda cam plaka üzerinde zemin numunesinin parçalanmadan 3 mm çapında silindircikler halinde yuvarlanabildiği, plastik davranış sergilediği en küçük su muhtevası değerine ise plastik limit denilmektedir. Zemin plastik limitten daha az su muhtevası değerlerinde katı kıvamda olduğu kabul edilmektedir. Daha fazla su kaybının zeminin hacminde bir azalmaya sebep olmamaya başladığı su muhtevası değerine ise rötre limiti denilmektedir. Bu sınır su muhtevalarının hepsine birden kıvam limitleri denilmektedir. Kıvam limitlerinin küçükten büyüğe doğru aldıkları isimler sırası ile rötre limiti, plastik limit ve likit limittir. Kıvam limitleri laboratuarda yapılan Cassagrande yöntemi, düşen koni yöntemi, plastik limit deneyi ve rötre limiti deneyi ile belirlenmektedir.

Piknometre (özellik yoğunluk): Zemin danelerinin özgül yoğunluğunu belirlemek için yapılır.

Permeabilite: Zeminin permeabilitesini belirlemek için, sabit seviyeli permeabilite deneyi ile düşen seviyeli permeabilite deneylerinden faydalanılır.

Konsolidasyon deneyleri: Zeminlerin sıkışabilirlikleri örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan konsolidasyon deneyleri ile belirlenir. Ödometre deneyi, yanal deformasyonu önlenmiş olan, suya doymuş örselenmemiş bir zemin numunesinin alt ve üst yüzeyinden drenaj sağlayarak sabit bir basınç altında konsolidasyon miktarı ve hızının ölçümü için kullanılmaktadır.

Kayma mukavemeti ve gerilme deformasyon deneyleri: Kesme kutusu deneyi, özellikle kumlar için kayma mukavemeti parametrelerini hızlıca belirleyebilmek için kullanılır. Serbest basınç deneyi ise killerin drenajsız kayma mukavemetini belirlemek için kullanılır. Üç eksenli basınç deneyi ile drenajlı ve drenajsız şartlarda, kayma mukavemeti ile elastisite modülü belirlenebilir, gerilme-şekildeğiştirme arasındaki ilişkiler tanımlanabilir. Ayrıca yine üç eksenli basınç deneyi ile drenajlı/drenajsız kesme sırasında boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon sırasında hacim değişimi belirlenebilir. Düşen koni deneyinde standart boyutlarda ve ağırlıkta metal bir koni, sabit yükseklikten zemin numunesi üzerine düşürülür. Zeminin drenajsız kayma mukavemetinin koninin ağırlığı ile doğrudan, koninin zemin içine batma miktarının karesi ile tersten orantılı olduğu kabul edilerek zeminin drenajsız kayma mukavemeti elde edilebilmektedir. Düşen koni deneyi ve arazide uygulanan Veyn deneyi, yalnızca yumuşak normal konsolide killerde güvenilir sonuçlar vermektedir.

Kompaksiyon deneyi: Mekanik yöntemler yardımıyla zeminin boşluklarında yer alan havanın çıkartılarak danelerin birbirine yaklaşması ve böylece danelerin daha sıkı bir yerleşime sahip olmasını dolayısıyla da zeminin daha mukavim bir hale gelmesini sağlayan işleme kompaksiyon denir. Kompaksiyonun amacı, boşluk oranını azaltarak geçirimsizliği azaltmak, su emme ve su muhtevası özelliklerini kontrol altına almak, zeminin kayma mukavemetini dolayısıyla taşıma gücünü arttırmak, zemini titreşim ve yük etkisi altında hacim değiştirme, oturma ve deformasyonunu azaltmaktır. Kompaksiyon deneyi ile arazide sıkıştırılacak zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve bu birim hacim ağırlığına ulaşılan su muhtevası (optimum su muhtevası)

değeri tespit edilmektedir. Laboratuvar ortamında iki farklı kompaksiyon deneyi yapılabilir. Bunlar Standart Proktor ve Modifiye Proktor Deneyleridir.

2.2.3. Zeminin Sıvılaşma Olasılığının Belirlenmesi

Zeminin sıvılaşma analizinde ilk adım potansiyel olarak sıvılaşacak kumlu ve siltli zemin tabakalarının bulunup bulunmadığının belirlenmesidir. Bundan sonra yapılacak iş sıvılaşmanın olabilirliğinin sayısal yöntemlerle belirlenmesidir. Bu amaca yönelik iki yöntem vardır [8]:

1. Örselenmemiş numunelerin laboratuvar ortamında test edilmesi
2. Arazi davranışları ile indeks test parametrelerine dayalı ampirik bağıntıların kullanılmasıdır.

Laboratuvar testlerinin kullanılması, numune alımı ve numunenin arazideki gerilmelere konsolidasyonu sırasındaki örselenmeler sebebiyle oldukça zordur. Tekrarlı basit kayma ve üç eksenli dinamik testlerin her projede uygulanabilirliği ve ayrıca testlerin zor ve pahalı olması bakımından kısıtlıdır.

Arazi deneylerinin kullanımı mühendislik uygulamalarında oldukça yaygındır. Dört değişik arazi deney yöntemi ile sıvılaşma potansiyeli belirlenebilmektedir. Bu testler 1. Standart penetrasyon deneyi, 2. Koni penetrasyon deneyi, 3. Arazi kayma dalga hızının ölçülmesi ve 4. Becker penetrasyon deneyi'dir. Bu yöntemler arasında en eski ve en sıkça kullanılan yöntem Standart penetrasyon deneyidir.

2.3. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Tarihi yığma yapılarda sıklıkla kullanılan taş ve tuğla malzemelerin basınç dayanımı, harçla yapı malzemesi arasındaki kayma dayanımı, elastisite modülü ve malzeme kalitesinin belirlenmesi için çoğunlukla tahribatsız deneylerden faydalanılır. Doğru sonuçlara ulaşmak için, yapıdan numune alınarak laboratuvar ortamında test edilmesi ve bu deneylerin bir arada değerlendirilmesi gerekir, ancak tarihi yapılarda bu her zaman mümkün olamamaktadır. Yapıdan numune alınamaması durumunda yakın tarihlerde yapılmış benzer nitelikteki tahrip olmuş yapılardan alınan örneklerden faydalanılmaktadır.

Tahribatsız deneyler, çekiç geri tepme indisi ölçümleri ya da ultrases ölçümleri şeklinde olabilir. Duvarlarda kayma dayanımı, yapı üzerinde yapılacak deneylerle

bulunabilir. Onarım ve güçlendirmede kullanılacak malzemenin belirlenmesi için mevcut duvarları oluşturan bileşenler üzerinde kimyasal deneyler yapılmalıdır [5].

2.3.1. Sertlik Ölçümü

Malzemelerin en önemli mekanik özellikleri, elastisite, süneklik, dayanım, tokluk ve sertliktir. Sertlik, bir malzemenin yüzeyine batırılan sert bir cisme karşı gösterdiği dirençtir ve cismin dayanımı hakkında bir fikir verir, ancak dayanım ya da süneklik gibi belirli bir karakteristiği tam olarak ifade etmez. Sertliğin belirlenmesi ile malzemenin kökeni hakkında bilgi edinilir, farklı iki numunenin aynı malzemeye ait olup olmadığı anlaşılır. Sertlik deneylerinin yapılması kolaydır, deneyde malzeme tahrip edilmez, bu deney, yığma yapılarıdaki doğal taş, tuğla, harç gibi gözenekli ve seramik bünyeli malzemelerde elle taşınabilir aletler ile laboratuvar dışında da gerçekleştirilebilir. Sertlik değerinden malzemenin iç yapısına bağlı özelliklere geçilebilmesi için cismin homojen olması, yüzey özelliklerinin iç yapıdan farklı olmaması gerekir [9].

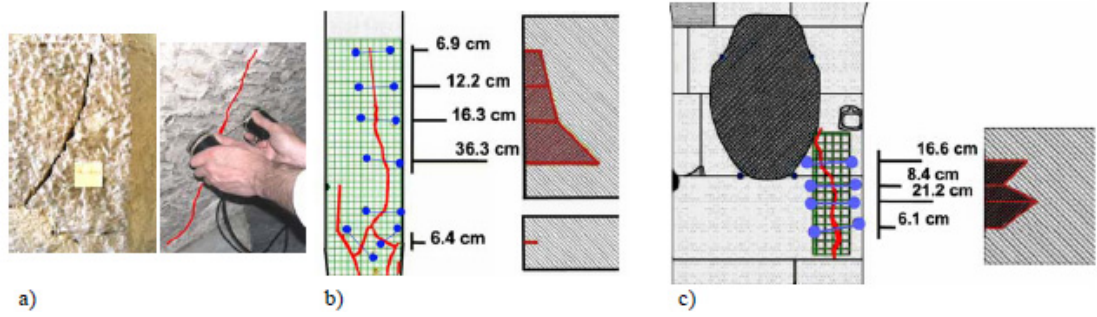
Seramik bünyeli, gözenekli yapı malzemelerinde sertliğin belirlenmesi için çoğunlukla geri sıçramanın ölçülmesi prensibine dayanan N tipi veya P tipi Schmidt çekicinden yararlanılır. P tipi Schmidt çekiciyle yapılan bir test Şekil 2.19'da görülmektedir. Bunlardan, N tipinde, bir bilye, P tipinde ise bir pandül, arkasında bulunan yay yardımı ile yüzeye fırlatılır. Bilye veya pandül taş cismin yüzeyine çarptıktan sonra geri sıçrar, geri sıçrama ne kadar büyük ise sertlik o kadar yüksektir. Elemanın yüzeyindeki sıva veya kaplama kaldırıldıktan sonra değişik noktalara en az 10 vuruş yapılmalı, maksimum vuruş değeri ile minimum vuruş değeri arasındaki fark 10'dan küçük olmalıdır [10].



Şekil 2.19: P tipi Schmidt çekici testi uygulaması [36]

2.3.2. Ultrases Ölçümü

Frekansı 16.000'in üzerinde olan ve insan kulağı tarafından işitilemeyen ultrases dalgaları, katı, sıvı ve gaz içinde belirli bir hız ile yayılır. Ultrases dalgaları da ışık dalgaları gibi yayılır, yansır, kırılır ve difraksiyona uğrar. Ultrases deney tekniğinde, ses dalgaları, cisme, boşluk bırakılmaksızın temas ettirilen piezoelektrik transduser ile gönderilir ve aynı özellikteki transduser yardımı ile alınır. Alıcı ve verici probalar arasındaki ses dalgalarının iletim süresi ve hızı zaman ölçer devre ile ölçülür. Cismin yoğunluğu düşük ise ve/veya bünyesinde çatlaklar var ise ses dalgalarının yayılımı ve dolayısı ile ses geçiş hızı düşük olur [10].



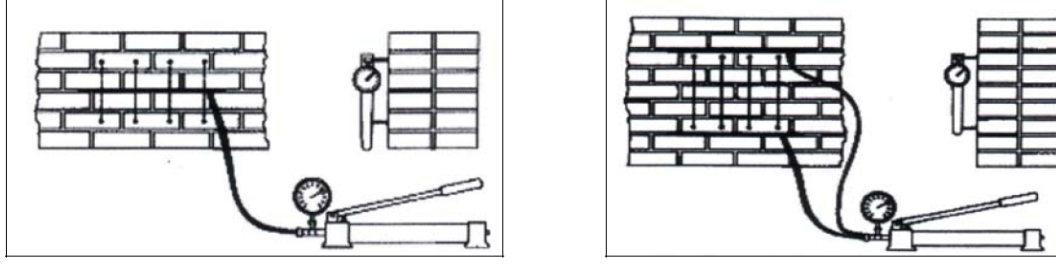
Şekil 2.20: (a) Ultrasonic test işlemi (b), (c) kolon üzerindeki test sonuçları [39]

Ultrasonic test tekniği, sütunların içerisindeki çatlak derinliğinin ölçülmesinde kullanılmaktadır. Çatlağın iki tarafına eşit mesafede tutulan 40 khz'lık transduser yardımıyla çatlak oluşumu izlenebilmektedir. Şekil 2.20'da ultrasonic test tekniğine ait uygulama ve çizimler görülmektedir. Test sonuçlarından kolon üzerindeki çatlağın 40 cm derinliğe kadar ulaştığı görülüyor [11].

Ses geçiş hızının yüksek olması, boşlukların az, dolayısı ile dayanımın yüksek olduğu anlamına gelir, ancak bu deney dayanımın belirlenmesi için tek başına yeterli değildir. Diğer ölçümler ile birlikte değerlendirilmelidir.

2.3.3. Yerinde Basınç Deneyi

Yığma yapılarda, ASTM C 1196-92 (Reapproved 1997)'ye uygun olarak gerçekleştirilen yerinde basınç deneyinde; elemana uygulanan kuvveti ve kuvvete karşılık gelen boy değişiminin ölçülmesine imkân sağlayan flat-jack deney düzeneğinden faydalanılır. Tek ve çift plak ile yapılan ölçüm düzenekleri Şekil 2.21'de görülmektedir.



Şekil 2.21: Yerinde basınç deneyi: a. Tek Plak ile Ölçüm b. Çift Plak ile Ölçüm [9]

Bu deney düzeneği şekil 2.21’de görüldüğü gibi basınç uygulayan bir kompresör ve bir basınçölçer, basınç kuvvetini yüzeye uygulamaya yarayan plaklar, yerdeğiştirmeyi ölçmeye yarayan komparatör ve komparatörü tespit etmeye yarayan pimlerden oluşmaktadır. Şekil 2.22’de flat-jack uygulamasına ait resim görülmektedir.

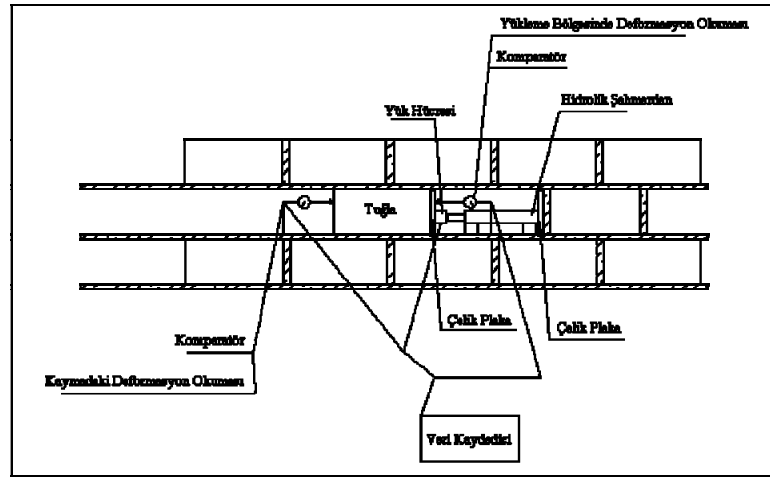


Şekil 2.22: Flat-jack uygulaması [36]

Deneyin uygulamasında, öncelikle yerdeğiştirmelerin ölçüleceği pimler, şablona uygun olarak yapıştırılır; başlangıçtaki uzaklık ölçülür. Elemanda, tercihen yatay derzde plağın yerleştirileceği bölge, matkap ile açılır; harç kaldırıldığı için yapının zati yükü nedeni ile ölçüm bölgesinde boy değişimi meydana gelir. Pimler arasındaki mesafe ölçülerek boy değişimi tespit edilir. Açılan bölgeye plak yerleştirilir, gerekli bağlantılar yapılır, kuvvet uygulanır, belirli aralıklar ile kuvvet ve yerdeğiştirmeler ölçülür. Deneylerden gerilme ve şekildeğiştirmeler, elastisite modülü ve ölçüm yapılan bölgedeki gerilme seviyesi belirlenir. Bu gerilme seviyesi, şekildeğiştirmenin başlangıçtaki değerine ulaştığı gerilme seviyesi olarak kabul edilir [9].

2.3.4. Yerinde Kayma Deneyi

Yığma yapıdaki kayma dayanımının ASTM C 1531-03'e uygun olarak belirlendiği deney seti, kuvvet uygulanan kompresör, kuvvet ölçer ve yerdeğiştirmeyi tespit eden transducer'den oluşur. Deneyin uygulanmasında şekil 2.23'de görüldüğü gibi ölçüm yapılacak bölgenin iki tarafı açılır, bir taraftan yatay kuvvet uygulanır, diğer tarafa yerleştirilen transduserin yerdeğiştirmeyi kaydettiği andaki kayma gerilmesi, yapıdaki kayma dayanımı olarak tespit edilir [9].



Şekil 2.23: Yerinde kayma deneyi [9]

2.3.5. Laboratuarda Yapılan Fiziksel ve Mekanik Deneyler

Yapıdan alınan ve laboratuara getirilen taş, tuğla ve harç numunelerinden mekanik fiziksel deneyler için numuneler hazırlanır, fiziksel ve mekanik deneyler yapılır, gerekli görülür ise onarım ve güçlendirmede kullanılacak malzemelerin mevcut malzemelere uyumunun sağlanması için iç malzemelerde içyapı analizleri gerçekleştirilir. Şekil 2.24'te özel aletlerle yapıdan numune alınışı görülmektedir.



Şekil 2.24: Yapıdan numune alınması [36]

Taş örneklerden, alındığı yapıya ve elemana göre kodlanan numunelerin (Şekil 2.25a), deneye hazırlanması için öncelikle birbirine paralel iki başı çap/yükseklik oranı 1/1 olacak şekilde taş kesme aleti ile düzeltilir. Bu numuneler, ortalama 48 saat süre ile sıcaklığı 20 ± 2 °C, bağıl nemi 65 ± 5 olan rüzgârsız laboratuvar ortamında bekletilir. Numunelerin çapı ve yüksekliği ölçülür, birim ağırlığının belirlenmesi için tartılır, ses geçiş süresi ölçülür. Ölçüm ve tartım işleminden sonra düzeltilen yüzeylere alçı, çimento karışımı hamur ile toplam 5-6 mm kalınlığında başlık yapılır. Başlığın sertleşmesinden sonra başlıklı yükseklik (h,mm) ölçülür. Bu numunelerde tek eksenli basınç deneyi yapılır, basınç etkisinde meydana gelen boy değişimi ve kırma yükü belirlenir, basınç mukavemeti hesaplanır.



Şekil 2.25: a. Numunenin kodlanması b. Tuğla numunesinde basınç deneyi [36]

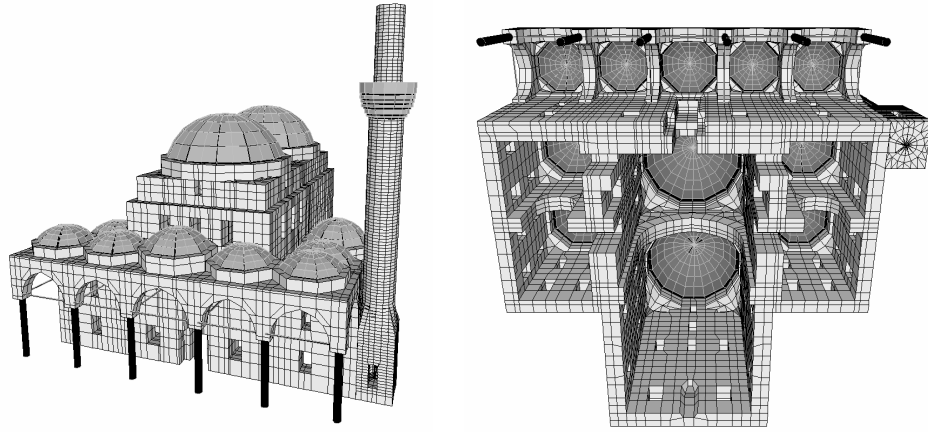
Alındığı yapıya ve elemana göre kodlanmış olarak plastik torba içinde laboratuvara getirilen tuğla numunelerinden mekanik deneyler için TS 4563 ve TS 705'e uygun olarak hazırlanan numunelerde, tek eksenli basınç deneyi yapılır, kırma yükü belirlenir, kırma yükünün kuvvet uygulanan yüzeye oranlanması ile basınç dayanımı hesaplanır. Deney sonuçların verildiği çizelgede tuğlaların nominal boyutları, dar kenarı, uzun kenarı ve kalınlığı da verilir.

Fiziksel deneyler için hazırlanan numunelerde kılcal su emme ve ağırlıkça su emme deneyleri yapılır, deney sonuçlarından boşluklu birim hacim ağırlık, ağırlıkça su emme, hacimce su emme ve kılcal su emme katsayıları belirlenir.

Fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenen malzemelerin onarımında kullanılacak malzeme ile uyumun araştırılması amacı ile taş, tuğla ve özellikle harç numunelerin mikro-yapısal özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir [9].

2.4. Yapı Güvenliğinin Belirlenmesi

Yapının düşey ve yatay yükler altındaki davranışının ve elemanlardaki gerilme ve kuvvet akışının belirlenmesi için bir model geliştirilmelidir. Güçlendirme sisteminin yeterliliğinin belirlenmesinde oluşturulacak mekanik modelin yapının özelliklerini yansıtması önemlidir. Oluşturulacak model kapsamlı olması derecesinde ek kabullere ihtiyaç olacaktır. Bunun yanında geliştirilecek çok basit model de gerçek durumu temsilden uzak olabilir. Modelin karmaşıklık derecesine, yapıya bağlı olarak deneyimli mühendis tarafından karar verilmelidir. Hazırlanacak modelle yapılacak yapısal çözümleme güçlendirme durumunda kuvvet akışını ortaya çıkaracak ve bazı kritik kesit ve bölgelerin belirlenmesinde faydalı olacaktır [1].



Şekil 2.26: Bu çalışmada incelenen Murat Paşa Camii'nin sonlu eleman modeli perspektif görüntüleri

Tarihi yığma yapıların güvenliğinin belirlenmesinde diğer yapılardan farklı olarak daha hassas ve ayrıntılı hesapların yapılması gerekir. Bu nedenle yığma türü yapı sistemlerinin analizinde analitik çözümler yerine sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemle çubuk (frame), kabuk (shell) ve katı (solid) eleman gibi çeşitli yapı eleman modellerini bir arada kullanmak mümkün olmakta yapının üç boyutlu statik ve dinamik analizi yapılabilmektedir. Yapılacak hesaplarda öncelikle yapının mevcut güvenlik düzeyi belirlenip güçlendirme ihtiyacı olup olmadığı saptanmalı daha sonra güçlendirildiği şekliyle tekrar modellenip öngörülen güvenlik düzeyine ulaşıp ulaşılmadığı kontrol edilmelidir. Bu çalışma kapsamında Murat Paşa Camii'nin üç boyutlu sonlu eleman modeli kurularak statik ve dinamik analizleri yapılmıştır. (Şekil 2.26) Model ile ilgili detaylı bilgi ve analiz sonuçları çalışmanın üçüncü bölümünde yer almaktadır.

3. TARİHİ YIĞMA YAPILARDA ONARIM VE GÜÇLENDİRME YÖNTEMLERİ

Yeterli deprem güvenliğine sahip olmayan tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesi gerekir. Tarihi yığma yapıların onarım ve güçlendirilmesinde çok çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunların bir kısmında geleneksel malzemeler kullanılırken, bunların yetersiz kaldığı durumlarda yeni malzemeler kullanılır. Bazı müdahaleler birkaç elemanın onarımı şeklinde olabilirken bazılarında yapı bütün olarak güçlendirilir.

3.1. Onarım ve Güçlendirme Yönteminin Belirlenmesi

Tarihi yığma yapılarda uygulanacak onarım ve güçlendirme yönteminin belirlenmesinde dikkate alınması gereken hususlar aşağıda sıralanmıştır:

- a. Onarım ve güçlendirme yöntemi seçilirken olası yöntem seçenekleri içerisinde mevcut yapıya en az müdahale getirecek teknik tercih edilmelidir.
- b. Onarım ve güçlendirmede kullanılacak malzemenin seçiminde tarihi yapının mevcut malzemesi ile uyum ve zamana karşı dayanıklılık göz önünde bulundurulmalıdır.
- c. Onarım ve güçlendirme, eleman düzeyinde ve bütün sistem düzeyinde ayrı ayrı ele alınmalıdır.
- d. Taşıyıcı sistem güvenliğinin sağlanması koruma ve restorasyon faaliyeti kapsamında ele alınmalıdır. Onarım ve güçlendirme ile tarihi malzeme veya belirgin bir mimari özelliğin kaldırılmasına veya değiştirilmesine izin verilmemelidir.
- e. Onarım ve güçlendirme müdahalesinin seçiminde mevcut sistemdeki kuvvet iletiminin nasıl olduğu göz önüne alınmalıdır.
- f. Onarım ve güçlendirme, hasarın kendisinden çok sebebine yönelik olmalıdır. Hasarlı bir tarihi yapının hasar sebebi kesin olarak belirlenmesinden sonra güçlendirilmesi gerekir.

g. Hasarsız bir yapının güçlendirmesi söz konusu olduğunda, çok uzun zamandan beri durumunu koruduğu gözden kaçırılmamalıdır. Belirgin bir hasarı olmayan yapıya ağır bir güçlendirme projesi hazırlanması durumunda bunun gerekliliği konusunda sorgulayıcı olmalıdır.

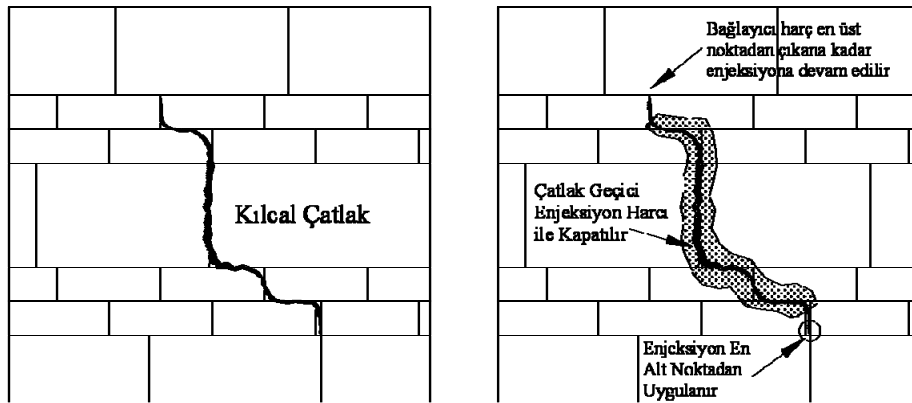
h. Mümkün olduğu durumlarda sökülüp değiştirilebilen güçlendirme elemanları tercih edilmelidir. Gelecekte ortaya çıkabilecek yeni onarım ve güçlendirme malzemelerinin ve yöntemlerinin uygulanmasına imkân tanınmalıdır [1].

3.2. Çatlakların Onarımı

Yığma yapı elemanlarında özellikle duvarlarda sıkça karşılaşılan hasar biçimi olan çatlakların onarılması, yerel bir güçlendirme olmakla birlikte yapının genel taşıyıcılığına da olumlu etkisi olduğu kesindir. Çatlakların onarım yöntemi çatlak genişliğine göre değişir. Küçük çatlaklar uygun harçla doldurulurken, daha geniş çatlaklarda bozulan elemanlar yenileriyle değiştirilip gerektiğinde çekme gerilmesi taşıyacak çelik ya da FRP malzemeye desteklenmelidir.

3.2.1. Küçük Çatlakların Onarımı

İnce çatlakların ve kalın duvarlardaki çatlak ve boşlukların onarımında en uygun yöntem boşluğa duvarda kullanılan özgün malzemeye benzer özellikteki bir harcın enjekte edilmesidir (Şekil 3.1) [5].



Şekil 3.1: Çatlakların enjeksiyon yöntemi ile onarımı

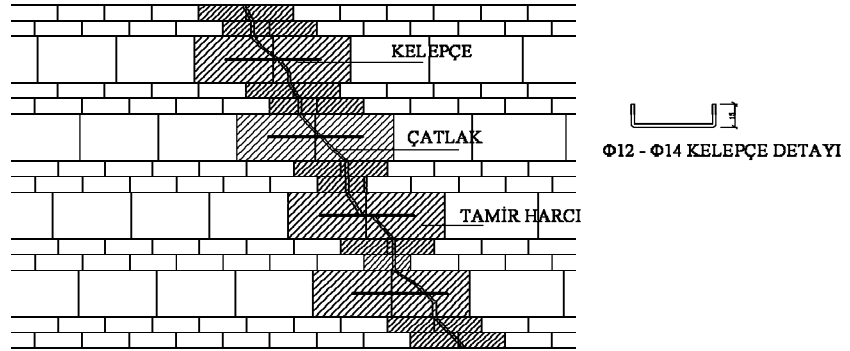
Uygulamada en çok kullanılan enjeksiyon sistemi; taş derzlerinde 14 mm. çapında ve 15-40 cm. uzunluğunda delikler açılarak, bu deliklere monte edilecek packer'lerden, çatlak, boşluk vb. bölgelere poliüretan reçinelerinin uygun basınçlarda enjekte

edilmesidir. Kısa sürede priz alan reçineler yığma duvarlardaki çatlak ve boşlukları, taş aralarını kalıcı olarak tamamen doldurur ve böylece yapıda istenilen onarım ve yalıtım sağlanmış olur. Enjekte edilen malzeme miktarı, çatlakların ve taşların içindeki boşlukların hacmine ve özelliğine göre değişir. Enjeksiyon yönteminde yapılan işler şu şekilde sıralanabilir: [12]

- a. Çatlakların basınçlı hava vb yöntemle temizlenmesi
- b. Çatlakların geçici olarak kapatılması
- c. 10-20 cm. arayla 15-40 cm derinlikte 14 mm çapında delik delinmesi
- d. Enjeksiyon packerlerinin çakılması
- e. Reçinelerin özel enjeksiyon pompaları ile enjekte edilmesi
- f. Packerlerin sökülmesi ve delik yerlerinin yüzeysel olarak onarılmasıdır.

3.2.2. Geniş Çatlakların Onarımı

Çatlak genişliğinin 10mm'den büyük olduğu ya da duvarı oluşturan taş ya da tuğlaların düşmüş olması durumunda çatlakların onarımında uygulanan enjeksiyon yöntemi çekme gerilmelerini alacak elemanlarla birlikte yapılır. Bu amaçla çatlağa bitişik taş ya da tuğlalar çıkarılır ve dikiş elemanları veya çelik bağlantı elemanları yerleştirilir. Taş ya da tuğla duvarın boşlukları, uygun bir karışımla düşük basınç altında doldurulur [5]. Uygulamaya ait bir çizim Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2: Çatlak duvarın dikilerek onarılması

Bu yöntem duvarın diğer yüzünde de uygulanmalıdır. Enjeksiyon bitince yapılan işin ne düzeyde gerçekleştiği değişik kotlardan alınan numuneler üzerinde yapılacak numuneler üzerinde kontrol edilmelidir. Yapılan yetersiz ise enjeksiyon tekrarlanmalıdır [5]. Çelik lamalarla dikilerek onarılmış bir çatlak duvara ait resim Şekil 3.3'de görülmektedir.



Şekil 3.3: Çatlak duvarın dikilerek onarılması

3.3. Taşıyıcı Elemanların Güçlendirilmesi

Güçlendirme yöntemleri incelenirken, yapı elemanları ayrı ayrı ele alınmıştır. Tarihi yapılarda taşıyıcı sistem birçok eleman bir arada ele alınarak bütün olarak güçlendirilebileceği gibi güçlendirme işi taşıyıcı eleman düzeyinde yerel olarak da yapılabilir.

3.3.1. Temellerin Güçlendirilmesi

Diğer yapı elemanlarına göre daha zor ve pahalı olan temel güçlendirilmesi işlemi bazı durumlarda söz konusu olur:

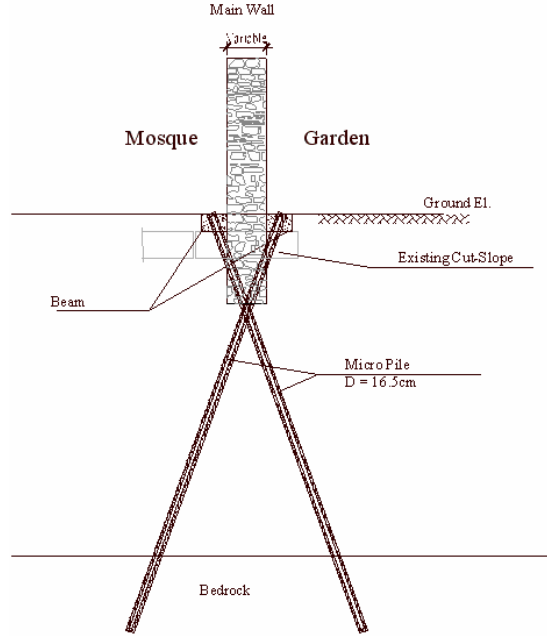
- a. Kötü zemin nedeniyle temelde büyük oturmalar meydana gelirse;
- b. Büyük deprem yükleriyle temelde hasar oluşursa;
- c. Yapı yüklerinde güçlendirmeden ileri gelen artmalar varsa;
- d. Hareketli yükleri arttıracak işlev düzenlemeleri yapılırsa.

Temel sisteminin güçlendirilmesinde, mevcut temele ilave yapılabildiği gibi, yeni temel düzenlenebilir, temel zemini iyileştirilebilir veya yapının yüklerinin uygun bir sistemle daha derindeki sağlam tabakalara iletilmesi sağlanabilir [4].

Taşıma gücü düşük olan zeminlerde temel yüklerinin daha derindeki taşıyıcı tabakalara aktarılması gerekir. Bunun için çakma kazıklar, itmeli kazıklar, mini kazıklar ve jet-grout kolonları kullanılmaktadır.

Küçük Ayasofya Camii'nin temellerinin farklı özelliklerdeki zeminlerin üzerine inşa edilmesi sebebiyle, zayıf olan zeminin daha fazla oturması neticesinde yapıda farklı

oturmalar meydana gelmiş ve yapı hasar görmüştür. Çözüm olarak temellerin mini kazıklarla güçlendirilmesi yoluna gidilmiştir. (Şekil 3.4) [13].



Şekil 3.4: Küçük Ayasofya Camii'nde mini kazıklarla temel takviyesi [13]

Jet-grout tekniğinin esası, delici bir takımın, istenilen derinliğe kadar yaklaşık 10 cm çapında delik delmesi ve daha sonra otomatik tesislerde hazırlanan harcın özel aletlerle alttan yukarıya doğru istenilen seviyeye kadar zemini kesip çakıl ve kumu bünyesine alarak 320 - 440 atmosfer basınçla zemine enjekte edilmesi ve bu suretle kolon oluşturulması ilkesine dayanır. Yüksek basınçlı karışım, boşlukları doldurmakta, yeraltı suyunu itip yerini almakta ve zeminle karışmaktadır. Böylece zemin yapay olarak taşlaştırılıp, taşıyıcı kolonlar oluşturulmaktadır [35].

Temellerin güçlendirilmesinde eski ve yeni bölümlerin birlikte çalışması, eski elemandan yeni elemana yük aktarılmasının sağlanması gerekmektedir.

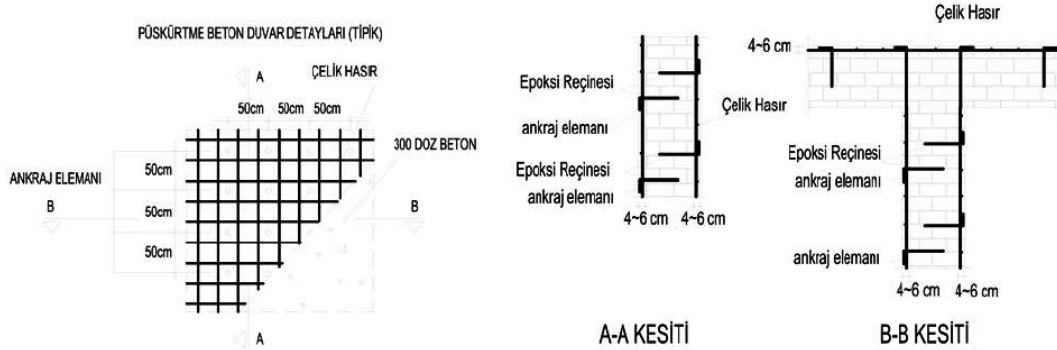
Temelin altındaki zeminin sağlam olduğu durumda, temelde güçlendirme yapmak yerine temelin kayarak yanal yerdeğiştirmesini ve açılmasını önlemek amacıyla temel çevresinin dolgu ile sıkıştırılması yeterli olabilmektedir.

Temelin takviyesine karar vermeden önce mutlaka sondajlar, deneme çukurları açılmalı ve numuneler üzerinde laboratuvar ortamında deneyler yapılarak zemin dikkatli bir şekilde incelenmelidir.

3.3.2. Duvarların Güçlendirilmesi

Tarihi yığma yapılarda duvarların güçlendirilmesi, duvar çatlaklarının onarılması ve duvarların kalınlaştırılması şeklinde yapılır. Duvarda meydana gelen çatlak genişliğine göre duvar, ya enjeksiyon harcı ile doldurulur ya da kelepçelerle dikilerek tamir harcı ile onarılır. Bu şekildeki onarımların yetersiz kaldığı önemli hasar durumlarında duvarın kalınlaştırılması yoluna gidilir.

Duvarın bir veya iki taraflı yapılacak çelik hasır ile püskürtme beton uygulamasında, duvarın hem onarılması ve hem de kalınlaştırılması suretiyle duvara ek kesme kuvveti kapasitesi kazandırılır. Duvara yerleştirilen çelik hasır kenetleme donatıları ile duvara bağlanarak mevcut duvarla bütünleşme sağlanır (Şekil 3.5). İki taraflı püskürtme beton uygulamasında, iki yüzdeki çelik hasırlar birbirine duvarı delen donatılarla bağlanır. Eklenen püskürtme beton ve tamir harcı kalınlığının 50 mm olması imalat bakımından uygun düşer. Güçlendirmenin yeterli kalınlık ve boyda olduğu güçlendirilmiş sistemde deprem güvenliği hesabı yapılarak kontrol edilebilir. Güçlendirilmiş duvarda kayma gerilmesi hesabında tuğla ve taş duvarların elastik modülleri betonun elastik modülünün 1/5'i kabul edilebilir [4].

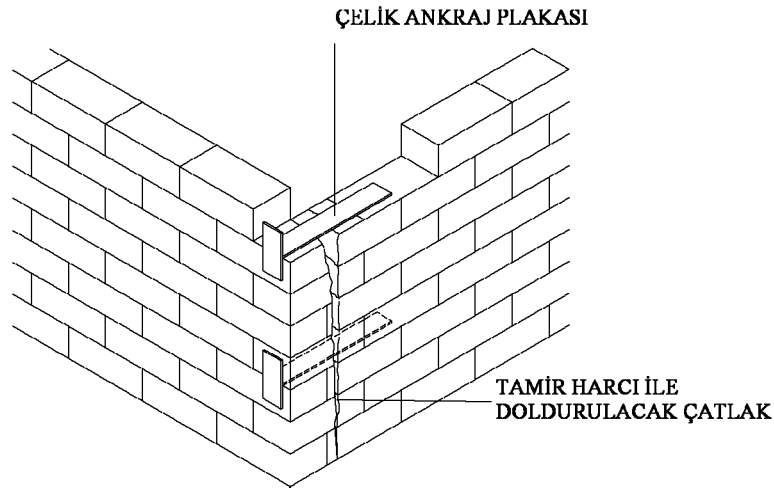


Şekil 3.5: Çelik hasır - püskürtme beton duvar detayları (Sultan Abdülaziz Av Köşkü, İzmit) [5]

Genellikle yeni yığma yapılarda uygulanan bu yöntem tarihi yığma yapılarda mecbur kalınmadıkça tercih edilmemelidir. Ancak bezeme olmayan, sıvalı duvarlarda ve yeterli olacak en az duvar alanında yapılmalıdır. Burada dikkat edilecek nokta bir eski yapıda bütün yığma duvar yüzeylerinin bu şekilde güçlendirilmesi durumunda elde edilen yapının artık eski eser sınıfına girmeyeceğinin bilinmesidir [5].

Yığma duvarların köşelerde birbiri ile kenetlenmesi ve bütünleşmesi yapının dayanımı bakımından çok önemlidir. Bu kenetlenme ile duvarların birbirine mesnetlenmesi sağlanır. Köşelerinden ayrılmış duvarların, çelik ankraj plakaları ile

birleştirilmesi gerekir. Şekil 3.6’da birbirini kesen iki duvarın birbiri ile bütünleşmesi için bir uygulama örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Duvar ayrılmalarının ankraj plakaları ile onarılması

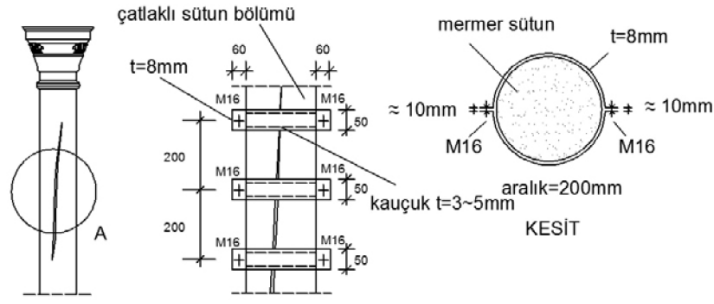
3.3.3. Sütunların ve Minarelerin Güçlendirilmesi

Düzce depreminden sonra bölgede yapılan araştırmalar, hasar gören yığma minarelerin çoğunun gerilmelerin en fazla olduğu çokgen kaidesinden silindirik kısmına geçiş bölgesinden yıkıldığını göstermiştir. Şekil 3.7’de 600 yıllık tarihiyle bölgenin en eski yapısı olan İmaret Camii’nin Düzce depreminde yıkılan taş – tuğla alması düzende yapılmış minaresi görülmektedir [14].



Şekil 3.7: 12 Kasım 1999 Düzce Depremi'nde İmaret Camii minaresinde oluşan hasar.[14]

Sütunlarda gerilmelerin daha fazla olduğu alt bölgelerdeki ezilmeleri önlemek için öngerilmeli çember bilezik yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 3.8). Bu çember çelik olabileceği gibi, karbon esaslı lif takviyeli polimer malzemeden de seçilebilir [1]. Yapı elemanının bu şekilde sarılmasıyla basınç dayanımında artış sağlanmaktadır.



Şekil 3.8: Sütunlarda güçlendirme örneği [5]

Sütun ve minarelerdeki küçük çaplı hasarlar genellikle çatlak olarak ortaya çıkmaktadır. Öncelikle yapılacak iş, bu çatlakların durağan olup olmadıklarının belirlenmesidir. Durağan ve küçük çatlakların onarılmasında yüzey temizliği sonrası basınç ile epoksi reçinesi veya epoksi harcı enjeksiyonu uygulanır. Devam eden çatlaklar için ayrıntılı incelemenin yapılması ve sebebinin belirlenerek gerekli tedbirlerin alınması gerekir. Daha büyük çatlaklarda ve ayrılmalarda dikiş yöntemi uygulanmaktadır. Bunun için duvarlarda olduğu gibi, hasar gören elemanlar çıkarılır, paslanmaz metal kenetler ve tamir harcıyla birleşim sağlanır. Şekil 3.9’da dikiş yöntemiyle güçlendirilmiş tarihi bir minare görülmektedir.



Şekil 3.9: Minarede güçlendirme

Taşları arasındaki kenetleri paslanmış ve böylece taşıma gücü zayıflamış minarelerin parçalara ayrılarak sökülmesi ve yeniden benzer nitelikte modern bağlayıcılarla inşa edilmesi uygun bir çözüm olabilmektedir. Ancak sökme işlemi sırasında elemanların zarar görmemesi ve her bir elemanın numaralanarak yerinin tespit edilmesi gerekir.

3.3.4. Ahşap Döşemelerin Güçlendirilmesi

Ahşap döşemelerin onarım ve güçlendirilmesi düşey yükleri karşılayarak duvarlara iletmeleri ve duvarların bütünlüğünü sağlamaları bakımından önemlidir. Ahşap döşemelerin üzerine mevcut kaplama ile açı yapacak şekilde yeni bir kaplama çakılması önemli bir yatay ve düşey rijitlik sağlar. Bu işlem çelik elemanlar kullanılarak da yapılabilir. Döşeme kirişlerine yeterli mesnet boyu sağlanmalı ve varsa buralardaki çürüme ve bozulmalar giderilmelidir [1].

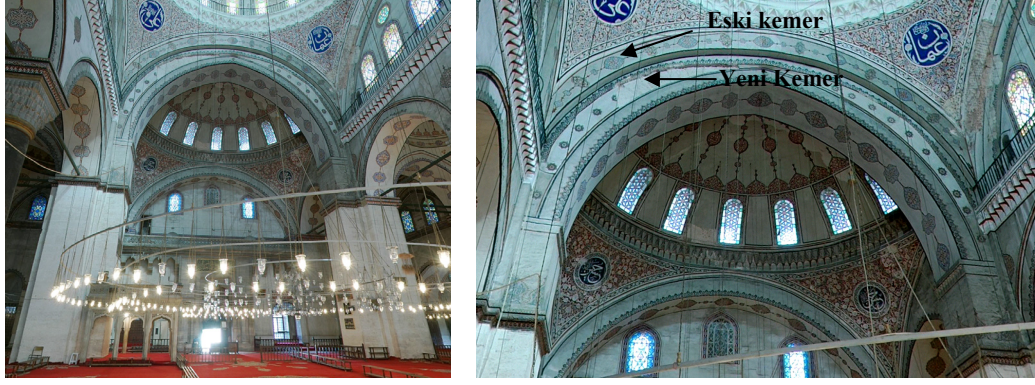
3.3.5. Kemerlerin / Tonozların Güçlendirilmesi

Kemer ve tonozlarda en sık rastlanan hasar, çatlaklar ve yapı malzemesindeki bozulmalardır. Çatlaklar uygun harçla doldurulur, ezilen, düşen ya da bozulan elemanlar kemer ya da tonoz askıya alınarak yenileri ile değiştirilir. Kemer ve tonozlarda karşılaşılan bir başka hasar nedeni de mesnet noktalarının açılmasıdır. Mesnetlerdeki ayrılmaların önlenmesi için gerilme alacak şekilde gergiler düzenlenir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10: Kemerlerde gergi düzenlemesi ve mesnetlerin sabitlenmesi (Roma Forumu'nda Yapı) [5]

Kubbe ile örtülü yığma yapılarda kemerler ayrı bir öneme sahiptirler. Böyle yapılarda kubbe kasnağı kemerlere oturmaktadır, kemerlerin bir kısmının zayıf olması kubbenin mesnet şartlarının her noktada aynı olmaması anlamına gelir. Bu ise kubbeye farklı oturmalara oluşmasına dolayısıyla aşırı zorlanmalara sebep olur. Böyle bir durumda çözüm, kemerin daha az sehim yapacak şekilde güçlendirilmesidir. Bunun bir yolu kemerin altına yeni bir kemer eklenmesidir. Bunun en güzel örneğini 16. yy da Mimar Sinan yapmıştır. II. Beyazid Camii'nin zayıf olan kemerini, altına bir sivri kemer teşkil ederek güçlendirmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11: İstanbul II. Beyazid Camii kemerinde Mimar Sinan tarafından yapılan güçlendirme

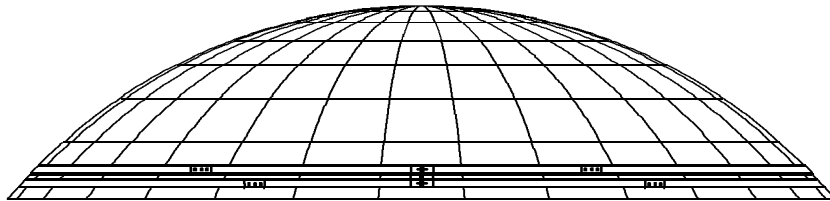
Yakın tarihte yapılan bir çalışma, II.Beyazid Camii'nin ana kemerinde Mimar Sinan tarafından yapılan bu şekildeki güçlendirmenin kubbedeki farklı oturumları %84 oranında azalttığını ortaya koymuştur [15].

3.3.6. Kubbelerin Güçlendirilmesi

Bu tür elemanlarda görülen tipik hasar kubbe eteğinde oluşan çekme gerilmelerinin taşınamaması sonucu oluşan radyal çatlaklardır. Bu tür çatlakların daha da açılmasını önlemek için alınacak en iyi önlem etek civarında bir öngerilmeli çekme çemberi oluşturmaktır (Şekil 3.12 - 3.13). Çekme çemberinde kullanılacak çeliğin paslanmaz çelik olması, aksi hallerde zaman içinde korozyon bakımı yapılması ya da çemberin bir beton kesit içine alınması uygun olacaktır [5].



Şekil 3.12: Ahi Çelebi Camii kubbe eteğinde çekme çemberi oluşturulması [5]



Şekil 3.13: Kubbe eteğinde çekme çemberi düzenlemesi

Şekil 3.14’de güçlendirme öncesi hasarlı durumu gösterilen Küçük Ayasofya Camii’nin kubbe kasnağında, zeminin farklı oturmasından kaynaklandığı düşünülen ayrılmalar görülmektedir.



Şekil 3.14: Küçük Ayasofya Camii kubbe kasnağında hasar [13]

Kubbelerde güçlendirme amacıyla çekme çemberi uygulamasının yanı sıra, kubbenin lif takviyeli polimer levha türü malzeme ile sarılması yoluna da gidilmektedir. Şekil 3.15’de bu yöntemle güçlendirilen Küçük Ayasofya Camii kubbe kasnağı görülmektedir.



Şekil 3.15: Kubbe kasnağında FRP uygulaması (Küçük Ayasofya Camii, İstanbul) [13]

Kubbesinde ciddi çatlaklar ve tuğlalarda ağır hasar bulunan Mısır’daki 800 yıllık tarihe sahip El-Eini’nin kubbe gövdesindeki derin çatlaklar sebebiyle, kubbenin en üstte kesişen birbirinden bağımsız kemerler gibi davrandığı sonucuna varılmıştır. Diğer çatlakların silindirik kubbe kasnağına kadar devam ettiği ve önlem alınmaması

halinde kubbenin göçmesine sebep olacağı bildirilmiştir. Bu yapıda da lif takviyeli polimer levha türü malzeme ile güçlendirme yapılmıştır.



Şekil 3.16: Kubbede değişik seviyelerde CFRP uygulaması (El-Eini Kubbesi, Mısır) [16]

Çözüm olarak silindirik kubbe kasnağı iki katman halinde CFRP ile kuşatılmış ayrıca çatlakların çok fazla olması sebebiyle kubbe değişik seviyelerde yine aynı malzeme ile sarılmıştır (Şekil 3.16). Fiber çimento harcı ile birlikte uygulanan CFRP malzemenin böylece zayıf kubbe yüzeyi ile güçlü bir bağ kurulabilmesi sağlanmıştır. Son katmanda tuğla tozunun da kullanılmasıyla, tarihi yapıda herhangi bir renk, biçim ve görünüş farklılaşması oluşturulmadan başarıyla güçlendirilmiştir [16].

3.4. Zeminin Güçlendirilmesi

Zemin iyileştirme yöntemleri: a. Taş Kolonlar, b. Kum kazıkları-düşey drenler, c. Ön ve fazla yükleme, derin karıştırma (deep mixing), d. Vibrokompaksiyon-Vibroflotasyon, e. Dinamik Kompaksiyon (Ağırlık düşürme), f. Kompaksiyon Enjeksiyonu, g. Çatlatma-Girme-Deplasman Enjeksiyonu, h. Jet Enjeksiyonu, ı. Patlatma, i. Geotekstil ve Geosentetikler ile Güçlendirme, j. Kimyasal Enjeksiyon olarak sıralanabilmektedir.

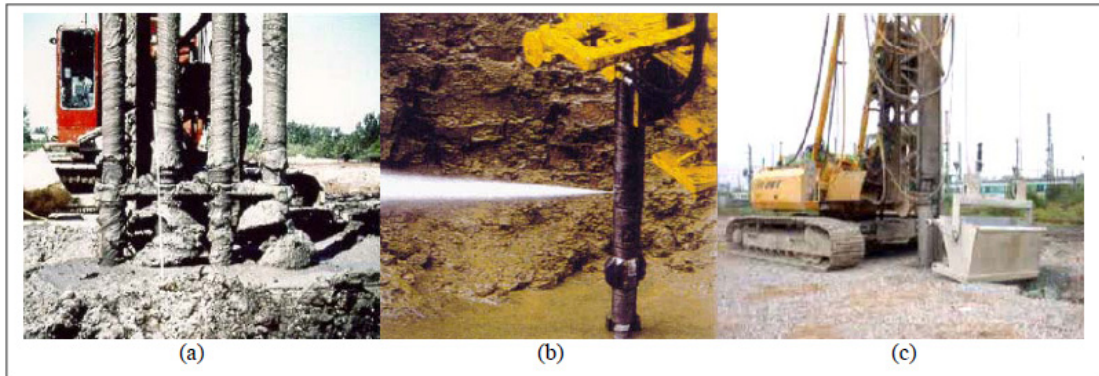
Zeminde meydana gelen oturma, taşıma kapasitesinin aşılması, deprem durumunda sıvılaşma üst yapıda hasar oluşmasına sebep olan başlıca nedenlerdir. Tarihi yapılarda temel zemini uzun zamandır aynı yapının altında bulunduğu için kohezyonlu zeminlerde oturmaların sona ermiş olması beklenir. Buna karşılık sıvılaşmaya meyilli olan kararsız zeminler özellikle deprem sırasında yapıda büyük yerdeğiştirmelerin oluşmasına sebebiyet verir. Yeraltı, yağmur ve pis su sızması nedeni ile temelin altındaki zeminde erozyon olabilir ve temelin altına boşalması

oturmaya neden olabilir. Sızan sular killi zeminlerde kilin şişmesine yol açar ve bu durum nispeten hafif yapılarda yapının yukarı doğru itilmesine ve temelde hareketlere yol açabilir. Yeraltı su kaçağının önlenmesi sonucu killi zemin bu kez büzölmeye ve zemin hacmi küçölmeye başlar. Bu ise zeminde aşğı doğru harekete yol açar. Oluşan oturmalar duvarlarda çatlaklara neden olur.

Sıvılaşma kısaca deprem durumunda geçici ve tekrarlı yüklerle yeraltı su seviyesi altındaki kumlu ve siltli zeminlerin boşluk suyu basıncının artmasına bağılı olarak mukavemet kaybı olarak adlandırılmaktadır. Sıvılaşmanın belli başlı etkileri arasında deprem esnasında ve sonrasında oluşın zemin taşıma gücü kayıpları, oturmalar, şevli arazilerde yanal zemin ötelenmeleri sayılabilir

Sıvılaşma etkilerinin azaltılmasına yönelik metotlar arasında; a. Zemin sıkılaştırmasıyla mukavemet parametrelerinin arttırılması (vibrokompaksiyon, taş kolon, dinamik kompaksiyon, patlatma vs.), b. Aşırı boşluk suyu basınçlarının taş kolon veya şerit drenler ile drenajı, c. Çimento ve diğır bağlayıcılarla zeminde mukavim kolonlar oluşturulması ('Jet Grouting', 'Deep Mixing' vs.), d. Çakma veya fore kazıklı temeller (kesme kuvvetlerini karşılayacak şekilde donatılarak), e. Yeraltı su seviyesinin düşürölmesi, f. Diyafram duvar uygulamaları sıralanabilir.

Çimento ve diğır bağlayıcıların zemin içine yüksek veya düşük basınçlar altında enjekte edilmesine yönelik 'Jet Grouting' ve 'Deep Mixing' yöntemleri özellikle yüksek taşıma gücünün gerektiğı, saha jeolojisi sebebiyle değışken zemin tiplerinde çalışma ihtiyacı duyulduğı ve inşaat süresinin kısıtlı olduğı durumlarda diğır yöntemlere göre daha avantajlı olmaktadır [17]. Şekil 3.17 a ve b'de sırasıyla deep mixing ve jet grouting uygulamaları görölmektedir.



Şekil 3.17: Sırasıyla (a) Deep Mixing (b) Jet Grouting (c) Taş Kolon yöntemleri uygulamaları [17]

Taş kolonlar ile problemli yumuşak ve gevşek zeminlerin iyileştirilmesi, son yıllarda yurtdışında çok uygulaması olan bir sistemdir. (Şekil 3.17 c) Taş kolonlar ile üstyapı proje yüklerine, saha ve zemin koşullarına bağlı olarak zeminin taşıma kapasitesi artırılmakta, oturma (konsolidasyon) süresi azaltılmakta ve deprem durumunda sıvılaşan veya mukavemeti kaybeden zeminler sağlamlaştırılmaktadır. Taş kolonlar genellikle yumuşak ve orta katı kil zeminlerde, problemli zemin tabakası kalınlığının genellikle 10.0 m'den az olduğu koşullarda tercih edilmektedir. Taş kolon uygulaması ile oturma problemleri genellikle %50-%60 oranında azaltılabilmekte, taşıma kapasitesi ise çok daha yüksek seviyelere çıkarılabilmektedir. Taş kolonlarının genellikle uçlarının sağlam bir taban zeminine oturtulması tavsiye edilmektedir. Yapım yöntemi olarak, - vibroflotasyon ataşmanları (su veya hava) ile kolonların oluşturulması - klasik foraj ile problemli zeminin dışarı atılarak yerine çakıl yerleştirilmesi ve sıkıştırılması - boru çakma veya itme ile zeminin sıkıştırılması ve kolonların oluşturulması imalatları yapılabilmektedir [18].

Temel zeminin güçlendirilmesi amacıyla kullanılan yöntemlerden birisi de enjeksiyondur. Bu yöntemin amacı zeminlerin geçirirliiliğinin azaltılması, sıkıştırılması ve kayma mukavemeti parametrelerinin artırılmasıdır. Bunun için zemin sınıfına göre hazırlanmış değişik tipte çimento esaslı harçlar büyük bir basınçla zemine basılır. Olası kimyasal yöntemler ise şöyle sıralanabilir; iri daneli kumlarda asfalt emülsiyonu enjeksiyonu, doymun kumlarda karpamit polimer enjeksiyonu, doymun kumlarda ve l s zeminlerde silikasyonu sağlamak amacıyla cam suyu enjeksiyonu.

Zemin iyileştirmesi Yoluyla Sıvılaşma Riskinin Ortadan Kaldırılması: Zeminlerin sıvılaşmaya karşı direncini artırmak amacıyla uygulanan zemin iyileştirmesi tekniklerinin asıl hedefi, deprem sırasında aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunu önlemektir. Hedefe ulaşmak için zeminin sıklılığı artırılır veya zemin içindeki suyun drenajı sağlanır.

Dinamik kompaksiyon: Bu yöntem, şahmerdan adı verilen metal veya benzeri bir ağırlığın 10 ile 30 metre arasında değişen yüksekliklerden düşürölerek, zeminin darbe etkisiyle sıkıştırılması esasına dayanır. Bu amaçla, iyileştirilecek zeminin yüzeyi kare şeklinde alanlara bölünür ve her karenin içinde kalan alandaki zemine darbe uygulanır. Bu yöntem, kum/kumlu zeminlerin sıvılaşmaya karşı direncinin artırılmasında ekonomik bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Dinamik yükleme ile

zeminde önemli bir sıkışma yaratılır. Zeminin içerdği ince dane miktarı fazla ise sıkışmanın zorlaşacağı anımsanmalıdır [19].

Vibroflotasyon: Bu yöntemde, zeminin içine indirilen özel bir vibratörün titreştirilmesiyle zeminin dane yerleşim yapısı bozulmakta ve daneler bir araya gelmeye zorlanarak zeminin sıkışması sağlanmaktadır. Uygulamada 30 metre kadar bir derinliğe inilebilmekte ve sıkıştırma yönteminde olduğu gibi, belirli aralıklarla sıkıştırma işlemi yapılmaktadır [19].

Taş kolonları: Zeminde açılan geniş çaplı deliklerin çakıl ve taş ile doldurulması, bu yöntemin esasını oluşturur. Taş kolonlar, vibroflotasyon tekniği ile zemine yerleştirilebileceği gibi, metal muhafaza borularının içinden zemine dökülen çakılların üzerine şahmerdan düşürülerek de oluşturulabilir. Sıkıştırma işlemi yapıldıkça muhafaza borusu aşamalı olarak yüzeye çekilir [19].

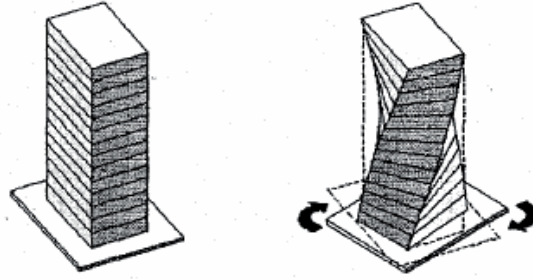
Sıkıştırma enjeksiyonu: Bu yöntemde; su, kum ve çimentonun karıştırılmasıyla elde edilen ve akıcılığı düşük bir karışım belirli bir basınç altında zemine enjekte edilir. Karışım, içine girdiği zeminin danelerini öteleyerek sıkıştırır ve duraylı bir zon oluşturur. Yöntemin en önemli avantajlarından biri de, mevcut yapıların temellerine de uygulanabilmesidir. Bu amaçla enjeksiyon işlemi yapının yan taraflarından yapılacağı gibi, eğimli delikler aracılığı ile doğrudan yapının tabanındaki zemine de uygulanabilir [19].

Drenaj teknikleri: Sıvılaşmadan kaynaklanabilecek zararlar, zemindeki suyun drenajını kolaylaştırmak yoluyla da azaltılabilir. Eğer zeminin boşluklarında su ortamdan uzaklaştırılabilirse, deprem sırasında gelişebilecek aşırı boşluk suyu basınçları da önemli ölçüde azaltılmış veya önlenmiş olacaktır. Çakıl ve kum drenleri veya zemine yerleştirilen sentetik malzemeler başlıca drenaj teknikleri olarak kullanılmaktadır. Çakıl ve kum türü malzemeler, zeminde belirli aralıklarla düşey yönde açılmış deliklerden dökülerek çakıl veya kum drenleri oluşturulur. Buna karşın, sentetik malzemedan yapılan vick drenler ise, zemine istenilen bir açıyla yerleştirilebilmektedir. Sıvılaşmaya karşı daha etkili bir zemin iyileştirmesinin yapılabilmesi amacıyla drenaj teknikleri çoğu kez yukarıda belirtilen diğer zemin iyileştirme teknikleri ile birlikte kullanılmaktadır [19].

3.5. Sismik Yalıtım

Binalarda deprem etkisinde kullanılan koruyucu önlemlerden birisi deprem etkisine karşı taban yalıtımı yapılmasıdır. Günümüzde güncel olarak tartışılan bu konunun ortaya konulması oldukça eskidir. Ancak, uygulamaya dönük teknolojinin ortaya çıkması ise yeni sayılabilir. Taban yalıtımı kavramının kullanılması oldukça basittir. Deprem sırasında, yeryüzünde bir hareket meydana gelir. Bu olay bir dalga şeklinde her doğrultuda yayılır ve hareket bir yapıya eriştiğinde temellerini sallamaya başlar. Temeller de kendisine bağlı olan taşıyıcı sistemi sallar ve sistem elemanlarının kesitlerinde atalet kuvvetlerinin oluşturduğu etkiler meydana gelir [4].

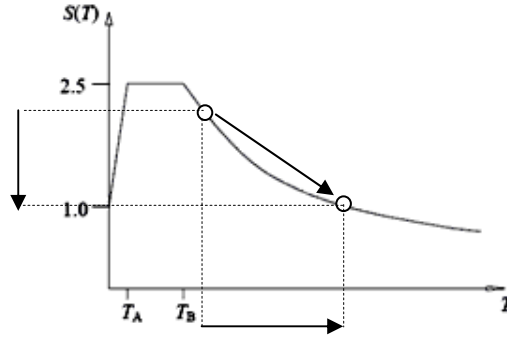
Zemin yapı etkileşimi olarak tanımlanan bu olay zeminden yapıya yapıdan zemine enerji transferi olarak yorumlanabilir. Şekil 3.18'deki burulma örneği bu duruma güzel bir örnektir.



Şekil 3.18: Deprem hareketine yapının muhtemel tepkisi

Zemin ile yapı arasındaki etkileşimin azaltılması, yer hareketinin yapıda meydana getireceği hasarın da azaltılması anlamına gelir. Bu amaca yönelik her türlü sismik iyileştirme çalışmalarına “sismik izolasyon” ya da “taban izolasyonu” denir. Daha genel anlamıyla taban izolasyonu; yapının tabanına düşeyde rijit fakat yatayda esnek, belirli ölçüde yerdeğiştirme yapabilen donanımlar yerleştirmek suretiyle üst yapıyı yer hareketinin yüksek frekanslı etkisinden ayırma işlemidir [20].

Yapının temelini taşıyıcı sistemden ayrılarak titreşimin yapıya erişmesinin önlenmesi, depremde taban yalıtımının ana fikrini oluşturur. Şekil 3.19’da verilen elastik ivme spektrumunda görüldüğü gibi T (periyot) uzadıkça spektral ivme azalmakta, yani yapı daha az deprem kuvvetlerine maruz kalmaktadır. Sismik yalıtımda hedef, yapının periyodunun arttırılması, böylece deprem kuvvetlerinin azaltılmasıdır.



Şekil 3.19: Elastik ivme spektrumu [34]

Depreme karşı yalıtım, temel ile yapı arasında bazı özel düzeneklerin veya yapı elemanlarının yerleştirilmesi ile yapılır. Taban yalıtımı olmayan ve doğrudan temele bağlı bir sistemde deprem titreşimleri temel yoluyla yapıya iletilir. Bu kısa zamanda yön değiştiren titreşimler, temel ile üst yapı arasında rölatif küçük yerdeğıştirmeler meydana getirmesine rağmen, yapı elemanlarında ve birleşim bölgelerinde önemli etkiler oluşturur. Taban yalıtımlı bir sistemde temel ile üst yapının birbirinden tamamen ayrılması mümkün değildir. Arada düşey yüklerin güvenli bir şekilde iletimini sağlayan elemanlar kullanılır (Şekil 3.20). Yatay harekette rölatif olarak elastik olan bu elemanlar sayesinde, yatay deprem titreşimlerinin ancak bir bölümü üst yapıya geçer. Bunun sonucu olarak üst yapıdaki etkiler azaltılmış olur. Ancak, temel deprem etkisinde hareket ederken, üst yapıdaki yerdeğıştirmeler sonucu, temel ile yapı arasında önemli bir rölatif hareket görülür [4].



Şekil 3.20: Sismik yalıtım uygulaması [37]

Yalıtım elemanlarının mevcut yapılara güçlendirme amacıyla konulmasında birtakım güçlüklerle karşılaşılır. Mevcut duvarlar ayırma düzleminden kesilerek, geçici bir mesnetlenme oluşturulur. Bu sırada düşey yüklerin uygun şekilde yayılmalarının sağlanması gerekir. Bu amaçla ayrılma kesitlerinde basıncı hassas biçimde kontrol edilebilen krikolar kullanılabilir. Genellikle epoksili tamir harcı kullanılarak, bu

krikolar yerinde bırakılır. Ayrılma düzleminde bulunan ve kesilen taşıyıcı elemanların yükünü yalıtım elemanına iletebilmesi için üst ve alt başlık plakaları ve bunların elemanlara bağlanması gerekir. Bu şekilde oluşturulan taşıyıcı sistemin genellikle 150mm~500mm civarında bir yatay yerdeğiştirmeyi serbestçe yapabilmesi için tedbir alınmalıdır [4].

3.5.1. Elastomer Mesnetli Sistemler

Esas olarak iki ana yalıtım sistemi vardır. Bunlardan birincisi doğal kauçuk veya neopren malzemeden yapılan elastomer mesnetlerdir. İkincisi ise kayıcı mesnetli sistemlerdir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan elastomer mesnetli sistemlerdir. Yatay rijitliği düşük olan bu malzeme ile yapının yatay deprem hareketinden etkilenmesi azaltılır. Kullanılan bu malzeme ile tüm yapı daha esnek olurken birinci serbest titreşim periyodu büyüyerek, deprem hareketinin büyük etkilerin oluşmasına sebep olduğu etkili periyotlardan yapının uzakta bulunmasını sağlar. Yalıtımla oluşturulan yeni sistemde ilk titreşim modunda, üst yapıda rijit cisim hareketi etkin olur. Bunun sonucu, şekildeğiştirmelerin önemli bölümü yalıtımı yapan sistemde veya malzemede meydana gelir. Yalıtılmış sistemin diğer modları taşıyıcı sistemde elastik şekildeğiştirmeler çıkaracak türden olmalarına rağmen, bunların etkileri küçük olduğu için, depremde yalıtılmış sistemin titreşiminde rijit hareket etkili olur. Bunun sonucu olarak, yalıtılmış sistemde büyük rijit yerdeğiştirmeler meydana gelirken, önemli deprem enerjisi tüketilmez. Bu açıklama yalıtımın tamamen doğrusal elastik davranmasına ve üst yapıda sönüm bulunmaması durumuna karşı gelir. Ancak, yalıtımın doğrusal olmayan davranışı ile hem yalıtımda ve hem de üst yapıda değişik türden sönümler davranışın daha da olumlu biçimde ortaya çıkmasına sebep olur [4].



Şekil 3.21: Yapının bodrum katında elastomer mesnetli sismik yalıtım uygulaması [37]

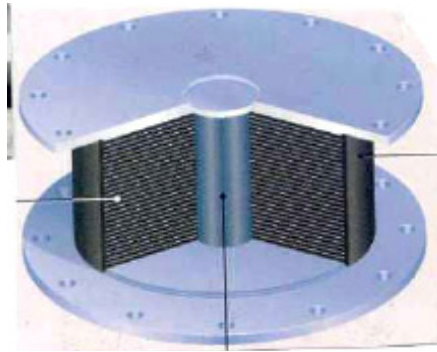
En yaygın kullanılan yalıtım sistemi elastomer mesnetlerdir. (Şekil 3.21) Bunlarda doğal veya yapay kauçuk kullanılır. Bu mesnetler, kalınlığı 8mm ~ 20mm arasındaki ince kauçuk levhalar ile kalınlığı 2mm ~ 3mm arasındaki ince çelik levhaların üst üste getirilmesiyle oluşur. İki tür levha basınç ve ısı kullanılarak birbirine yapıştırılır. En üst ve en altta, mesnedin temel ve üst yapı ile birleşmesini sağlayacak geniş ve kalın çelik levhalar bulunur. Çelik levhalar mesnedin düşey yük kapasitesini ve rijitliğini sağlarken aralardaki kauçuk levhaların düşey yük altında şişerek yanıl şekildeğiştirmesini önler. Yatay rijitlik de lastiğin kayma şekildeğiştirmesi ile sağlanır. Malzemelerin üretiminin ve işçiliğin pahalı oluşu, bu tür yalıtımın maliyetinin yüksek olmasına sebep olur [4].



Şekil 3.22: Kauçuk izolatörde şekildeğiştirme [40]

Elastomer mesnetler düşey doğrultuda rijit olup, bu mesnetlerde düşey yük altında 1mm ~3mm arasında bir düşey kısalma oluşur. Düşey rijitlikleri, yatay rijitliklerinin birkaç yüz katıdır. Yatay bir yerdeğiştirme durumunda, meydana gelen büyük şekildeğiştirmeden dolayı taşıyabileceği düşey yük azalır (Şekil 3.22). Bu durum yüksek deprem bölgelerinde elastomer yalıtımların kullanımı zorlaştırır [4].

Kurşunlu kauçuk mesnetler: Şekil 3.23’de görüldüğü gibi elastomer mesnedin ortasında bulunan bir deliğe kurşun silindir sıkıştırılması ile oluşur.



Şekil 3.23: Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör modeli [41]

Lastiğin düşük kayma rijitliğinden dolayı doğrusal davranış büyük şekildeğiştirmelerde de devam eder. Buna karşılık orta kısımdaki kurşun 10MPa gibi düşük bir gerilmeye akma durumuna gelir ve plastik olarak şekildeğiştirmeye başlar. Sistemin enerji tüketme mekanizması, lastiğin sönümü ve esas olarak levhaların ortasındaki kurşunun sönümü ile oluşur. Kurşunda plastik davranış etkili olduğu için, çevrimsel davranış sonucu sönüm ortaya çıkar [4].

Yüksek sönümlü kauçuk mesnetler: Normal elastomer mesnetler %2 civarında bir sönüme sahipken, bu tür mesnetlerde sönüm %8 ~%15 arasında değişir. Düşük şekildeğiştirmelerde sönüm %15 civarında iken, şekildeğiştirmenin %100'ün üzerine çıkması ile % 8 ~ %12'ye düşer. Bu sönüm elastomer mesnedi oluşturan lastiğin malzeme olarak değiştirilmesi ile elde edilir. Bu tür mesnette yüksek sönümlü ince tabakalardan oluşan kauçuk çelik plaklar arasında bulunur. Hazırlanma işlemi kurşun kauçuk mesnetler gibidir. Tek farkı lastiğin özelliğinin farklı olmasıdır. Kauçuk, sönüm özelliğine sahip karbon veya reçine gibi bir malzeme ile doldurulmuştur. Bu lastiğin küçük ve büyük şekildeğiştirmelerde sönüm özelliği vardır. Yüksek sönümlü kauçuk mesnetlerin ortasında kurşun çekirdek olan türleri de mevcuttur. Böylece iki sistemin de olumlu özellikleri bir araya toplanmıştır. Bu durumda eşdeğer viskoz sönüm %20-%30 değerlerine ulaşır [4].

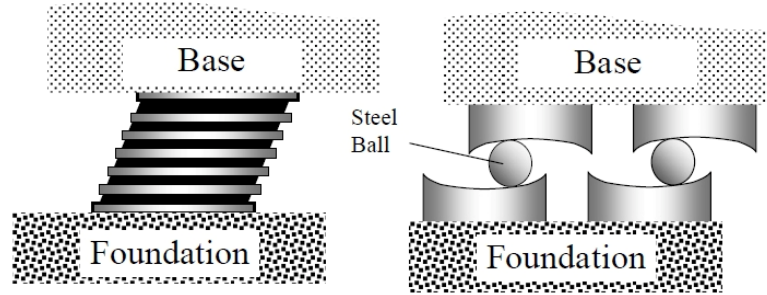
3.5.2. Kayıcı Mesnetli Sistemler

Taban yalıtımında ikinci ve daha az yaygın olarak uygulanan depreme karşı yalıtım sistemi temel ile üst yapı arasında oluşan yatay hareketin olabildiğince serbest bırakılması şeklindedir. Yapının özel hazırlanmış bir kum tabakası üzerinde bulunması veya ara yüzeyin kurşun-bronz bir plaktan oluşturulması bu türe örneklerdir. Bunun yanında üst yapı mesnetlerinin sürtünmeli bir silindirik veya küresel yüzey üzerinde sınırlı hareketine izin verilmesi de, diğer türden bir yalıtım biçimidir. Oldukça yaygın kullanılan bu sistem, kütlenin yukarıda mesnedin altta olması sebebiyle, sürtünmeli ters sarkaç sistemi olarak da bilinir [4].

Bu tür mesnetlerde bulunan sürtünme sebebiyle, kayma kuvvetleri belirli bir değere kadar iletilir. Bu değerden sonra mesnette öteleme hareketi başlar. Küçük sürtünme katsayısı seçilerek, küçük taban kesme kuvvetinin oluşması sağlanabilir. Temele aktarılan taban kesme kuvveti, deprem etkisinden bağımsız ve sadece sürtünme kuvvetine bağlıdır. Bu sistemlerde kayma yüzeyi paslanmaz çelik veya teflondandır.

Teflon yüzeyler elastomere göre daha fazla normal gerilme taşıyabilirler. Örneğin, teflon için tipik bir değer 50 MPa iken, elastomer için 15 MPa olabilir. Büyük depremlerde verimli bir şekilde kullanılan bu sistemler nispeten ucuz ve uygulaması kolaydır. Ancak, bir geri döndüren kuvvet olmadığı için, depremden sonra sistem başlangıç konumuna gelmez. Bunun için bu tür sistemler tek başına kullanılmaz ve ek bir sistemin kullanılması gerekir. Bu amaçla ek olarak elastomer mesnetlerin kullanımı bir seçenek olarak kabul edilebilir. Elastomerin rijitleşme özelliği sistemin büyük depremlerde daha etkili olmasını sağlar [4].

Depremden sonra sistemin geri dönüşü sürtünme sarkacı ile de sağlanabilir. Şekil 3.24 b’de verilen bu sistemde, ilk konumdan ayrılma durumu ortaya çıktığında, sistemde yatay hareket yanında düşey hareket de olduğu için, kendisini tekrar ilk duruma getiren kuvvet oluşur. Bu tür mesnetlere bu özelliğinden ve kayma yüzeyinin arasında sürtünmenin bulunmasından dolayı sürtünmeli sarkaç ismi verilmiştir. Enerji tüketimi aradaki küresel yüzey üzerinde oluşan sürtünme kuvveti ile meydana gelir [4].



Şekil 3.24: Taban Yalıtım Sistemleri: a. Kauçuk mesnet b. Kayıcı Mesnet [38]

3.6. Karbon Esaslı Lif Takviyeli Polimerlerle (FRP) Güçlendirme

Son zamanlarda uygulama alanı artan karbon esaslı lif takviyeli polimerlerin birçok üstünlükleri vardır. Korozyona karşı çelik gibi hassas olmamanın yanında nem ve rutubet etkisinde özelliğini kaybetmeden yıllarca yapının bünyesinde görevini icra edebilir. Çeliğin çekme dayanımından en az 5 kat daha fazla mukavemete sahiptir. Bu özel çekme bantları yığma yapıya diğer metotlarda olduğu gibi dışarıdan bir yapıştırma veya kaplama şeklinde derzler boyunca uygulanmaktadır. Derzler yine özel üretilmiş olan bir harçla doldurulmaktadır. Bu şekilde yığma yapının asıl haldeki durumuna uygun bir malzeme kullanıldığı için herhangi bir uyum problemi yaşanmaz. Duvarların bu bant bölgeleri çekme esaslı elemanlarla liflenmiş, lifli

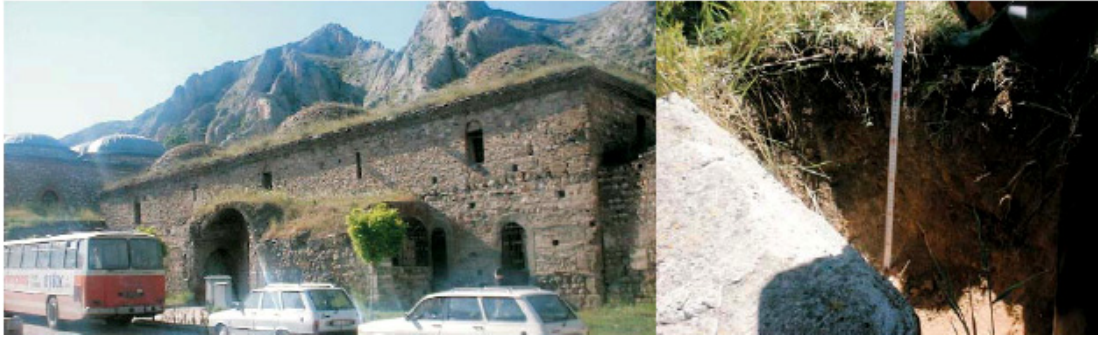
bünye oluşmuş olur. Lifli bu hatıl bölgeleri çekme kuvvetlerini almak için duvarlara en uyumlu yapı elemanlarıdır [21].

Ayrıca FRP uygulanan elemanın kesiti dolayısıyla atalet momenti ve rijitliği değişmediğinden gerilme yığılmalarının ve ek tesirlerin önüne geçilmiş olur.

3.7. Fazla Kütlelerin Kaldırılması

Yapının taşıyıcı elemanlarında düşey yükler altında hasar oluşmuş ise üzerinde taşıyabileceğinden fazla yük var demektir. Bu durumda iki türlü çözüm vardır, ya elemanın yük taşıma kapasitesi artırılır ya da imkân varsa üzerindeki yük azaltılır. Yükün azaltılması, deprem kuvvetlerini de azaltacağından daha iyi bir çözümdür.

Tarihi yığma yapılarda kemer ve tonozların üzerinin fazla kütle ve toprak ile doldurulması sık karşılaşılan bir durumdur (Şekil 3.25). Bu fazla kütleler, yapının taşıyıcı sistemine bir fayda sağlamamakla beraber, aksine deprem esnasında atalet kuvvetlerinin artmasına ve fazladan yatay kuvvetlerin oluşmasına sebebiyet verirler. Ağır toprak örtüleri yerine iklim şartlarından koruyacak yalıtım sağlayan daha hafif ürünler yerleştirilebilir. Kemer ve tonoz üzerindeki bu fazla yüklerin kaldırılarak yerine hafif malzeme yerleştirilmesi yapıya dolaylı bir güçlendirme sağlar.



Şekil 3.25: a. Ağır çatı (Arastalı Bedesten, Tokat) b. Çatıda toprak dolgu (Arastalı Bedesten, Tokat) [5]

3.8. Yapının Kısmen veya Tamamen Yenilenmesi

Yapının parçalara ayrılarak sökülmesi ve yeniden modern bağlayıcı maddelerle inşa edilmesi bazı durumlarda uygun sonuç verebilir. Özellikle ahşap elemanlardan veya taş yığma yapı elemanlarından oluşan bir yapı kısmen ve tamamen kolayca yenilenebilir. Sökme sırasında elemanların zarar görmemesi ve yapılan işlemlerin kayıt altına alınması önemlidir [1].

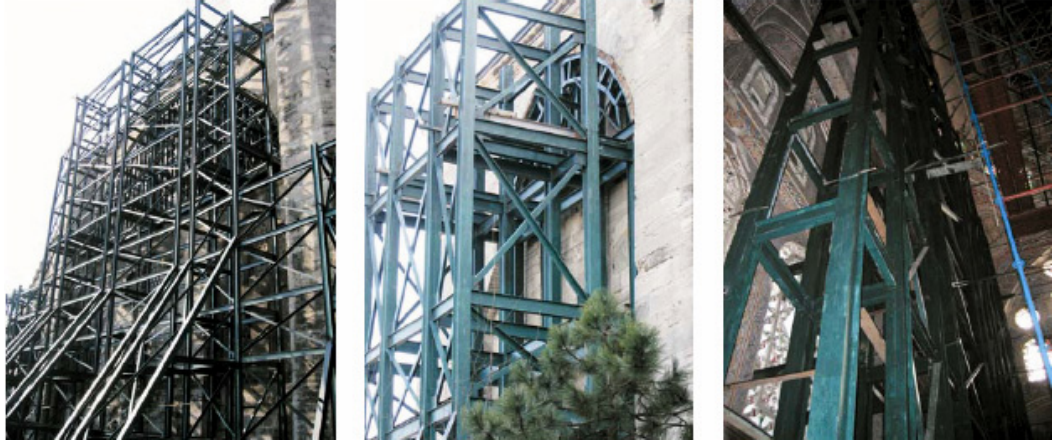
3.9. Acil Müdahaleler

Tarihi bir yapıda aşırı yükleme, deprem vb nedenlerle bir bozulma var ve yapının tamamında ya da bir kısmında stabilite bozukluğu ya da göçme riski varsa geçici acil müdahale yapılması kaçınılmazdır. Burada dikkat edilecek nokta, geçici müdahalenin sürekli müdahaleye dönüşme riskinin yüksek olması nedeniyle müdahalenin en az düzeyde tutulmasıdır.

Acil müdahale yöntemleri; geçici takviyeler ve yapının askıya alınması şeklinde sıralanabilir.

3.9.1. Geçici Takviyeler

Taşıyıcı sistemde, yanal kuvvetler bir gergi sistemi ile veya payandalarla desteklenir. Düşey kuvvetler ise bir kalıp-iskele sistemi ile yapı elemanları askıya alınarak taşınır (Şekil 3.26).



Şekil 3.26: Geçici takviyeler (Mihrimah Sultan Camii) [5]

Düşme, eğilme, yana yatma ya da devrilen elemanlar için geçici destek ve payandalar dikey ya da eğik destek sağlarlar. Geçici bağlantılar, duvarların ve iskelelerin birbirlerinin üzerlerine devrilme ya da düşme eğiliminde olan yerlerde kullanılır.

Geçici destek ve payandalar için, ahşap en çok kullanılan ve en kullanışlı malzemedir. Tek elverişsiz tarafı yangın tehlikesidir. Bu yüzden tarihi yapılarda yapılacak uygulamalar iyi bir yangın önlemi gerektirir. Bir diğer malzeme olan çeliğin paslanma riski dışında önemli bir dezavantajı yoktur [6].

3.9.2. Yapının Askıya Alınması

Bazı hallerde kubbe, tonoz ve kemer gibi elemanların yükleri bir kalıp – iskele sistemine aktarılabilir. Kalıplar, taşıyıcı elemanın formuna uygun olarak yapıldıktan sonra bir iskele sistemine bağlanır. İskelede mesnet noktalarında verilecek ters yüklerle taşıyıcı sisteme ters sehim verilerek yapı yükleri iskeleye iletilmiş olur [6]. Şekil 3.27’de askıya alınmış bir kemer görülmektedir.



Şekil 3.27: Kemerin askıya alınması (Saint Christ Kilisesi) [28]

3.10. Onarım / Güçlendirmede Kullanılacak Malzemeler

Günümüzde çok çeşitli onarım ve güçlendirme malzemesi bulunmaktadır. Yüksek dayanımlı çelik, paslanmaz çelik, epoksi reçinesi, modern çimento esaslı bağlayıcılar, tamir harçları, karbon esaslı lifli polimerler bunlardan sayılabilir. Ancak, Venedik Tüzüğü’ne göre, bunların alışlagelen güçlendirme malzemelerinin yetersiz olduğu durumlarda kullanılması önerilmektedir. Tuğla ve taş elemanların kullanımında bunların mevcut malzeme ile uyuşması ve zamana karşı dayanıklı olması önemlidir [1].

4. ÖRNEK ÇALIŞMA: MURAT PAŞA CAMİİ

4.1. Yapının Tanıtılması

4.1.1. Tarihçe

Bu çalışmada ele alınan Murat Paşa Camii, İstanbul Aksaray’da Fatih Sultan Mehmet’in sadrazamı Has Murat Paşa tarafından yaptırılan iki tuğla bir taş sırası ile T tipi yüksek kubbeli ve yanlarında ikişer odalı, tek minareli bir camidir. Kapının kemer aynasında yer alan Arapça kitabe, yapının H. 874 (M. 1470) yılında yapıldığını göstermektedir [22].



Şekil 4.1: Murat Paşa Camii giriş cephesinden görünüş

Cami, medrese, imaret ve hamamdan müteşekkil külliyeinin medresesi Murad Paşa’nın Otlukbeli seferi sırasında şehid olmasından sonra 1483 yılında tamamlanmıştır. Şadırvanı 17. yüzyılda Kara Davud Paşa tarafından yaptırılmıştır. Harabe halindeki cami 1946 yılında ihya edilerek tekrar ibadete açılmıştır. Murat Paşa Külliyesi içinde yer alan cami, batısında medrese, doğusunda hamam, güneyindeki hazire arasında yer alırken 1956 yılında bu yapılar yol yapımı nedeniyle ortadan kaldırılmıştır. Yine aynı tarihte yıktırılan Oğlanlar Tekkesinin sebil, türbe ve çeşmesi caminin kuzey avlusuna taşınmıştır. Cami; harim kısmı, yanlardaki tabhaneli mekânlar ve beş bölümlü son cemaat yerinden oluşmaktadır [23].

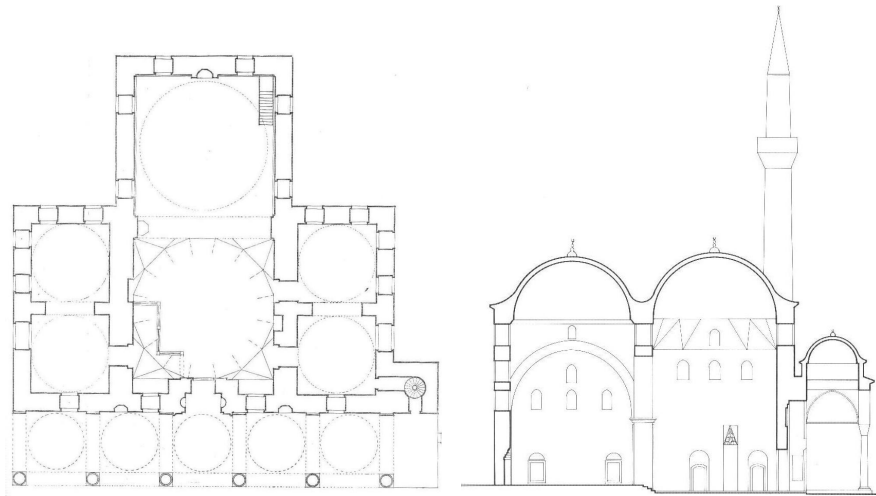
4.1.2. Mimari ve Geometrik Özellikleri

Osmanlı Mimarisinde Tabhaneli (zaviyeli) veya ters T plan şemalı camiler tipinde olan Murat Paşa Camiinin harim kısmı mihrap ekseninde kare planlı üstü iki kubbeyle örtülmüştür.



Şekil 4.2: Murat Paşa Camii minaresi'nden üst örtü sisteminin görünüşü

İki büyük kubbenin her biri 12 köşeli kasnağa oturmaktadır. Kasnağı taşıyan beden duvarları yüksek olduğundan iki büyük kubbeli hacim arasına atılan kemer de yüksekte kalmıştır. Kubbelere geçiş, birinci kubbede basit bir üçgenli kuşakla; ikinci kubbede, köşelerde konsollar üzerinde oturan kırık baklava ve üçgen şekillerden bir kuşak ile yapılmıştır [24].



Şekil 4.3: Murat Paşa Camii plan ve kesit [24]

Harime giriş kısmından yan tabhane mekânlarına geçiş sağlanır. Tabhane mekânlarını iki yanda iki kubbe örtmektedir. Bu mekânlarda kubbeye geçişler mukarnaslarla sağlanmıştır. Ara bölmeleri açık ve her birinin içinde ocak bulunan tabhanelerde dışarıya açılan harici kapılar da bulunmaktadır.

Son cemaat yeri her biri kubbeli beş gözden müteşekkildir. Caminin kuzey batı köşesinde muntazam kesme taştan tek şerefeli minare yer alır. Harim ve tabhane mekânları iki sıra tuğla ve bir sıra kesme küfeki taşından almalı duvar tekniğinden meydana gelmiştir. Son cemaat yerinin revak kemerlerinde ise iki renkli taş işçiliği dikkat çeker.



Şekil 4.4: Murat Paşa Camii son cemaat mahalli

Murat Paşa camiinin önemli özelliği ise tabhaneli camilerin önemini kaybetmeğe başladığı bir dönemde bir takım yeniliklerin denenmesidir. Mihrap eksenindeki kubbeli mekânın tabhane mekânlarından oldukça yüksek olduğu ve bununla hareketli bir cephe ile bol ışık alan bir mekân oluşturmak amaçlandığı söylenebilir [25].

Kaidesinde iki güneş saati bulunan minaresi, girişin sağındaki kanada bitişik durumda, kalınca gövdeli ve istalaktit şerefelidir [22].

Caminin taban alanı 828 m²'dir. Beden duvar yüksekliği yan kısımlarda 7.9 m orta kısımda ise 13.95 m olup, orta kısımda bulunan ana kubbenin üst kotu 22.28 m'dir. Büyük kubbelerin çapları takriben 10.50 m. ölçüsündedir. Kesme taş duvar kalınlığı 110-150 cm'dir. Yontma taştan yapılan minaresi 38 m yüksekliktedir.

4.1.3. Taşıyıcı Sistem ve Malzeme Özellikleri

Cami, plan olarak giriş – mihrap aksına dik bir eksene göre simetrik olan yığma kâgir taşıyıcı sistem ile inşa edilmiştir. İki sıra tuğla bir sıra kesme taştan almalı sistemde (Şekil 4.5 a) oluşturulan kalın beden duvarları, kemerler, bunlara mesnetlenen kubbe kasnağı, pandantifler ve tuğladan imal edilmiş kubbelerden meydana gelmiştir.

Beden duvarında tuğla kullanılması, camiyi İstanbul camileri içinde nadir eserlerden biri haline getirmiştir.

Son cemaat mahalli de aynı şekilde, sütunların taşıdığı kemerlere oturan beş kubbeden oluşmuştur. Buradaki altı adet sütundan, yanlardakiler pembe Mısır granitinden, ortadakiler yeşil Eğriboz taşından yapılmıştır (Şekil 4.5 b) [22].



Şekil 4.5: a. Murat Paşa Camii yan cephe duvarı: tuğla-taş almalı örgü sistemi b. Son cemaat mahallinde yeşil eğriboz taşından sütun

Camideki on bir kubbenin tamamında taşıyıcı eleman olarak tuğla kullanılmıştır, Caminin ön cephe duvarı ise tamamen kesme taştan yapılmıştır.

4.1.3 1. Küfeki Taşı

Ocaktan ilk çıktığında boşluklu birim hacim ağırlığı $\gamma \approx 22 \text{ kN/m}^3$, özkütlesi $\rho \approx 2.5$, porozitesi $p \approx \%12-13$, su emmesi $w \approx \%5$ (ağırlıkça) ve basınç dayanımı $f \approx f_0 = 20-30 \text{ MPa}$ olan (15 cm küp) küfeki taşı atmosfer koşullarında bekletildiğinde bünyesine CO_2 alarak hızlı karbonatlaşma süreci ile boşluklarının bir bölümü Kalsiyum bikarbonat $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ile dolar, porozitesi azalır dayanımı ve birim hacim ağırlığı artarken, su emmesi de azalır. Söz konusu “karbonatlaşma” sonucunda basınç dayanımındaki artışın gelişimi beton ile büyük benzerlik göstermektedir. Beton ile

arasındaki en önemli farklılık betonun $t=0$ anında $f=0$ olması, küfeki taşının ise $t=0$ anında $f=f_0$ gibi bir ilk dayanıma sahip olmasıdır. Bol kavkılı küfeki taşı numuneleri üzerinde yapılan deneylerde ocağın çıktıktan 30 gün sonraki dayanımların $f_b \cong 45$ MPa olduğu gözlenmiştir.

(Basınç dayanımı / çekme dayanımı) oranı 11-12 olarak belirlenmiştir [31]. Bu değer, enerji yutma kapasitesi yüksek başka bir deyişle “sünek” malzeme yapısını işaret etmektedir.

Elastik modül / basınç dayanımı $\cong 720$ hesaplanmıştır [32].

Yapısında su mevcuttur, bu suyun bir bölümü uçarken bir bölümü de dış çeperlerden içeriye doğru zamanla gelişen kalınlıkta karbonatlaşmanın sonucunda oluşan katman içinde hapsedilmektedir. Bünyede suyun varlığı dinamik yükler altında yapının taşıma gücüne önemli ilave katkı getirmektedir [33].

Mevcut kavkılar gelişigüzel başka bir deyişle üç boyutlu olarak yönlendirilmiştir ve boy/çap oranları genellikle büyüktür, bu özelliği ile tipik bir “lifli kompozit malzeme” özelliği taşımaktadır. Dolayısı ile “bol kavkılı” küfeki taşlarının üç eksenli gerilme altında (deprem yüklemesi) etkin bir sünek davranış göstereceği söylenebilir. Kavkılarının küfeki taşının zaman içindeki dayanıklılığı açısından matrisin bozulmasını engellemesi yönünde önemli etkisi mevcuttur.

“Bağımsız boşluklu” bir yapısı mevcuttur ve $0.1\mu\text{m}$ ’dan küçük boşlukların az olduğu türü dış etkilere (sıcaklık değişimleri, ıslanma-kuruma, donma-çözülme, endüstriyel emisyonlar, deniz tuzları vb.) daha az etkilenmektedir.

Matris ve kavkı CaCO_3 esaslı olduğundan kavkı-matris ara yüzeyinde mükemmel bir kimyasal yapışma mevcuttur.

Doğada masif, çatlaksız ve yönlendirilmemiş yapıda bulunması nedeni ile kaya kütlelerinde boyut etkisi mevcut değildir, diğer bir anlatımla kayacın yerinde basınç dayanımı ile laboratuvar basınç dayanımı birbirine eşittir.

4.1.3.2. Tuğla

Tuğla, günümüzden çok önceleri yapı malzemesi olarak kullanılmaya başlanmış olan ve hâlen de kullanılan doğal bir malzemedir. Kilin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesiyle elde edilir ve ebatlarına, işlevlerine göre çeşitleri vardır. Tarihi

yapılarda kullanılan tuğlalar saf kaolin ve kil karışımının fırınlarda yüksek ateş altında pişirilmesiyle elde edilmiştir. Tuğlanın iyi pişirilmiş olması, mukavemeti ve çevre şartlarına karşı direnci açısından çok önemlidir.

Tuğla, ahşap ve taş göre daha kolay elde edilmesi ve ekonomik olması sebebiyle en çok kullanılan yapı malzemesidir. Hafif bir malzeme olması sebebiyle kubbe gibi örtü elemanlarında büyük çoğunlukla kullanılan malzeme olmuştur. Tuğla da taş gibi yapıda ancak basınç altında çalışabilir. Çekme mukavemeti oldukça düşüktür. Aşağıdaki tabloda tuğlalar için yaklaşık değerler verilmiştir.

Tablo 4.1: Tuğlanın Ortalama Mekanik Özellikleri

Basınç mukavemeti	Çekme mukavemeti	Elastisite Modülü	Özkütle
3 – 10 MPa	0.2 – 0.5 MPa	1000-5000 MPa	1.7 (kN/m ³)

4.1.3.3. Horasan Harcı

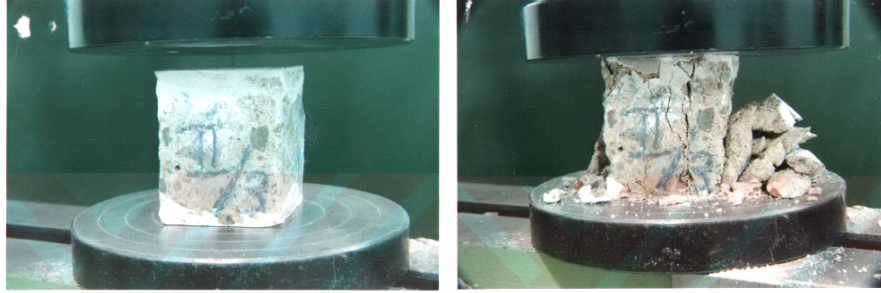
Horasan, kırılmış veya öğütülerek toz haline getirilmiş kiremit, tuğla, çömlek vb. pişmiş kildir. Horasanın, belli oranlarda kireç ve su ile karıştırılmasıyla elde edilen harç ise, horasan harcı olarak tanımlanır. Bazı uygulamalarda harcın içerisine kum katılırken, bazılarında ise nohut büyüklüğünde parçalar halinde tuğla veya kiremit kırıkları gibi seramik malzemelere rastlanır. Bu ikinci grup harçlar, yontulmuş yapı taşlarını birleştiren, bağlayan klasik harçlardan farklıdır. Fonksiyonları bakımından günümüz betonuna eş değer olup, taşıyıcı yapı taşını meydana getirirler. Tarihi eserlerin incelenmesinde bunlara da horasan denilse de, daha gerçekçi bir sınıflandırma yapıldığında “horasan betonu” adını almaları daha doğru olur [29].

Bizans, Selçuklu ve Osmanlı eserlerinde horasan harç ve betonu kullanımının oldukça yaygın olduğu bilinmektedir. Osmanlı yapılarından özellikle 15. yüzyıla ait olanlar ve daha sonraki eserlerde, horasan harç ve betonu geniş ölçüde kullanılmıştır. Rumelihisarı (Boğazkesen Kalesi – 1452), Süleymaniye Camii temellerinde (1550-1577), Yeni Camii (1597-1664) ve Nur-u Osmaniye Camii radye temellerinde (1748-1755), Belgrad yolu köprülerinde köprülerinde (1500-1600), Sultan Ahmet Külliyesinde horasan betonu kullanıldığı tespit edilmiştir [29].

Horasan harcının mukavemet ve durabilite açısından, kireç harçlarına göre teknik üstünlüğü, Osmanlı inşaatçıları arasında bilinmekteydi. Ayrıca, harcın renginden

dolayı, tuğla yapılarda mükemmel bir ahenk oluşturmaları, mimaride estetik açıdan da diğer harçlardan daha özel bir yer almasına sebep olmuştur.

Horasan harcı üzerinde yapılan bir çalışmada ortalama boyutları 4x5x6 cm olan dikdörtgen prizması şeklindeki numuneler üzerinde yapılan deneylerde basınç mukavemeti ortalama 5MPa olarak tespit edilmiştir [30].



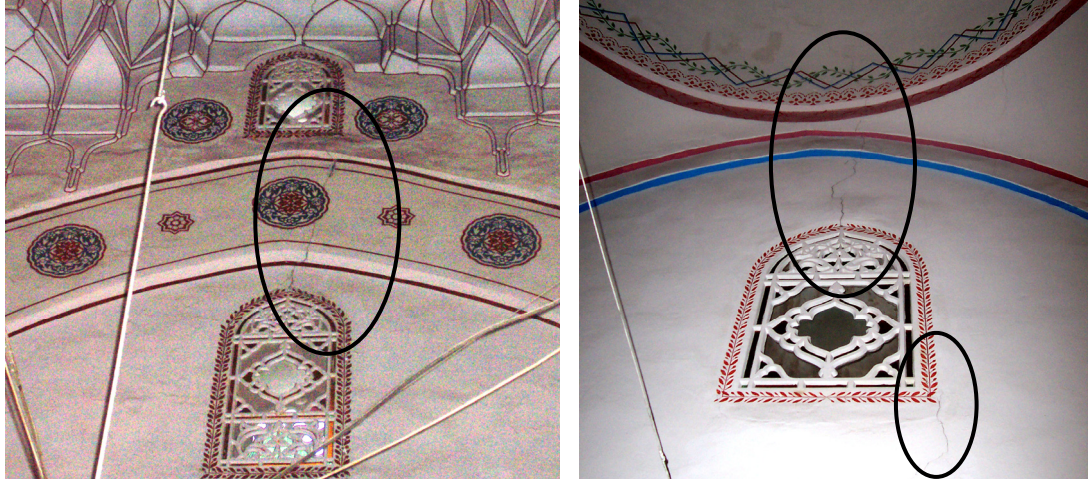
Şekil 4.6: Edirnekapı'dan alınan numunelere basınç deneyi uygulaması öncesi-sonrası [30]

4.1.4. Yapının Mevcut Durumu

Cami yapıldığı tarihten bugüne kadar 1509, 1766, 1894, 1999 yıllarında büyük depremler yaşamıştır. Bu depremlerden sonraki hasar durumu ve tadilat görüp görmediğine dair kaynaklara dayalı ayrıntılı bir bilgi bulunmamasına karşılık, yapının en son 1946 yılında ihya edildiği bilinmektedir. Cephelerdeki düzgün tuğla taş dizisinin ve derzlerin; bu tarihteki çalışmalarda renkli çimento ile sıvanmak suretiyle teşkil edildiği kaydedilmekle beraber, genel olarak yapının özgün halini muhafaza ettiği söylenilebilir. Ayrıca yapının değişik yerlerinde yapı güvenliğini tehdit etmediği düşünülen ince çatlaklar tespit edilmiştir. (Şekil 4.7, 4.8)



Şekil 4.7: Murat Paşa Camii büyük kemerdeki çatlak



Şekil 4.8: Murat Paşa Camii duvarlarında çatlak oluşumu

Rölöve ve Çizimlerin Oluşturulması: Fatih Deprem Odaklı Kentsel Dönüşüm Projesi kapsamında hazırlanmış olan Murat Paşa camisine ait rölöve çizimleri, Bimtaş A.Ş.’den temin edilmiştir.

Bimtaş A.Ş. tarafından hazırlanan projede caminin 3 boyutlu ölçümleri lazer tarama cihazı ile yapılmış olup gerçek 3 boyutlu nokta bulutu modeli elektronik ortamda oluşturulmuştur. Bu model üzerinde yapıyı tanımlayıcı, özellikle duvar kalınlıklarını ve duvarlarda bulunan boşlukları tanımlayan kotlardan plan kesitler; düşey doğrultuda istenilen yerden en kesit ve boy kesitler alınarak CAD ortamında rölöve paftaları çizilmiştir. Yapının elde edilen çizimleri Ek A’da verilmiştir.

Elde edilen nokta bulutları ve ölçüm cihazına kalibre edilmiş yüksek çözünürlüklü fotoğraf makinesi ile gerçek “ortho-photo”lar kullanılarak fotogrametrik cepheler hazırlanmıştır. Oluşturulan fotogrametrik cephe çizimleri CAD ortamına aktarılarak yapıya ait cepheler elektronik olarak çizilmiştir.

Yapıya ait rölöve ve çizimler oluşturulduktan sonra, yapının Sap2000 programında sonlu eleman modeli hazırlanmıştır.

4.2. Yapının Sonlu Elemanlar Metodu İle Modellenmesi

4.2.1. Model Özellikleri

Murat Paşa Camii’nin üç boyutlu sonlu eleman modeli Sap2000 programında hazırlanmıştır. Model; çubuk, kabuk ve katı elemanlardan oluşmaktadır. Son cemaat mahallindeki sütunlar ve kemerlerin arasındaki gergiler “çubuk” elemanlarla; kubbeler “kabuk” elemanlarla; duvar, kemer, pendantif, minare gibi diğer yapı

elemanları da “katı” elemanlarla modellenmiştir. Yapının üç boyutlu sonlu eleman modelinde kullanılan elemanların sayıları Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2: Modelde kullanılan elemanlar ve sayıları

Çubuk elemanlar	17
Kabuk elemanlar	1184
Katı elemanlar	13038
Toplam düğüm noktası	19864

Caminin taban alanı 828 m²’dir. Beden duvar yüksekliği yan kısımlarda 7.9 m orta kısımda ise 13.95 m olup, orta kısımda bulunan ana kubbenin üst kotu 22.28 m’dir. Büyük kubbelerin çapları takriben 10.50 m. ölçüsündedir. Duvar kalınlığı 110-150 cm, minaresi 38 m yüksekliktedir.

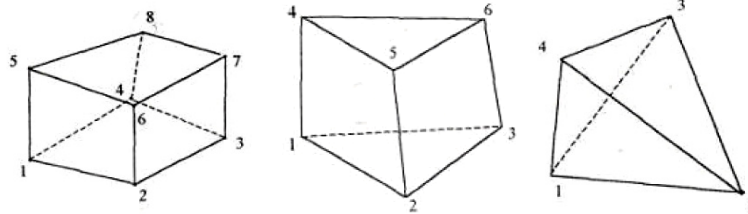
Modelde, duvarların toprak seviyesinden bir metre aşağıda sabit mesnet gibi tutulduğu kabul edilmiştir.

Yapı modelinde, kubbelerde tuğla, son cemaat mahallinde ve minarede taş, ana kütle ve yan mekânlarda “tuğla + taş” malzeme tanımlanmıştır. Yapının tarihi özelliğinden dolayı taşıyıcı sistem malzemelerinin mukavemet tayinine yönelik deney yapılmak üzere numune alınamamıştır. Modelde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 4.3’de gösterilmiştir.

Tablo 4.3: Modelde kullanılan malzemeler ve özellikleri

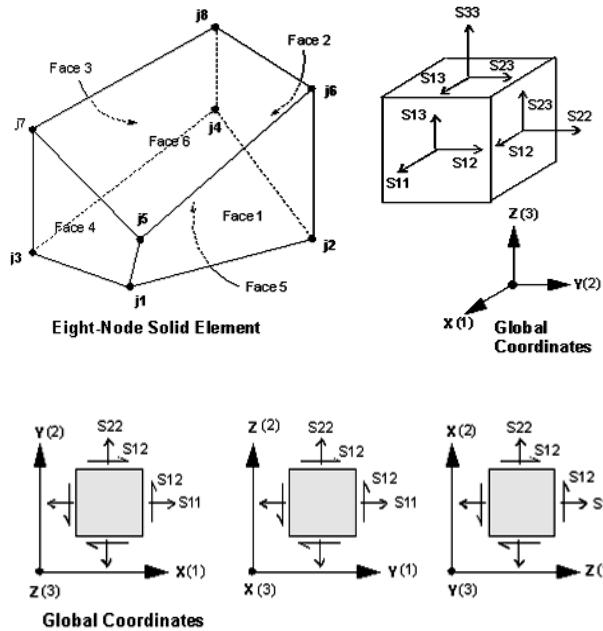
	Yapı malzemesi	Yapı eleman tipi	Elastisite Modülü (MPa)	Özkütle (kN/m³)
Kubbeler	Tuğla	Kabuk	3000	18
Ana kütle duvarları	Taş + Tuğla	Katı	4500	20
Son cemaat mahalli duvarları - minare	Taş	Katı	10000	22
Son cemaat mahallindeki sütunlar	Taş	Çubuk	10000	22
Son cemaat mahallindeki gergiler	Dökme Demir	Çubuk	200000	78

Sonlu eleman modelinde kullanılan katı elemanlar düğüm noktası sayılarına göre sınıflandırılmaktadır (Şekil 4.9). Modelin genelinde sekiz düğüm noktasına sahip heksahedral katı elemanı kullanılmış, yapının geometrisi gereği ihtiyaç duyulan yerlerde altı düğüm noktasına sahip pentahedral ve bilhassa pendentif gibi özel köşelerde de dört düğüm noktasına sahip tetrahedral katı elemanlar kullanılmıştır.



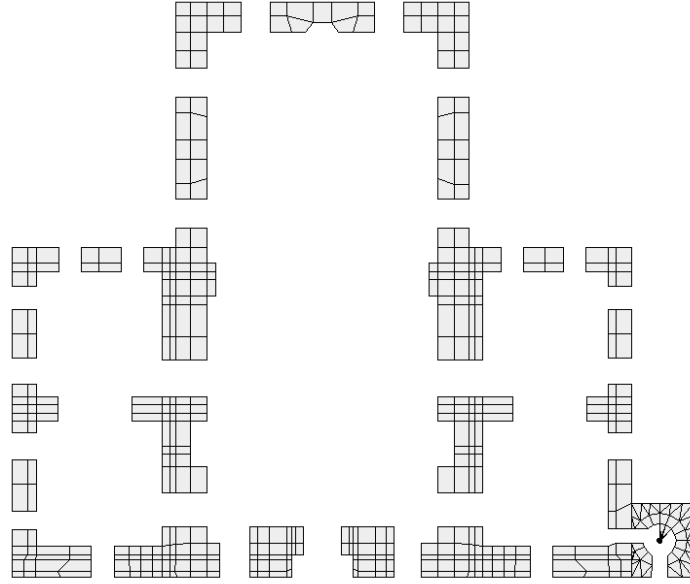
Şekil 4.9: a. Heksahedral b. Pentahedral c. Tetrahedral katı elemanlar [27]

Analiz sonuçlarında gösterilen S_{11} , S_{22} , S_{33} , S_{12} , S_{13} , S_{23} gerilmelerinin karşı geldiği yüzeyler Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Maksimum (S_{max}) ve minimum (S_{min}) gerilmeler düğüm noktasında oluşabilecek en büyük basınç ve çekme gerilmelerini göstermektedir. Yığma yapı elemanlarının basınç dayanımının çekme dayanımına göre çok daha yüksek olması sebebiyle, analiz sonuçlarında yapının daha hassas olduğu çekme gerilmelerini tanımlayan S_{max} değerleri verilmiştir.



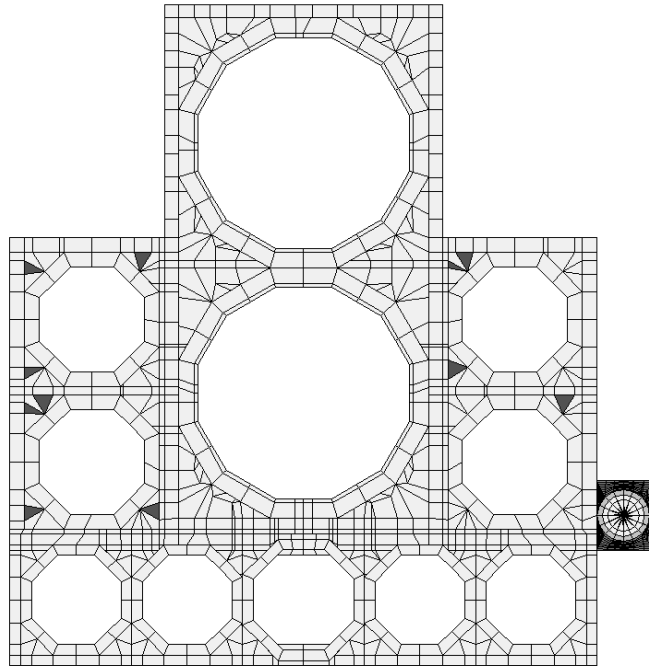
Şekil 4.10: Katı elemanlardaki gerilmeler [27]

1.5 m'ye ulaşan kalın duvarlar en az iki parça olarak modellenmiş (Şekil 4.11), detaylı modellemenin gerektiği son cemaat mahallinde daha küçük elemanlar kullanılmıştır.



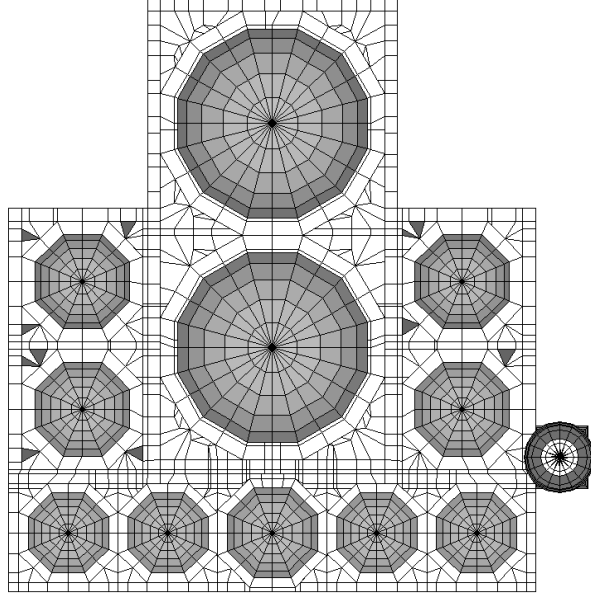
Şekil 4.11: Murat Paşa Camii sonlu eleman modeli plan görünüşü

Modelde ayrıca, heksahedral elemanların yanında pentahedral ve tetrahedral elemanlar da kullanılarak katı elemanların sadece düğüm noktalarında kesişmelerine imkân sağlanmıştır. Şekil 4.12'de yapının üst kotlarında duvar-kasnak birleşimlerinde bu tür elemanlar görülmektedir.

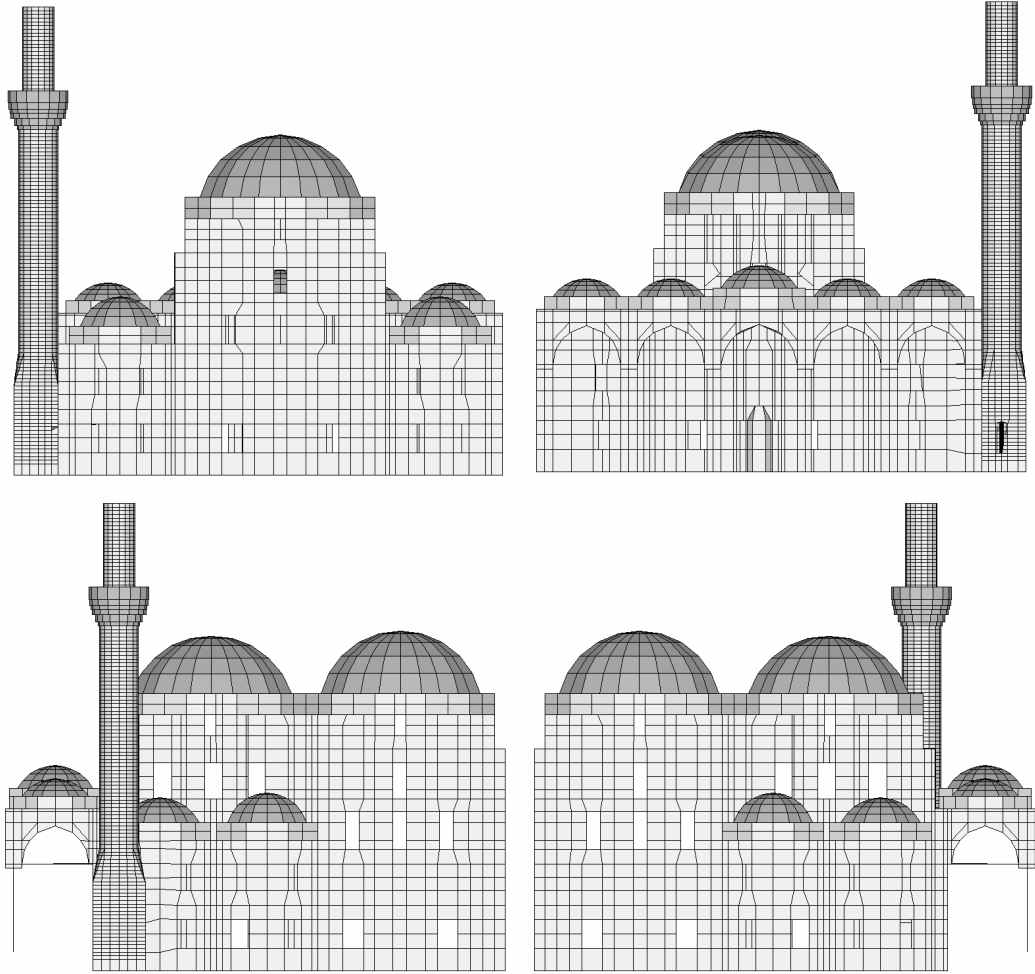


Şekil 4.12: Murat Paşa Camii sonlu eleman modeli üstten görünüş (katı elemanlar)

Murat Paşa Camii sonlu eleman modeline ait çeşitli görüşler Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de verilmiştir.

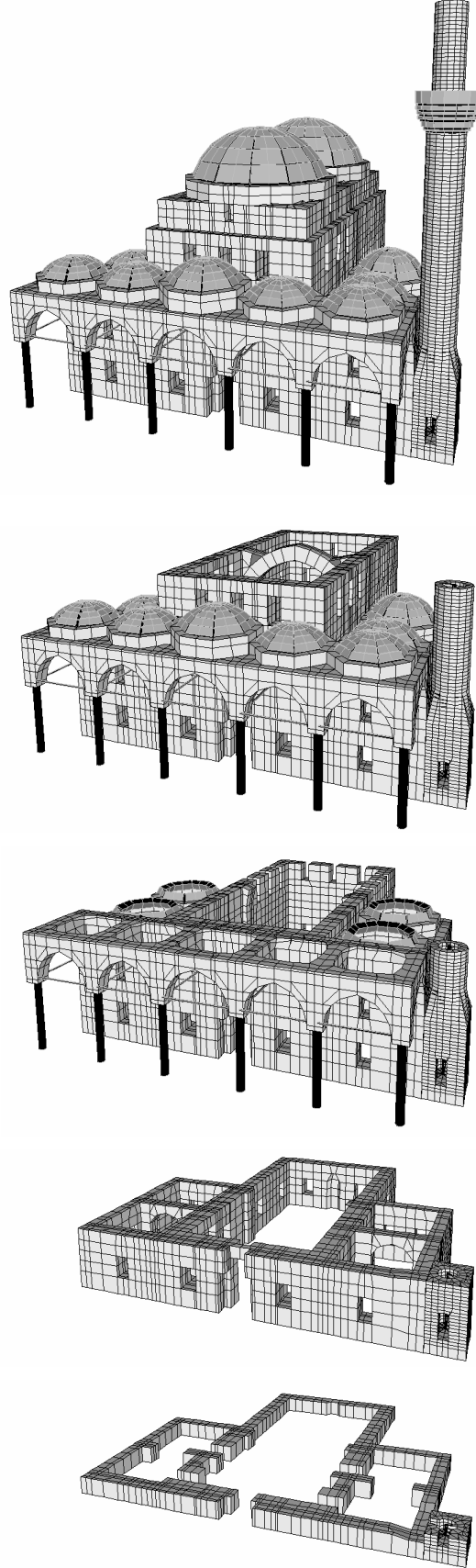


Şekil 4.13: Murat Paşa Camii sonlu eleman modeli üstten görünüş



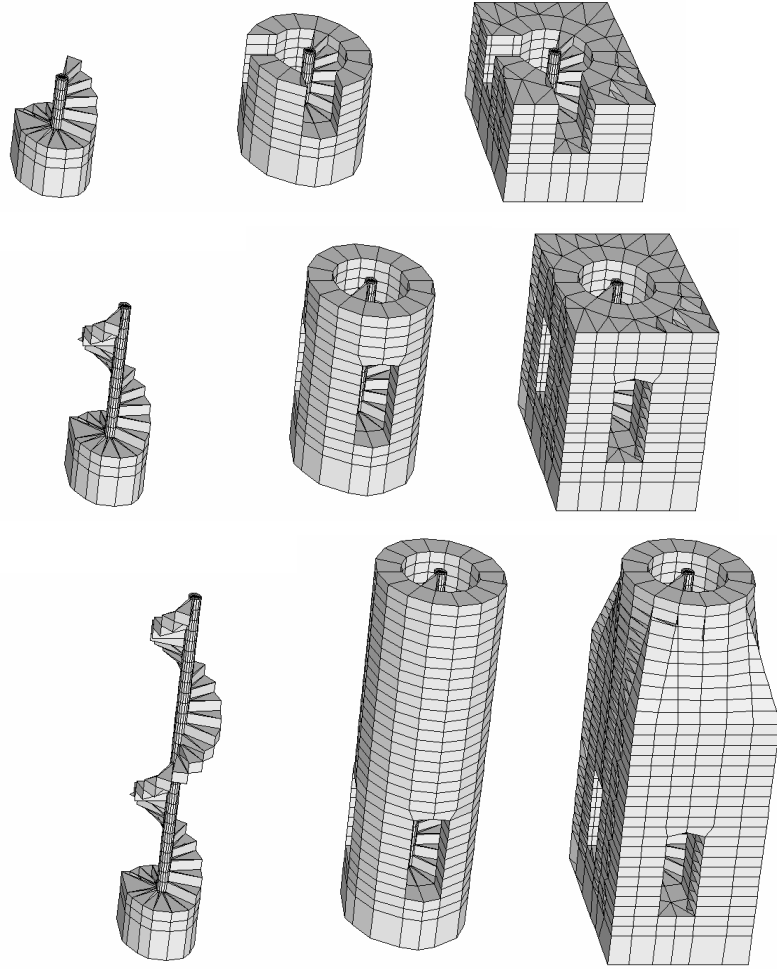
Şekil 4.14: Murat Paşa Camii sonlu eleman modeli ön, arka ve yan görüşler

Murat Paşa Camii sonlu eleman modeli, aşamalar halinde Şekil 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4.15: Murat Paşa Camii sonlu eleman modeli aşamaları

Murat Paşa Camii minaresi, gerçek davranışa en yakın sonucu elde edebilmek için 5020 tane katı eleman kullanılarak hassas bir şekilde modellenmiştir. Minarenin rijitliğine önemli katkısı olan ve davranışını olumlu şekilde etkileyen basamaklarla birlikte modellenmiş ve onaltıgen olarak idealleştirilmiştir (Şekil 4.16).



Şekil 4.16: Murat Paşa Camii minaresi sonlu eleman modeli aşamaları

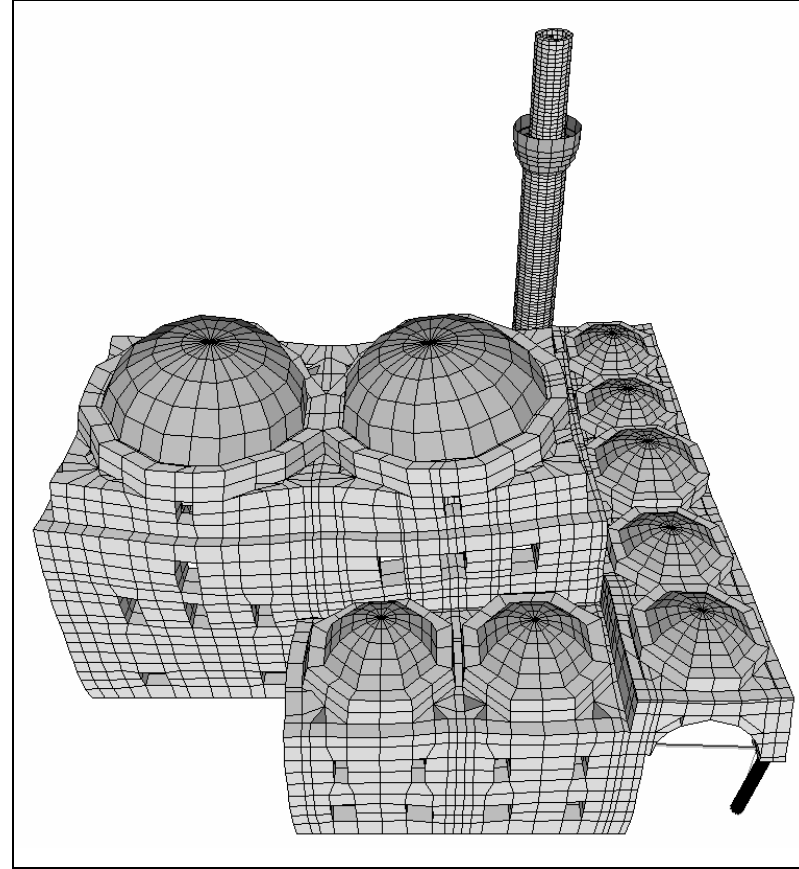
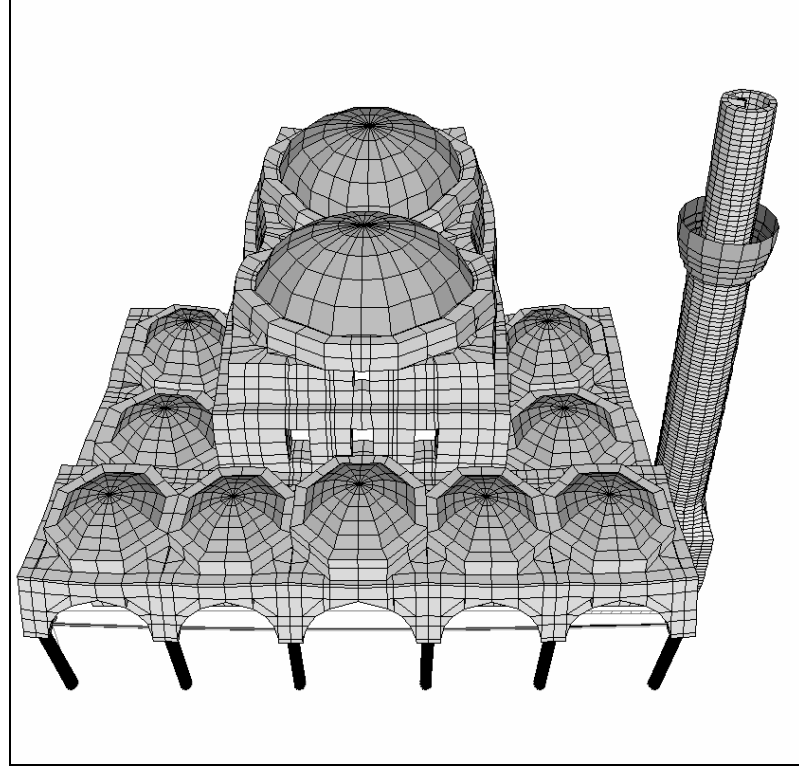
4.3. Yapının Analizi

Bu bölümde, yapının zati yükleri altında analizi, modal çözümleme ve modal spektral çözümleme sonuçlarından bahsedilecektir.

4.3.1. Ölü Yükler Altında Analiz

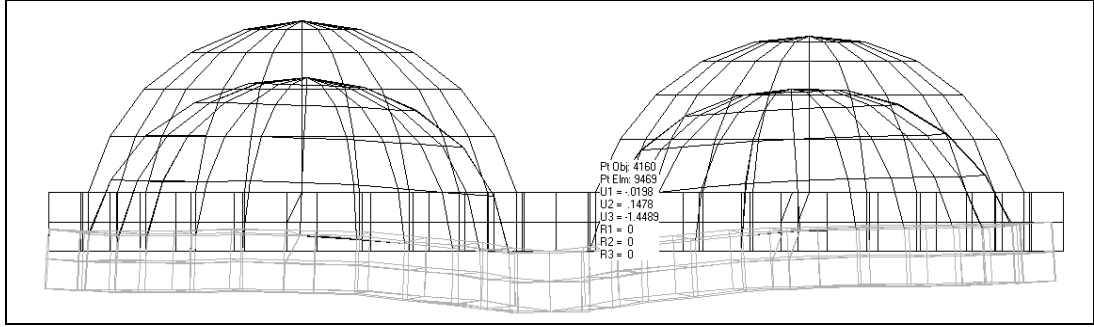
Murat Paşa Camii'nin üç boyutlu sonlu eleman modelinin kendi ağırlığı altında yapılan statik analizi neticesinde yapıdaki muhtemel gerilme dağılımlarına, şekildeğiştirme değerlerine ulaşılmış ve çatlak oluşabilecek kritik yerler tespit

edilmiştir. Şekil 4.17’de yapının zati yükler altında şekil değiştirmiş hali görülmektedir.



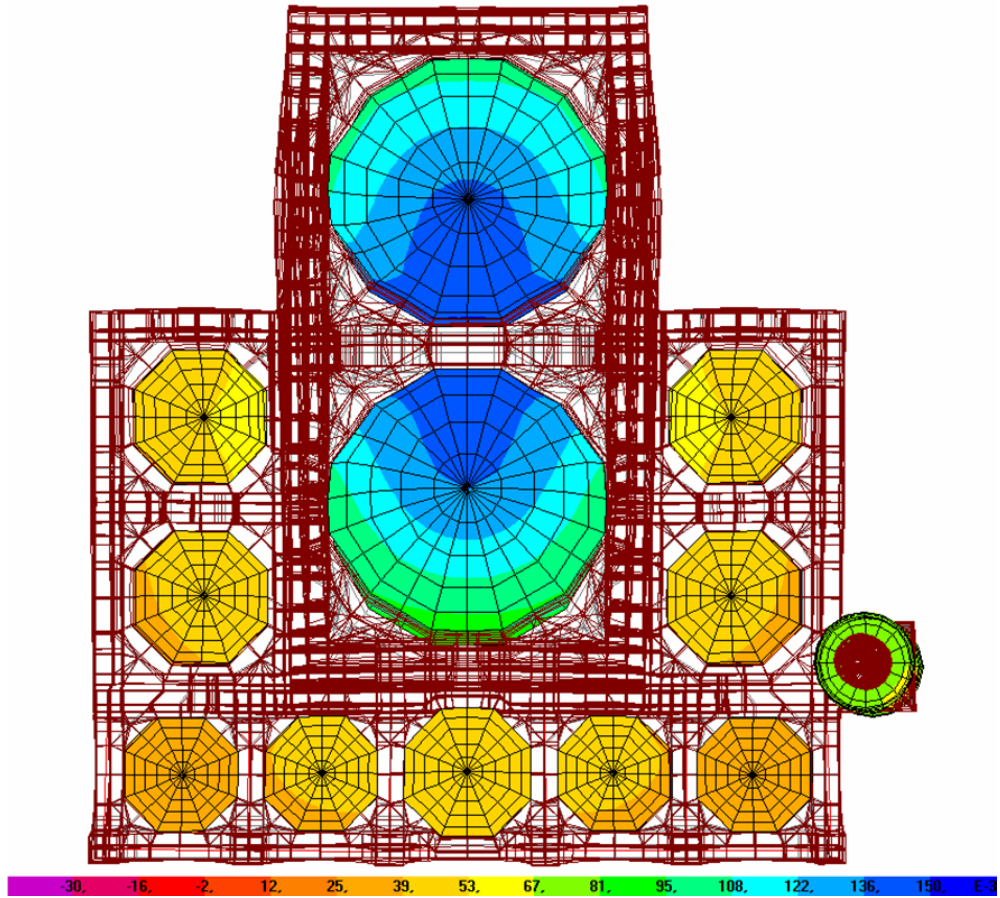
Şekil 4.17: Ölü yükler altında yapının şekil değiştirmiş hâli

Şekildeğiştirmeler, kalın duvarlara göre göreceli olarak daha kolay düşey hareket yapabilen büyük kemerin bulunduğu, kubbelerin birleştiği orta bölgede toplanmaktadır (Şekil 4.18).



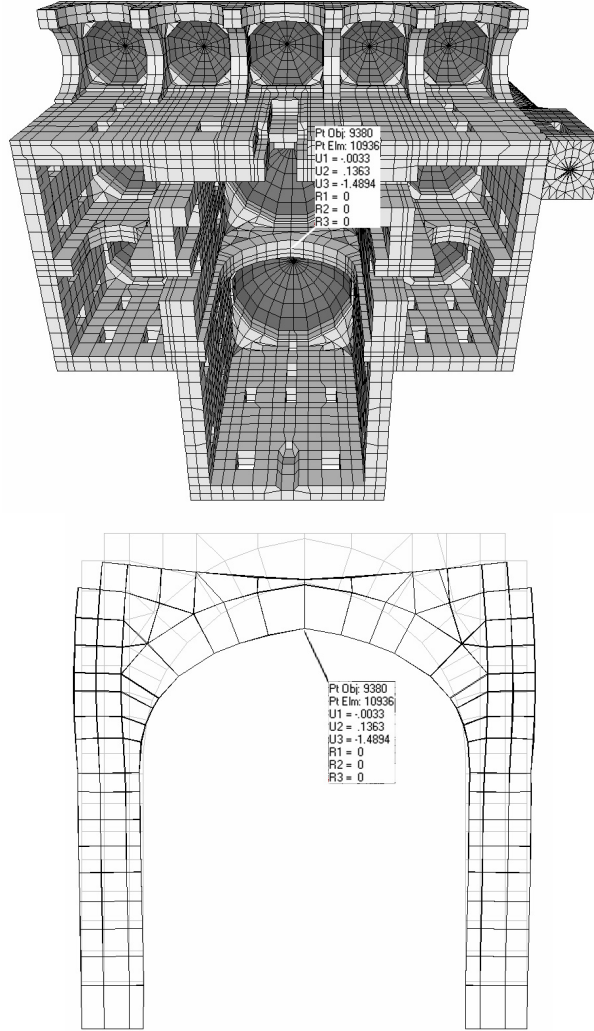
Şekil 4.18: Ölü yükler altında büyük kubbelerdeki şekildeğiştirme

Şekil 4.19’da yapının zati ağırlığı altındaki şekildeğiştirme diyagramı verilmiştir. Kabuk elemanlardaki koyu alanlar daha fazla şekil değiştiren bölgeleri göstermektedir. Kubbelerin birleştiği yerin daha koyu olduğu dolayısıyla daha fazla yer değiştirdiği görülmektedir.



Şekil 4.19: Ölü yükler altında kabuk elemanlarda şekildeğiştirme diyagramı ($10^{-3} \times \text{cm}$)

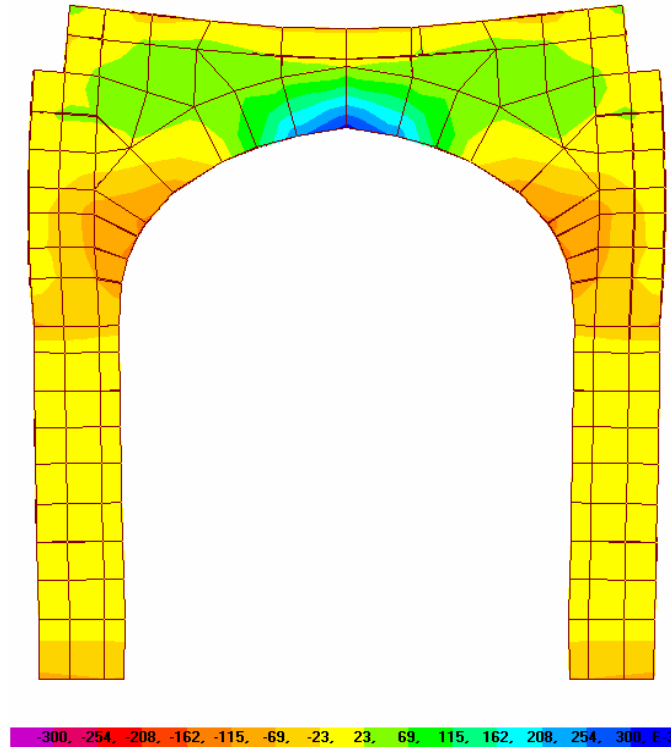
Düşey yükler altında yapıda en fazla büyük kemer zorlanmakta ve yapıdaki en büyük yerdeğiştirme, kemerin tepe noktasında düşey doğrultuda yaklaşık 1.5 mm olmaktadır (Şekil 4.20).



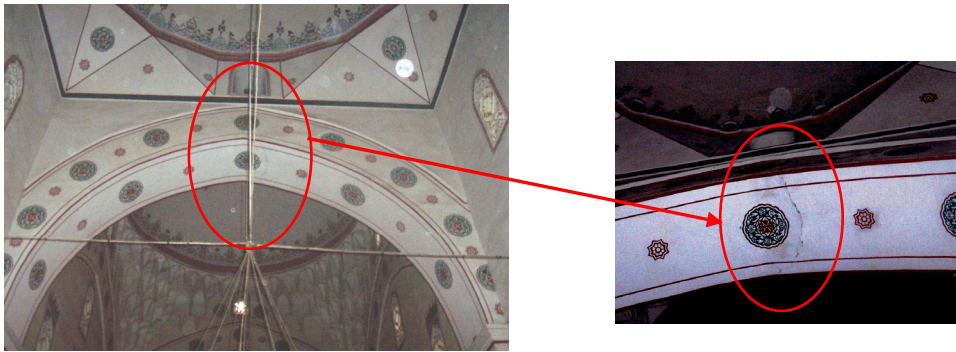
Şekil 4.20: Ölü yükler altında büyük kemerdeki yerdeğiştirme

Zati yükler altında yapılan statik hesap sonucunda maksimum gerilmelerin 0.35 MPa, minimum gerilmelerin ise -0.6 MPa düzeyinde olduğu, bu değerlerin de öngörülen emniyet gerilmelerinin oldukça altında kaldığı görülmüştür. Beş buçuk asra yakın bir süredir ayakta olan bir yapının kendi ağırlığını zorlanmadan taşıdığını söylemek zaten zor olmayacaktır. Bununla birlikte statik analizden elde edilen gerilme diyagramları, yapıdaki gerilme dağılışı hakkında fikir vermektedir. Yapının kendi ağırlığı, elemanlarda genel olarak hasara sebep olacak kadar zorlamalara sebep olmasa da yapılan analizle yapıdaki kritik bölgelerin belirlenmesinde tatmin edici sonuçlara ulaşılabilmektedir.

Düşey yükler altında yapıdaki en büyük gerilme, Şekil 4.21’de görüldüğü gibi büyük kemerin üst noktasında oluşmakta ve burada S11 gerilmesi 0.35 MPa değerine ulaşmaktadır. Gerilme değerinin malzeme için öngörülen çatlama emniyet gerilmesini ($\tau_0=0.3$ MPa) biraz aştığı görülmektedir. Yerinde yapılan incelemede burada çatlak oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4.22). Bununla birlikte, yapıdaki hareketlerin gerçekte uzun süreli yüklemelerin ve yapının geçirmiş olduğu depremlerin birleşimi olması sebebiyle buradaki çatlakın zati yükler altında bir risk oluşturmayacağı söylenebilir, ancak burasının kritik bir bölge olduğu unutulmamalıdır. Düşey yükler altında minarede ve kubbelerde de önemli sayılabilecek zorlanmalar oluşmamaktadır.

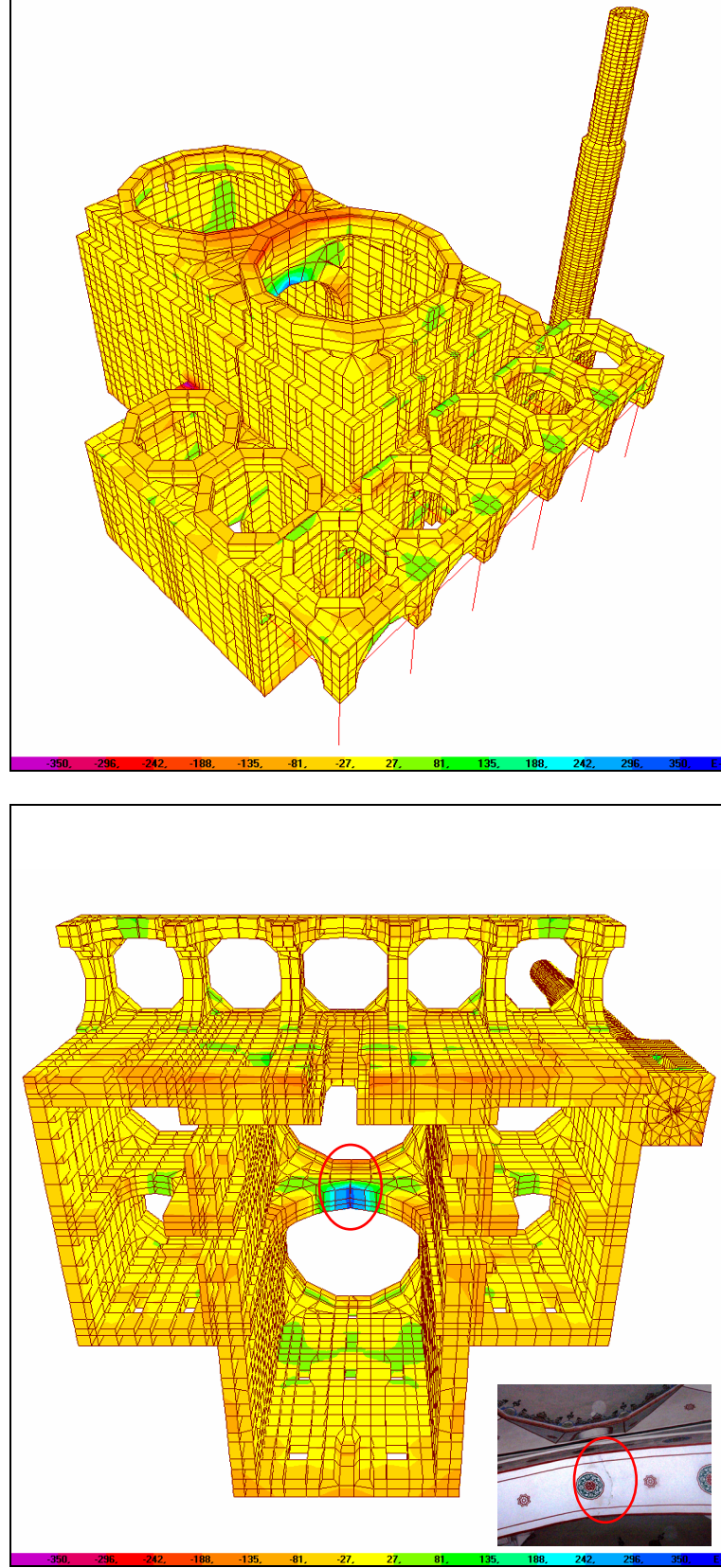


Şekil 4.21: Ölü yükler altında şekil değiştirmiş kemerde S11 gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)

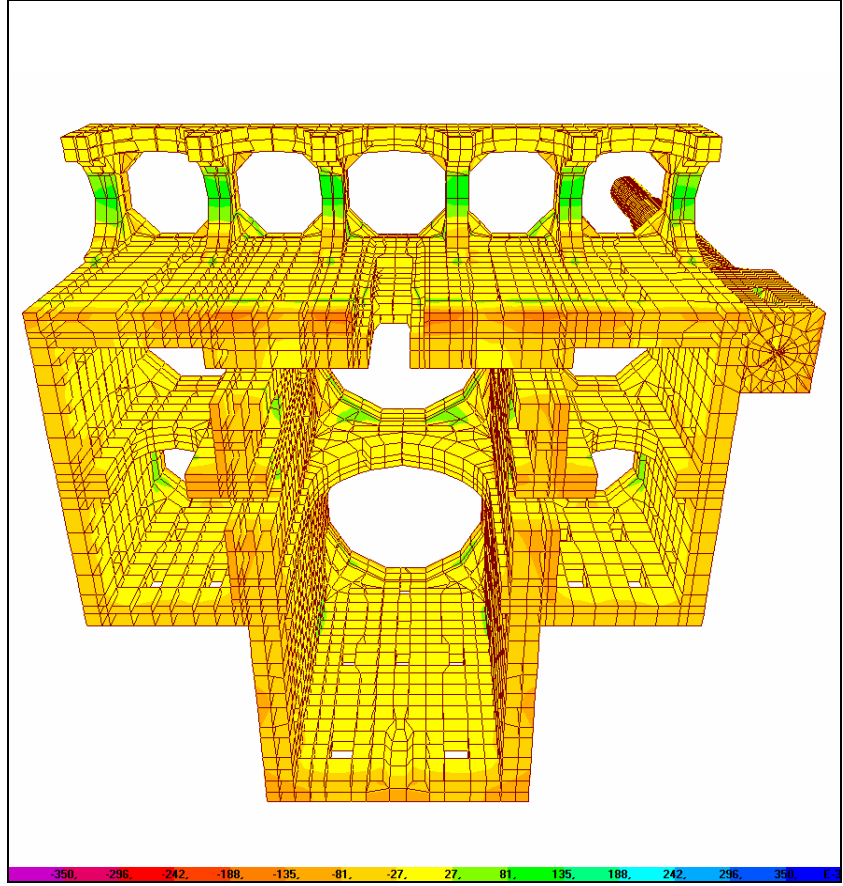
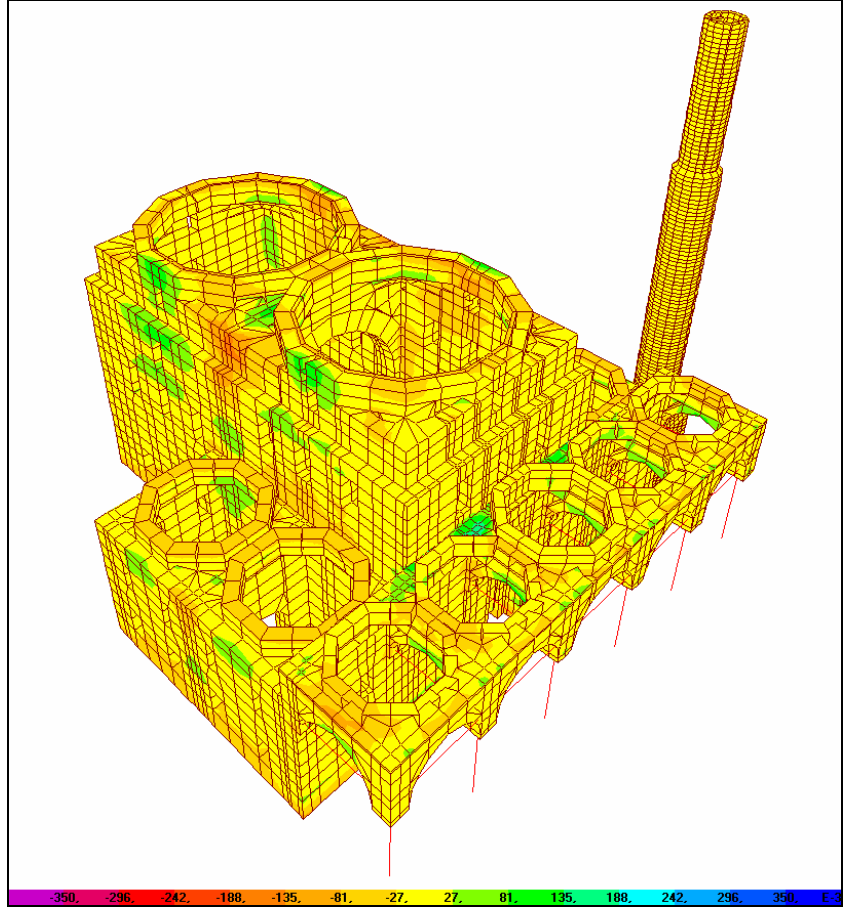


Şekil 4.22: Kemerde çatlak oluşumu

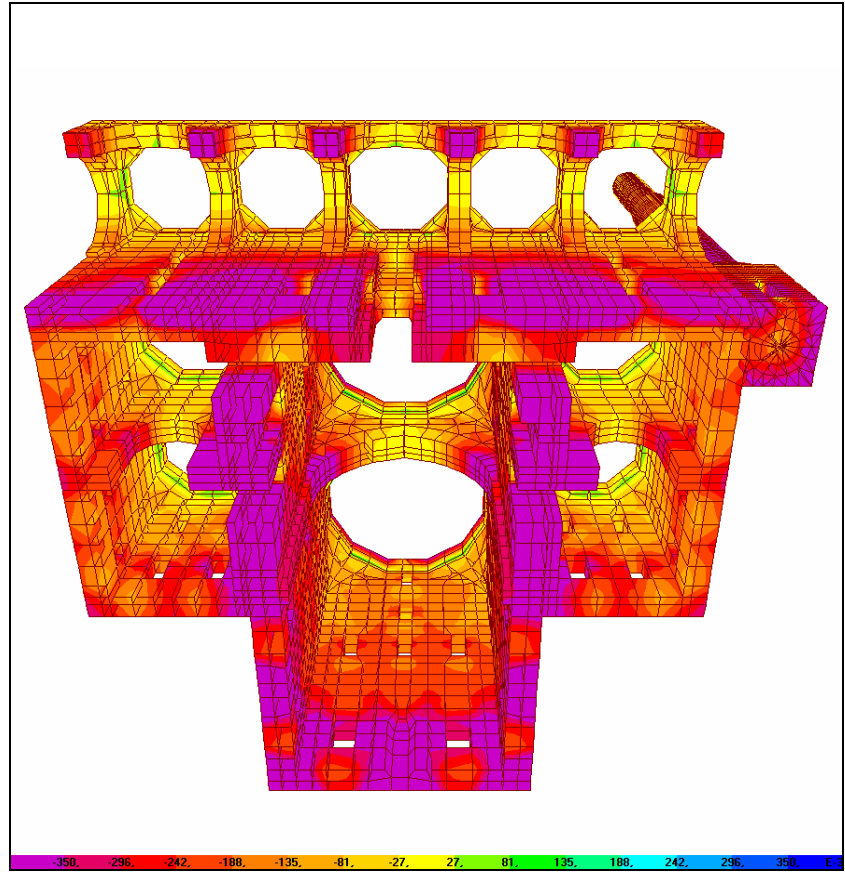
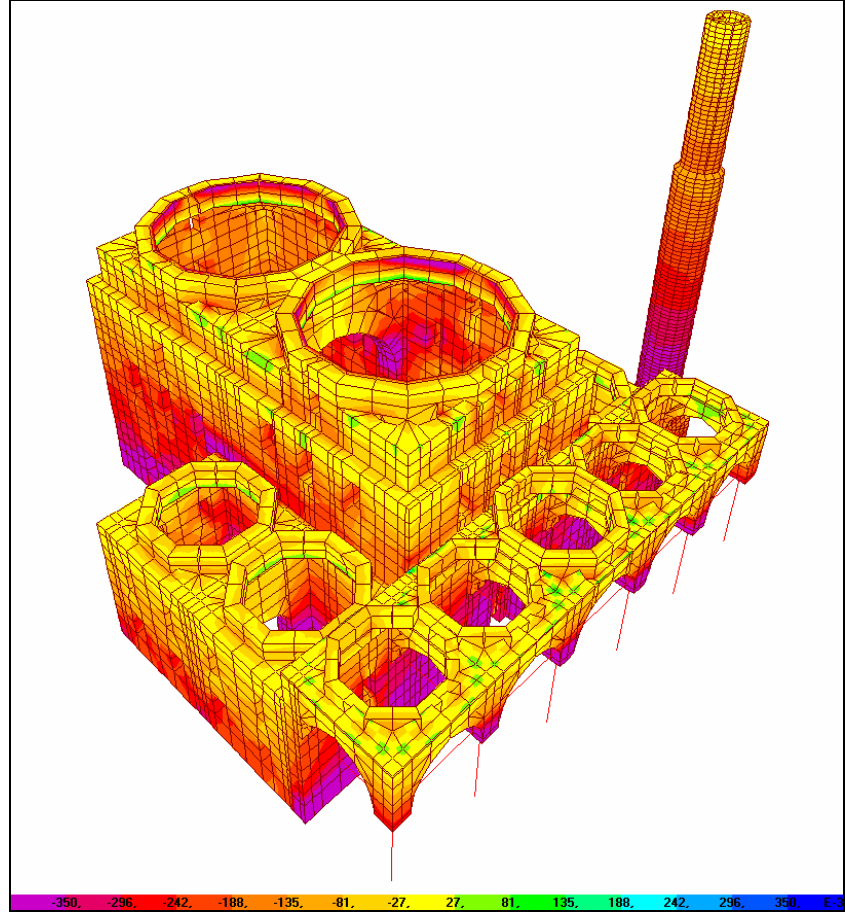
Statik hesap sonucunda yapıda oluşan S11, S22, S33, S12, S13, S23 gerilmeleri Şekil 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28’de gösterilmiştir.



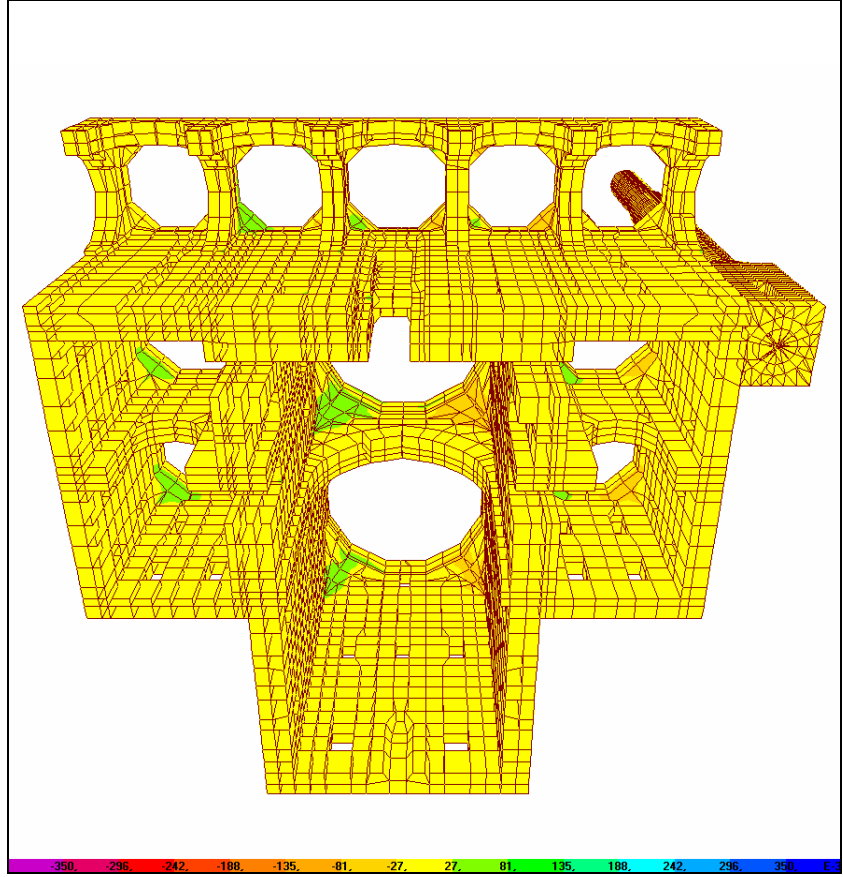
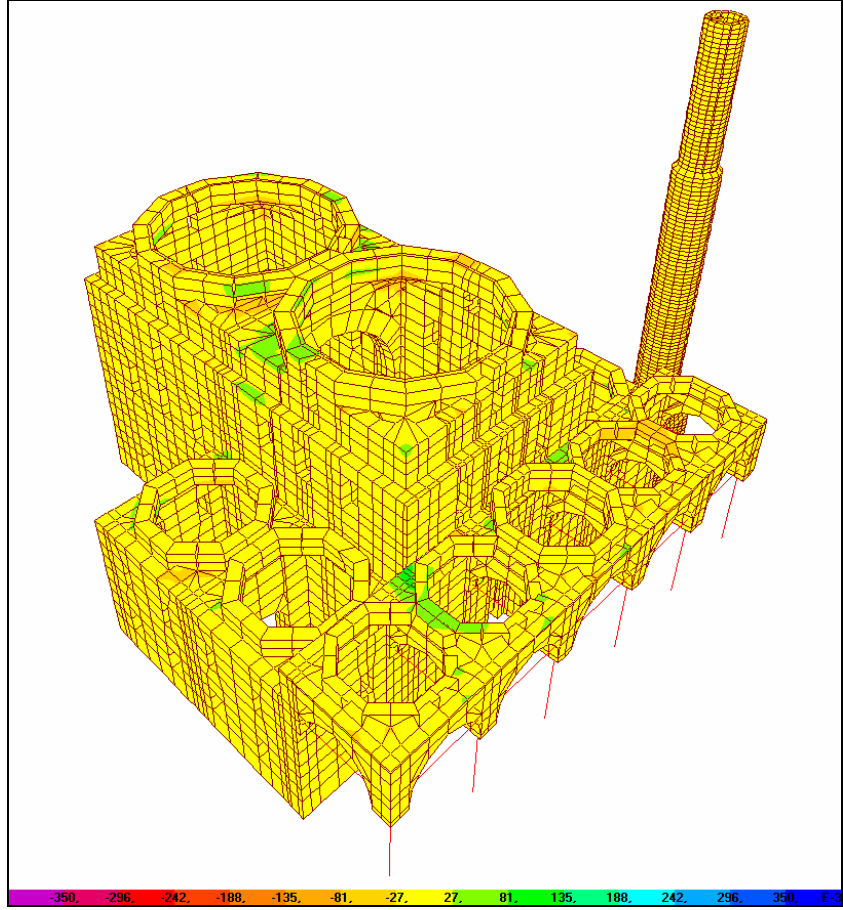
Şekil 4.23: Ölü yükler altında S11 (X doğrultusu) gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$) – Kemerde çatlak oluşumu.



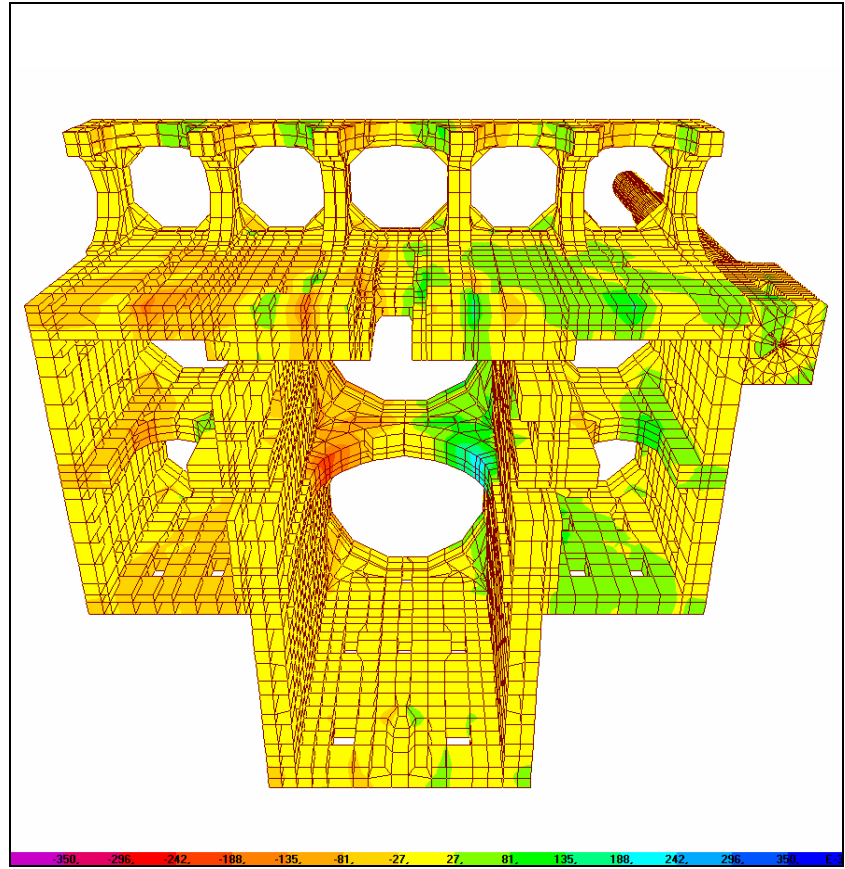
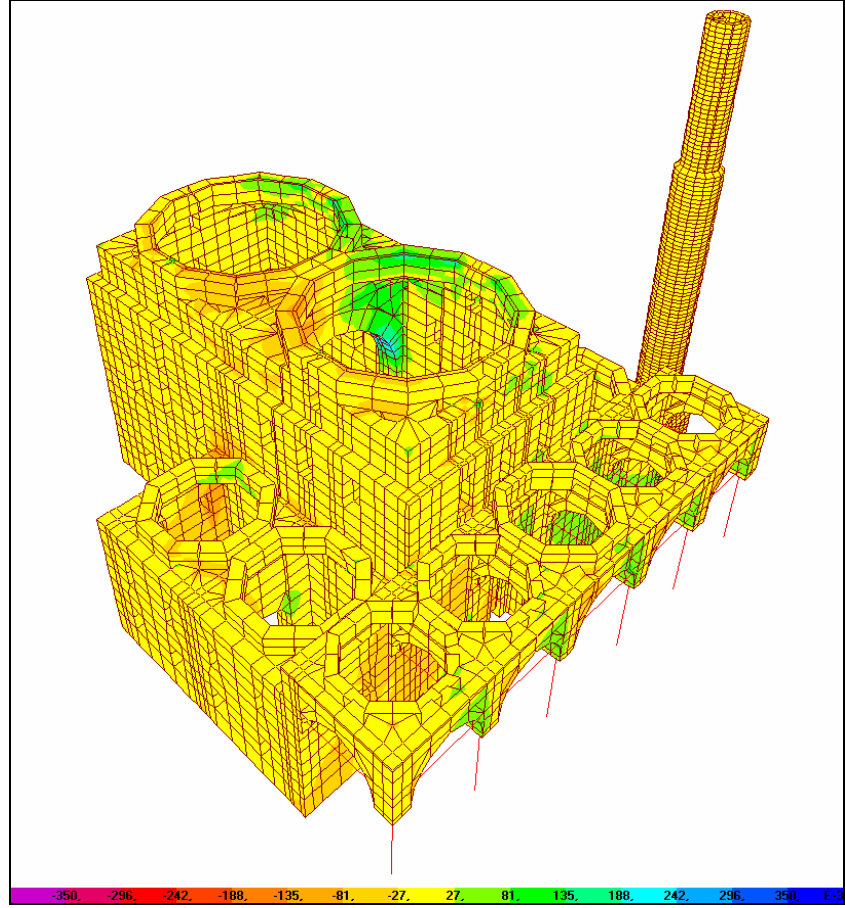
Şekil 4.24: Ölü yükler altında S22 (Y doğrultusu) gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)



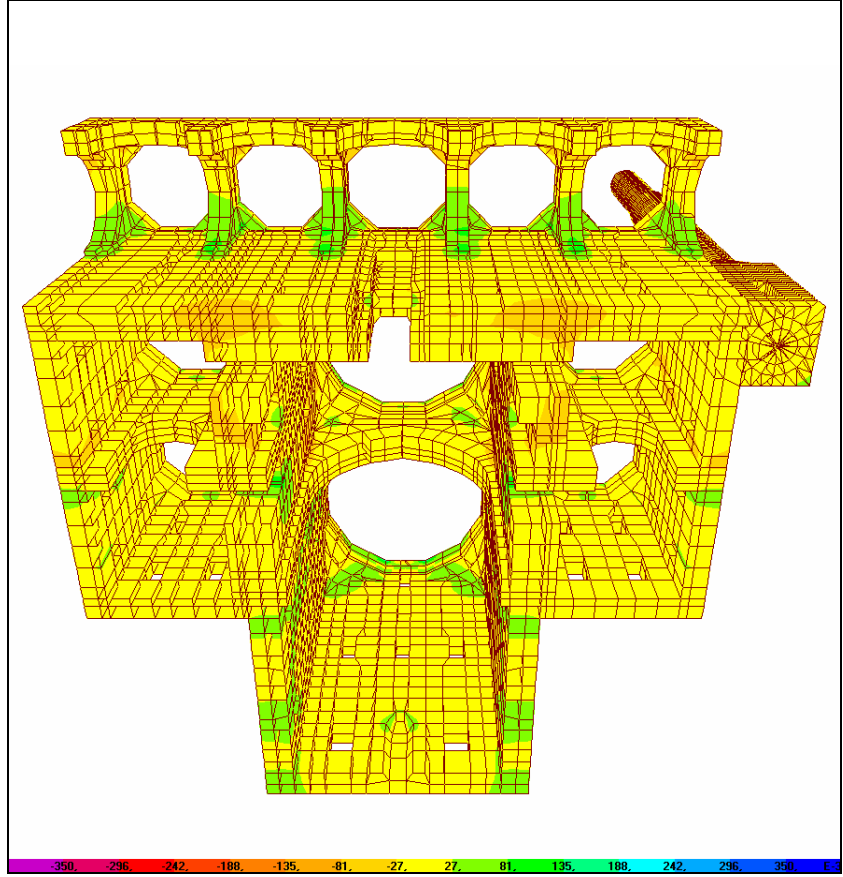
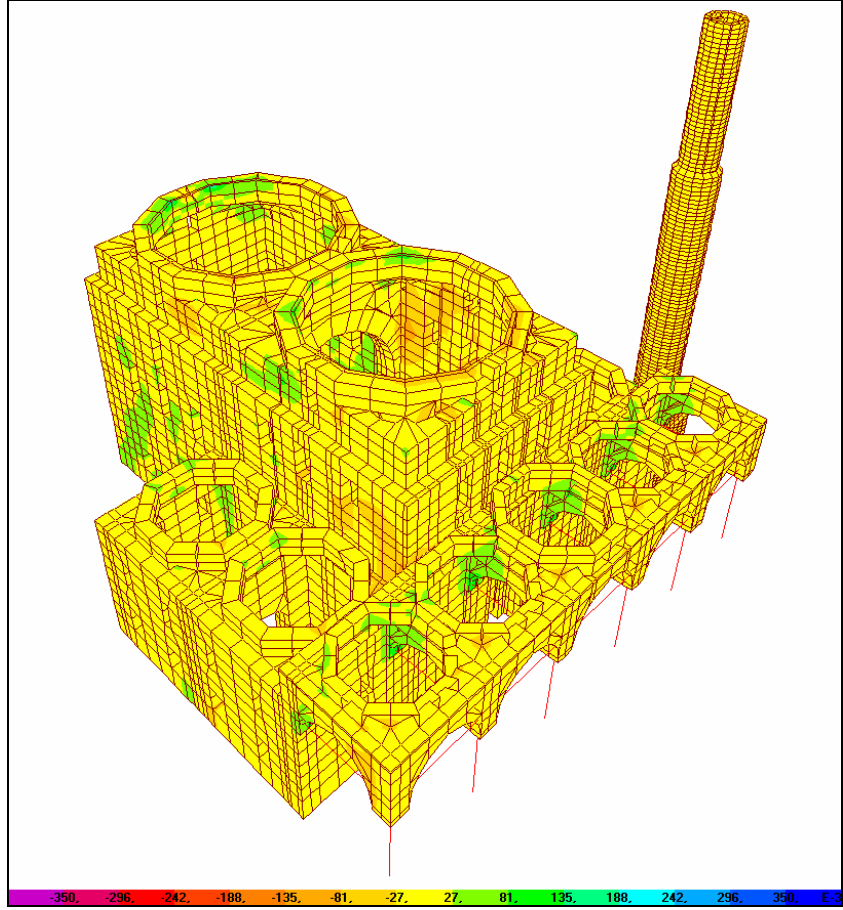
Şekil 4.25: Ölü yükler altında S33 (Z doğrultusu) gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)



Şekil 4.26: Ölü yükler altında S12 gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)

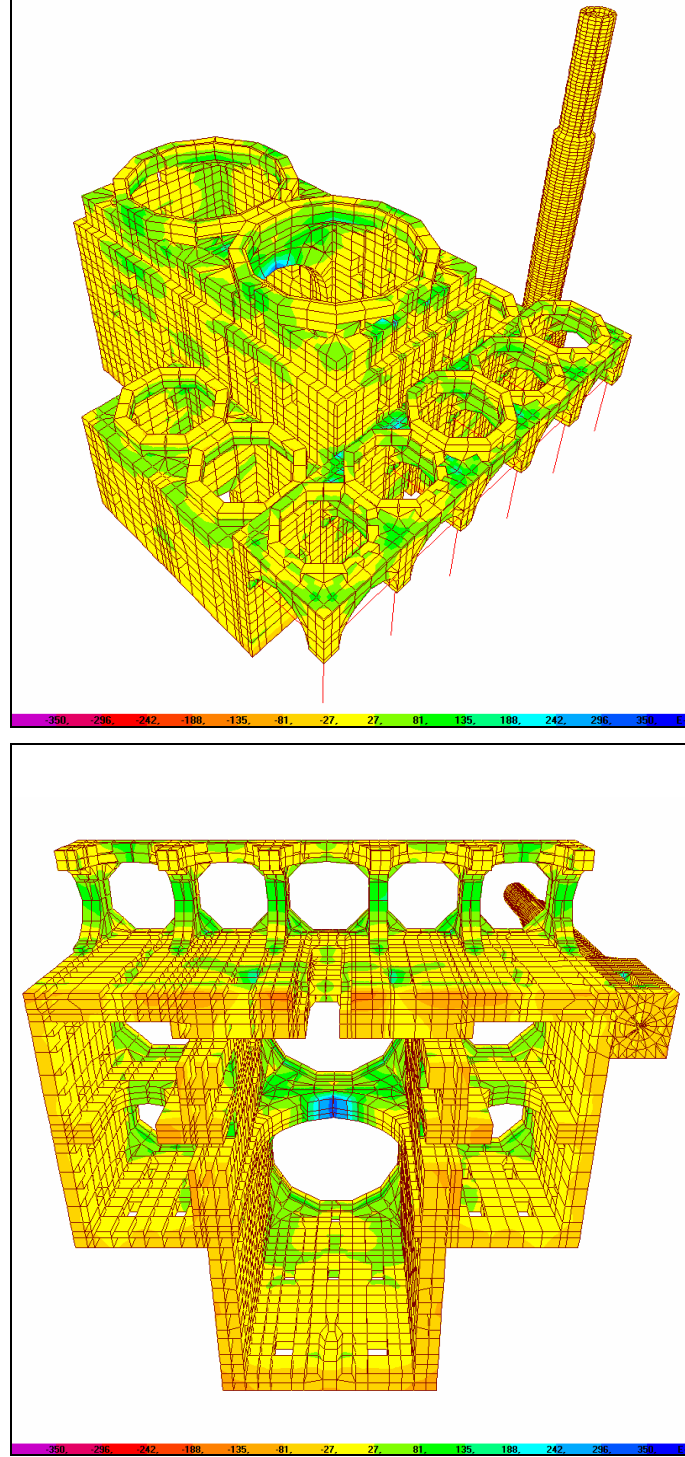


Şekil 4.27: Ölü yükler altında S13 gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)



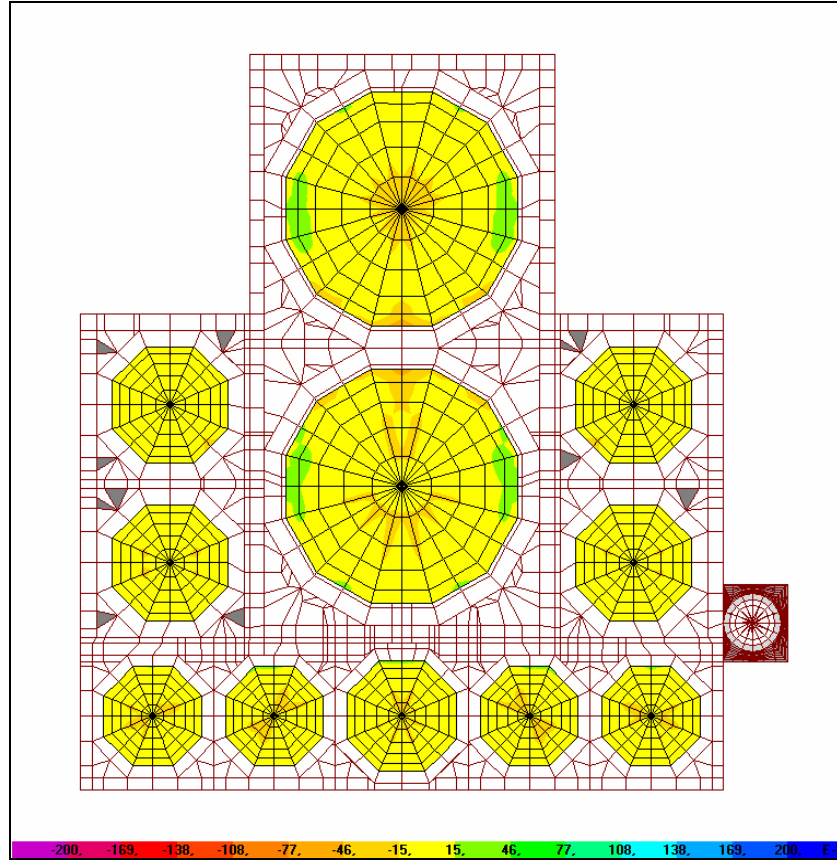
Şekil 4.28: Ölü yükler altında S23 gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)

Ölü yükler altındaki maksimum gerilme dağılımı Şekil 4.29’da verilmiştir. Düşey yükler altında kayma gerilmelerinden ziyade çekme gerilmelerinin daha kritik olduğu, maksimum gerilme dağılışının daha çok S11 gerilme dağılışına benzediği, dolayısıyla düşey yükler altında en kritik gerilmelerin X doğrultusunda oluşan çekme gerilmeleri olduğu görülmektedir.

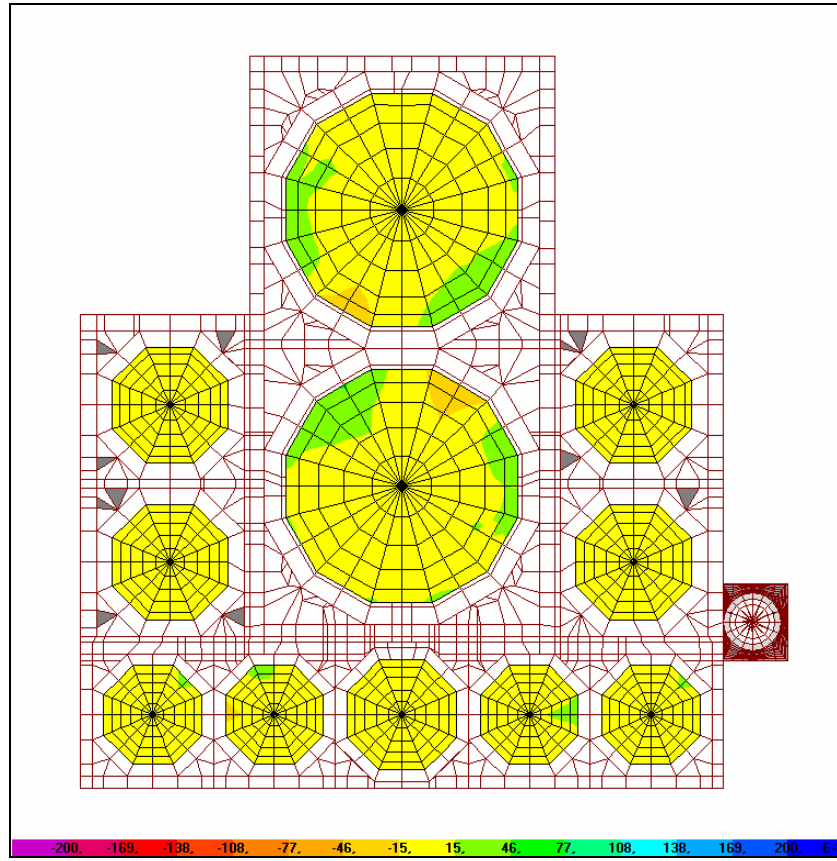
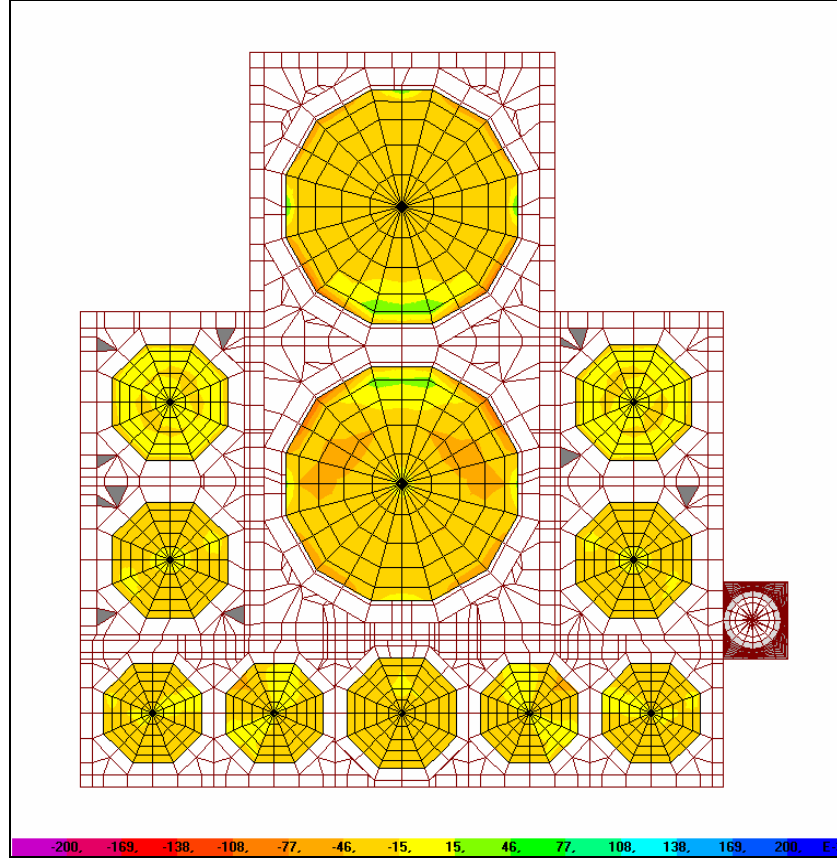


Şekil 4.29: Ölü yükler altında Smax gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)

Çekmeye karşı zayıf olan yığma yapı malzemesinin çekme almayacak şekilde boyutlandırılması ihtiyacının ortaya çıkardığı kubbe biçiminin, yapıda kendisinden beklenen vazifeyi başarıyla yerine getirdiği görülmektedir. Kubbelerdeki çekme gerilmeleri en fazla 0.082 MPa, basınç gerilmeleri ise en az -0.25 MPa değerine ulaşmıştır. Yapının 80 cm kalınlığa sahip kubbelerinin kendi ağırlıklarını taşımada kusursuz oldukları söylenebilir. Yapıda kabuk elemanlarla modellenen kubbelerin S11, S22 ve S12 gerilme dağılımları Şekil 4.30, 4.31, 4.32’de görülmektedir.



Şekil 4.30: Ölü yükler altında S11 (X doğrultusu) gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)



4.3.2. Modal Çözümleme

Eigen-value analizi olarak da isimlendirilen modal çözümleme ile yapı sisteminin kütle ve rijitlik matrisleri kullanılarak, mod şekilleri ve periyotlar elde edilmektedir.

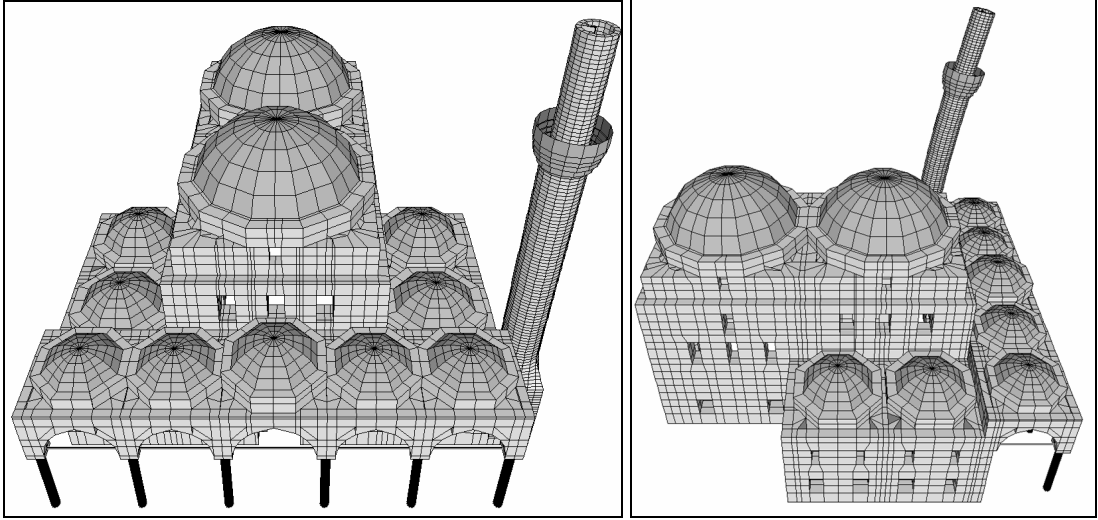
Murat Paşa Camii'nin sonlu eleman modelinin Sap2000 programında modal çözümlemesi yapılmış ve neticede 50 tane mod şekli ve serbest titreşim periyodu elde edilmiştir. İlk 50 modun kütle katılım oranları toplamı %88 olmaktadır. Mod sayısı 100'e çıkarıldığında bu oran sadece % 3 artış göstermektedir.

Ana kütlelerin X doğrultusunda yanal yerdeğiştirme hareketini gösteren üçüncü modun kütle katılım oranı % 44, Y doğrultusunda yanal yerdeğiştirme hareketini gösteren dördüncü modun kütle katılım oranı ise % 63 olarak hesaplanmıştır. Yapının Y doğrultusunda uzanan duvarlarının sürekli olması ve bu doğrultuda daha kararlı ve rijit olması, buna karşılık X doğrultusunda iki ana mekân arasında duvar olmaması neticesinde yapının bu doğrultuda zayıflığının bulunması, ana doğrultulardaki modların kütle katılım oranları arasındaki farkı açıklamaktadır. Yapının 50 moduna ait periyotlar ve kütle katılım oranları Tablo 4.4'de gösterilmiştir.

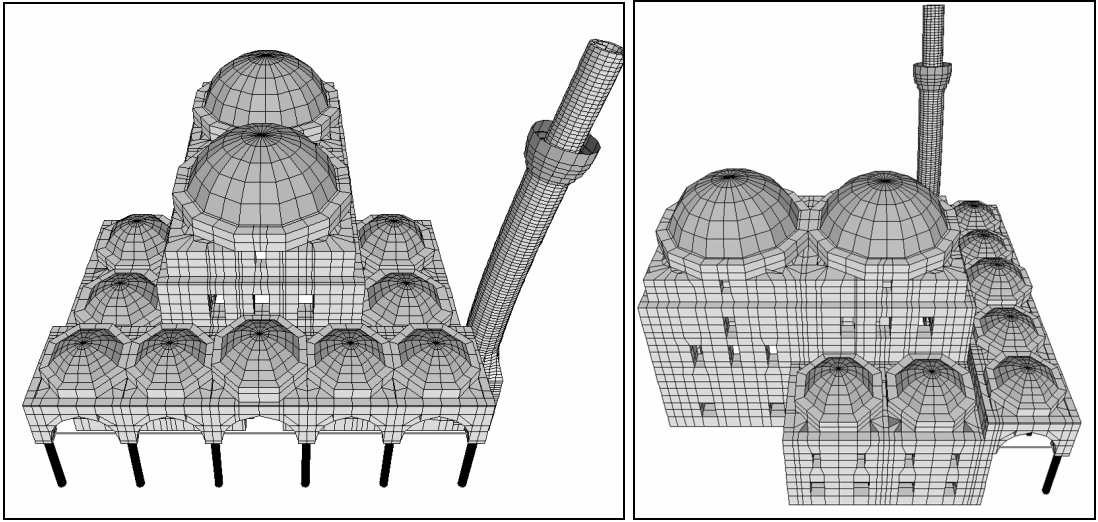
Modal çözümleme neticesinde elde edilen yapı serbest titreşim modlarının ilk onuna ait titreşim şekilleri aşağıda verilmiştir. İlk iki mod, minarenin X ve Y doğrultularındaki yanal hareketini göstermektedir (Şekil 4.33, 4.34). Üçüncü ve dördüncü modlar, yapının tümünde hâkim olan X ve Y doğrultularındaki yanal yerdeğiştirme hareketidir (Şekil 4.35, 4.36). Beşinci ve altıncı modlar; minarenin şerefeden itibaren üst kısmının alt kısmına göre ters yönlü yanal hareket yaptığı moddur (Şekil 4.37, 4.38). Yedinci modun ana kütlede burulma olduğu görülmektedir (Şekil 4.39). Sekizinci mod, kible tarafındaki büyük kubbenin açılma hareketidir (Şekil 4.40). Dokuzuncu mod, yapının burulmayla birlikte z ekseninde etrafında dönme modudur (Şekil 4.41). Onuncu mod ise iki kubbenin aynı anda açılma hareketidir (Şekil 4.42).

Tablo 4.4: Serbest Titreşim Peryotları ve Kütle Katılım Oranları

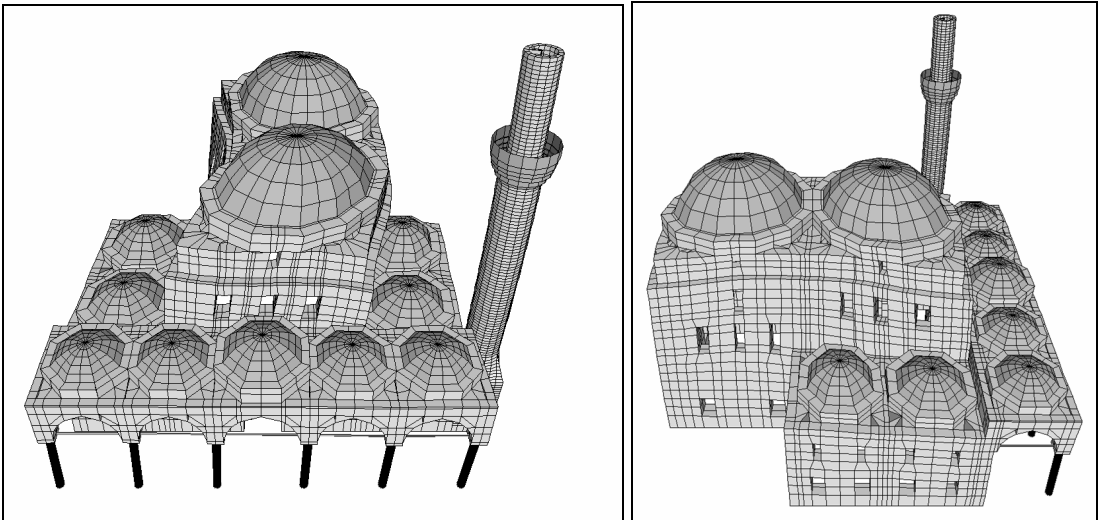
Serbest Titreşim Peryotları ve Kütle Katılım Oranları							
Adım	Periyot (s)	UX	UY	UZ	Topl. UX	Topl. UY	Topl. UZ
Mod 1	0.5650	0.00037	0.01592	0.00000	0.000	0.016	0.000
Mod 2	0.5508	0.01498	0.00037	0.00000	0.015	0.016	0.000
Mod 3	0.1747	0.44000	0.00000	0.00000	0.460	0.016	0.000
Mod 4	0.1274	0.00001	0.63000	0.00047	0.460	0.640	0.000
Mod 5	0.1188	0.00008	0.00035	0.00003	0.460	0.640	0.000
Mod 6	0.1152	0.01422	0.00025	0.00000	0.470	0.640	0.000
Mod 7	0.1063	0.01091	0.00001	0.00000	0.480	0.640	0.000
Mod 8	0.1020	0.00001	0.01242	0.00251	0.480	0.660	0.003
Mod 9	0.0905	0.12000	0.00009	0.00001	0.610	0.660	0.003
Mod 10	0.0837	0.00255	0.00010	0.00103	0.610	0.660	0.004
Mod 11	0.0802	0.03214	0.00205	0.00002	0.640	0.660	0.004
Mod 12	0.0779	0.12000	0.02024	0.00117	0.760	0.680	0.005
Mod 13	0.0770	0.04521	0.05297	0.00553	0.800	0.730	0.011
Mod 14	0.0711	0.01557	0.00001	0.00066	0.820	0.730	0.011
Mod 15	0.0700	0.00091	0.00000	0.04599	0.820	0.730	0.057
Mod 16	0.0682	0.00005	0.00111	0.00007	0.820	0.730	0.057
Mod 17	0.0676	0.00004	0.00072	0.00005	0.820	0.730	0.058
Mod 18	0.0662	0.00010	0.08570	0.00127	0.820	0.820	0.059
Mod 19	0.0609	0.00000	0.00212	0.03830	0.820	0.820	0.097
Mod 20	0.0597	0.00009	0.00187	0.03550	0.820	0.820	0.130
Mod 21	0.0589	0.00082	0.00032	0.00355	0.820	0.820	0.140
Mod 22	0.0552	0.00035	0.00017	0.01993	0.820	0.820	0.160
Mod 23	0.0549	0.00009	0.00024	0.22000	0.820	0.830	0.380
Mod 24	0.0541	0.00037	0.00007	0.00275	0.820	0.830	0.380
Mod 25	0.0538	0.00152	0.00023	0.00208	0.820	0.830	0.390
Mod 26	0.0522	0.00165	0.01381	0.01175	0.830	0.840	0.400
Mod 27	0.0507	0.00152	0.00100	0.00003	0.830	0.840	0.400
Mod 28	0.0500	0.00008	0.01466	0.00023	0.830	0.850	0.400
Mod 29	0.0482	0.00014	0.00604	0.00028	0.830	0.860	0.400
Mod 30	0.0480	0.00924	0.00010	0.00015	0.840	0.860	0.400
Mod 31	0.0471	0.00005	0.00241	0.00913	0.840	0.860	0.410
Mod 32	0.0466	0.00026	0.00000	0.00036	0.840	0.860	0.410
Mod 33	0.0456	0.00006	0.00134	0.12000	0.840	0.860	0.520
Mod 34	0.0452	0.01519	0.00018	0.00279	0.850	0.860	0.530
Mod 35	0.0450	0.00185	0.00176	0.00572	0.850	0.870	0.530
Mod 36	0.0439	0.00427	0.00079	0.00239	0.860	0.870	0.540
Mod 37	0.0439	0.00139	0.00498	0.01008	0.860	0.870	0.550
Mod 38	0.0427	0.00008	0.00011	0.01765	0.860	0.870	0.560
Mod 39	0.0421	0.00007	0.00017	0.00012	0.860	0.870	0.560
Mod 40	0.0412	0.00024	0.00017	0.00120	0.860	0.870	0.560
Mod 41	0.0406	0.00003	0.00003	0.00004	0.860	0.870	0.560
Mod 42	0.0400	0.00170	0.00002	0.00027	0.860	0.870	0.570
Mod 43	0.0396	0.00026	0.00135	0.00018	0.860	0.870	0.570
Mod 44	0.0389	0.00002	0.00023	0.00089	0.860	0.870	0.570
Mod 45	0.0386	0.00193	0.00100	0.00559	0.860	0.880	0.570
Mod 46	0.0383	0.00218	0.00288	0.02850	0.870	0.880	0.600
Mod 47	0.0379	0.00622	0.00000	0.00203	0.870	0.880	0.600
Mod 48	0.0377	0.00005	0.00003	0.02685	0.870	0.880	0.630
Mod 49	0.0364	0.00016	0.00041	0.00094	0.870	0.880	0.630
Mod 50	0.0362	0.00217	0.00011	0.00003	0.880	0.880	0.630



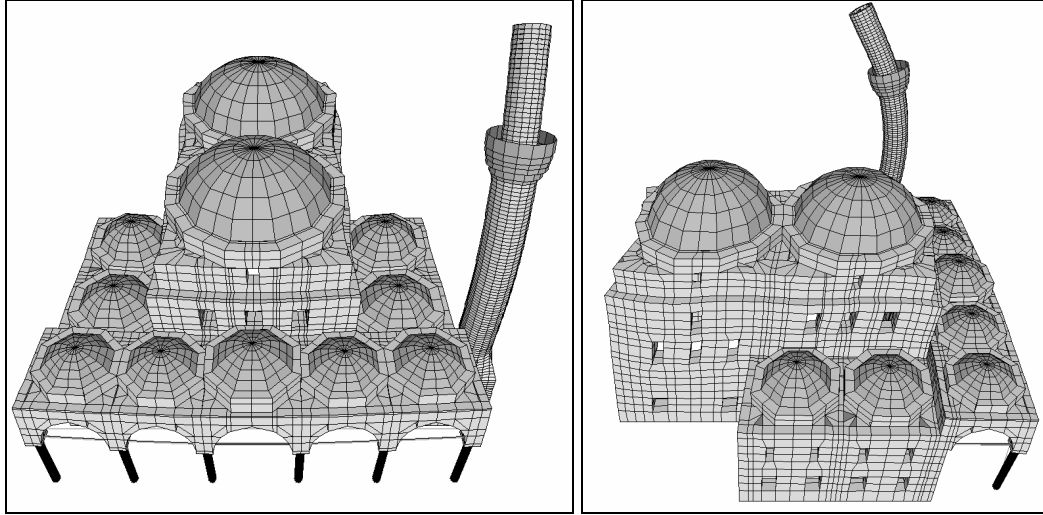
Şekil 4.33: 1.Mod: Minarenin Y doğrultusundaki yanal hareketi (0.565 s)



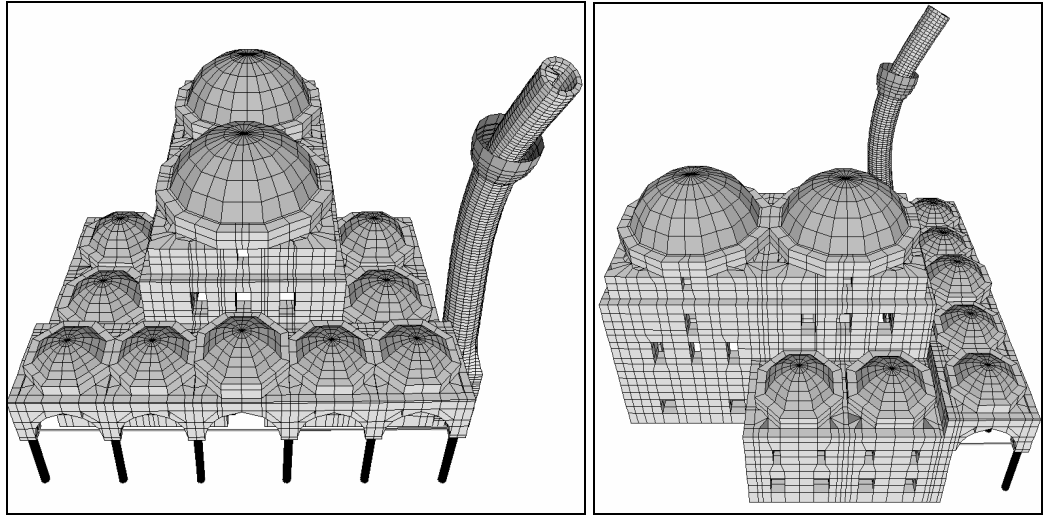
Şekil 4.34: 2.Mod: Minarenin X doğrultusundaki yanal hareketi (0.551 s)



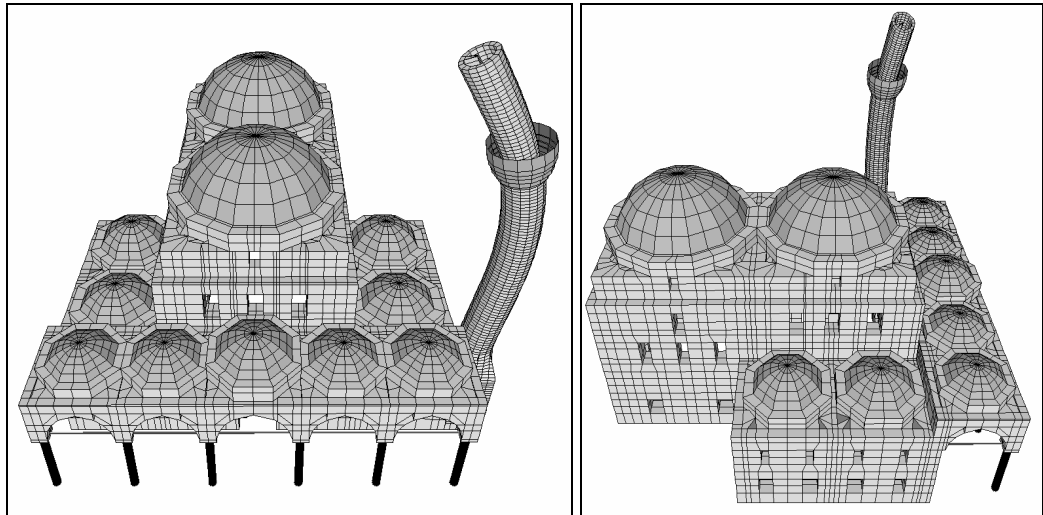
Şekil 4.35: 3.Mod: Yapının bütününde X doğrultusunda yanal hareket (0.175 s)



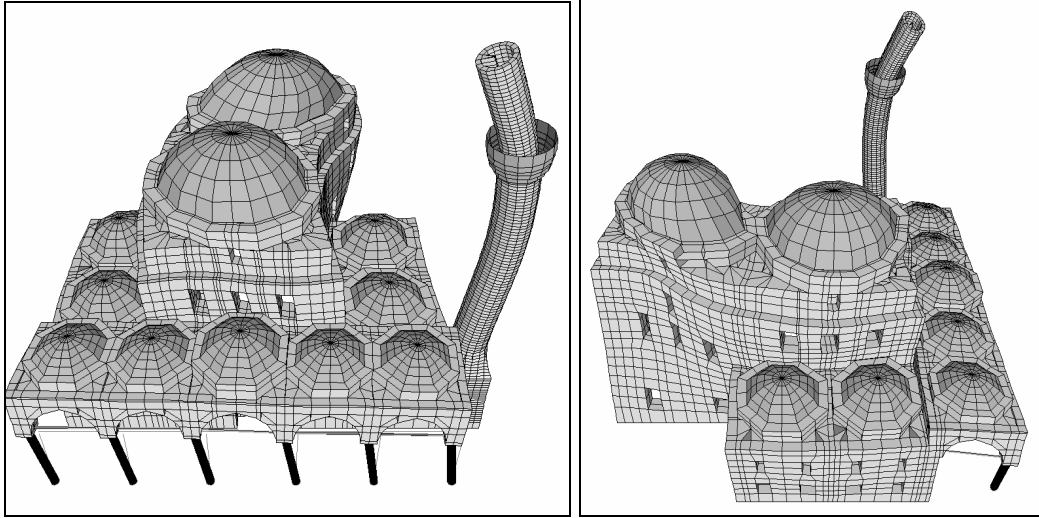
Şekil 4.36: 4.Mod: Yapının bütününe Y doğrultusunda yanıl hareket (0.127 s)



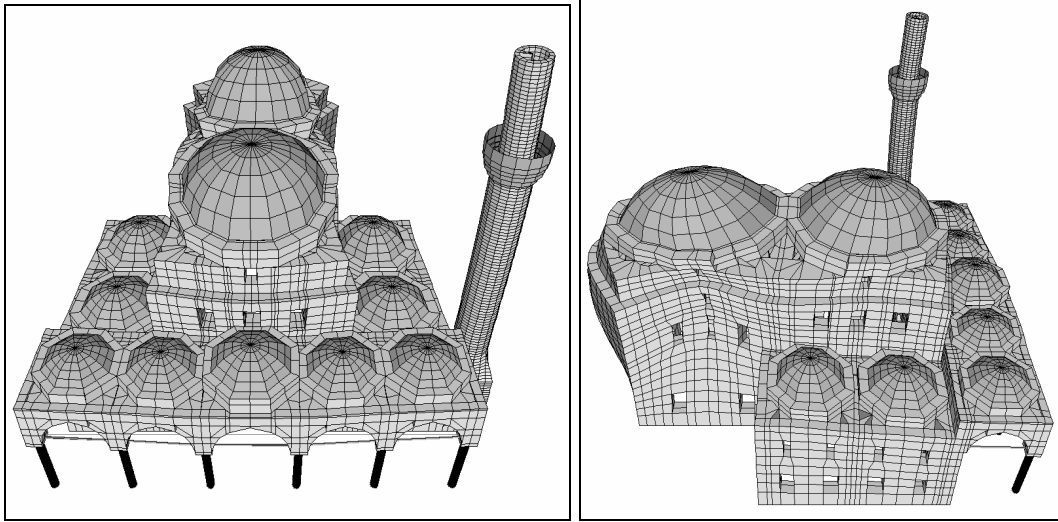
Şekil 4.37: 5.Mod: Minarenin Y doğrultusunda farklı yanıl hareketi (0.119 s)



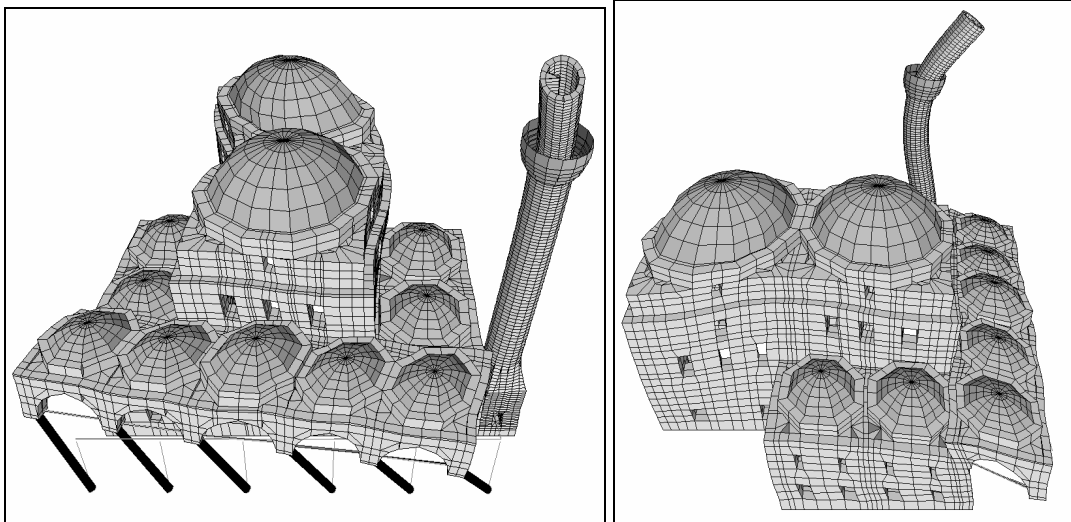
Şekil 4.38: 6.Mod: Minarenin X doğrultusunda farklı yanıl hareketi (0.115 s)



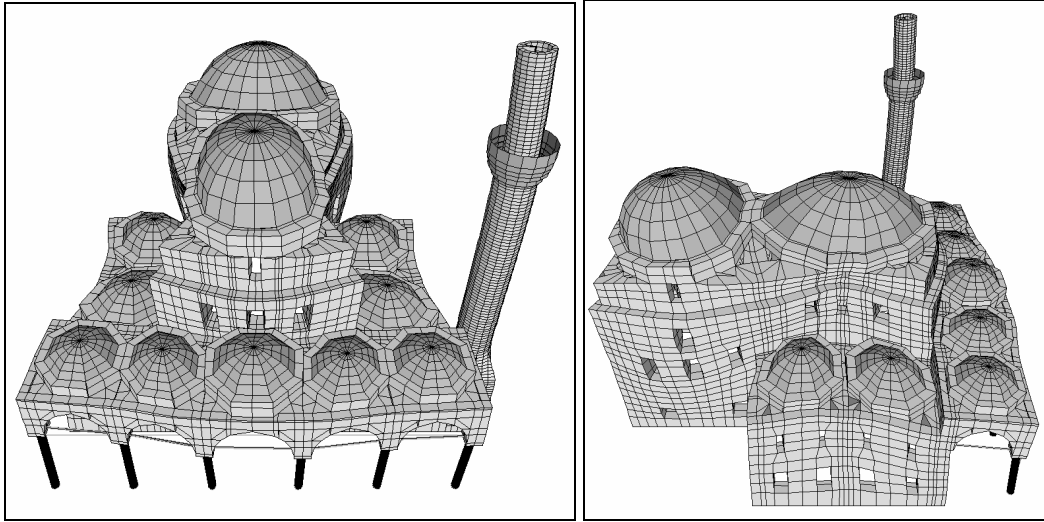
Şekil 4.39: 7.Mod: Burulma modu (0.106 s)



Şekil 4.40: 8.Mod. Büyük kubbenin açılma hareketi (0.102 s)



Şekil 4.41: 9.Mod: Yapının bütününde dönme ve burulma (0.090 s)



Şekil 4.42: 10.Mod: Kubbelerin birlikte açılma hareketi yapması (0.084 s)

4.3.3. Modal Spektral Çözümleme

Zaman alanında sayısal çözümleme, yerdeğiştirme veya kesit etkisi gibi bir sistem parametresin zamana bağlı olan değişimini verir. Ancak, taşıyıcı sistemin güvenilirliğinin belirlenmesinde genel olarak bu parametrenin en büyük değeri etkili olur. Bu nedenle, uzun ve yorucu olan sayısal çözümlemeye ihtiyaç kalmadan, Deprem Yönetmeliği'nde verilen tasarım spektrumu kullanılarak, en elverişsiz değerlerin elde edilmesi önemli ölçüde kolaylık sağlar.

Spektral eğriler sadece en büyük değeri verecek şekilde hazırlandıkları için ve belirli bir andaki çeşitli modların katkılarının bulunmasında yeterli olmadığı için, matematiksel bir yaklaşıklığın yapılması gerekli olur.

Mutlak Değerlerin Toplamı (ABS) olarak adlandırılan yöntemde bütün modların en büyük katkılarının aynı zamanda olduğu kabul edilerek, incelenen parametrenin meydana gelebilecek en büyük değerlerinin üst sınırını elde edilir, ancak bu değer abartılı biçimde büyük çıktığı için genellikle kullanılmaz. Bunun yerine kullanılan Karelerinin Toplamının Karekökü (SRSS) yöntemiyle elde edilen değer, serbest titreşim frekansları ayırık olan sistemlerde, zaman alanında çözümleme ile elde edilen sonuçlara oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu kuralın bu tür sınırlamasını kaldıran Tam Karesel Birleştirme (CQC) ise çok daha kapsamlı olup, serbest titreşim frekansları yakın olan sistemler için de kullanılabilir. Modların karşılıklı etkileşimi ihmal edilirse Tam Karesel Birleştirme ile Karelerin Toplamının Karekökü Kuralı üst üste düşer.

Bu şekilde birleştirme yöntemlerinin kullanılmasıyla, sistemin zaman alanında dinamik bir çözümünün yapılmasına ihtiyaç kalmayabilir. Ancak Modal Spektral Çözümleme Yöntemi'nde de sistemin periyot, sönüm ve mod şekilleri gibi sistemin dinamik özellikleri yanında, depremin dinamik özelliklerini içeren spektrum eğrileri kullanıldığı için, bu yöntem de dinamik bir yöntemidir. Daha önce deprem kayıtları değerlendirilerek spektrum eğrilerinin hazırlanması ile Modal Spektral Çözümleme Yöntemi'nin başlangıcını teşkil etmek ve böylece zaman tanım alanında adım adım sayısal çözüme göre büyük bir kolaylık sağlamaktadır [4].

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007'de yığma binalar için depreme dayanıklı tasarım kurallarını açıklayan beşinci bölümünde, yığma yapılarda hesap yapılırken spektrum katsayısının sabit olarak $S(T) = 2.5$ ve deprem yükü azaltma katsayısının da $R(T) = 2.0$ alınarak hesap yapılması uygun görülmüştür [34]. Modal spektral çözümlemede kullanılan değerler Tablo 4.5'de bir arada verilmiştir.

Tablo 4.5: Modal Spektral Çözümlemede Kullanılan Değerler

Deprem bölgesi:	2
Etkin yer ivmesi katsayısı:	$A_0 = 0.3$
Bina önem katsayısı:	$I = 1$
Spektrum katsayısı:	$S(T) = 2.5$
Deprem yükü azaltma katsayısı:	$R = 2$
Elastik spektral ivme	$S_{ae}(T) = 7.358 \text{ m/s}^2$

Bu çalışmada modal spektral çözümleme yapılırken, modların birleştirilmesinde Tam Karasel Birleştirme (CQC) yöntemi uygulanmış, zemin sınıfına göre değişen spektrum eğrisi yerine, Deprem Yönetmeliği'nin öngördüğü şekilde sabit $S(T) = 2.5$ değeri kullanılmış ve deprem yükü azaltma katsayısı da $R=2$ olarak alınmıştır. Yapı İstanbul'un Fatih ilçesi'nde yer aldığı için deprem bölgesi değeri 2 olarak alınmış, böylece etkin yer ivmesi katsayısı $A_0 = 0.3$ olmuştur. Ayrıca bina önem katsayısı da $I=1$ olarak alınmıştır. Elastik spektral ivme $S_{ae}(T)$ ise şu şekilde hesaplanmıştır:

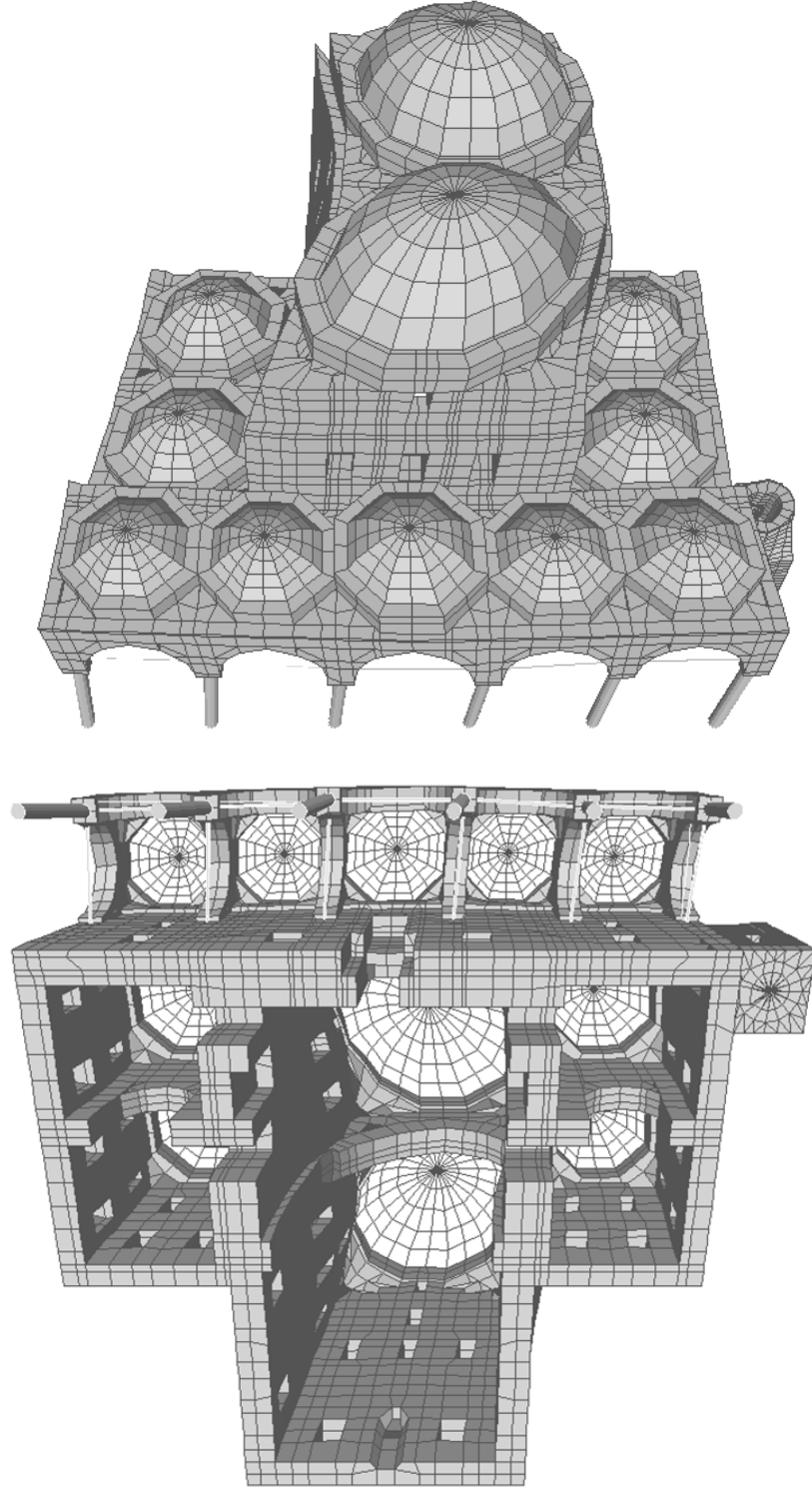
$$A(T) = A_0 \cdot I \cdot S(T) \quad (4.1)$$

$$S_{ae}(T) = A(T) \cdot g \quad (4.2)$$

$$S_{ae}(T) = A_0 \cdot I \cdot S(T) \cdot g = 0.3 \cdot 1 \cdot 2.5 \cdot 9.81 = 7.358 \text{ m/s}^2$$

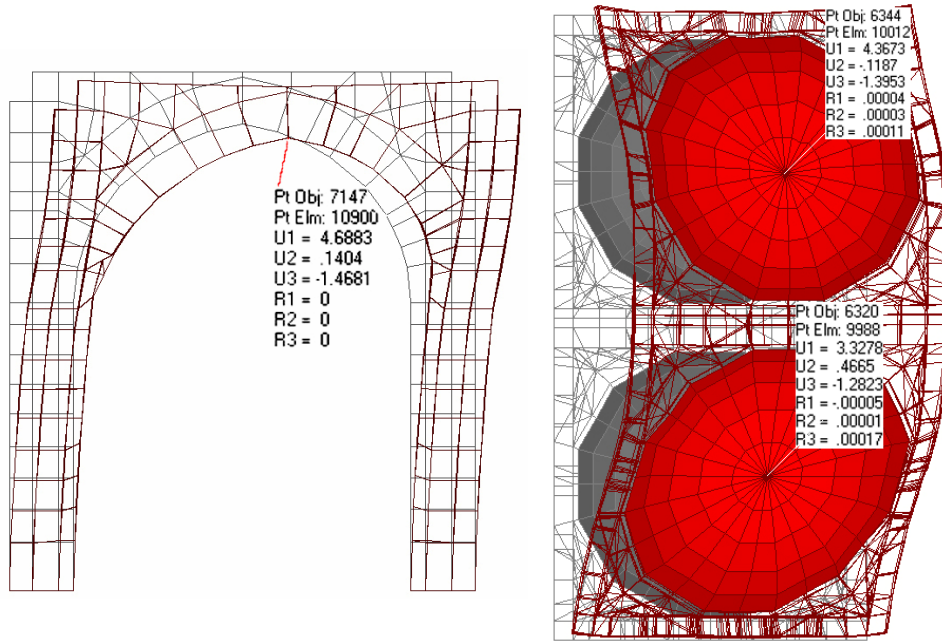
4.3.3.1. G + Ex Yüklemesi

Ölü yükler ve X doğrultusunda etki eden, deprem yükü azaltma katsayısı ($R=2$) ile azaltılmış deprem yükleri altında modal spektral çözümleme sonucu yapıda oluşan şekildeğişiklikler Şekil 4.43’de verilmiştir.



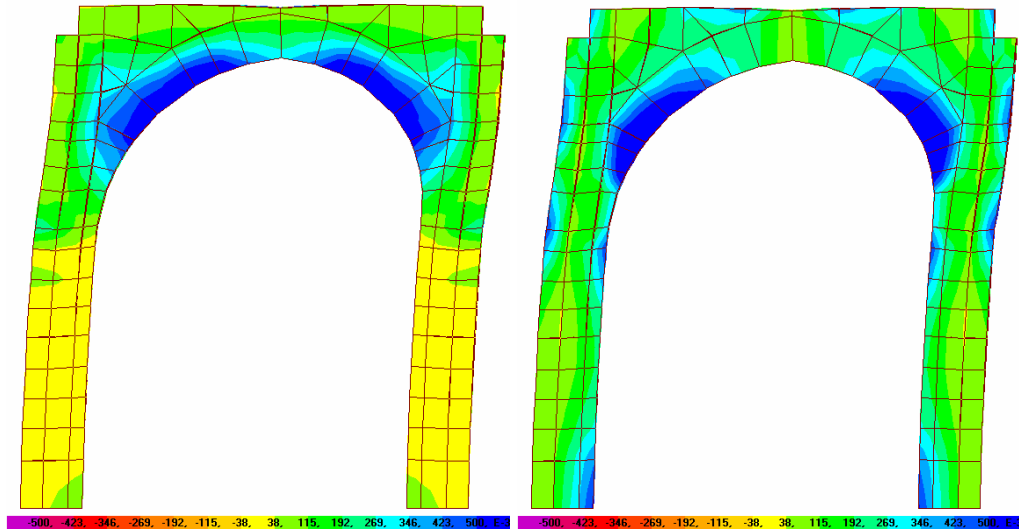
Şekil 4.43: G + Ex yüklemesi altında yapıdaki şekildeğişiklik

G+Ex yüklemesi, kemerde X yönünde 5 mm'ye yakın yanal öteleme meydana getirmektedir. Büyük kubbelerde ise yine X yönünde 4.3 mm ve 3.3 mm yerdeğiştirme oluşmuştur (Şekil 4.44).



Şekil 4.44: G + Ex yüklemesi altında büyük kemerde ve kubbelerdeki yerdeğiştirmeler (mm)

G+Ex yükleme durumunda yapıdaki en büyük gerilmelerin kemerde olduğu görülmüştür (Şekil 4.45). Kemerdeki S11 ve S33 gerilmeleri, 0.7 MPa değerine ulaşmaktadır. Gerilme değerinin malzeme için öngörülen çatlama emniyet gerilmesini ($\tau_0=0.3$ MPa) aştığı görülmektedir.

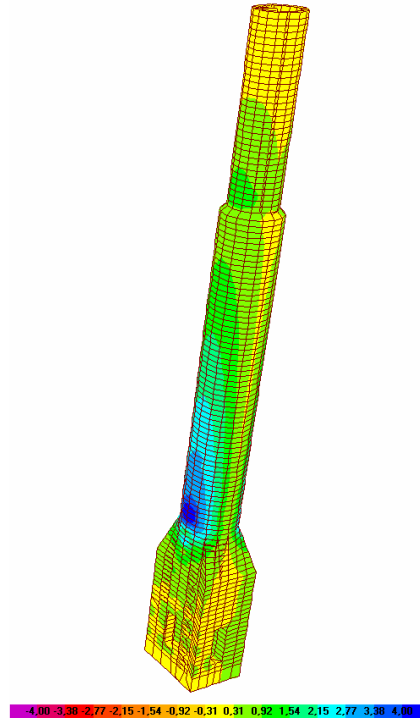


Şekil 4.45: G + Ex yüklemesi altında S11 ve S33 maksimum gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)

Yapı üzerinde yapılan statik ve dinamik bütün analizler büyük kemerin yapıdaki en kritik bölge olduğunu göstermektedir. Oluşabilecek depremde yapının zarar

görmemesi için kemerin lif takviyeli polimer levha türü malzeme ile güçlendirilmesi önerilmektedir. Yapının iç kısmının tamamen sıva ile kaplı olması bu uygulama açısından avantaj teşkil etmektedir. Kemer üzerindeki sıvanın kaldırılarak yapılacak lif takviyeli polimer levha türü malzeme uygulamasının ardından yeniden sıvanması neticesinde yapılacak güçlendirmenin yapının görünümünü değiştirmeyeceği, dolayısıyla yapının estetik ve tarihi değerini oluşturan mekânsal ve biçimsel özelliklerini değiştirmedeği, birinci bölümde sözü edilen koruma ilkelerine uygun olacağı açıktır.

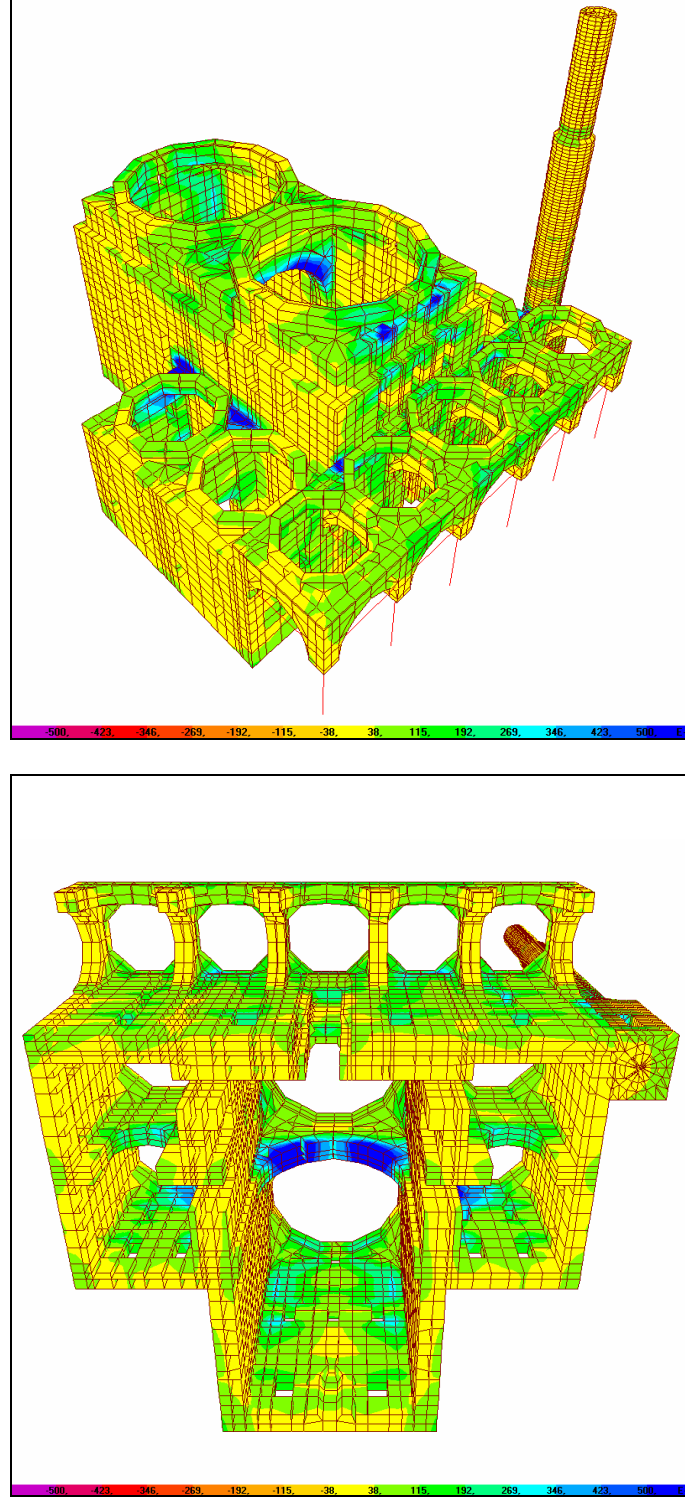
G+Ex yükleme durumunda, minarede de önemli gerilmeler meydana gelmektedir. Minarenin yüksekliği boyunca 1.5 MPa civarında oluşan S33 gerilmeleri, minarenin kaidesiyle birleştiği kritik bölgede en büyük değerine ulaşmakta ve 4 MPa olmaktadır (Şekil 4.46). Minarenin en üst bölgesinde X yönünde 54 mm yatay yerdeğiştirme meydana gelmektedir. Minarenin kaidesiyle birleştiği kritik bölgesinin lif takviyeli polimer levha türü malzeme ile takviye edilmesi önerilmektedir.



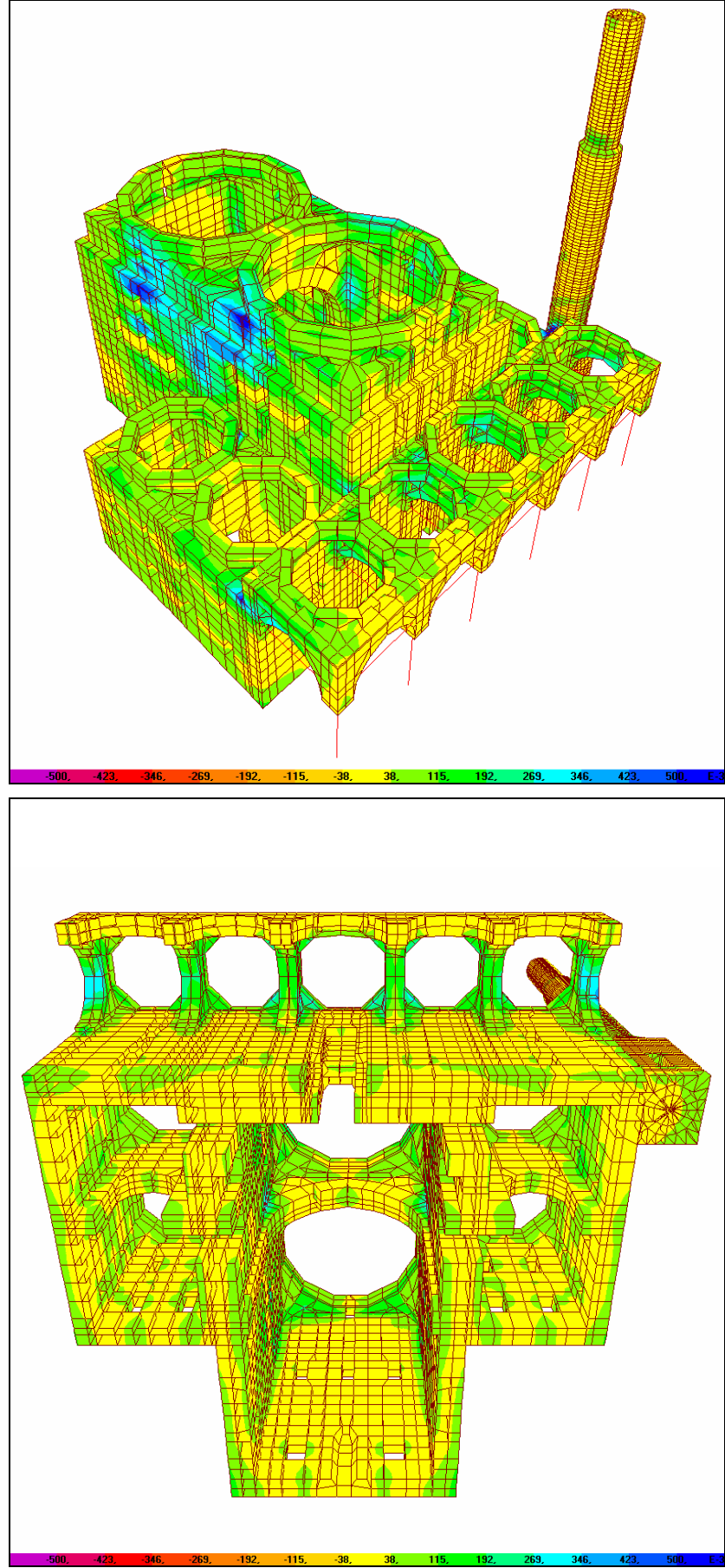
Şekil 4.46: G + Ex yüklemesi minarede oluşan gerilme dağılımı (N/mm²)

Kısaca G+Ex olarak ifade edilen yükleme durumunda; ölü yükler ve X doğrultusunda etki eden, deprem yükü azaltma katsayısı (R=2) ile azaltılan deprem yükleri altında modal spektral çözümleme sonucu hesaplanan S11, S22, S33, S12, S13, S23 gerilmeleri Şekil 4.47, 4.48, 4.49, 4.50, 4.51, 4.52’de verilmiştir.

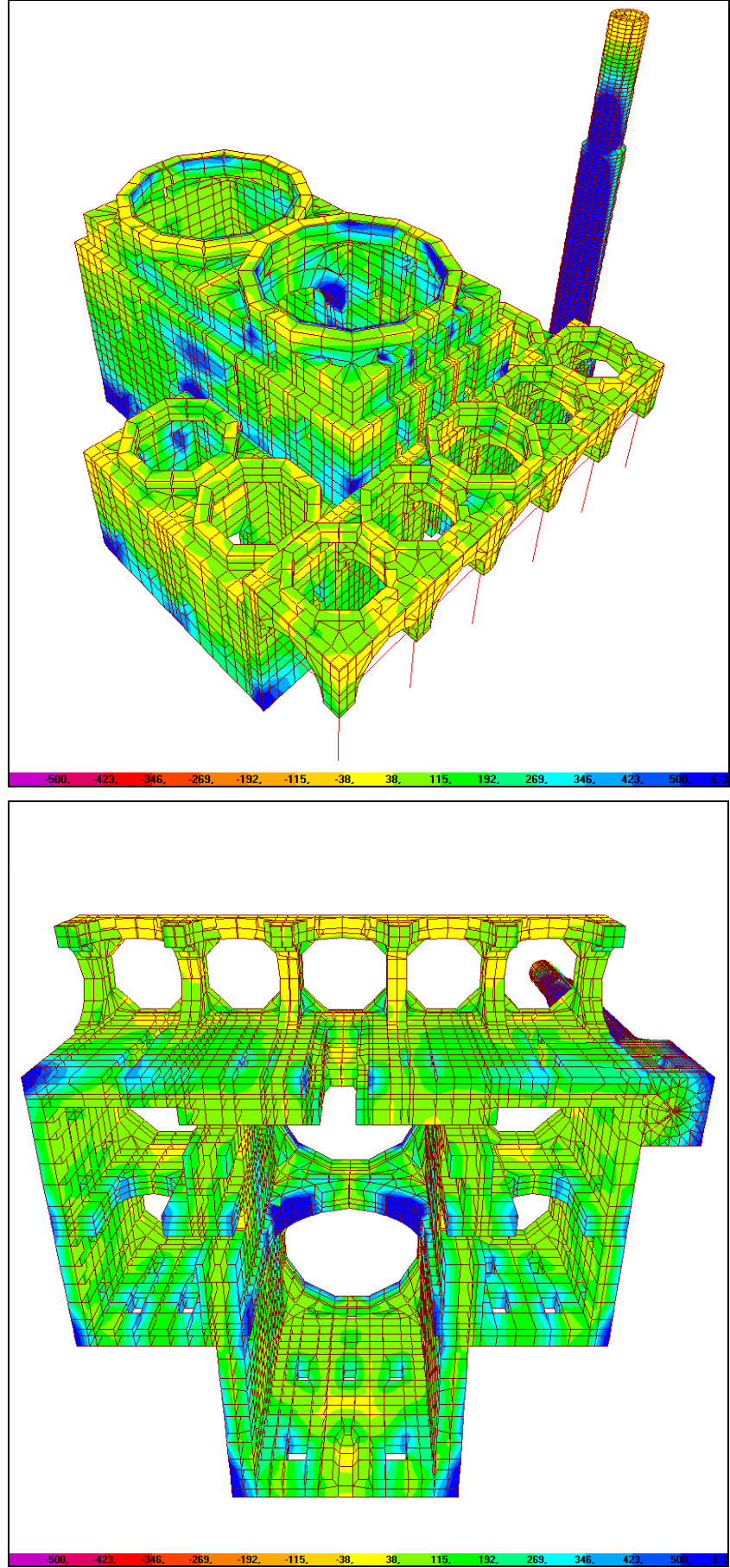
Gerilmelerdeki maksimum değer, genel olarak pozitif çıktığından, en elverişsiz değer olarak da malzemenin hassas olduğu çekme gerilmeleri gösterilmiştir. Malzemenin daha dirençli olduğu, en elverişsiz basınç değerlerini gösteren minimum gerilmeler ayrıca verilmemiştir. Ancak bunlar kontrol edilmiş ve basınç emniyet gerilmelerinin çok altında kaldığı görölmüştür.



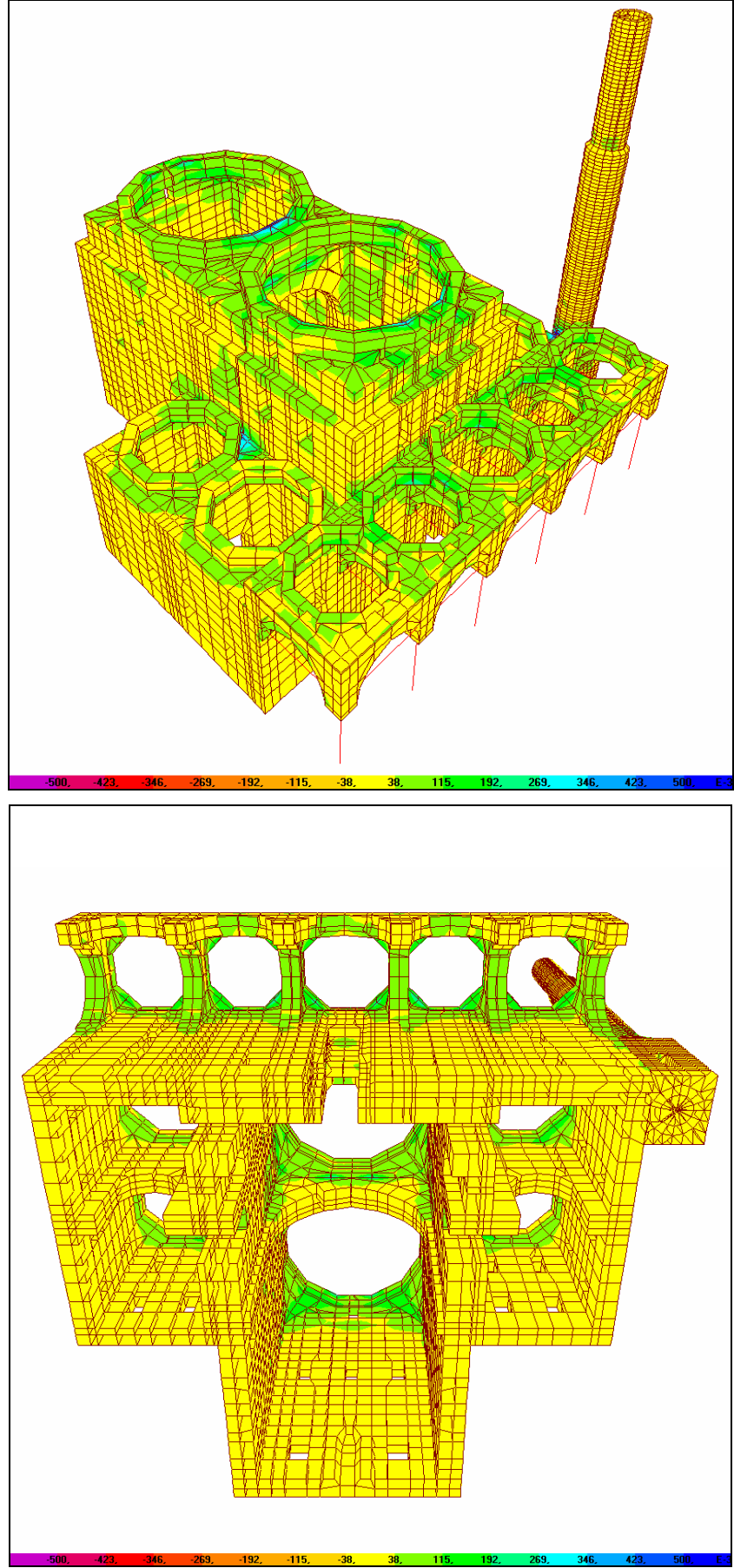
Şekil 4.47: G + Ex yüklemesi S11 (X doğrultusu) maksimum gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)



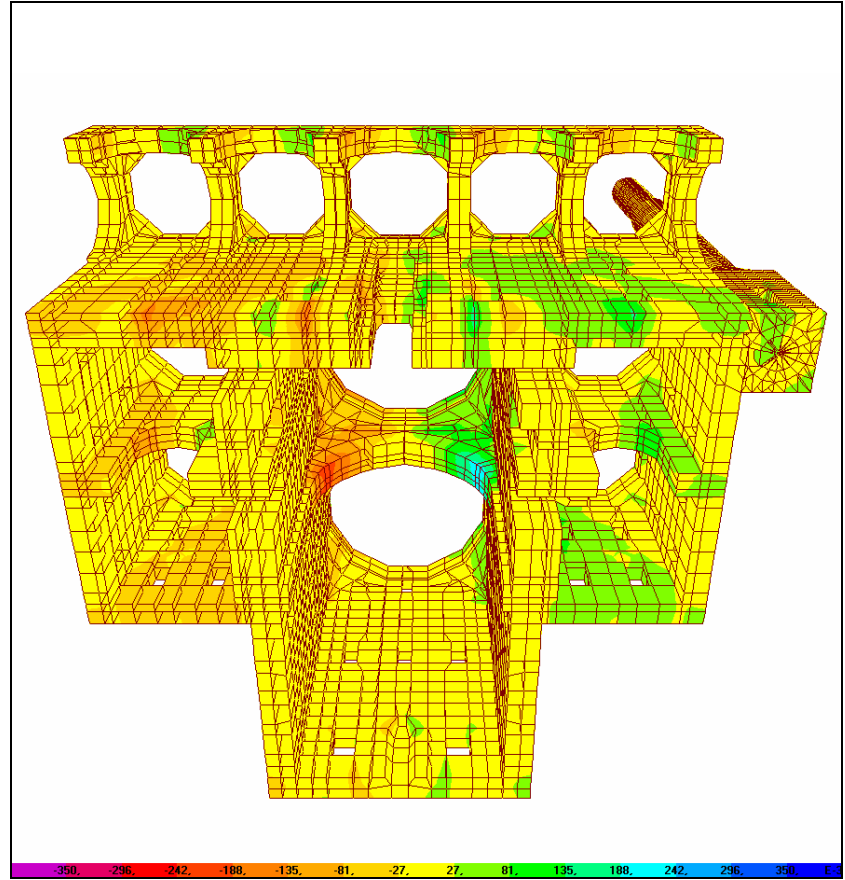
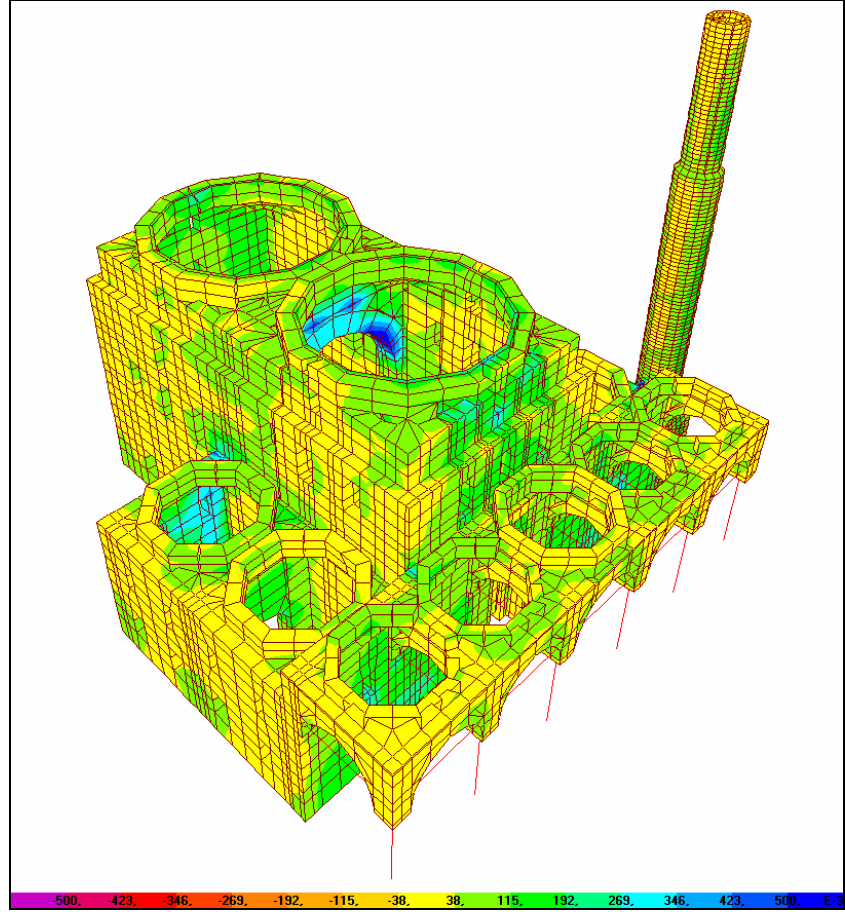
Şekil 4.48: G + Ex yüklemesi S22 (Y doğrultusu) maksimum gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)



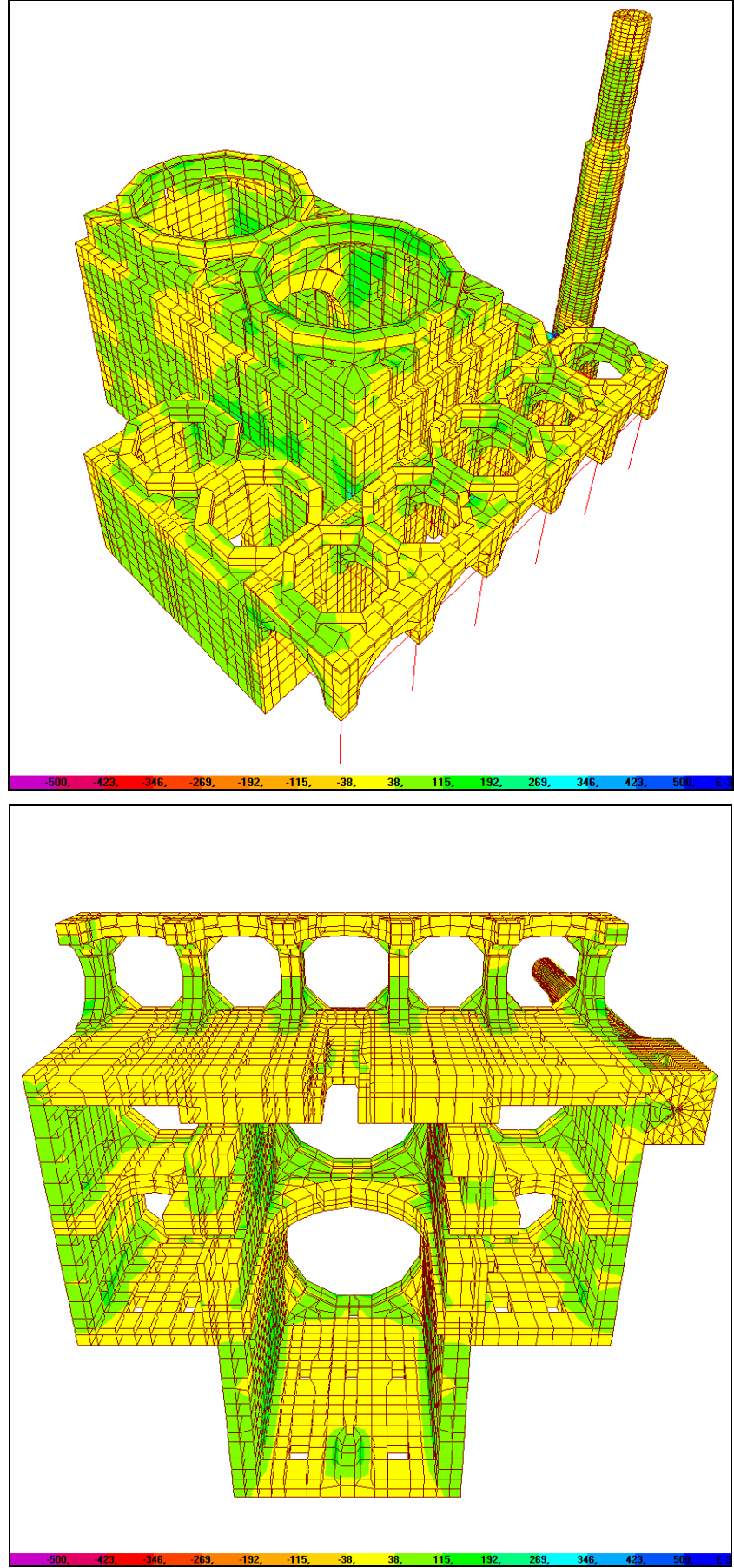
Şekil 4.49: G + Ex yüklemesi S33 (Z doğrultusu) maksimum gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)



Şekil 4.50: G + Ex yüklemesi S12 maksimum gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)

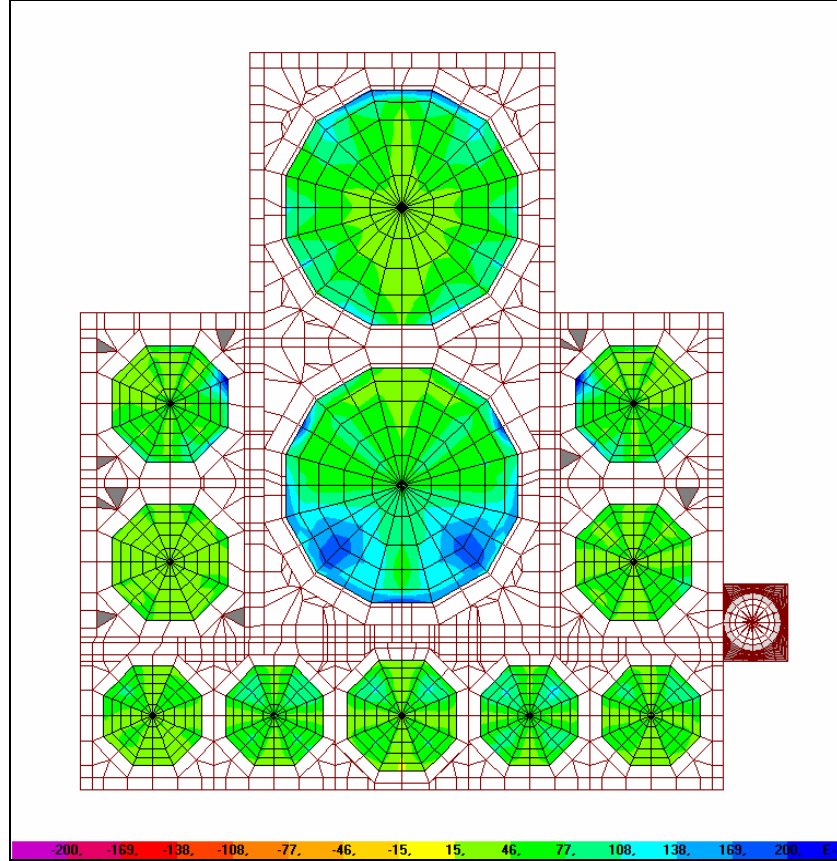


Şekil 4.51: G + Ex yüklemesi S13 maksimum gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)

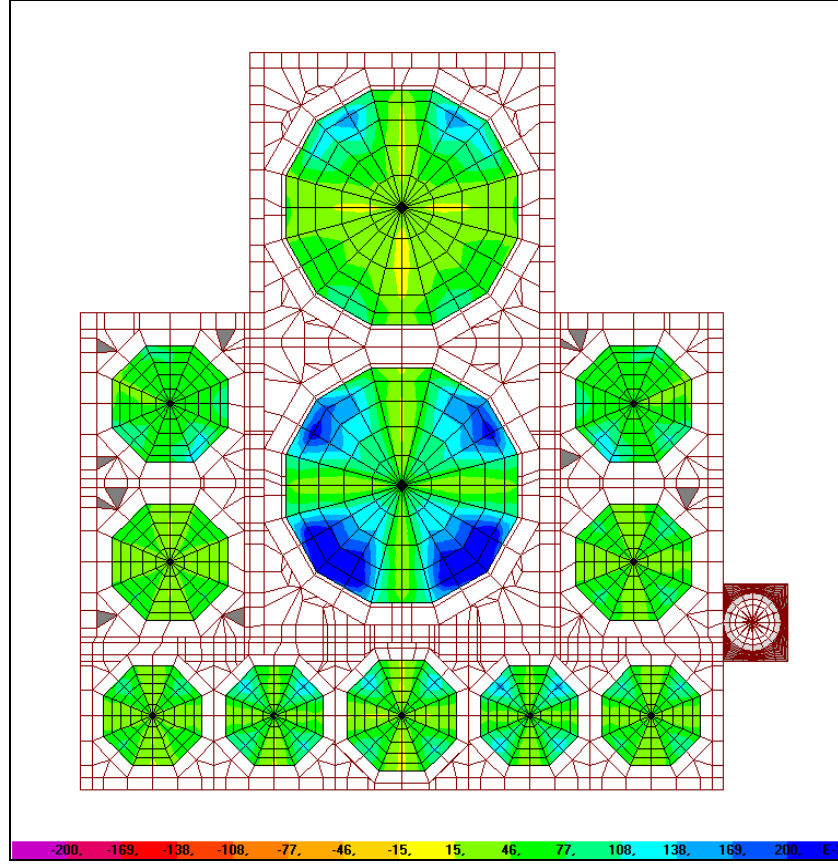


Şekil 4.52: G + Ex yüklemesi S23 maksimum gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)

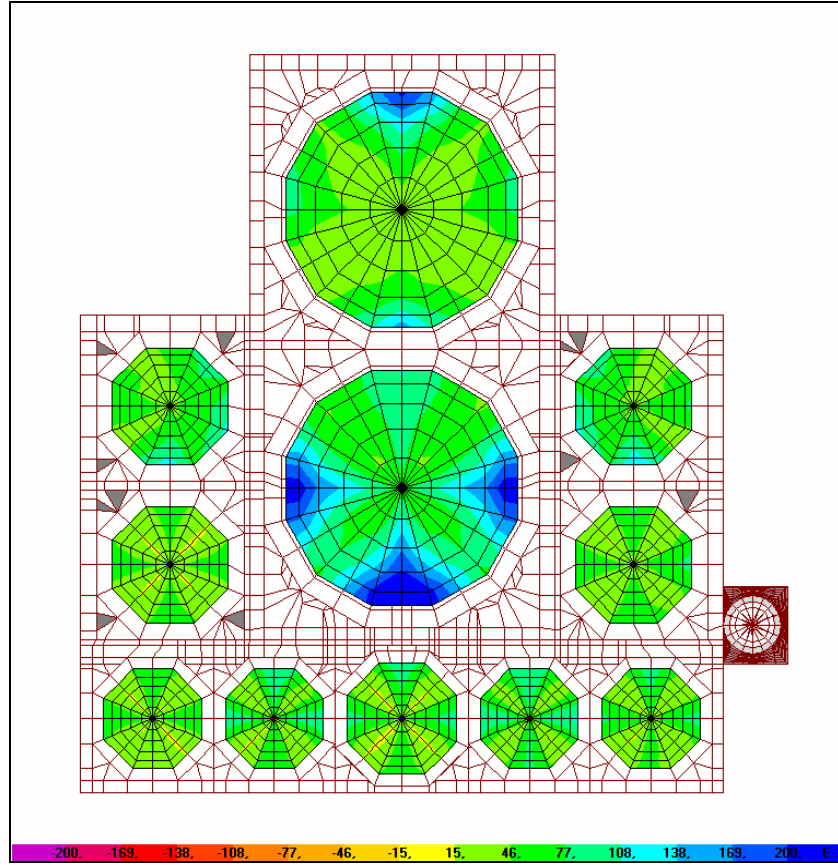
G+Ex yükleme durumunda büyük kubbelerdeki çekme gerilmeleri en fazla 0.2 MPa değerine ulaşmıştır. Yapının 80 cm kalınlığa sahip büyük kubbelerinin X doğrultusunda etki eden deprem yüklerine karşı yeterli dayanıma sahip oldukları söylenebilir. Daha güvenli durumdaki küçük kubbelerde gerilme değerleri ise en fazla 0,08 MPa değerine ulaşmaktadır. Yapıda kabuk elemanlarla modellenen kubbelerin S11, S22 ve S12 gerilme dağılımları Şekil 4.53, 4.54, 4.55’de görülmektedir.



Şekil 4.53: G + Ex yüklemesi S11 (X doğrultusu) gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)



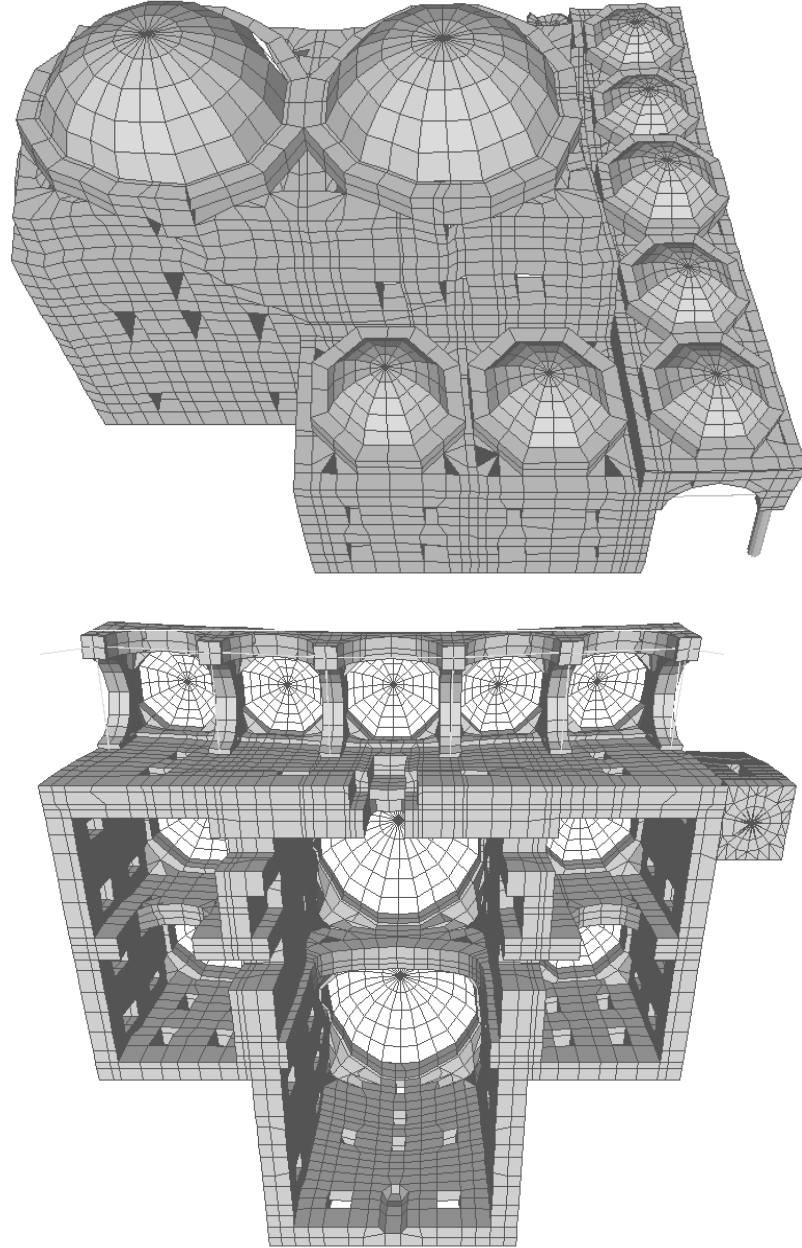
Şekil 4.54: G + Ex yüklemesi S22 (Y doğrultusu) gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)



Şekil 4.55: G + Ex yüklemesi S12 gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)

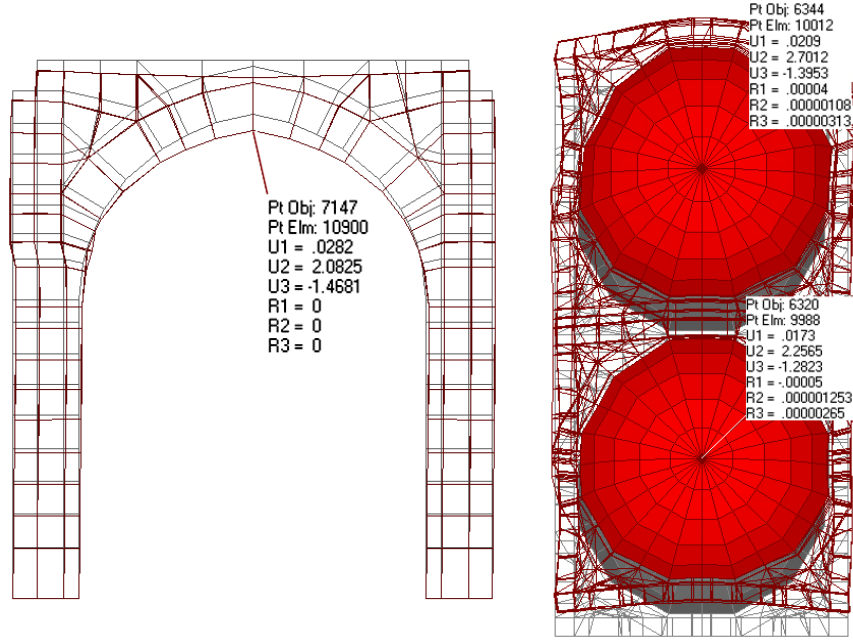
4.3.3.2. G + Ey Yükleme

Ölü yükler ve Y doğrultusunda etki eden, deprem yükü azaltma katsayısı ($R=2$) ile azaltılmış deprem yükleri altında modal spektral çözümleme sonucu yapıda oluşan şekildeğişiklikler Şekil 4.56’da verilmiştir.



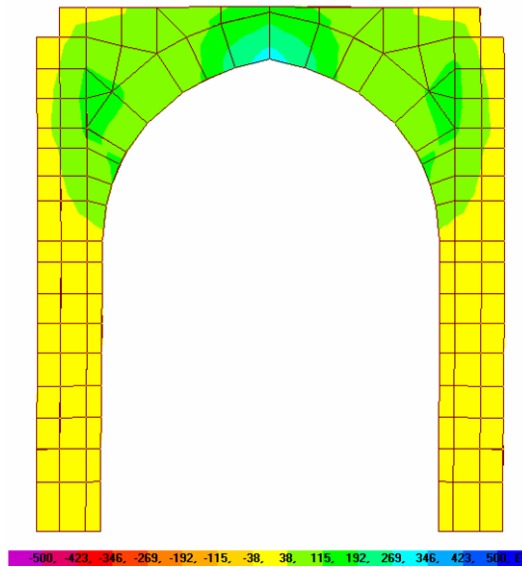
Şekil 4.56: G + Ey yüklemesi altında yapıdaki şekildeğişiklik

G+Ey yüklemesi, kermide Y yönünde 2 mm’ye yakın yanal öteleme meydana getirmektedir. Büyük kubbelerde ise yine Y yönünde sırasıyla 2.7 mm ve 2.3 mm yerdeğişiklik oluşmuştur (Şekil 4.57).



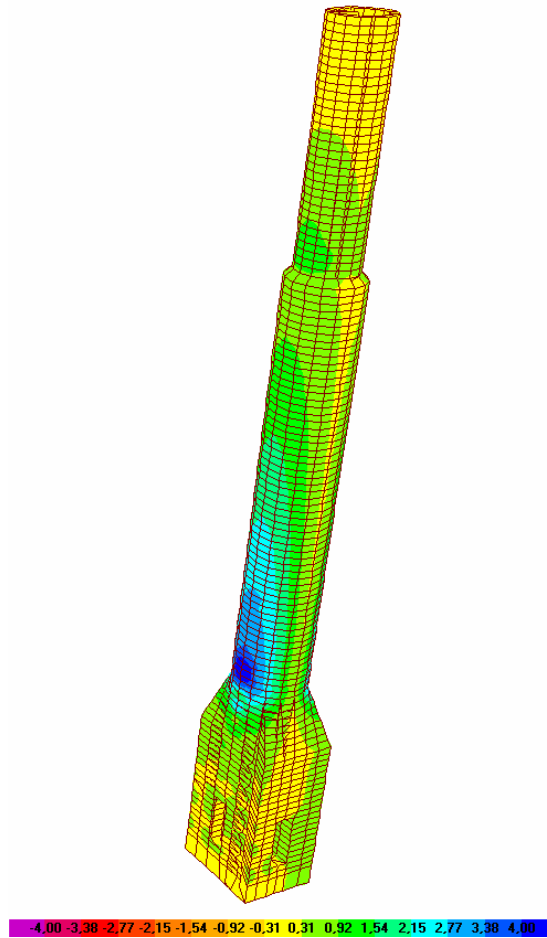
Şekil 4.57: G + Ey yüklemesi altında büyük kemerde ve kubbelerdeki yerdeğiştirmeler

G+Ey yükleme durumunda yapıdaki en büyük gerilmelerin kemerde olduğu görülmüştür (Şekil 4.58). Kemerdeki S11 gerilmeleri 0.3 MPa değerine ulaşmaktadır. X doğrultusunda etki eden deprem yüklerine göre gerilme değerlerinin yarı yarıya daha az olduğu görülmektedir. Yapının Y doğrultusunda uzanan duvarlarının sürekli olması, bu doğrultuda daha kararlı ve rijit olması, buna karşılık X doğrultusunda iki ana mekân arasında duvar olmaması neticesinde yapının bu doğrultuda zayıflığının bulunması, gerilmeler arasındaki farkı açıklamaktadır. Kısaca, Y doğrultusunda etki eden depremin, yapı üzerinde X doğrultusundaki kadar etkili olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.58: G + Ey yüklemesi S11 ve S33 maksimum gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)

G+Ex yükleme durumunda olduğu gibi G+Ey yüklemesinde de, minarede önemli gerilmeler meydana gelmektedir. G+EX yüklemesi ile aynı şekilde minarenin yüksekliği boyunca 1.5 MPa civarında oluşan S33 gerilmeleri, minarenin kaidesiyle birleştiği kritik bölgede en büyük değerine ulaşmakta ve 4 MPa olmaktadır (Şekil 4.59). Minarenin en üst bölgesinde Y yönünde 58 mm yatay yerdeğiştirme meydana gelmektedir. Minarenin kaidesiyle birleştiği kritik bölgesinin lif takviyeli polimer levha türü malzeme ile takviye edilmesi önerilmektedir.

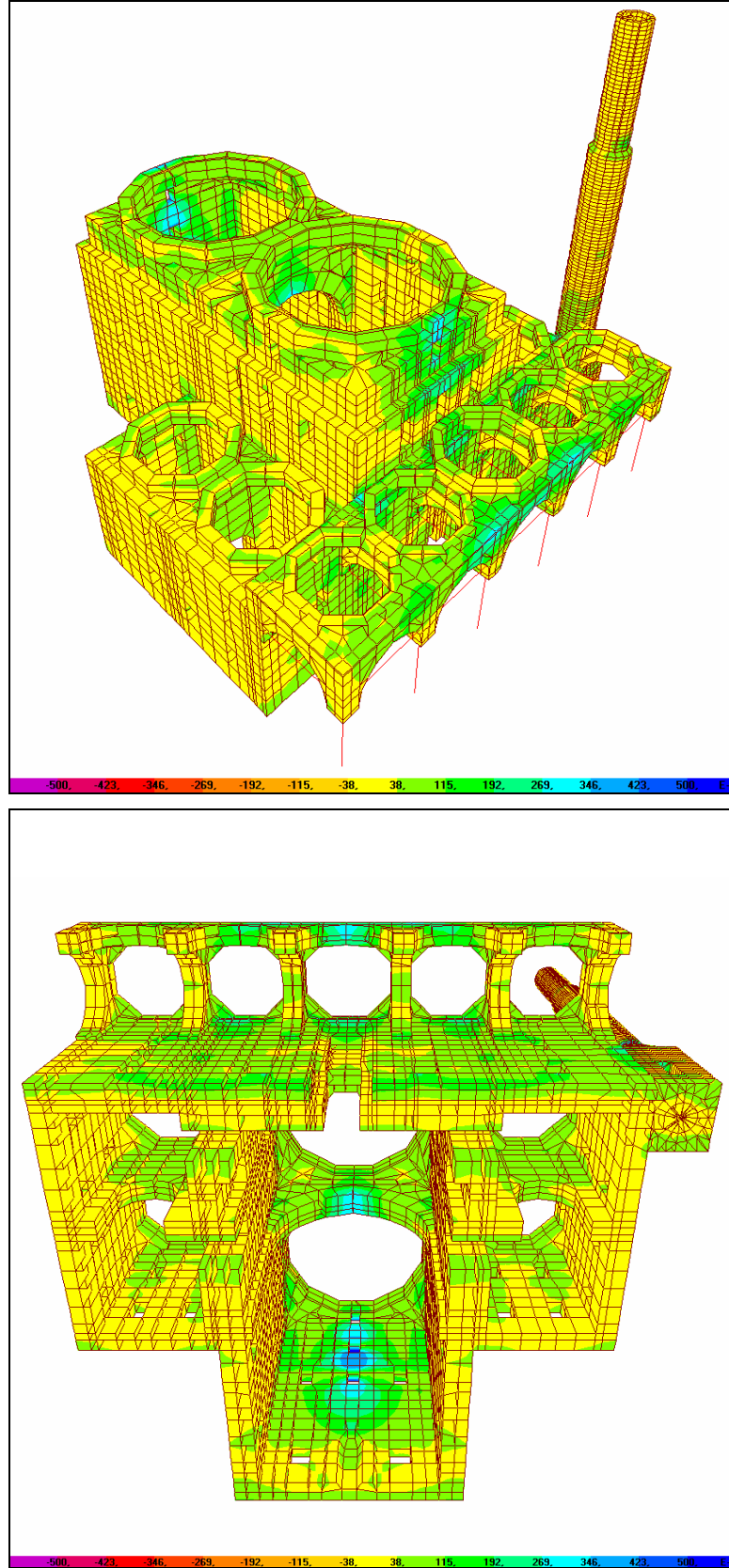


Şekil 4.59: G + Ey yüklemesi minarede oluşan gerilme dağılımı (N/mm²)

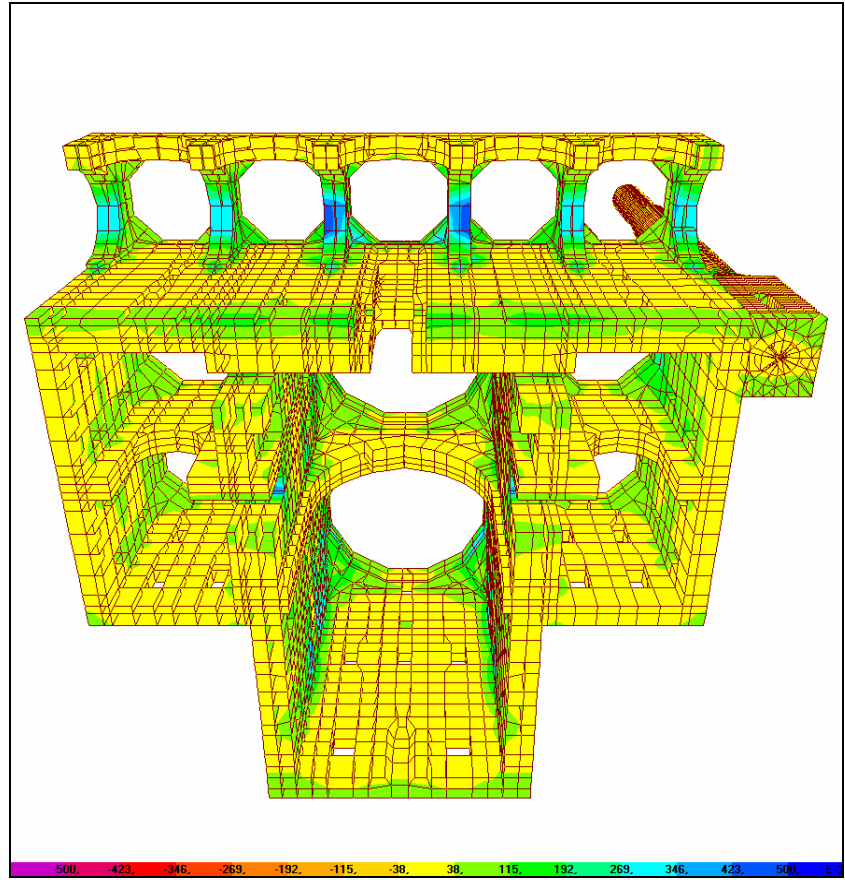
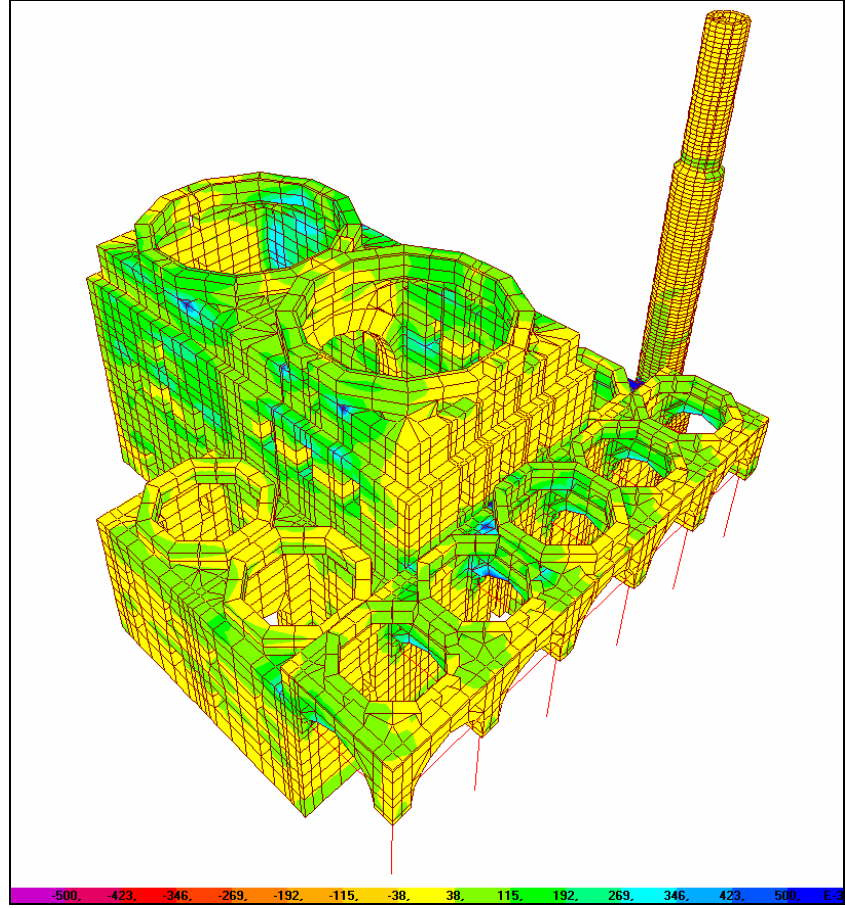
Kısaca G+Ey olarak ifade edilen yükleme durumunda; ölü yükler ve Y doğrultusunda etki eden, deprem yükü azaltma katsayısı (R=2) ile azaltılan deprem yükleri altında modal spektral çözümleme sonucu hesaplanan S11, S22, S33, S12, S13, S23 gerilmeleri Şekil 4.60, 4.61, 4.62, 4.63, 4.64, 4.65’de verilmiştir.

Gerilmelerdeki maksimum değer, genel olarak pozitif çıktığından, en elverişsiz değer olarak da malzemenin hassas olduğu çekme gerilmeleri gösterilmiştir. Malzemenin daha dirençli olduğu, en elverişsiz basınç değerlerini gösteren minimum gerilmeler

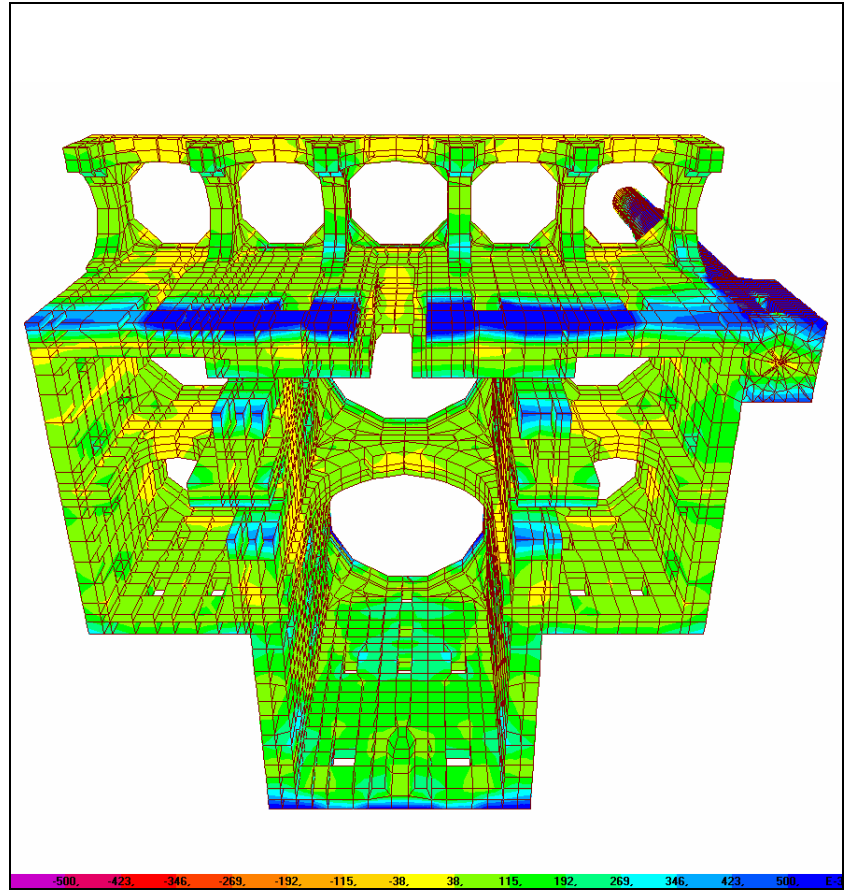
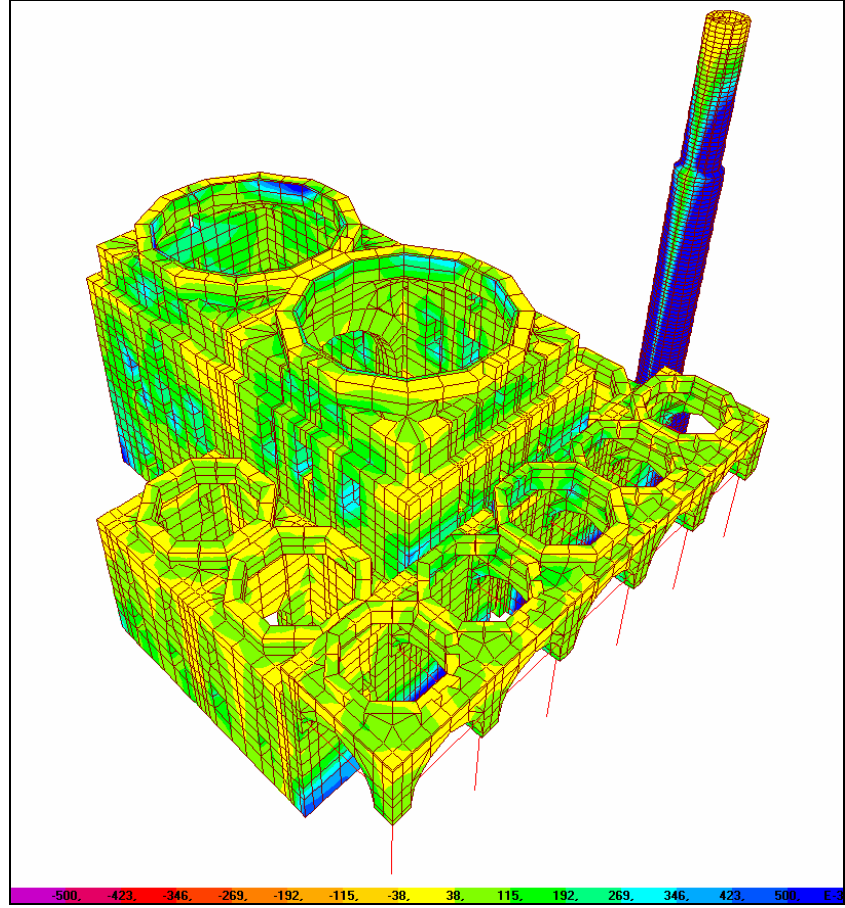
ayrıca verilmemiştir. Ancak bunlar kontrol edilmiş ve basınç emniyet gerilmelerinin çok altında kaldığı görülmüştür.



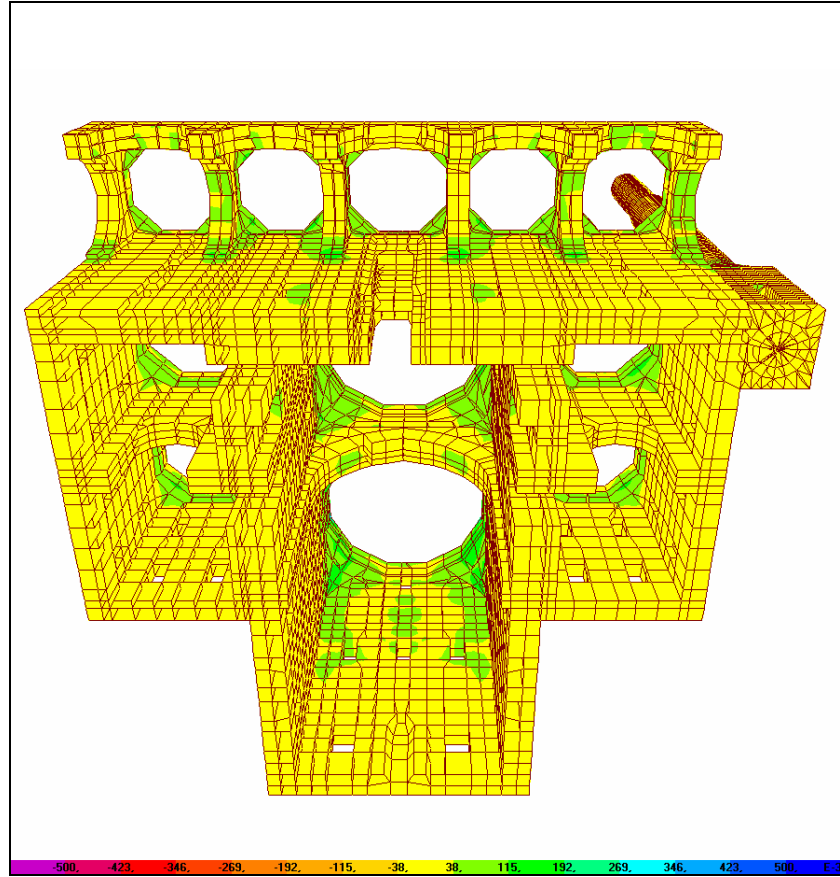
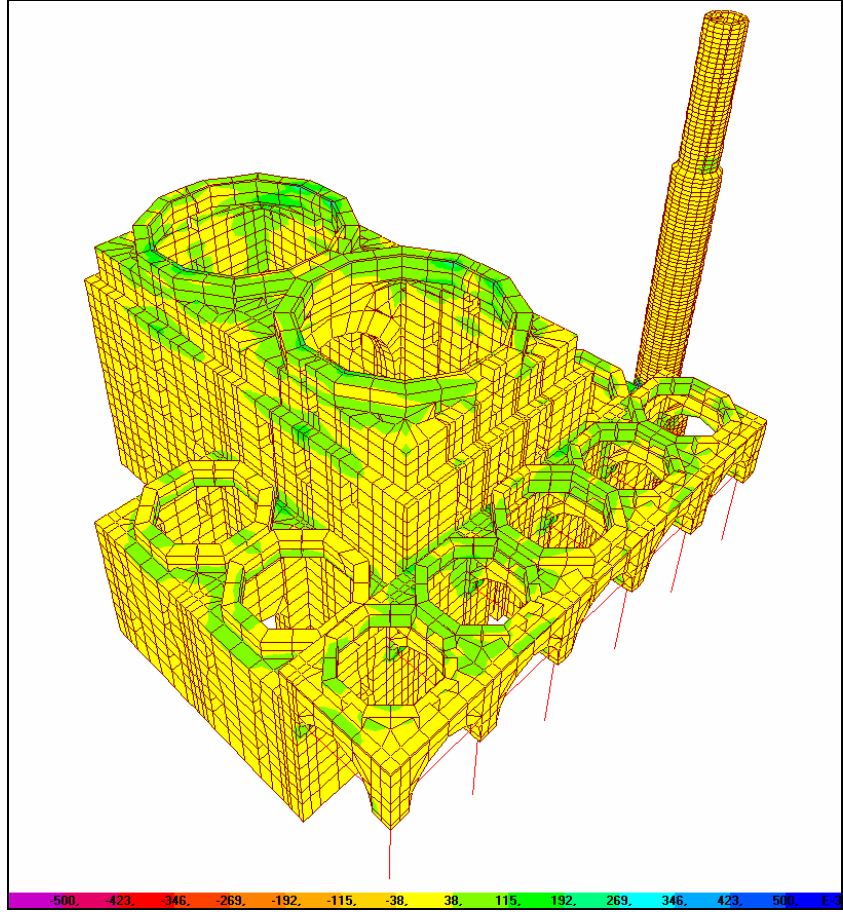
Şekil 4.60: G + Ey yüklemesi S11 (X doğrultusu) maksimum gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)



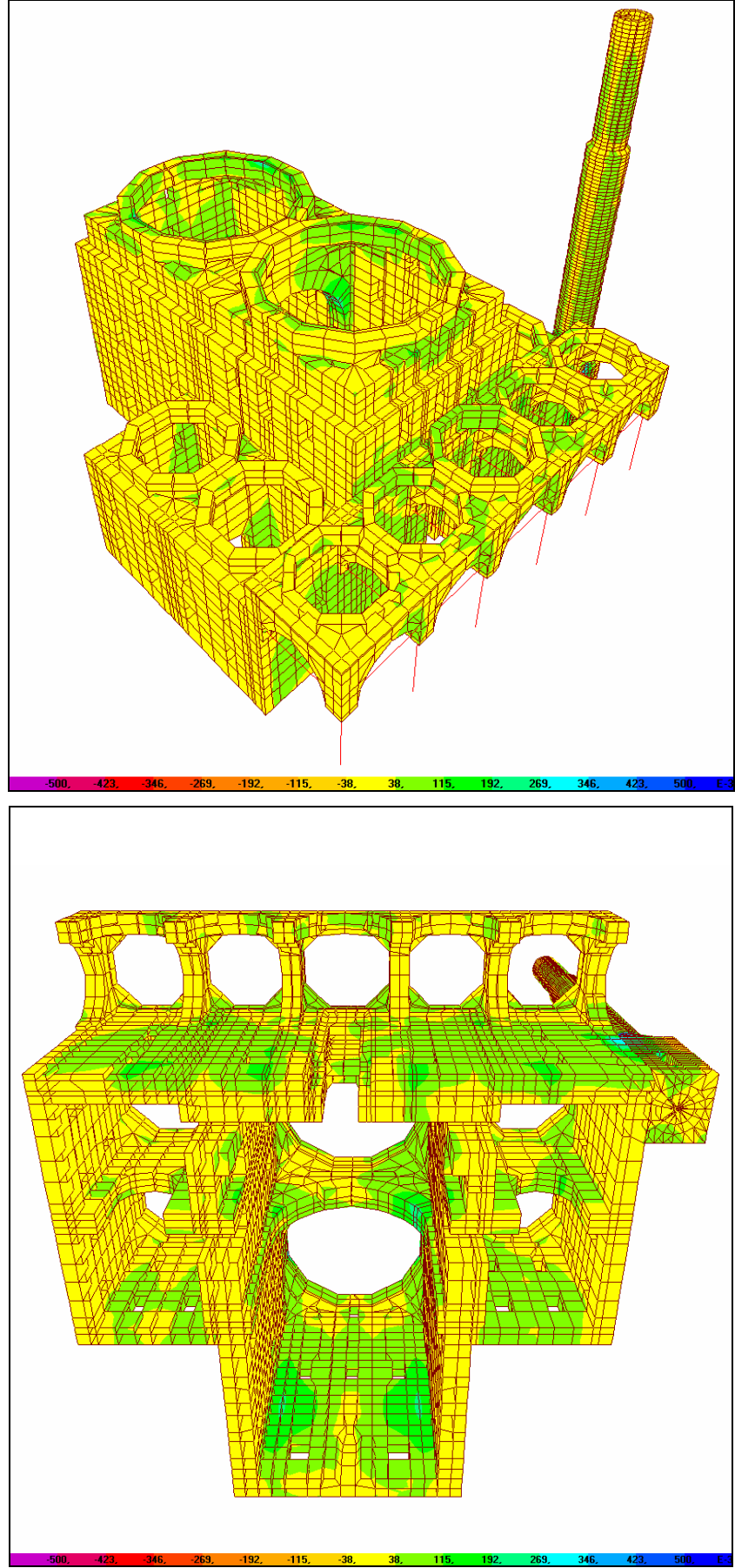
Şekil 4.61: G + Ey yüklemesi S22 (Y doğrultusu) maksimum gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)



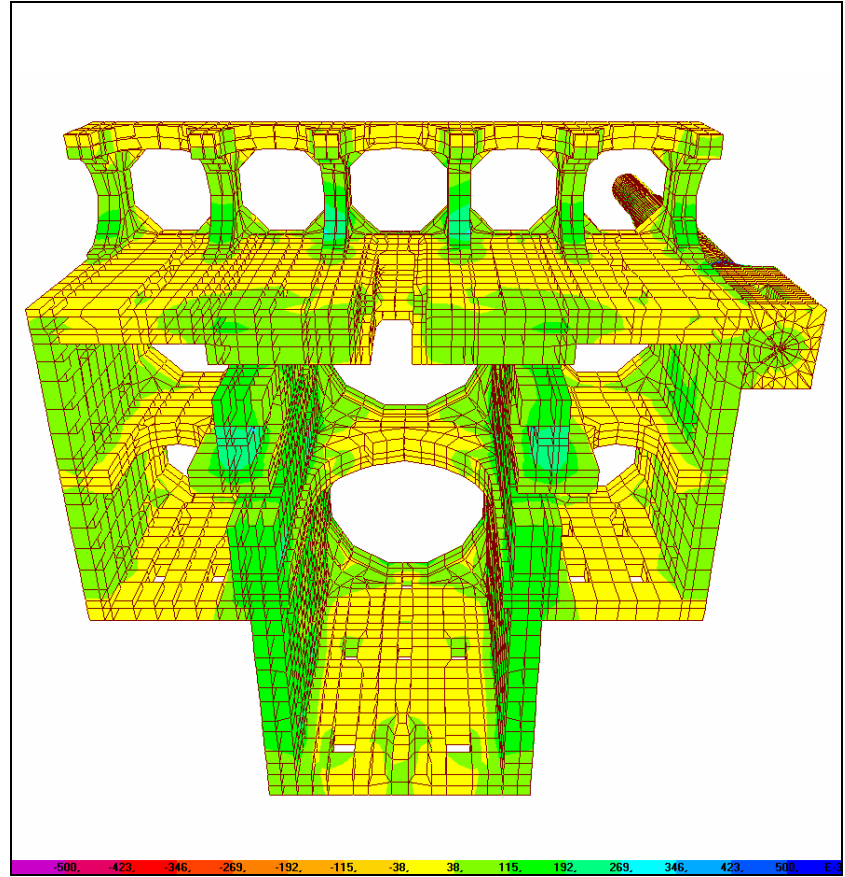
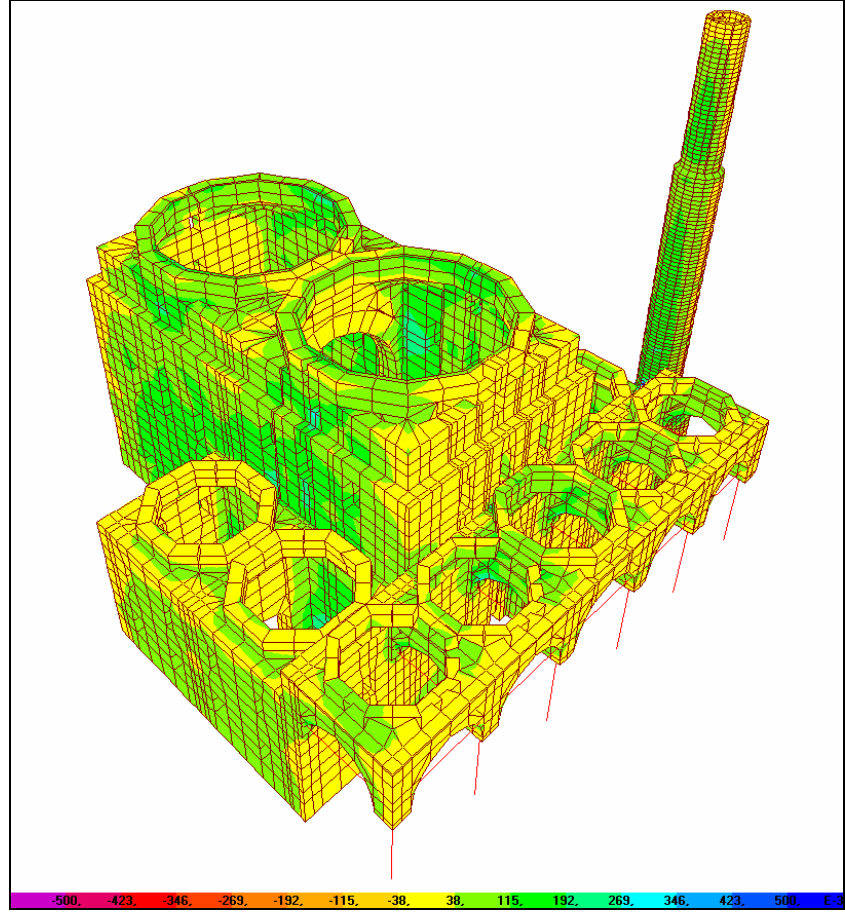
Şekil 4.62: G + Ey yüklemesi S33 (Z doğrultusu) maksimum gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)



Şekil 4.63: G + Ey yüklemesi S12 maksimum gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)

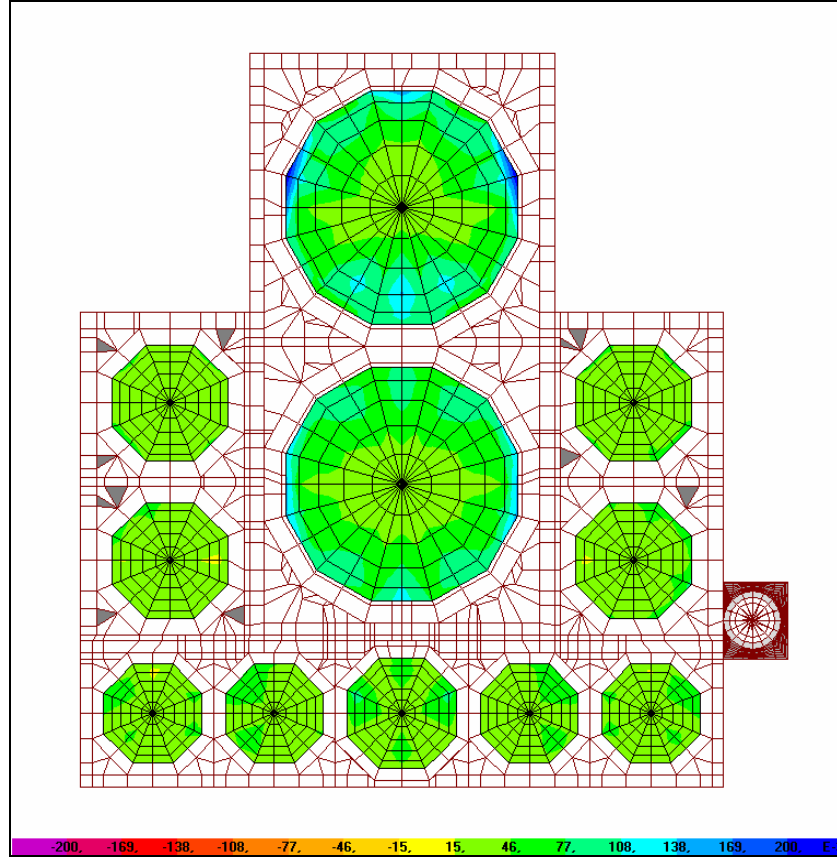


Şekil 4.64: G + Ey yüklemesi S13 maksimum gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)

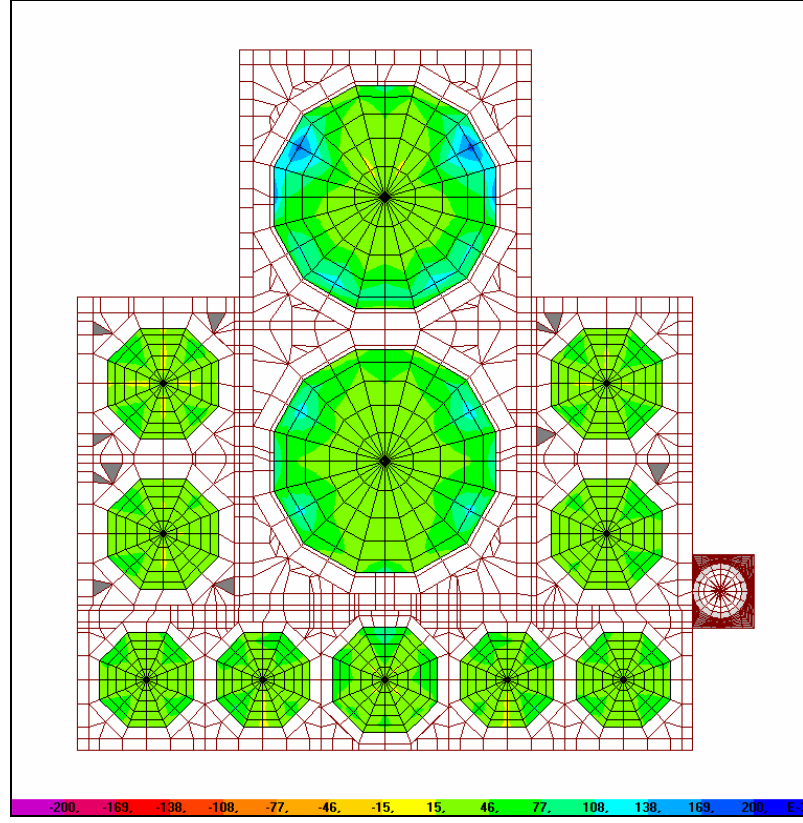


Şekil 4.65: G + Ey yüklemesi S23 maksimum gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)

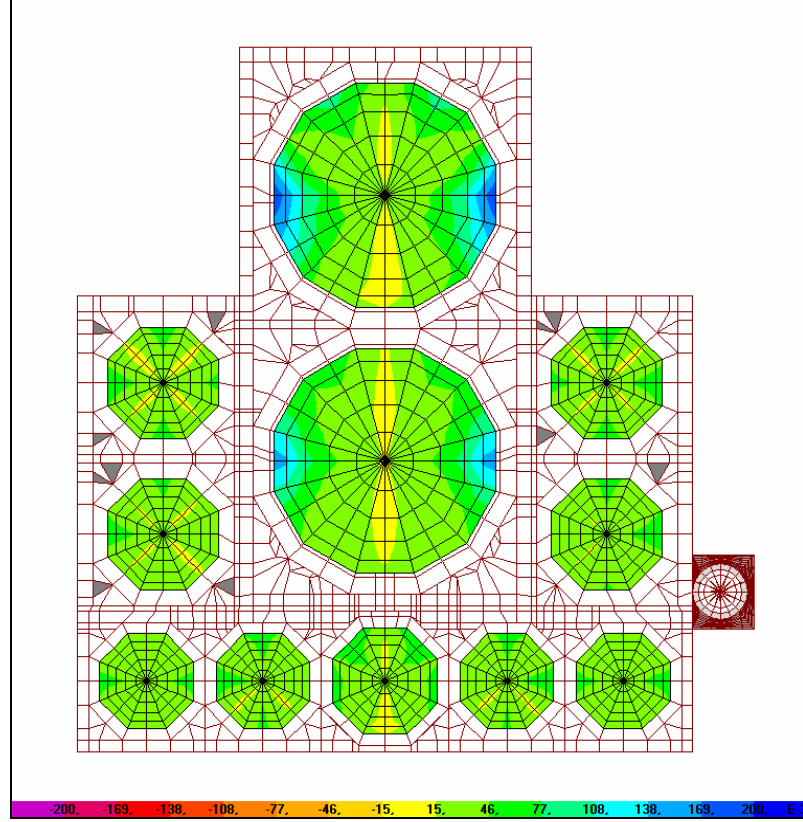
G+Ey yükleme durumunda büyük kubbelerdeki çekme gerilmeleri en fazla 0.2 MPa değerine ulaşmıştır. Yapının 80 cm kalınlığına sahip büyük kubbelerinin Y doğrultusunda etki eden deprem yüklerine karşı yeterli dayanıma sahip oldukları söylenebilir. Daha güvenli durumdaki küçük kubbelerde gerilme değerleri ise en fazla 0,08 MPa değerine ulaşmaktadır. Yapıda kabuk elemanlarla modellenen kubbelerin S11, S22 ve S12 gerilme dağılımları Şekil 4.66, 4.67, 4.68’de görülmektedir.



Şekil 4.66: G + Ey yüklemesi S11 (X doğrultusu) maksimum gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)



Şekil 4.67: G + Ey yüklemesi S22 (Y doğrultusu) maksimum gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)



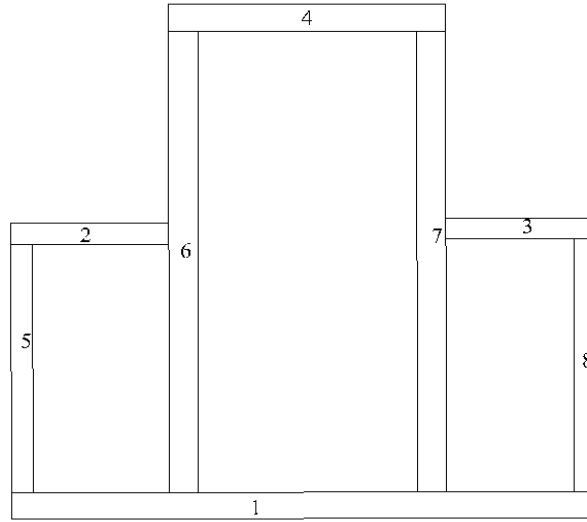
Şekil 4.68: G + Ey yüklemesi S12 maksimum gerilme dağılımı ($10^{-3} \times \text{N/mm}^2$)

4.3.4. Deprem Yönetmeliğine Göre Kontrol

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007'nin yığma binalar için depreme dayanıklı tasarım kurallarını açıklayan beşinci bölümüne göre, duvarda oluşan kayma gerilmesi, duvar kayma emniyet gerilmesi τ_{em} ile karşılaştırılacaktır.

$$\tau_{em} = \tau_0 + \mu\sigma \quad (4.3)$$

Bu denklemde τ_{em} = Duvar kayma emniyet gerilmesi (MPa), τ_0 = duvar çatlama emniyet gerilmesi (MPa), μ = sürtünme katsayısıdır.



Şekil 4.69: Yapının şematik gösterimi ve duvarların numaralandırılması

Hesaplarda kontrol edilen duvarlar şematik olarak Şekil 4.68'de gösterilmiştir.

Tablo 4.6: Kayma gerilmeleri Kontrolü (G+Ex)

Duvar No	σ (Duvar Düşey Gerilmesi MPa)	μ	$\mu\sigma$	τ_0	$\tau_{em} = \tau_0 + \mu\sigma$	τ (Duvar Kayma Gerilmesi MPa)
1	0,60	0,5	0,300	0,15	0,450	0,200
2	0,25	0,5	0,125	0,15	0,275	0,250
3	0,25	0,5	0,125	0,15	0,275	0,250
4	0,40	0,5	0,200	0,15	0,350	0,200
5	0,25	0,5	0,125	0,15	0,275	0,150
6	0,45	0,5	0,225	0,15	0,375	0,150
7	0,45	0,5	0,225	0,15	0,375	0,150
8	0,25	0,5	0,125	0,15	0,275	0,150
Minare	0,50	0,5	0,250	0,10	0,350	0,400

Tablo 4.7: Kayma gerilmeleri Kontrolü (G+Ey)

Duvar No	σ (Duvar Düşey Gerilmesi MPa)	μ	$\mu\sigma$	τ_0	$\tau_{em} = \tau_0 + \mu\sigma$	τ (Duvar Kayma Gerilmesi MPa)
1	0,60	0,5	0,300	0,15	0,450	0,100
2	0,25	0,5	0,125	0,15	0,275	0,100
3	0,25	0,5	0,125	0,15	0,275	0,100
4	0,40	0,5	0,200	0,15	0,350	0,150
5	0,25	0,5	0,125	0,15	0,275	0,150
6	0,45	0,5	0,225	0,15	0,375	0,250
7	0,45	0,5	0,225	0,15	0,375	0,250
8	0,25	0,5	0,125	0,15	0,275	0,150
Minare	0,50	0,5	0,250	0,10	0,350	0,400

Hesaplarda yapının duvarları için $\tau_0 = 0.15$ (tuğla duvar), minare için $\tau_0 = 0.10$ (taş duvar) olarak alınmıştır. Sürtünme katsayısı ise yönetmeliğin ön gördüğü şekilde $\mu = 0.5$ olarak alınmıştır. τ kayma gerilmeleri, üç boyutlu sonlu eleman modeli üzerinde yapılan modal spektral çözümlemelerden elde edilmiştir.

Deprem yönetmeliğine göre yapılan kontrolde Tablo 4.6’da ve 4.7’de görüldüğü gibi bütün duvarlarda duvar kayma gerilmeleri, kayma emniyet gerilmelerinden küçük çıkmaktadır. Minarede ise kayma emniyet gerilmesinin bir miktar aşıldığı görülmektedir. Olası bir depremde, tedbir alınmadığı takdirde, gerilmelerin en yüksek değerlere ulaştığı minarenin kaidesiyle birleştiği bölgede hasar oluşabileceği tahmin edilmektedir. Bu bölgenin lif takviyeli polimer levha türü malzeme ile güçlendirilmesi önerilmektedir.

5. SONUÇ

Tarihi yığma yapıların onarım ve güçlendirilmesi konusu, tarihi mirasın korunması bakımından önem taşımaktadır. Yurdumuzun her köşesinde pek çok sayıda bulunan tarihi yapıların en yakın zamanda deprem güvenliklerinin belirlenmesi ve depreme karşı yeterli emniyette bulunmayanların güçlendirilmesi gerektiği söylenebilir. Bu kapsamda yapılacak çalışmalara katkısı olacağı ümit edilen bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Tarihin yapıların onarım ve güçlendirilmesi ile ilgili en doğru kararlara mühendislik, mimarlık, restorasyon, sanat tarihi gibi farklı disiplinlerdeki uzmanların işbirliği sonucunda varılabilir.
2. Tarihi yapılarda yapılacak onarım ve güçlendirme çalışmalarında esas olan, yapının emniyetinin sağlanması ile kültürel ve sembolik değerlerinin muhafazası arasındaki dengenin korunmasıdır, bunun için en az müdahale ile en fazla koruma sağlayacak yöntemler tercih edilmelidir.
3. Tarihi yapılarda yapılacak onarım ve güçlendirme çalışmalarında gününbirlik geçici tedbirler almak yerine kalıcılık ve sürekliliğinin sağlanması önemlidir.
4. Onarım ve güçlendirme safhasına geçmeden önce yapıdaki hasarlar ve sebepleri tespit edilmeli, zemin ve malzeme özellikleri gerekli deneylerle belirlenmelidir.
5. Yapının düşey ve deprem yükleri altında, statik ve dinamik çözümlemesi yapılarak yapının deprem güvenliğinin belirlenmesi gerekmektedir.

Çalışma kapsamında Murat Paşa Camii'nin sonlu eleman modeli hazırlanarak statik ve dinamik çözümlemesi yapılmış ve şu sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Yapının zati yükleri altında yapılan statik analizi sonucunda yapıdaki en büyük yerdeğiştirme, büyük kemerin tepe noktasında düşey doğrultuda 1.5 mm, en büyük gerilme yine aynı noktada 0.35 MPa olarak hesaplanmıştır. Gerilme değerinin malzeme için öngörülen çatlama emniyet gerilmesini ($\tau_0=0.3$ MPa) biraz aştığı görülmüş, yerinde yapılan incelemede burada çatlak olduğu tespit edilmiş ancak zati yükler altında bu durumun bir risk oluşturmayacağı sonucuna varılmıştır.

2. Modal spektral çözümleme neticesinde yapının X doğrultusunda etki eden depremde Y doğrultusundakine göre daha fazla şekil değiştirdiği ve gerilmelerin daha büyük değerler aldığı görülmüştür. Kubbelerdeki yerdeğiştirmeler, Y doğrultusunda etki eden deprem yükleri altında 2.7 ve 2.3 mm, X doğrultusunda etki eden deprem yükleri altında ise 4.3 ve 3.3 mm hesaplanmıştır. Büyük kemerdeki yerdeğiştirmeler ise Y doğrultusunda etki eden deprem yükleri altında 2mm, X doğrultusunda etki eden deprem yükleri altında 5mm olarak hesaplanmıştır. Gerilme değerleri her iki yükleme durumunda da büyük kemerde en büyük değere ulaşmıştır. Bu noktadaki gerilmeler X doğrultusunda etki eden deprem yükleri altında 0.7 MPa, Y doğrultusunda etki eden deprem yükleri altında ise 0.3 MPa olarak hesaplanmıştır.
3. Modal spektral çözümleme neticesinde, minarenin en üst noktasında X doğrultusunda etki eden deprem yükleri altında 54 mm, Y doğrultusunda etki eden deprem yükleri altında ise 58 mm yerdeğiştirme hesaplanmıştır. Gerilme değerleri ise her iki yükleme durumunda da minarenin kaidesiyle birleştiği kritik bölgede 4 MPa mertebesine ulaşmıştır.
4. Deprem yönetmeliğindeki spektrum değeri ve deprem yükü azaltma katsayısı göz önüne alınarak X doğrultusunda etki eden deprem yükleri altında yapılan modal spektral çözümleme neticesinde hesaplanan gerilmelerin, yapıda özellikle büyük kemer bölgesinde ve minarede hasara sebep olabileceği öngörülmüş, kemerin ve minarenin lif takviyeli polimer levha türü malzeme ile güçlendirilmesi önerilmiştir.
5. Büyük kemerin yüzeyinin sıvalı olması, lif takviyeli polimer levha türü malzeme ile yapılacak güçlendirmenin üzerine tekrar sıva yapılabilmesini mümkün kılacaktır. Böylece, kemerde yapılacak müdahale sonucunda yapının görünümünün değişmeyeceği, dolayısıyla, yapının estetik ve tarihi değerini oluşturan mekânsal ve biçimsel özelliklerinin korunacağı ve çalışmanın birinci bölümde sözü edilen koruma ilkelerine uygun olacağı düşünülmektedir.
6. Çalışmada son olarak, deprem yönetmeliğinin beşinci bölümüne göre; yapının duvarlarında oluşan kayma gerilmeleri, duvar kayma emniyet gerilmesi ile karşılaştırılmış; yapının oldukça kalın olan duvarlarının kayma gerilmelerine karşı emniyetli olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, 2004. Deprem Şurası – 2004 Komisyon Raporları, T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Basım İşliğı, İstanbul.
- [2] **Koçak, A.**, 1999. Tarihi yapıların statik ve dinamik yükler altında lineer ve nonlinear analizi, Küçük Ayasofya Camii örneğı, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Ekşi, D., Aköz, F.**, 2004. A system approach for examination and determination in historical buildings, *Proceedings of the Fourth International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, Possibilities of Numerical and Experimental Techniques*, Padova, Italy, November 10-13, Vol.1, s. 95-102.
- [4] **Celep, Z., Kumbasar, N.**, 2004. Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı, İstanbul.
- [5] **Sesigür, H., Çelik, O.C., Çılı, F.**, 2007. Tarihi yapılarda taşıyıcı bileşenler, hasar biçimleri, onarım ve güçlendirme. *İstanbul Bülten*, **89**, s. 10-21.
- [6] **Saraç, M.M.**, 2003. Tarihi yığma kagir yapıların güçlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] **Sert, S., Önalp, A., Arel, E.**, 2007. Koni penetrasyon deneyi ile kazık kapasitesinin belirlenmesi, Adana.
- [8] **Çetin, K.Ö., Unutmaz, B.**, 2004. Zemin sıvılaşması ve sismik zemin davranışı, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, **430**, s. 32-35.
- [9] **Aköz, F.**, 2005. Yığma kagir yapılarda hasar tespiti, *YDGA 2005*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [10] **Postacioğlu, B.**, 1981. Cisimlerin yapısı ve özellikleri – iç yapı ve mekanik özellikler, cilt1, İTÜ Matbaası, İstanbul.
- [11] **Binda, L., Cantini, L., Saisi, Antonella, Zanzi, L.**, 2006. Non destructive techniques applied to the pillars of the syracuse cathedral, *1st International Conference on Restoration of Heritage Masonry Structures*, Cairo, Egypt, April 24-27.

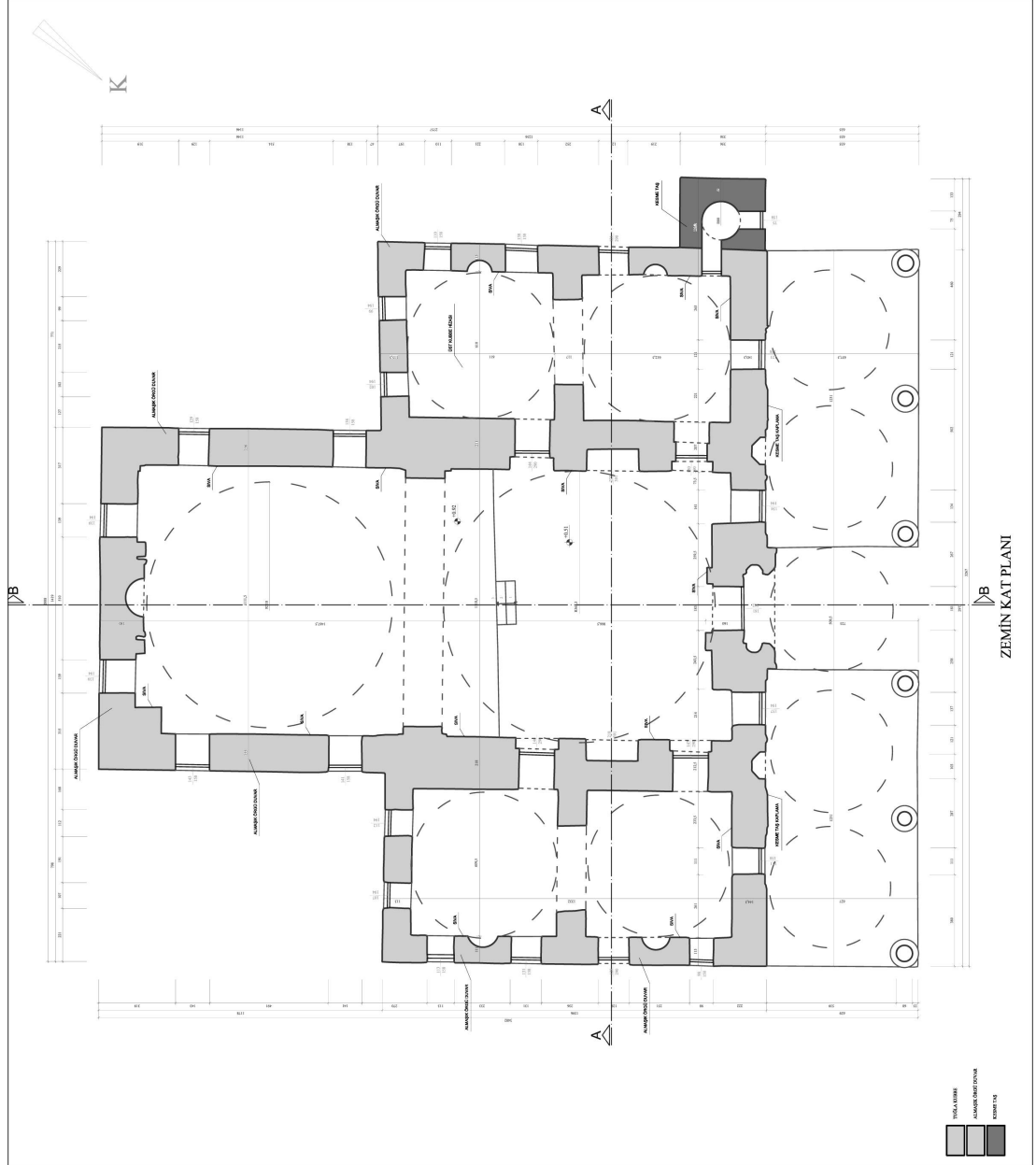
- [12] **Kasapgil, M.E.**, 2007. Adana Ulucami minaresi güçlendirme çalışması, *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-1*, Ankara, 27-29 Eylül, s.219-225.
- [13] **Güler, K., Sağlamer, A., Celep, Z., Pakdamar, F.**, 2004. Structural And Earthquake Response Analysis of the Little Hagia Sophia Mosque, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada.
- [14] **Sezen, H., Fırat, G.Y., Sözen, M.A.**, 2003. Investigation of the performance of monumental structures during the 1999 Kocaeli and Düzce earthquakes, *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, 26-30 Mayıs.
- [15] **Sadan, O.B., Bal, İ.E., Smyrou, E.**, 2007. Structural analysis of İstanbul Beyazıt II Mosque retrofitted by Mimar Sinan, *International Symposium Studies on Historical Heritage*, Antalya, Turkey, September 17-21.
- [16] **Mahfouz, I., and Rizk, T.**, 2003. Applications of FRP in strengthening of structures, *Proceedings of the International Conference Structural Faults and Repair*, London, UK, July 1-3.
- [17] **Özsoy, B., Durgunoğlu, T.**, 2003. Sıvılaşma etkilerinin yüksek kayma modüllü zemin – çimento karışımı kolonlarla azaltılması, *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, 26-30 Mayıs.
- [18] **Nalçakan, M.S.**, 2004. Problemli zeminlerde geoteknik çözümler, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, **430**, s. 29-30.
- [19] **Ulusay, R.**, 2000. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, *Mavi Gezegen Popüler Yerbilimleri Dergisi*, Ankara, **2**, s. 47-56.
- [20] **Skinner, R.I., Robinson, W.H. and McVerry, G.H.**, 1993. An introduction to seismic isolation, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [21] **Nigel, G.S., Mark, J.M., Shelley, L.L.**, 2001. Strengthening and rehabilitation of masonry using fibre reinforce polymers, Guimarães, 2001.
- [22] **Ayverdi, E.H.**, 1953. Fatih Devri Mimarisi, İstanbul Fethi Derneği Neşriyatı, İstanbul.
- [23] **Tanman, M.B.**, 1994. Murat Paşa Külliyesi, Düünden Bugüne İstanbul Ansiklopedisi, c.5, Kültür Bakanlığı ve Tarih Vakfı Ortak Yayını, İstanbul.

- [24] **Kuran, A.**, 1964. İlk devir Osmanlı mimarisinde camii, ODTÜ Mimarlık Fakültesi, Ankara.
- [25] **Aslanapa, O.**, 1984. Türk Sanatı, İstanbul.
- [26] **Huerta, S.**, 2001. Mechanics of masonry vaults: The equilibrium approach, Historical Constructions, Guimarães.
- [27] **SAP2000**, 2005. Integrated structural analysis and design software, Computer and Structures Inc., Berkeley, California.
- [28] **Lourenço, P.B.**, 2004. Analysis and restoration of ancient masonry structures, Guimarães, Portugal.
- [29] **Akman, S.**, 1986. "Horasan harcı ve betonunun tarihi ve teknik özellikleri" II. Uluslararası Türk İslam Bilim ve Teknolojisi Tarihi Kongresi, İstanbul.
- [30] **Satongar, Ş.**, 1994. İstanbul şehir surları horasan harçları üzerine bir araştırma, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [31] **Arioğlu, N, Arioğlu, E.**, 1997. "Mimar Sinan'ın seçtiği taş: küfeki ve çekme dayanımı, 14. Türkiye İnşaat Mühendisliği Teknik Kongresi, İzmir, Ekim 1997.
- [32] **Erguvanlı, K, Ahunbay, Z.**, 1989. "Mimar Sinan İstanbul'daki eserlerinde kullandığı taşların mühendislik jeolojisi ve mimarlık özellikleri", Mühendislik Jeolojisi Bülteni, İstanbul, 11, s. 30-33.
- [33] **Tuncel, Z, Arioğlu, E.**, 1998. "Alçı malzemesinin basınç ve çekme dayanımlarında yükleme hızının etkisi" 4.Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Zonguldak, Ekim 1998.
- [34] Afet Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- [35] **Toğrol, E. Özkan M.T., Ören, F., Özbatır, M.**, 1996. Fethi Ahmet Paşa Yalısı temel takviyesi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Altıncı Ulusal Kongresi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, s. 426-431.
- [36] **Krstevska, L., Tashkov, Lj., Arun, G., Akoz, F.**, 2007. Evaluation of Seismic Behaviour of Historical Monuments, *International Symposium Studies on Historical Heritage*, Antalya, Turkey, September 17-21.
- [37] **Nasrotzki, P.**, 2007. Elastic Support Systems for the Preservation of Cultural Heritage, *International Symposium Studies on Historical Heritage*, Antalya, Turkey, September 17-21.

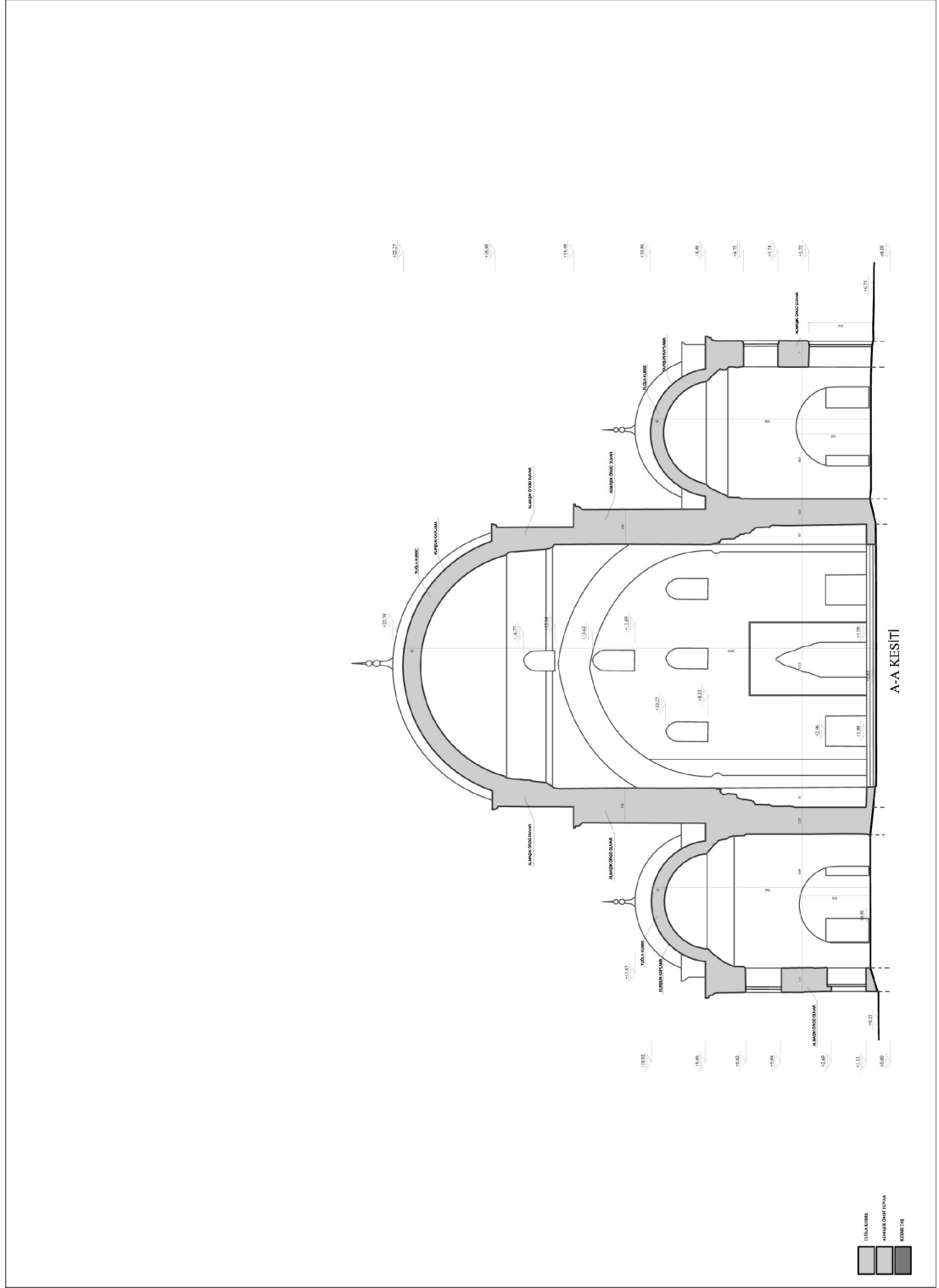
- [38] **Kawaguchi, K., Abe, K., Abe, J., Tahugchi, T., Takahama, R.,** 2007. Proposal of a New Base-Isolation System for Historic Timber Structures fort the Safety of Their Structural and Non-Structural Components, *International Symposium Studies on Historical Heritage*, Antalya, Turkey, September 17-21.
- [39] **Cantini, L., Saisi, A., Zanzi, L., Binda L.,** 2006. Non Destructive Techniques Applied to the Pillars of the Syracuse Cathedral in Sicily, *1.International Conference on Restoration of Heritage Masonry Structures*, Cairo, Egypt, April 24-27.
- [40] **Antonucci, R., Medeot, R.,** 2003. Seismic Protection Of Buildings Through Energy Dissipation and the Base Isolation System: The Italian Experience, *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, 26-30 Mayıs.
- [41] **Gerçek, M.,** 2003. Köprü ve Viyadüklerin Depreme Dayanıklı Olarak Projelendirilmesi ve Deprem İzolatör Uygulamaları, *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, 26-30 Mayıs.
- [42] **Sevgili, G., Küçükdoğan, B., Karaesmen, E.,** 2005. Old Masonry in Seismic Zones, *Earthquake Engineering Essentials and Applications*, Middle East Technical University.

EKLER

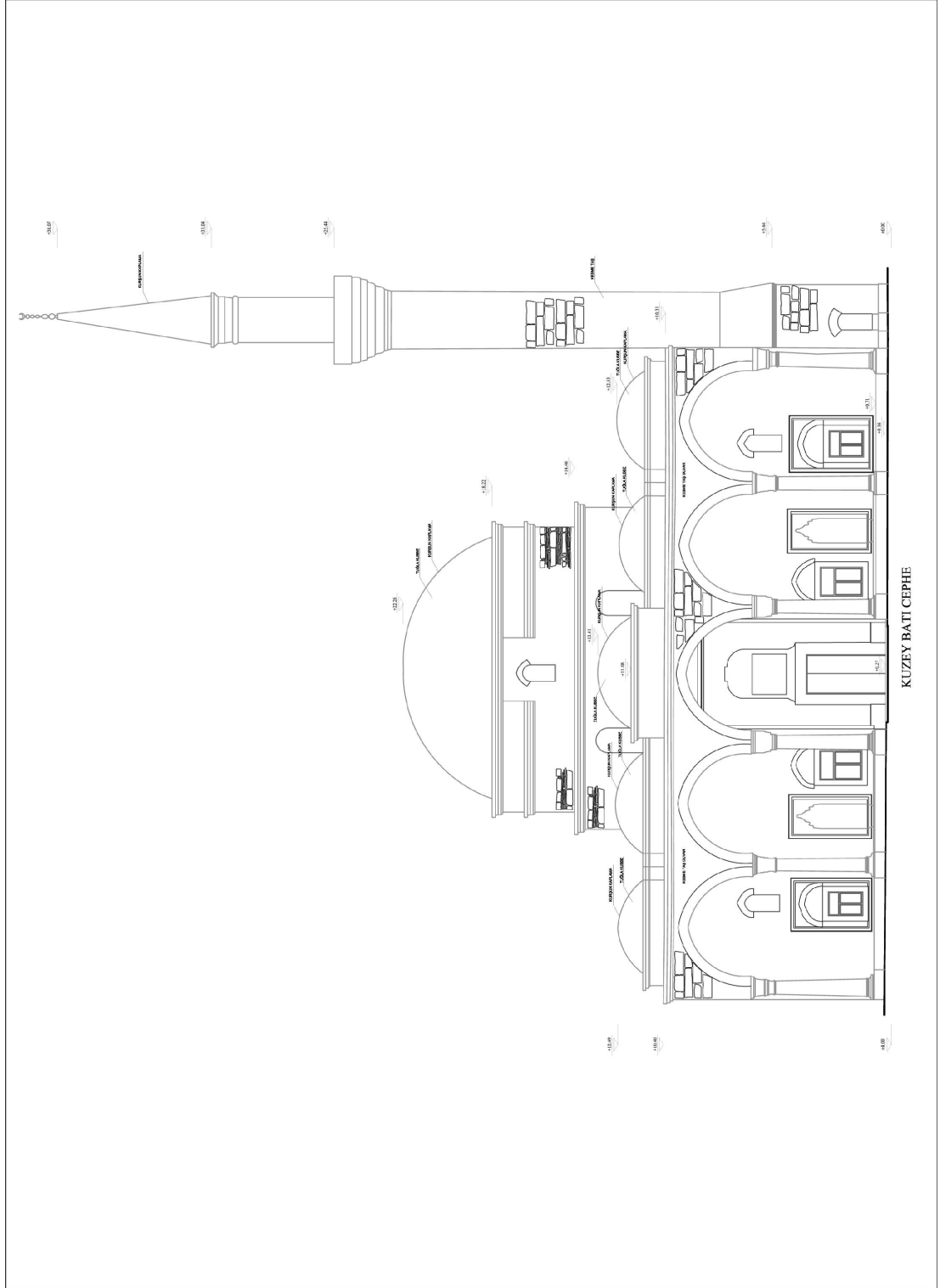
EK A: Murat Paşa Camii Rölöve Çizimleri



Şekil A.1: Murat Paşa Camii Planı



Şekil A.2: Murat Paşa Camii A-A Kesiti



Şekil A.4: Murat Paşa Camii Kuzey Batı Cephesi



ÖZGEÇMİŞ

Abdurrahman Hakan AKÖZ

1983 yılında Bursa’da doğdu. İlk ve orta öğrenimi aynı şehirde tamamladı. 2000 yılında Bursa Çınar Lisesi’nden mezun olup, İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat mühendisliği bölümünü ikincilikle kazandı. 2003 yılında çift anadal programı kapsamında İTÜ Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü’nde, ikinci üniversite programı kapsamında da A.Ü. İşletme Fakültesi, İşletme Bölümü’nde okumaya başladı. 2005 yılında İTÜ İnşaat Fakültesini bitirerek inşaat mühendisi unvanını aldı ve mühendislik eğitimine İTÜ FBE Yapı Mühendisliği yüksek lisans programında devam etti. 2007 yılında İTÜ Mimarlık bölümünü bitirerek mimar, AÜ İşletme bölümünü bitirerek işletmen unvanlarını aldı. Eğitim hayatı boyunca çeşitli devlet kurumlarında, İMP’de staj yaptı ve özel işletmelerde çalıştı.