

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TARİHİ YIĞMA YAPILARIN
DEPREM PERFORMANSININ BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. – Mimar Ömer DABANLI

Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı: YAPI MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2008

**TARİHİ YIĞMA YAPILARIN
DEPREM PERFORMANSININ BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. – Mimar Ömer DABANLI
(501051099)**

**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, bu araştırma sürecinde eşsiz katkılarda bulunan, tez danışmanlığımı yürüten, çalışmamın önünü aydınlatan ve bana ışık tutan, değerli hocam, Sayın Prof. Dr. Kadir GÜLER'e,

Çalışma boyunca her an desteğini gördüğüm değerli dostum A. Hakan AKÖZ'e, yorumlarıyla katkıda bulunan Ferhat PAKDAMAR'a, arşivini cömertçe paylaşan fotoğraf sanatçısı Mustafa YILMAZ'a,

Cami Rölövelerini temin etmemize yardımcı olan, Bimtaş Genel Müdürü Sayın Ahmet AĞIRMAN nezdinde Bimtaş A.Ş.'ye, araştırmayı "Projem İstanbul" kapsamında destekleme kararı alan İstanbul Büyükşehir Belediyesine,

Bu süreçte yanımda olan, adını sayamadığım tüm arkadaşlarıma ve maddi manevi hiçbir fedakârlıktan çekinmeyen aileme, bilhassa kardeşim İsmail ve abim Abdülkadir DABANLI'ya teşekkürlerimi arz ederim.

Mayıs, 2008

Ömer DABANLI

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tarihi Mirasın Korunması	1
1.1.1 Koruma Kavramına Tarihi Bakış	2
1.1.2 Koruma İlkeleri	6
1.1.3 Koruma Yöntemleri	8
1.3. Tarihi Yapılarda Performans Kavramı	11
1.4. Hedefler	14
1.5. Yığma Yapılar	16
2. TARİHİ YIĞMA YAPILARIN DEĞERLENDİRİLMESİ İÇİN YAPILAN HAZIRLIK ÇALIŞMALARI	19
2.1. Gözlem ve Araştırma	19
2.1.1. Tarihi Araştırmalar	19
2.1.1. Yerinde Gözlem ve İncelemeler	20
2.2. Malzeme Özellikleri	22
2.2.1. Harç	22
2.2.2. Tuğla	23
2.2.3. Taş	24
2.2.3. Ahşap	28
2.2.4. Kâgir Malzeme ve Kompozit Malzeme Tanımları	28
2.3. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi	32
2.3.1. Yerinde Yapılan Tahribatlı Deneyler	33
2.3.1.1. Yerinde Basınç Deneyi (Flat-jack Deneyi)	33
2.3.1.2. Yerinde Kayma Deneyi	34
2.3.2. Laboratuvar Ortamında Yapılan Deneyler	35
2.3.2.1. Fiziki Deneyler	35
2.3.2.2. Çekme, Basınç ve Kayma Deneyi	35
2.3.2.3. Model Deneyleri	39
2.3.3. Tahribatsız Deneyler	39
2.3.3.1. Sertlik Deneyi	39
2.3.3.2. Ultrases Deneyleri	40
2.3.4. Görüntüleme (Monitoring) Teknikleri	41
2.3.5. Serbest Titreşim Deneyi	42
2.4. Zemin Araştırmaları	43
2.4.1. Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi	43

2.4.1.1. Arazi Çalışmaları	44
2.4.1.2. Zemin İndeks Özellikleri ve Sınıflandırma Deneyleri	46
2.4.2. Zeminden Kaynaklanan Hasarlar	47
3. TARİHİ YIĞMA YAPILARIN MODELLENMESİ	49
3.1. Modelleme İlkeleri ve İdealleştirmeler	50
3.1.1. Geometrinin İdealleştirilmesi	50
3.1.2. Malzemenin İdealleştirilmesi	51
3.2. Modelleme Yöntemleri	55
3.2.1. Mikro Modelleme Yöntemi	56
3.2.2. Makro Modelleme Yöntemi	58
3.2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi	58
3.2.3.1. Doğrusal Sistemlerde Sonlu Elemanlar Yöntemi	62
3.2.3.2. Doğrusal Olmayan Sistemlerde Sonlu Elemanlar Yöntemi	63
3.3. Yapı Elemanlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modellenmesi	64
3.3.1. Duvarların Modellenmesi	66
3.3.2. Kubbe ve Tonozların Modellenmesi	67
3.3.3. Sütun ve Ayakların Modellenmesi	67
3.3.4. Kemerlerin Modellenmesi	68
3.3.5. Döşemelerin Modellenmesi	68
3.3.6. Minarelerin Modellenmesi	69
4. TARİHİ YIĞMA YAPILARIN ANALİZİ	70
4.1. Yükler	71
4.2. Yığma Yapı Davranışı	72
4.2.1. Kubbe, Tonoz ve Kemerlerin Davranışı	72
4.2.2. Duvarların Davranışı	78
4.3. Sismik Risk	80
4.3.1. Tarihi Depremler	80
4.3.2. İstanbul İçin Deprem Senaryoları	82
4.4. Analiz Yöntemleri	84
4.4.1. Düşey Yükler Altında Statik Analiz	86
4.4.2. Dinamik Analiz	86
4.4.2.1. Modal Analiz	86
4.4.2.2. Davranış Spektrumu Analizi	87
4.4.2.3. Zaman Tanım Alanında Analiz	88
4.5. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	88
5. ÖRNEK ÇALIŞMA: HIRKA-İ ŞERİF CAMİİ	89
5.1. Genel Bilgiler	89
5.1.1. Hırka-i Şerif'in Tarihçesi	89
5.1.2. Mimari Özellikler	90
5.1.3. Geometrik Özellikler	93
5.1.4. Taşıyıcı Sistem ve Malzeme Özellikleri	94
5.1.5. Yapının Mevcut Durumu	94
5.1.6. Zemin ve Sismik Risk	96
5.1.6.1. Amaç ve Kapsam	96
5.1.6.2. İklim, Meteoroloji, Su Bilançosu ve Yer Altı Suyu	97
5.1.6.3. Genel Jeoloji	98
5.1.6.4. Hırka-i Şerif Camii Zemininin Yerel Jeolojisi	100
5.1.6.5. Sondaj Çalışması	100

5.1.6.6. Standart Penetrasyon Deneyi	101
5.1.6.7. Sismik Kırılma Ölçümleri	101
5.1.6.8. Sismik Parametreler	102
5.1.6.9. Laboratuar Deneyleri	103
5.1.6.10. Zemin Hasar Tespitleri	104
5.1.6.11. Sismik Risk	105
5.1.6.12. Zemin İnceleme Sonuçları ve Öneriler	105
5.1.7. Yapının Rölöve Çizimleri	107
5.2. Yapının Sonlu Elemanlar Modeli	108
5.2.1. Malzeme Özellikleri	108
5.2.2. İdeallemeler	108
5.2.3. Model Özellikleri	110
5.3. Yapının Sonlu Elemanlar Analizi	115
5.3.1. İşaret Uyumu ve Yön Kabulleri	115
5.3.2. 2007 Türk Deprem Yönetmeliği'nde Yığma Yapılar	116
5.3.3. Düşey Yükler Altında Statik Analiz	118
5.3.4. Dinamik Analiz	126
5.3.4.1. Modal Analiz	126
5.3.4.2. Davranış Spektrumu Analizi	136
6. SONUÇ	154
7. KAYNAKLAR	158
EKLER	162
EK A: Hırka-i Şerif Camii Rölöve Çizimleri	162
ÖZGEÇMİŞ	170

KISALTMALAR

CPT	: Cone Penetration Test
SPT	: Standart Penetration Test
ASTM	: American Society for Testing and Materials
TS	: Türk Standardı
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
EC	: European Code
ASCII	: American Standard Code for Information Interchange
FEM	: Finite Element Method
DE	: Discrete Element (Ayrık Eleman Metodu)

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Tuğlaların Ortalama Mekanik Özellikleri	24
Tablo 2.2. Taşların Ortalama Mekanik Özellikleri [13]	25
Tablo 2.3. Küfekiinin Fiziki Özellikleri [14]	27
Tablo 2.4. Küfekiinin Mekanik (Tek Eksenli) Özellikleri (1-30 günlük) [15].....	27
Tablo 2.5. Birleşik Zemin Sınıflandırması	43
Tablo 4.1. İstanbul’da Yaşanan Tarihi Depremler [37]	82
Tablo 4.2. Analiz Tiplerinin Karşılaştırılması [30]	86
Tablo 5.1: Modelde kullanılan malzemeler ve özellikleri.....	108
Tablo 5.2. Serbest Titreşim Periyotları ve Kütle Katılım Oranları (U:Yer değiştirme, R:Dönme).....	128

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: İstanbul II. Beyazid Camii Ana Kemerinde Mimar Sinan Tarafından Yapılan Güçlendirme	3
Şekil 1.2. Ayasofya'nın 1573 Öncesi (Çizim) ve Şimdiki Halleri [5].....	4
Şekil 1.3. Selimiye Camii'nin Dış Avlu Duvarının Köşesindeki Bizans Sütunu	5
Şekil 1.4. 2007 Türk Deprem Yönetmeliğinde Hasar Seviyeleri	13
Şekil 1.5. Depremler a)S. Francisco, (1906), (b)Messina, (1908) (c)Tokyo, (1923) [19].....	17
Şekil 1.6. Yığma Taş Yapılar a) Moloz taş, b) Kesme taş, c) İri Kesme Taş [20]	17
Şekil 1.7. Tuğla Örgü Teknikleri a) Basit, b) Çapraz, c) Flaman [20]	18
Şekil 1.8. Roma'da Duvar a) Bağlı b) Yastıklı-Ortası Dolgulu c) Tuğla Yüzlü-Dolgulu [12].....	18
Şekil 1.9. Göz Kamaştırıcı Tarihi Yığma Şaheserler.....	18
Şekil 2.1. St. Michele Arcangelo Kilisesinin İnşaat Safhaları [22]	20
Şekil 2.2. Cephe Dokusundan Yapım Safhalarının Belirlenmesi [22]	20
Şekil 2.3. Yapı Elemanlarında Hasarların Tespiti ve Sınıflandırılması [22]	21
Şekil 2.4. Hasar Tiplerinin, Çatlak Biçimlerinin Belirlenmesi [22]	21
Şekil 2.5. Silindirik Tuğlanın Çevrimli Basınç Deneyi ve Tipik Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi [19].....	24
Şekil 2.6. Taşlarda Aranan Özellikler [15]	25
Şekil 2.7. Küfeki'nin Statik ve Dinamik Davranışı [15].....	27
Şekil 2.8. Küfeki ve Beton - Karbonatlaşmayla Mukavemet Değişimi [15]	28
Şekil 2.9. Yığma Numune Tek Eksenli Tekrarlı Basınç Deneyi [19].....	29
Şekil 2.10. Yığma Malzeme Modelleri, Sırasıyla Detaylı Mikro, Basit Mikro ve Makro Model [20].....	30
Şekil 2.11. Homojen Malzeme Tanımı (RVE: Repesantative Volume Element) [1].....	31
Şekil 2.12. İki Adımlı Homojenleştirme İşlemi [1]	31
Şekil 2.13. Flat Jack Ekipmanı İle Yerde Basınç Deneyi ($d=d_i$ iken $p=p_f$) [18].....	33
Şekil 2.14. Flat Jack Deneyi [42].....	34
Şekil 2.15: Yerde Kayma Deneyi [42]	35
Şekil 2.16. Tek Eksenli Basınç Deneyi [42].....	36
Şekil 2.17. Yığma Derzin Çevrimli Kayma Deneyi ve Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi [19].....	36
Şekil 2.18. Derz Mukavemeti - Muhtemel Deneyler a), b) Üç Noktadan Eğilme c) Dört Noktadan Eğilme d) Derz-Burulma e) Dağılma [12]	37
Şekil 2.19. Derz Kayma Mukavemeti - Muhtemel Deneyler a) İkili b) Üçlü [12]	37
Şekil 2.20. Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi - Muhtemel Deneyler [1]	38
Şekil 2.21. Çekme Mukavemetinin Belirlenmesi - Muhtemel Deneyler [1]	38
Şekil 2.22. Labarotuar Ortamında Gerçekleştirilen Model Deneyleri	39
Şekil 2.23. Bir Mermer Sütunun Ultrases Deneyi ile İncelenmesi	41
Şekil 2.24 Ultrases Deneyi [22]	41
Şekil 2.25. İki Sütunun Hasar Biçimi ve Yatay Kesit Tomografileri [26].....	42
Şekil 2.26. Muayene Çukuru / Galerisi Kesiti	44
Şekil 3.1. Santa Maria del Fiore Modelinde Kullanılan 4 Farklı Analitik Model [7].....	51
Şekil 3.2. Tarih Boyunca Yapısal Analizlerin Doğrulukları [20].....	52
Şekil 3.3. Tuğla, Harç ve Yığma Eleman - Gerilme-Şekil Değiştirme Diyagramı [27][28]	53

Şekil 3.4. İstanbul Ortaköy'deki Atik Ali Paşa Yalısı İçin Deneyler ve EC-6 Yardımı İle Oluşturulan Malzeme Modeli[41]	53
Şekil 3.5. Basınç Altında Yığma Eleman Gerilme Şekil Değiştirme Diyagramı [12].....	54
Şekil 3.6. Yığma Malzemelerin Homojenleştirilmesi [31]	54
Şekil 3.7. Model Yaklaşımları a)Detaylı Mikro b)Basit Mikro c)Makro Modelleme [19].....	55
Şekil 3.8. Yığma Duvarın Mikro Model Analizi a) Kuvvet-Yer değiştirme Diyagramı b,c) Maksimum ve Nihai Yüklerdeki Deformasyonlar [19]	57
Şekil 3.9. Yığma Duvarın Makro Model Analizi a) Kuvvet-Yer değiştirme Diyagramı b) Nihai Yükte Deformasyon Şekli [19]	58
Şekil 3.10. FEM - Temel Kavramlar: a) Genel Bir P(x,y) Değişkeni b) Üçgen Sonlu Eleman c) Üçgen Sonlu Eleman Ağı [23]	59
Şekil 3.11. Amorf Bir Şeklin Sonlu Eleman Ağı a)41 Kare Sonlu Eleman b)Eleman Boyutlarını Değiştirerek Hassasiyetin Artırılması [23]	60
Şekil 3.12. Sonlu Eleman Sayısı İle Yaklaşık Sonuçların Yakınsama İlişkisi [23]	60
Şekil 3.13. Ortasında Boşluk Bulunan Bir Dikdörtgen Alanın Sonlu Eleman Ağı [23].....	61
Şekil 3.14. Çeşitli Sonlu Eleman Modelleri a) Model Alanı b) Üçgen c) Dörtgen d) Dörtgen ve Yamuk Elemanlar [23]	62
Şekil 3.15. Bazı Sonlu Elemanlar a) Üçgen b) Dörtgen c) 3D Dörtüzlü d) 3D Dörtgen [23].....	64
Şekil 3.16. Hırka-i Şerif Camiinin Üç Boyutlu (3D) Sonlu Eleman Modeli	65
Şekil 3.17. Atik Mustafa Paşa ve Bodrum Camilerinin Duvar Dokuları [7].....	66
Şekil 3.18. Zeyrek ve Ayasofya'ya Ait Duvar Dokuları [7]	67
Şekil 3.19. Basit Volta Döşeme Kesiti [40].....	68
Şekil 3.20. Merdivenli Minare Kesiti [27].....	69
Şekil 4.1. Kemer Davranışı a) Yeni Yapılan Kemer b) Oturan 3 Mafsallı Kemer [2]	73
Şekil 4.2. Kemerde İtki Çizgisi ve Çatlak İlişkisi [2]	74
Şekil 4.3. Barlow Modeli Kemer ve İtki Çizgileri [2]	74
Şekil 4.4. Zincir Eğrisi ve Tersinden Elde Edilen Kemerler	75
Şekil 4.5. Kemerlerde Göçme Mekanizması - İtki Çizgisi İlişkisi [1].....	76
Şekil 4.6. Kemerlerde Gerginin Etkisi [17]	76
Şekil 4.7. Kubbede Kemer Dilimi [16].....	77
Şekil 4.8. Kubbede Gerilme Dağılışı ve Bir Kabuk Elemanın Dengesi[16].....	77
Şekil 4.9. Deneylerde Gözlenen Kayma Mekanizmaları [1]	78
Şekil 4.10. Kayma Etkisi Altında Duvar-Göçme Mekanizmaları ve Gerilme Dağılımı [1].....	79
Şekil 4.11. Yığma Duvarlarda Düzlem Dışı Etkiler [11] [16]	79
Şekil 5.1 Hırka-i Şerif'in Deseni	89
Şekil 5.2. Hırka-i Şerif Camii ve Müştemilatı – Perspektif Çizim	90
Şekil 5.3. Hırka-i Şerif Camii – Sekizgen Kaideye Oturan Kubbe ve Tonozların Minareden Görünüşü	91
Şekil 5.4. Hırka-i Şerif Camii – Minareler ve İçeriden Ana Kubbe	91
Şekil 5.5. Hırka-i Şerif Camii – Merkezi Mihrap Aksından İç Görünüm, Dıştan bir görünüm	91
Şekil 5.6. Alman Mavisi Haritası Pafta No: L9-4 Hırka-i Şerif Camii ve Çevresi (1913).....	92
Şekil 5.7. Hırka-i Şerif Camii ve Çevresinin Hava Fotoğrafı (1966)	93
Şekil 5.8. Hırka-i Şerif Camii Zemin ve Birinci Kat Planı	93
Şekil 5.9. Hırka-i Şerif Camii Ön ve Yan Görünüş	94
Şekil 5.10. Duvarlarda Görülen Diyagonal Çatlaklar	95
Şekil 5.11. Duvar ile döşemelerin birleşim noktalarında ve pencere üstü kemerlerdeki hasarlar	95
Şekil 5.12. Tavanlarda meydana gelen hasarlar	95
Şekil 5.13. Hırka-i Şerif Camii Zemininde Yapılan Sondaj Çalışması ve Arazi Deneyleri.....	100

Şekil 5.14. 3D Sonlu Eleman Modeli Çeşitli Plan Seviyeleri ve Döşemeler.....	109
Şekil 5.15. 3D Sonlu Eleman Modeli Plan Görünüşü	110
Şekil 5.16. 3D Sonlu Eleman Modeli, Sağ Yan ve Sol Yan Görünüş	111
Şekil 5.17. 3D Sonlu Eleman Modelinden Çeşitli Görüntüler.....	112
Şekil 5.18. Hekzahedral, Pentahedral ve Tetrahedra Elemanlar	112
Şekil 5.19. 3D Sonlu Eleman Modelleme Aşamaları	113
Şekil 5.20. 3D Sonlu Eleman Modelinden Çeşitli Görüntüler.....	114
Şekil 5.21. 8 Noktalı Katı Eleman ve Gerilmeler [35]	115
Şekil 5.22. Düzlem Kabuk Elemanda İç Kuvvetler [35]	115
Şekil 5.23. Düzlem Kabuk Elemanda Gerilmeler [35]	116
Şekil 5.24. Katı Elemanların Normal, Kayma ve Asal Gerilmeleri [35].....	116
Şekil 5.25. (G + Q) Ana Kubbe Tepe Noktasında Yer Değiştirme: 0.88 mm).....	119
Şekil 5.26. (G + Q) Büyük Döşeme Ortasında Yer Değiştirme (maks: 4 mm)	119
Şekil 5.27. (G + Q) Duvarlarda Düzlem Dışı Hareketler (max: 0.24 mm).....	120
Şekil 5.28. (G + Q) Yapının Şekil Değiştirmiş 3D Görüntüsü	120
Şekil 5.30. (G + Q) S22 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa.....	121
Şekil 5.31. (G + Q) S33 Gerilmeleri, MPa	122
Şekil 5.32. (G + Q) SMax Gerilmeleri, 10^{-3} MPa	122
Şekil 5.33. (G + Q) SVmax Gerilmeleri, MPa.....	123
Şekil 5.34. (G + Q) Kabuk Elemanlar S11 Normal Gerilmeleri, 10^{-3} MPa	123
Şekil 5.35. (G + Q) Kabuk Elemanlar S22 Normal Gerilmeleri, 10^{-3} MPa	124
Şekil 5.36. (G + Q) Kabuk Elemanlar S12 Kayma Gerilmeleri, 10^{-3} MPa	124
Şekil 5.37. Mod 1, T = 1.075 s – Minarelerin x doğrultusunda yanal hareketi	129
Şekil 5.38. Mod 2, T = 1.074 s – Minarelerin x ve y doğrultusunda yanal hareketi.....	129
Şekil 5.40. Mod 4, T = 1.072 s–Minarelerin x ve y doğrultusunda yanal hareketi.....	130
Şekil 5.41. Mod 5, T = 0.204 s–Minarelerin x doğrultusunda yanal hareketi	130
Şekil 5.42. Mod 6, T = 0.203 s–Minarelerin x ve y doğrultusunda yanal hareketi.....	130
Şekil 5.43. Mod 7, T = 0.203 s–Minarelerin y doğrultusunda yanal hareketi	131
Şekil 5.44. Mod 8, T = 0.202 s–Minarelerin x doğrultusunda yanal hareketi	131
Şekil 5.45. Mod 9, T = 0.102 s–Burulma hareketi (1.Hâkim Mod).....	131
Şekil 5.46. Mod 10, T = 0.100 s – y doğrultusunda ötelenme hareketi (2. Hâkim Mod)	131
Şekil 5.47. Mod 11, T = 0.099 s – Burulma hareketi.....	132
Şekil 5.48. Mod 12, T = 0.093 s – Minarelerin açılma hareketi	132
Şekil 5.49. Mod 19, T = 0.079 s – Yapının y doğrultusunda hareketi.....	132
Şekil 5.50. Mod 20, T = 0.072 s – Yapının y doğrultusunda hareketi	132
Şekil 5.51. Mod 9, T = 0.102 s – Burulma hareketi - Önden (1.Hâkim Mod).....	133
Şekil 5.52. Mod 9, T = 0.102 s–Burulma hareketi-Plan (1.Hâkim Mod)	133
Şekil 5.53. Mod 9, T = 0.102 s –Burulma hareketi-Yandan (1.Hâkim Mod).....	134
Şekil 5.54. Mod 10, T = 0.100 s – y doğrultusunda hareket - Önden (2.Hâkim Mod).....	135
Şekil 5.55. Mod 10, T = 0.100 s – y doğrultusunda hareket - Plan (2.Hâkim Mod)	135
Şekil 5.56. Mod 10, T = 0.100 s – y doğrultusunda hareket - Yandan (2.Hâkim Mod)	136
Şekil 5.57. 2007 Türk Afet Yönetmeliği Elastik İvme Spektrumu.....	137
Şekil 5.58. (G + Q + EX) Ana Kubbe Kaidesindeki Yer Değiştirme = 1.14 mm	139
Şekil 5.59. (G + Q + EX) Cami Harim Duvarlarında S11 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa	139
Şekil 5.60. (G + Q + EX) Sağ Hünkâr Dairesi Saçak Yer Değiştirmesi = 0.95 mm	140
Şekil 5.61. (G + Q + EX) Sağ Hünkâr Dairesinin Duvarında Gerilmeler 10^{-3} MPa	140
Şekil 5.62. (G + Q + EX) S11 Gerilmeleri, MPa.....	141
Şekil 5.63. (G + Q + EX) S22 Gerilmeleri, MPa	141
Şekil 5.64. (G + Q + EX) S33 Gerilmeleri, MPa	142
Şekil 5.65. (G + Q + EX) S12 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa	142
Şekil 5.66. (G + Q + EX) S13 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa	143
Şekil 5.67. (G + Q + EX) S23 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa	143
Şekil 5.68. (G + Q + EX) Kabuk Eleman S11 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa	144
Şekil 5.69. (G + Q + EX) Kabuk Eleman S22 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa	144
Şekil 5.70. (G + Q + EX) Kabuk Eleman S12 Kayma Gerilmeleri, 10^{-3} MPa.....	145

Şekil 5.71. (G + Q + EY) S11 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa	147
Şekil 5.72. (G + Q + EY) S22 Gerilmeleri, MPa.....	147
Şekil 5.73. (G + Q + EY) S33 Gerilmeleri, MPa.....	148
Şekil 5.74. (G + Q + EY) S12 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa	148
Şekil 5.75. (G + Q + EY) S13 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa	149
Şekil 5.76. (G + Q + EY) S23 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa	149
Şekil 5.77. (G + Q + EY) Kabuk Eleman S11 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa	150
Şekil 5.78. (G + Q + EY) Kabuk Eleman S22 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa	150
Şekil 5.79. (G + Q + EY) S12 Kayma Gerilmeleri, 10^{-3} MPa.....	151
Şekil A.1: Hırka-i Şerif Camii Zemin Kat Planı.....	162
Şekil A.2: Hırka-i Şerif Camii 1. Normal Kat Planı	163
Şekil A.3: Hırka-i Şerif Camii A-A Kesiti	164
Şekil A.4: Hırka-i Şerif Camii B-B Kesiti.....	165
Şekil A.5: Hırka-i Şerif Camii Kuzey Batı Cephesi	166
Şekil A.6: Hırka-i Şerif Camii Güney Doğu Cephesi.....	167
Şekil A.7: Hırka-i Şerif Camii Güney Batı Cephesi.....	168
Şekil A.8: Hırka-i Şerif Camii Kuzey Doğu Cephesi.....	169

SEMBOL LİSTESİ

γ	: Birim hacim ağırlığı
ρ	: Özkütle
p	: Porozite
w	: Su emme
t	: Zaman
f_b	: Basınç mukavemeti
f_c	: Çekme mukavemeti
f_{eb}	: Basınç emniyet gerilmesi
f_{bk}	: Kompozit malzeme basınç mukavemeti
τ_0	: Çatlama Emniyet gerilmesi
E	: Elastisite modülü
ν	: Poisson oranı
σ	: Gerilme
ε	: Şekil değiştirme
$S(T)$	: Spektrum katsayısı
R_s	: Deprem yükü azaltma katsayısı
A_0	: Etkin yer ivmesi katsayısı
I	: Bina Önem katsayısı
P_k	: Kırma (göçme) Yüğü
ρ_k	: Tuğla ile harç arasındaki sürtünme katsayısı
σ_m	: Flat-jack testinde gerçek gerilme
K_m	: Flat-jack testi kalibrasyon faktörü
K_a	: Flat-jack testine ait alan katsayısı
d	: Flat-jack ölçüm mesafesi

TARİHİ YIĞMA YAPILARIN DEPREM PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

ÖZET

Tarihi ve kültürel mirasımızı teşkil eden tarihi yığma yapıların korunması ve gelecek nesillere ulaştırılması, bu yapıları dikkatle incelemek ve problemlerini tespit edip çözüm önerileri geliştirmek suretiyle ortaya konulacak sürdürülebilir ve etkin bir koruma anlayışıyla mümkün olabilir. Özellikle aktif deprem kuşağında yer alan ülkemizde, tarihi yığma yapıların korunması için bu yapıların deprem performanslarının belirlenmesi ve gerekli önlemlerin alınması kaçınılmazdır. Bu araştırmada, tarihi yığma yapıların güvenlik seviyelerinin belirlenmesinde ve yapısal değerlendirme sürecinde izlenmesi gereken metot ve yaklaşımlar üzerinde durulmuştur.

Bu çalışmanın ilk bölümünde koruma kavramına ve tarihi mirasın korunması konusuna değinilmiş, koruma ilkeleri ve hedefler anlatılmıştır.

İkinci bölümde, yapısal değerlendirme öncesi yapılacak çalışmalar ele alınmıştır. Tarihi araştırmalar, yerinde gözlem ve ölçümler, malzeme ve zemin özelliklerinin belirlenmesi başlıkları incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, tarihi yığma yapıların modellenmesi üzerinde durulmuştur. Bu bölümde idealleştirmeler, kabuller, modelleme teknikleri ve yığma yapı elemanlarının modellenmesi hakkında bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde, yığma yapı davranışı ve analiz yöntemleri üzerinde durulmuştur.

Beşinci bölümde örnek yapı olarak seçilen Hırka-i Şerif Camii detaylı olarak incelenmiştir. Bu bölümde, camii hakkında yapılan araştırmalara yer verilmiş, daha sonra yapının üç boyutlu sonlu eleman modeli kurularak statik ve dinamik analizler vasıtasıyla yapısal güvenliği ve deprem performansı değerlendirilmiştir.

Son bölümde analiz sonuçları değerlendirilmiş ve güçlendirme önerileri üzerinde durulmuştur.

DETERMINATION OF THE EARTHQUAKE PERFORMANCE OF HISTORICAL MASONRY STRUCTURES

SUMMARY

The conservation of historic monuments which form our historical and cultural heritage is possible if only in the case of investigating them in detail, obtaining their problems and improving solution method and techniques. Thus they can be preserved for the next generation with a sustainable and effective approach. Especially, in Turkey which is located in highly seismic activity region, it is an obligation to determine the earthquake performance of historical masonry structures to prevent structural damages and loss of heritage.

In this study, structural assessment and rehabilitation process of historical masonry structures has been investigated. Assessment methodology and different approaches were discussed.

In the first chapter, the concept and the principles of conservation are discussed.

The observations required before structural assessment are the subject of the second chapter. This section includes historical researches and in site observations, determination masonry material properties and soil investigations.

The third section is about the modeling techniques of historical masonry structures. Idealizations, assumptions, different modeling techniques and modeling the elements of masonry structures form the content of this chapter.

In the fourth chapter, behaviors of masonry structures and analysis methods were discussed.

The fifth section covers numerical investigations of Hirka-i Sherif Mosque of Istanbul. The structural system of the mosque was analyzed by using 3D model under static and dynamic loads to determine the earthquake performance of the structure.

In the last chapter, the results of analyses, requirements and suggestions of strengthening and retrofitting of the Hirka-i Sherif Mosque are discussed.

1. GİRİŞ

1.1. Tarihi Mirasın Korunması

Yüzyıllar boyunca, çeşitli tabii afetler, yangınlar, savaşlar ve olumsuz çevre şartları ile ilgisizlik yüzünden büyük bir bölümünü kaybettiğimiz, bir kısmını da hakkıyla korumaya muvaffak olamadığımız tarihi ve kültürel mirasımızı teşkil eden tarihi yığma yapılar, birçok bilim ve sanat dalının çalışma konusu içine giren önemli bir konu olarak önümüzde durmaktadır. Tarihi yapılar koruma altına alınmış fakat sürdürülen koruma anlayışı, bu yapıları kaderine terk etmiş, etkin ve sürdürülebilir bir koruma uygulaması geliştirilememiştir. Bu eksikliğin en büyük sebeplerinden birisi, yapısal değerlendirme ve koruma uygulamalarının, birçok zorlukları ve belirsizlikleri içinde barındıran karmaşık bir mesele olması ve çok disiplinli bir çalışma sürecine ihtiyaç duyulmasıdır.

Güvenlik, güvenilirlik, risk ve sürdürülebilirlik kavramları tarihi mirasın korunmasında önemli kavramlardır. Özellikle deprem riskinin büyük olduğu bölgelerde, her bir tarihi eserin özel olarak ele alınması suretiyle, güvenilir bir yöntem vasıtasıyla yapısal güvenliğinin belirlenmesi kaçınılmaz bir ihtiyaçtır. Bu değerlendirme sonucunda yapıların performans seviyeleri belirlenmiş, ayrıca ihtiyaç halinde bu yapıların ömrünün uzatılması, sürdürülebilirliği ve gelecek nesillere ulaştırılması için güçlendirme önerileri geliştirilmiş olacaktır [1].

Oldukça zengin olan bu mirası korumak için büyük bir gayret sarf edilmesi gerektiği de açıktır. Bununla birlikte, koruma uygulamaları ve öncesinde yapılacak yapısal değerlendirmelerin maliyeti ise oldukça yüksektir. Ülkemizde yer alan binlerce eserin sözcülemi 50 yıl daha sorunsuz olarak yaşatılması için yapılacak değerlendirme çalışmalarının, restorasyon ve güçlendirme uygulamalarının maliyeti çok büyük rakamlara ulaşmaktadır. Hal böyleyken, rastgele ve yetersiz bilgilerle bu eserleri korumaya çalışmak, bilimin ve insan mantığının dışındadır. Sistemli ve planlı bir koruma yaklaşımın yanı sıra doğru ve gerçekçi uygulama yöntemlerinin de geliştirilmesi tartışılmaz bir ihtiyacı karşılayacaktır.

Ülkemizdeki yer alan binlerce mimari eserin korunması adına yapılan girişimlerin hız kazandığı günümüzde, söz konusu eserlerin korunması ve gelecek nesillere güvenle ulaştırılması için pek çok çalışma yapılmaktadır. Ancak bu çalışmaların izlemesi gereken bir standardın bulunmayışı da önemli bir eksikliktir. 2007 yılında yürürlüğe girmiş olan Yeni Deprem Yönetmeliği de tarihi mirasın korunmasına yönelik herhangi bir öneri ve standart getirmemiştir. Bu sebeple, ülkemizde, tarihi yapıların incelenmesi, değerlendirilmesi, restorasyon ve güçlendirme uygulamalarını çağdaş bilimin gereklerine göre kontrol altına alacak bir standart geliştirilmesi gereklidir.

1.1.1 Koruma Kavramına Tarihi Bakış

Koruma kavramı, kent dokusunun korunması ve yapı ölçeğinde koruma uygulamaları şeklinde iki alt başlığa ayrılabilir. Kent dokusunun korunması, bu kısımda yüzeysel olarak anlatılmıştır. Yapı ölçeğinde gerçekleştirilecek olan koruma uygulamaları ise her ne kadar bazı temel ilkelerde uzlaşma sağlansa bile, boyutları ve mahiyeti hala tartışılmakta olan bir konudur.

Aslında tarihi eserlerin korunmasında, geçmişte yer alan uygulamalar çoğu kez göz ardı edilmiştir. Tarih sayfalarına bakıldığında, özellikle Osmanlı Devleti topraklarında pek çok koruma uygulaması yapıldığı da görülür. Mimari ve mühendislik dehasıyla ünlü Mimar Sinan, koruma uygulamaları açısından da devrinin en öndeki ismidir. Bu sebeple Mimar Sinan'ın koruma anlayışını çözümlemek, koruma kavramına tarihi bir anlayış boyutu kazandırabilir.

Mimar Sinan, başta İstanbul olmak üzere, imparatorluğun birçok yerinde koruma ve onarım faaliyetlerinde bulunmuştur. Bunlar arasında en fazla cami onarımları göze çarpmaktadır. Mimar Sinan'ın Anadolu'daki onarımları, Çorum'daki Sultan Alâeddin Camii ve Kütahya'daki Sultan Orhan Camii'dir. 1573 yılında ise İstanbul'daki en önemli yapılardan biri olan Beyazıt Caminin güçlendirilmesini gerçekleştirmiş, bunu caminin giriş-mihrap aksında yer alan yarım kubbelere oturan zayıf kemerlere, düşey yer değiştirmesinin düşük olması ile bilinen sivri bir kemer eklemek suretiyle taşıyıcı sistemi güçlendirerek yapmıştır (Şekil 1.1). Mimar Sinan'ın anıtların onarımları yanında bu eserlerin gerek iç kısımlarının, gerekse çevrelerinin yabancı müdahalelerden arındırılmasına da önem verdiği, 1559 yılında

Rumeli Hisarı'nı içine ve çevresine yapılan evlerden ve dükkânlardan temizlediği 16. yüzyıla ait belgelerden anlaşılmaktadır [3].

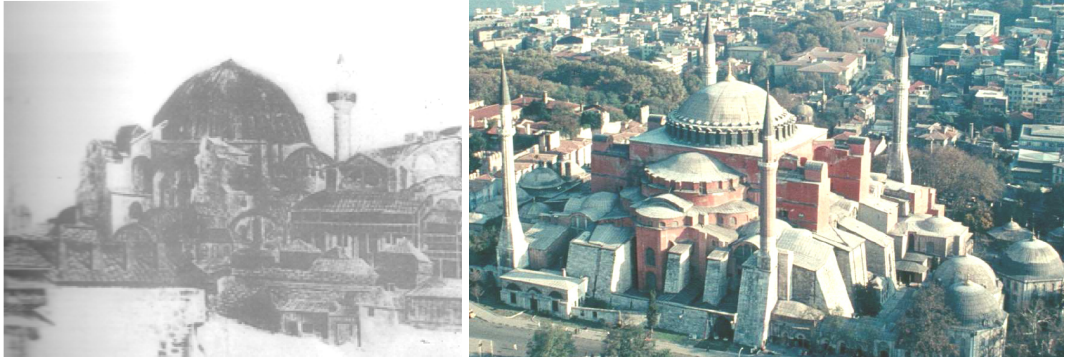


Şekil 1.1: İstanbul II. Beyazid Camii Ana Kemerinde Mimar Sinan Tarafından Yapılan Güçlendirme

Mimar Sinan, 1572 yılında, Zeyrek Camii, (Pantokrator Kilisesi), Eski İmaret (Pantepoptes Kilisesi), ve Kalenderhane Camii'ni (Maria-Kiriotissa Kilisesi), iç mekânlarına ve dış duvarlarına yapılan müdahalelerden arındırma işi ile görevlendirilmiştir. Özellikle Zeyrek Camii ile Eski İmaret'in son derece kötü durumda olduğu ve bu yapıların çevresine yapılan evlerin cami pencerelerini ve kapılarını kapadığı, iç mekânın kümes ve ahır olarak kullanımının camiye büyük zarar verdiği ifade edilmiştir. Sinan bu anıtları çevresini saran niteliksiz yapılardan temizleyerek yapıların cami olarak tekrar kullanıma açılması sağlamış ve yeni yapılacak yapıların bu tür eserlere beş arşından fazla yaklaşmalarını da yasaklamıştır. 1 mimar arşını 75.8 cm'e karşılık geldiği düşünülürse, yaklaşık 4.00 m kadar bir yaklaşma mesafesi söz konusudur.

Mimar Sinan, 1573 yılında Ayasofya'nın onarımına başladığı sıralarda yapı gecekondü tarzında niteliksiz yerleşmelerle sarılmış bir durumdaydı. Konut sahipleri yapının içinde ve dışında, payeleri ve kemerleri oyarak kendilerine ocaklar, pencereler, dolaplar ve tuvaletler yapmışlardı. Sinan'ın bilgisi dâhilinde alınan bir kararla, yeni yapıların Ayasofya'ya her iki yandan 35 arşından (26,50 m) fazla yaklaşması yasaklandı. Bu kararla Osmanlı'da yeni yapıların eski yapılara yaklaşma mesafesi için bir sınırlama getirilmiş oluyordu. Ayasofya'nın 1573 yılından önce yapılmış bir tasviri ile bugünkü görüntüsünü karşılaştırdığımızda, yapının bozulmadan günümüze kadar ulaşmasında Sinan'ın yapıları çevresiyle birlikte koruma çabalarının (doku bazında koruma) ne derece önemli olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 1.2) [5].

Mimar Sinan tarafından Ayasofya'ya eklenen, diğer iki minareye kıyasen oldukça kalın olan minareler, Osmanlı'nın yapıya eklediği büyük ve cesametli dış payandaların arasında, bu minareleri hem kütleyle uygun bir estetik tasarım hem de yapıyı güçlendiren elemanlar olarak dikkat çekmektedir. Mimar Sinan'ın Ayasofya'daki bu tavrı, 1570'lerde Sultan II. Selim ve daha sonra Sultan III. Murad'ın türbelerinin Ayasofya'nın yanına inşa edilmesi kararıyla sürdürülmüştür. Ayasofya, Osmanlıların kendilerinden önceki bir kültüre ve Hristiyanlık eserlerine saygıyla yaklaştıklarının delili olarak, yaptıkları ilavelerle hem korunmuş, hem de bu ilavelerin tamamlayıcı, yüceltici, tezyin edici güzelliğiyle daha değerli hale getirilerek günümüze ulaşması sağlanmıştır [6].



Şekil 1.2. Ayasofya'nın 1573 Öncesi (Çizim) ve Şimdiki Halleri [5]

Mimar Sinan'ın koruma anlayışının ölçek gözetmediğini, tek bir yapı elemanının dahi koruma anlayışında ne denli önemli olduğunu ortaya koyan bir uygulama, Edirne Selimiye Cami dış avlu duvarının köşesine özenle yerleştirdiği Bizans sütununda görülmektedir (Şekil 1.3). Bu karar, “Sinan'ın tüm geçmiş kültürlerle sahip çıkma anlayışını simgeleyen bir uygulama” olarak tanımlanmaktadır [5]. Mimar Sinan'ın buna benzer uygulamaları, diğer eserlerinde de mevcuttur. En ünlü eserlerinden olan Şehzade Camii ve Süleymaniye Camii'nin inşaatı esnasında, devletin dört bir yanına haber salarak, ihtiyaç duyulan sütun gibi yapı elemanlarını Mısır, Lübnan gibi uzak mesafelerdeki eski tapınaklardan getirtmiştir. Ayrıca, Fatih'te bulunan ünlü Kıztaşı'nı da yine yerinden alarak camide kullanmıştır. Şu an Kıztaşı olarak bilinen taş ise Mimar Sinan tarafından sonradan konulan bir sütundur.



Şekil 1.3. Selimiye Camii'nin Dış Avlu Duvarının Köşesindeki Bizans Sütunu

Mimar Sinan, Osmanlı'nın mimari, mühendislik ve şehircilik alanında en çok değer verilen şahsiyeti olduğu için, onun uygulamaları da aslında Osmanlı'nın koruma anlayışını yansıtıyordu. Mimar Sinan'ın şahsında ve uygulamaları perspektifinden baktığımız zaman tarihi koruma anlayışının şu şekilde özetlenebildiği görülmektedir.

- Şehir dokusunun korunması, özellikle şehir dokusu ve silueti ile bütünleşmiş nadide eserlerin korunması vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Niteliksiz hiçbir yapı koruma altına alınmadığı gibi, imar hareketlerini sınırlayacak bir koruma anlayışı da görülmemektedir.
- Korunması gereken anıtların dokusu ve önemi, etrafına sonradan eklenen yapılar ve müdahalelerden arındırmak suretiyle pekiştirilmiştir.
- Kullanılamaz durumda olan anıtlar, onarılarak ve güçlendirilerek kullanıma açılmıştır.
- Anıtların yakın çevresindeki yapılaşma için anıtlara çeşitli yaklaşım sınırları getirilmiştir.
- Tek bir yapı elemanı dahi önemsenerek korunmuştur, fakat bu elemanların bir müze yerine önemli yapıların bünyelerine yerleştirilerek, kullanılarak korunması da dikkat çekicidir.
- Önceki kültürlere ait dini yapılar, İslami ibadet mekânları haline getirilerek yaşatılmıştır [5].

Günümüzde sit alanı ilan edilerek bir bölgedeki mevcut bütün tarihi yapıların korunması uygulamalarının da yaygın olduğu görülmektedirken, tarihi uygulamalara baktığımız zaman buna benzer bir uygulamayla karşılaşmamaktadır. Bir şehrin bütününün veya bir bölümünün tamamen korunması çoğu zaman mümkün

olmamıştır. Bunun yerine, Mimar Sinan'ın uyguladığı gibi şehirle bütünleşmiş, şehrin karakteri haline gelmiş yapıların ve silüetin korunması yoluna gidilmesi de değerlendirmeye alınması gereken bir yaklaşım olarak tarihin önümüze koyduğu bir gerçektir. Aslında çoğu zaman ekonomik engeller sit alanı koruma uygulamalarını zorlaştırmaktadır. Genellikle, yüksek maliyetler sebebiyle yapı sahipleri restorasyondan kaçınmaktadır. Dolayısıyla tarihi mirastan bahsederken, bu mirasın yaşatılması için telaffuzu bile zor olan maliyetler karşımıza çıkmaktadır ki bu durum söz konusu eserleri, tarihi bir mirastan çok tarihin yeni nesillerin sırtına yüklediği külfetli bir borç haline getirmektedir. Mesela, 1998 yılında Belçika'da yapılan bir araştırmaya göre, ülkede yer alan 10.000 adet tescilli yapının ömürlerinin 50 yıl daha uzatılması için 2.25 milyar Euro harcanması gerekmektedir [1]. Koruma uygulamalarının başarıya ulaşması için bir ekonomik modelle desteklenmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Ekonomik olarak desteklenmiş olan koruma uygulamalarından çok iyi sonuçlar alınmıştır.

Tarihi yapıların korunması söz konusu olduğunda kaçınılmaz maliyetler ortaya çıkar. Bu maliyetlerin mal sahiplerine bırakılması koruma uygulamasını zorlaştırmakta, hatta bazı bölgelerde imkânsız kılmaktadır. Koruma bölgelerinin tespiti sırasında bölgeye uygun bir ekonomik modelin yerel yönetim ve vatandaş işbirliğiyle geliştirilmesi bu sorunu büyük ölçüde çözebilir. Ekonomik bir modelle desteklenmeyen koruma uygulamaları eksik kalmakta ve istenen ölçüde başarıya ulaşamamaktadır.

1.1.2 Koruma İlkeleri

Tarihi yapıların yapısal değerlendirmesi ile onarım ve güçlendirme çalışmalarında iki önemli soru ile karşılaşılmaktadır:

- Bu yapıların tarihi ve estetik özellikleri ne ölçüde ve nereye kadar korunacaktır?
- Söz konusu yapıların onarım ve güçlendirme ihtiyaçları ne şekilde karşılanacaktır?

Aslında bu soruların cevabı bellidir. Bu tür yapıların onarım, güçlendirme ve restorasyonunda, “azami koruma ve asgari müdahale” ilkesine göre hareket edilmelidir. Fakat koruma ve müdahalenin sınırındaki belirsizlik ve hatta her yapı

için bu sınırların değişkenlik göstermesi, uygulamada çok çeşitli zorluklar meydana getirmektedir.

Tarihi yapılara yapılacak müdahalelerin, 1964 tarihli Venedik Tüzüğü'ne uygun olması gerekir. 1964 tarihli Venedik Tüzüğü'nün Restorasyon başlığı altında toplanan ilkeleri kısaca şu şekilde sıralanabilir:

- Onarım uzmanlık gerektiren bir iştir ve amacı anıtın estetik ve tarihi değerini ortaya çıkarmak ve korumaktır. Onarımda, özgün malzeme kullanılmalı, güvenilir belgelere saygı duyulmalı ve bu belgelere bağlı kalınmalıdır.
- Restorasyon veya onarım ve güçlendirme öncesinde detaylı bir tarih araştırması yapılmalıdır. Bu çalışmada, yapının inşa edildiği tarih, yapım süreci, geçmiş hasarların boyutu ve şeması, geçmiş onarım ve güçlendirme müdahaleleri, yapı çevresinde yaşanmış değişiklikler tespit edilmelidir.
- Yapılacak onarım ve güçlendirme müdahalelerinde, geleneksel yöntemler yetersiz kalırsa yeterliliği deney ve araştırmalarla ispatlanmış çağdaş yöntemler kullanılabilir. Uygunluğu kesinleşmemiş yöntemler de yapıya zarar vermeden geri dönüştürülebilir ve sökülebilir olmalıdır. Bununla beraber her halükarda özgün malzeme ve yapım tekniği tercih edilmelidir.
- Değişik dönemlerin yapı üzerindeki katkıları da korunmalıdır. Restorasyonun amacı yapının ilk yapıldığı haline çevrilmesi değildir. Eksik parçalar ve bölümler, yapıya, yanlış anlamaya neden olmayacak ve özgün yapıdan farklı olduğu hissedilecek tarzda birleştirilebilir. Restorasyon işlemi sırasında yapılan tüm işlemler detaylı bir şekilde belgelenmelidir.

Yukarıda, dikkat çekici fakat çok önemsendiği söylenemeyen bir ifade vardır. Venedik tüzüğünde, yapılacak onarım ve güçlendirme müdahalelerinde geleneksel yöntemler yetersiz kalırsa başka bir yöneme başvurulması önerilmektedir. Fakat çoğu zaman geleneksel bir yöntem, müdahale alternatifleri arasına bile alınmaz. Mesela, bir kemerin güçlendirilmesinde, o kemerin içine yeni bir kemerin inşa edilmesi hiç düşünülmez. Hâlbuki Mimar Sinan'ın Beyazıt Camii'ne uyguladığı güçlendirme yöntemi yanlış kabul edilemeyeceği gibi, günümüzde de tekniğine uygun geleneksel yöntem güçlendirmeleri de yapılabilir.

Bunların yanında, tarihi yığma yapıların yapısal güvenliklerinin değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi için yapılacak deney, analiz ve güçlendirme uygulamalarında prensip olarak aşağıdaki ilkelerin de göz önünde tutulması gerekmektedir.

- Tarihi yığma yapıların sahip olduğu yapı sistemleri deprem ve diğer olumsuz şartlara dayanıklı bir yapı sistemidir. Yığma yapım tekniği, yetersiz, yanlış bir teknik olarak kabul edilmemelidir.
- Her yapının koruma derecesi, maruz kaldığı yıkıcı etkilerin ve riskin boyutuna göre belirlenmelidir.
- Orta ve hafif şiddetli depremlerde, bu yapılarda en düşük seviyede hasarın meydana geldiği, yapısal hasarın meydana gelmediği, ancak eleman bazında yerel bazı hasarların meydana geldiği kabul edilir.
- Büyük yer hareketlerinde ise yapının genel olarak dengesinin bozulmayacağı veya tamir edilebilir hasarların meydana geleceği kabul edilir [7].

1.1.3 Koruma Yöntemleri

Her bir yapı veya yapı grubunun korunması için farklı yaklaşımlar ortaya konabilir, çünkü her yapının ihtiyacı olan koruma yaklaşımı farklılıklar arz etmektedir. Bu farklı ihtiyaçlara cevap olarak önerilmiş ve uygulanmış olan koruma yöntemlerine dair kavramlar aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Preservation: Yapıları, yapı gruplarını özgün niteliğinde tutarak özgün detaylarının, dekorasyonunun, konumunun, taşıyıcı sisteminin, eksiksiz bütünleştirilmesini sağlayarak, olduğu gibi, “Müze alanlar” olarak korunması ön görülen alanlarda uygulanmaktadır

Conservation: Yapıların veya yapı gruplarının kullanımını sağlamak üzere karakterin ve ölçeğin korunarak günün şartlarına uyarlanması, eklentiler yapılması ve geliştirilmesi, çağdaştırılması gibi kontrollü değişimlere imkân vermektedir

Restorasyon: (Orijinal durumun canlandırılması) yapı ölçeğinde, bozulan parçaların yeni malzeme ve yapı teknolojileriyle yenilenmesi, taşıyıcı sistemin sorunlarının giderilmesi, yok olan kısımların yerine konması şeklinde yapılan yenileme müdahalelerini kapsamaktadır. Sağlamlaştırmadan biraz daha ileri bir müdahale biçimi olarak algılanabilir. Yapının bozulan, yok olan, eskiyen elemanları

değiştirilebileceği gibi, yapıya farklı bir işlev de verilmesi söz konusu olabilmektedir. Restorasyonda kullanılan teknikler aşağıda sıralanmıştır.

- Sağlamaştırma (consolidation): İklim, çevre şartları, fiziki müdahaleler ve tahribat neticesinde bir yapının eskiyen parçalarının temizlenmesi, onarılması malzeme ve doku dayanıklılığının artırılması ve sahip olduğu renk, doku, taşıyıcı sistem, bezeme gibi karakterlerin daha uzun süre aynı nitelikte izlenebilmesi amacıyla gerçekleştirilen bir yenileme türüdür. Sağlamaştırma tek yapı ölçeğinde malzemenin, taşıyıcı sistemin ve üzerinde bulunduğu zeminin sağlamaştırılması şeklinde olmaktadır.
- Bütünleştirme (reintegration): Farklı bir tanımla bütünleştirme, bir bölümü hasar görmüş ya da yok olmuş yapı ve yapı elemanlarını, ilk tasarımlarındaki bütünlüğe kavuşturacak biçimde geleneksel ya da çağdaş malzeme kullanarak tamamlama işlemidir. Bütünlemeyi yönlendiren değişkenler estetik, işlevsel ya da yapısal denge kaygılarıdır. Yıkık durumda göze hoş gelmeyen bir yapı bütünleştirilerek, hem estetik bütünlüğe kavuşur, kullanılabilir duruma gelir, hem de tümüyle yok olmaktan kurtarılabilir.
- Yenileme (renovation): Bu yöntemde yapının herhangi bir bölümü, belirli kısımları yenileştirilerek korunur. Söz konusu bileşenler tümünden yeni bir niteliğe kavuşturulur. Örneğin, yapıda belirli katların ya da ön cephenin mimari nitelikleri açısından yenilenmeleri bu nevidendir.
- Yeniden yapma (reconstruction): Kültürel varlığın yok olan önemli bir bölümünün ya da tümünün, yapının özgün durumuna veya kaynaklara, fotoğraflara ve belgelere dayanarak yeniden yapılması ve eskisinin yerine konması yoluyla yaşatılmasını amaçlayan bir tür koruma yöntemidir. Genellikle arkeolojik alanlarda ve kültürel değeri önemli yapılarda uygulanan bu yöntem, yangın, deprem ya da savaş gibi toplu yıkımlarla yitirilen ve yeniden canlandırılmaya çalışılan alanlarda tarihi sürekliliği ve milli karakteri yansıtabilmek endişesiyle başvurulmaktadır.
- Temizleme (liberation): Anıtların genel etkisini bozan, tarihi ve estetik değer taşımayan eklerden arındırılması işlemidir. Yapılarda bezeme temizliği ve cephe temizliği şeklinde uygulanır.

- Daha iyi bir çevreye taşıma (reproduction): Bayındırlık etkinlikleri (yol, baraj yapımı vb.) jeolojik yapı ya da doğal afetler, bir anıtın bulunduğu yerde korunmasını zorlaştırabilir, hatta imkânsız kılabilir. Bu durumda anıtın önceden belirlenen uygun bir yere taşınması gereklidir.
- Sıhhileştirme (rehabilitation): Kültürel değeri, günümüz konfor şartlarına kavuşturmak üzere yapı donatılarının ve alt yapısının iyileştirilmesidir.
- Kopyalayarak yaşatma (reproduction): Bulunduğu konumda çevresinden çeşitli şekillerde zarar gören kültürel varlığın ya da yapının daha uygun bir yere taşınması sonucu, boş kalan yerine kopyasının yapılarak konması yöntemidir. Mesela, Floransa'daki Signaria Meydanı'ndaki Michelangelo'nun "Davut Heykeli"nin müzeye kaldırılarak yerine kopyasının konulması buna bir örnek teşkil eder [40].

Restorasyon teknikleri geri dönüşümlü ve geri dönüşümsüz olarak isimlendirilebilecek iki gruba ayrılabilir. Geri dönüşümlü restorasyon tekniklerinde, tatbik edilen teknik, sonraki bir tarihte gerekli görüldüğünde, kolayca düzeltililebilecek ve yapı üzerinde çok az etki bırakacak, geri dönüşebilir bir teknik olmalıdır. Tekniğin geri dönüşümlü olmasının faydaları ise şöyle sıralanabilir.

- Kullanılan teknik yeterli dayanıklılık ve performans gösteremezse, yapıya zarar vermeden sökülebilir.
- Uygulamadan sonra, daha elverişli malzemeler ve teknikler geliştirildiğinde kolayca yeni bir uygulama yapılabilir.
- Yapıların sanat ve tarihi kalıntıları yok edilmemiş olur.

Geri dönüşebilir tekniklere örnek olarak verilebilecek uygulamalar çeşitli örnekler verilebilir. Bunlardan, kemerlerin gergilerle güçlendirilmesi, dış payandaların kullanılması, ön gerilmeli çelik ve lif takviyeli plastik çubuklar kullanılması, duvarların yatay stabilitesini ve bağlantısını sağlayacak, ön gerilmeli şerit ve dikiş elemanları kullanılması sayılabilir.

Geri dönüşümsüz restorasyon teknikleri, kalıcı ve yapıya zarar vermeden geri sökülemeyecek tekniklerdir. Bunların avantajları da şöyle sıralanabilir. Yapının taşıyıcı sisteminin bütünleştirilmesi ve entegrasyonu ile yeniden sistem kurmak söz konusu olduğunda, gerekli görülürse geri dönüşümsüz teknikler kullanılabilir. Geri

dönüşümsüz tekniklere örnek olarak, betonlama, yıkılmış olan duvarların yeniden yapılması, duvarlara dikiş atılması, ön gerilmeli kablo elemanlar kullanılması ve temellerin güçlendirilmesi sayılabilir [16].

1.3. Tarihi Yapılarda Performans Kavramı

Tarihi yapılara değer katan zaman faktörü, diğer bir taraftan tarihi yapıların başa çıkması gereken bir düşmanıdır. Genel anlamda malzemenin zamanla yaşlanması ve bozulması, orijinal tasarımın yetersizliği ya da zamanla yetersiz kalması, kullanım amacıyla zaman içerisinde meydana gelen değişiklikler sebebi ile oluşan hasarlar ve zorlanmalar ya da yapısal müdahaleler ve geçmiş büyük afetler sonrası oluşan hasarlar tarihi yapıların ortak problemleridir. Tarihi yapıların yapısal güvenliğinin incelenmesinde çeşitli tanımlanmış performans seviyeleri belirlenerek yapısal analiz ve kontrollerin yapılması sağlanabilir. Ancak önemli olan her bir yapı için, o yapının çeşitli dış etkilere karşı beklenen performansının tarif edilmesidir. Henüz yeni kullanılan bir kavram olan yapı sistemlerinin performans tabanlı olarak analizi yanında tarihi yapıların incelenmesinde benzer yaklaşımların kullanılması uygulamada oldukça nadir rastlanan bir durum olup konu ile ilgili kaynaklar da oldukça kısıtlıdır. Ancak kısıtlı çalışmalarda rastlanan ortak terminoloji ve tanımlar çerçevesinde performans seviyeleri aşağıda verilmiştir.

- Hasarsızlık beklentisi (ND) : Bu performans düzeyinde ihmal edilebilecek kadar az bir yapısal hasara müsaade edilebilir. Yapı sanatsal değerini kaybetmemeli ve hem yapısal elemanlarda hem de ihtiva edilen tarihi değerlerde ancak çok küçük ve ihmal edilebilir kayıp veya hasar oluşmalıdır. Özel durumlar hariç, bu performans beklentisi sık meydana gelen (50 yılda aşılması olasılığı % 20-50) depremlerde beklenmelidir.
- Kültürel değerin korunması (CVS) : Bu performans düzeyinde ise tamir edilebilir yapısal hasarlara izin verilir. Tamir, genel güvenlik önlemleri almayı gerektirmemelidir. Bölgesel hasarlar kabul edilebilir ancak yapının tamamına dağılmış bir hasar durumu oluşmamalıdır. Yapının sanatsal değerinde ve ihtiva edilen tarihi değerlerde kayıp kabul edilebilir ancak bu kayıp yok olma boyutuna ulaşmamalıdır. Tamir edilebilmeli veya olduğu gibi kullanılmaya-sergilenmeye devam edilebilmelidir. Özel durumlar hariç, bu

performans beklentisi orta sıklıkta meydana gelen (50 yılda aşılması olasılığı % 10-20) depremlerde beklenmelidir.

- Göçmenin engellenmesi (CP) : Yapıda genel ya da bölgesel göçme durumu oluşmamalıdır. Yapı sanatsal değerini kaybedebilir ve hem yapısal elemanlarda hem de ihtiva edilen tarihi değerlerde kayıp veya hasar oluşabilir ancak yapı ayakta kalmalıdır. Özel durumlar hariç, bu performans beklentisi çok ender meydana gelen (50 yılda aşılması olasılığı % 2-10) depremlerde beklenmelidir [41].

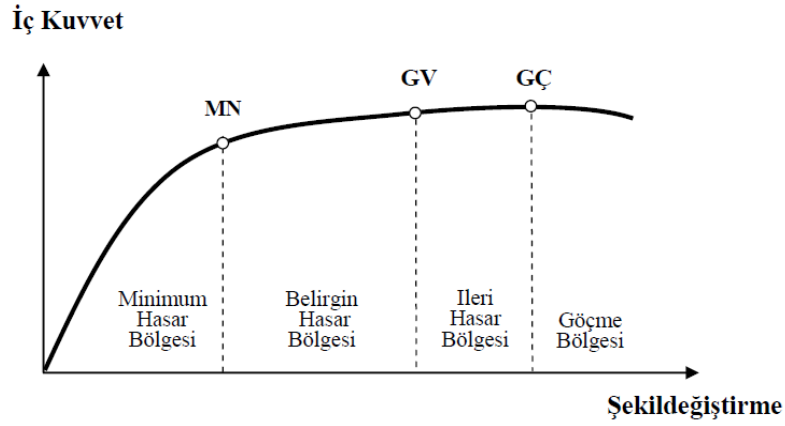
Tanımlanan malzeme modelleri ve yer hareketi parametrelerinden sonra gerçekleştirilen analizde yapının gösterdiği performans, ND ve CVS performans seviyeleri için yerdeğiştirmeler (d_{lim}) bazında tanımlı limitler kontrol edilerek, CP performans seviyesi için ise maksimum moment (M_u) yöntemi ile belirlenmesi ve kapasite tahkikleri yapılması önerilmektedir. Yerdeğiştirme limitleri için d yerdeğiştirme ve h eleman yüksekliği olmak üzere elemanın düşeyle yaptığı açının tanjant değeri olan d/h için Hasarsızlık performans seviyesinde 0.0005, Kültürel değerlerin korunması performans seviyesinde ise 0.001 değerleri önerilmiştir [41].

Tarihi yapılarda malzeme testleri için numune almanın bile çoğu zaman mümkün olmadığı düşünülürse, yapının türüne de bağlı olmak şartıyla çoğu zaman hasarsızlık performansını sağlaması gerektiği düşünülebilir. Özellikle anıt eserlerin korunmasında hasarsızlık performansı esas kabul edilebilir. Ancak hedef performans hasarsızlık olduğu zaman yapıda güçlendirme ihtiyacı ortaya çıkma ihtimali de yükselmektedir. Güçlendirme müdahaleleri ise oldukça dikkatli yapılması gereken zor çalışmalardır.

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik (2007) tarihi yapıların değerlendirilmesini kapsamamaktadır, öte yandan yönetmeliğin beşinci bölümünde yığma yapıların deprem performansının değerlendirilmesi için kullanılacak yöntem ve duvar kayma emniyet gerilmelerinden bahsedilmiştir. Tarihi yığma yapılar için bir kıyaslama olmak üzere bu değerlerden faydalanılabilmek mümkündür. Bu konu araştırmanın 5. Bölümünde daha detaylı olarak ele alınmıştır. Bu bölümde kavram açısından performans sınırları üzerinde durulmuştur.

Deprem yönetmeliğin tanımlarından yola çıkarak tarihi yığma yapılar için bazı performans kriterleri geliştirilmesi de mümkün olabilir. Yönetmelikte, deprem

performansı, yapıların belirlenen bir deprem etkisi altında, yapıda meydana gelmesi beklenen hasar durumları ile ilişkili olarak tanımlanmıştır. Buna göre dört farklı hasar durumu esas alınarak tanımlanan performans seviyeleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. 2007 Türk Deprem Yönetmeliğinde Hasar Seviyeleri

Hasar bölgeleriyle bağlantılı olarak, Hemen Kullanım, Can Güvenliği, Göçme Öncesi şeklinde üç performans düzeyi tanımlanmıştır. Bu düzeylerden tarihi yığma yapılar için kabul edilemeyecek olan ileri yapısal hasarların bulunduğu “göçme öncesi performans düzeyi” kolayca çıkarılabilir. Geriye kalan hemen kullanım ve can güvenliği performans düzeyleri ise yeniden tanımlanarak tarihi yığma yapılar için de kullanılabilir.

2007 Deprem Yönetmeliği’nde, yığma binaların performans seviyesine, bilgi düzeyine göre yapılan inceleme ve hesap sonucunda karar verileceği belirtilmiştir. Eğer yığma yapının her iki doğrultudaki tüm duvarlarının kesme dayanımı, uygulanan deprem etkileri altında oluşan kesme kuvvetlerini karşılamaya yeterli ise, yapının Hemen Kullanım Performans Düzeyi’ni sağladığı sonucuna varılacağı öngörülmüştür. Herhangi bir katta uygulanan deprem doğrultusunda bu şartı sağlamayan duvarların kat kesme kuvvetine katkısı % 20’nin altında ise yapının Can Güvenliği Performans Düzeyi’ni sağladığı kabul edilecektir. Bu durumda, sadece yetersiz olan duvarların güçlendirilmesi gerekir. Bunların dışında, yapının Göçme Durumu’nda olduğu kabul edilir [21].

Deprem yönetmeliğindeki hemen kullanım performans düzeyi, deprem etkisinin herhangi bir hasara yol açmadan duvarların kesme mukavemeti ile taşındığını kabul etmektedir. Sadece kesme kuvvetine dayalı bir performans belirlemek tarihi yapılar

açısından yeterli olmayabilir. Zira duvarlar için düzlem dış hareketler, duvarlar heterojen malzemeden oluştuğu için çeşitli eğilme ve dağılma etkileri de zaman zaman ne çıkmaktadır. Fakat tüm elemanlar hasar durumu açısından göz önüne alındığında, beklenen davranış bu performans seviyesinin kapsamıyla tam olarak örtüşmektedir. Kısaca ifade etmek gerekirse, hemen kullanım performans düzeyinin değerlendirme kriterleri tarihi yapılar için yeterli olmamakla birlikte, hasar hedefleri ve kabulleri tarihi yapılar için kabul edilebilir bir çizgidedir. Bu performans seviyesinde, kolayca tamir edilebilecek, yapısal olmayan hasarlar, çatlaklar kabul edilmiş olur.

Can güvenliği performans seviyesinde ise bazı duvarların kesme kuvveti taşıma kapasitesinin üzerinde zorlandığı, kapasitesi açılan elemanların kat kesme kuvvetine katkısı % 20'den az olduğu kabul edilmiştir. Tarihi yığma yapılar açısından can güvenliği performans seviyesinin de uygun olmadığı anlaşılır. Çünkü 1/5 oranında yapısal bir hasar kabul edilmiş olur. Hâlbuki bu yapıların korunmasına ve yaşatılmasına yönelik yaklaşımlar, sürdürebilirlik maliyetleri ve müdahale yapmanın gerek korumacılık gerekse malzeme ve yapım tekniği açısından barındırdığı zorluklar düşünüldüğünde, herhangi bir yapısal hasarın kabul edilemeyeceği anlaşılır.

Bu durumda, tarihi yığma yapılar “minimum hasar bölgesinde” kalmalıdır. Birçok performans seviyeleri yerine sadece tek bir performans seviyesi kabul edilebileceği düşünülür. Orta ve hafif şiddetli depremlerde, bu yapılarda en düşük seviyede hasarın meydana geldiği, yapısal hasarın meydana gelmediği, ancak eleman bazında yerel bazı hasarların meydana geldiği kabul edilir. Büyük yer hareketlerinde ise yapının genel olarak dengesinin bozulmayacağı veya tamir edilebilir hasarların meydana geleceği kabul edilebilir. Bunun yanında meydana gelebilecek yapısal hasarların boyutu genel olarak yapının genel stabilitesini bozmayacak, yapının göçmesine sebep olmayacak ve telafi edilebilecek elamanlarda olmalıdır. Telafi edilebilecek elemanlarda gerçekleşecek hasarlarda ise mühendislik yorumu ön plana çıkacaktır.

1.4. Hedefler

Geçmiş medeniyetlere ait büyük yığma anıtlar, yaşlanma etkisi, olumsuz hava şartları, bakımsızlık gibi sebeplerle sürekli g kaybetmektedir. Özellikle deprem riskinin büyük olduğu bölgelerde ise yer hareketleri önemli yıkıcı etkilerden birisini

oluşturur. Ekseriyetle yapısal değerlendirmelerin neticesinde, yenileme, onarım ve güçlendirme gibi müdahalelerin de yapılması kaçınılmaz olmaktadır. Ancak kültürel mirası koruma kavramıyla, bu yapıların yapısal davranışını belirlemek üzere yapılacak değerlendirme ve müdahaleler pek de kolay uzlaşmamaktadır. Oldukça zor görünen bu problemin kaynağı ise, yığma yapı davranışının tam manasıyla idrak edilememesidir. Özellikle bu alanda yapılan değerlendirme ve güçlendirme çalışmalarının öncesinde yapı davranışının iyice anlaşılması ve müdahale önerilerinin de bu doğrultuda geliştirilmesi gerekmektedir.

Yığma yapıların değerlendirilmesi dört temel aşamada gerçekleştirilebilir:

- Birinci aşamada, yapı hakkında detaylı bir bilgi toplama çalışması yapılmalıdır. Bu çalışma, tarihi araştırma, yapı sisteminin detaylı olarak incelenmesi, malzeme özellikleri, yapım teknikleri, yerel zemin özellikleri ve sismik risk başlıklarında gerçekleştirilmelidir.
- İkinci aşamada ise yapının sayısal hesap modelinin kurulması üzerinde çalışılmalıdır. Bu hesap modelinin oluşturulması için gerekli olan geometri, malzeme ve davranış idealleştirmeleri, çeşitli modelleme ilkeleri, uygun analiz sonuçlarının alınması için dikkate alınması gereken önemli başlıklardır. Bu aşamada, hesap modelinin analiz edilecek olan yapıyı iyi temsil etmesi için uygun modelleme tekniğinin de belirlenmesi gerekir.
- Üçüncü aşamada, yapıyı en iyi şekilde temsil edecek şekilde kurulan hesap modeli üzerinde, statik ve dinamik analizler yapılır. Analiz çalışmasından önce, yığma yapıların ve özellikle incelenecek olan yapının maruz kaldığı yükler altında göstereceği davranışın da iyi bilinmesi gerekir. Analiz öncesinde, göçme mekanizmalarını, tipik hasarları ve hasar görebilecek yapı elemanlarını da tespit etmek, bu elemanları dikkatle izlemek iyi bir yöntemdir.
- Yapının analizinden sonra, analiz sonuçları değerlendirilerek, yapının her hangi bir güçlendirme müdahalesine ihtiyaç duyup duymadığı tespit edilir. Dördüncü aşama olarak ifade edilebilecek olan bu safhada, müdahalenin ölçeği ve yöntemi belirlenerek çeşitli detay önerileri üretilir. Daha sonra takviye edilmiş yapının da tekrar analiz edilmesiyle, yapılan takviyenin uygunluğu da değerlendirilebilir.

1.5. Yığma Yapılar

İnsanoğlu tarafından kullanılan bütün yapı malzemeleri, en yeni teknolojiyle elde edilenler de dâhil olmak üzere tabiatta bulunan ham maddelerden elde edilmiştir. Bazen taş, bazen kerpiç, bazen de ahşap, tabiatta kolayca bulunabildiği için yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinden olmuştur. Taş, bu malzemeler arasında özel bir yere sahiptir. İnsanlar barınma ihtiyaçlarını karşılamak için çok defa taşı kullanmaya başvurmuşlardır. Tabiatta buldukları taşı çeşitli şekillerde işleyerek binlerce yıldır kullana gelmişlerdir. Mısır, Çin, Meksika, Roma, Bizans ve Anadolu'da pek çok tarihi eserin yapı malzemesi taştır. Taşın tabiatındaki güç ve kararlılık, onu yüzyıllara meydan okuyan eserlerin malzemesi yapmıştır. Bunun yanında, taş, bolluktan kaynaklanan ucuzluğu sebebiyle hala kullanılan bir yapı malzemesidir. Harcın kullanılmaya başlanması ve tuğlanın keşfiyle de tarihi yığma yapıları bu günlere kadar taşıyan önemli yapı malzemeleri tarihin sayfalarına kaydolmuştur.

Mevcut tarihi mirasın büyük bir bölümünü oluşturan yapılarda, yığma yapı tekniğinden ve ahşap malzemelerden faydalanılmıştır. Fakat bu malzemeler ve yapım teknikleri, günümüz inşaat mühendisliği eğitim programında çok az bahsedilen veya hiç söz konusu olmayana konulardandır. 20. yüzyılın çelik ve betonun temel mühendislik malzemelerini teşkil ettiği mühendislik ortamında, yapı mühendisleri geleneksel yapım teknikleri ve malzemeler hakkında çok az bilgi birikimine sahip olabilmektedir. Bu bilgi eksikliği, yapısal güvenliğin değerlendirilmesinde büyük bir önyargı ve çelişkiye sebep olmaktadır. Hatta günümüzde, geleneksel teknik ve malzemeler, tasarımın ilk aşamasında bir alternatif olarak bile akla gelmemektedir. Ne var ki, geleneksel teknik ve malzemeler, sürdürülebilir ve ekonomik yapılar açısından ilgi çekmeye başlayan yeni bir konuyu teşkil etmektedir. Yığma yapılar, günümüzdeki modern teknik ve malzemelere göre oldukça ekonomiktir. Mesela, bir yığma yapı elemanı olan tuğlayı üretmek için 2.8 MJ/kg enerjiye ihtiyaç duyulurken, beton için 8.5 MJ/kg ve çelik için ise 43 MJ/kg enerjiye ihtiyaç vardır. Tuğlanın, mimari detaylara uyumu, çevre şartlarına dayanıklı olması, durabilitesi ve zamana karşı gösterdiği performansı ve görünüşü de oldukça iyi seçenekler sunar. Yığma yapılar ayrıca geri dönüşebilir ve kolaylıkla ortadan kaldırılabilir malzemeler ve tekniklerle inşa edilmişlerdir [19].

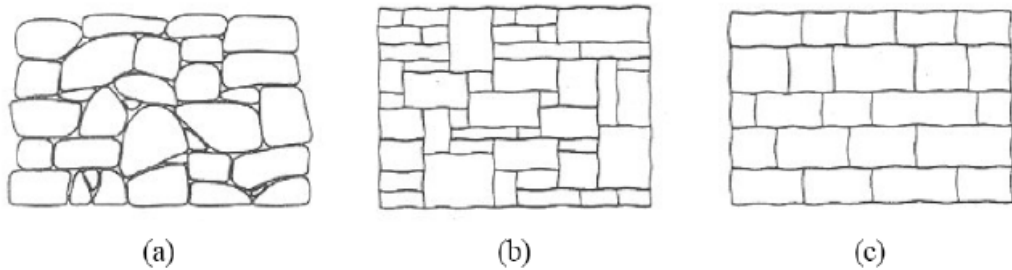
Yığma yapıların tasarım prensiplerinin büyük bir bölümü ampirik ve sezgiye dayanan kriterlerden ve zamanın geçersiz kıldığı tarzlardaki yaklaşık hesap yöntemlerinden oluşur. Yönetmeliklerin yetersizliği ile keyfi ve denetimsiz uygulamalar, pek çok depremde insanları perişan eden neticelere yol açmıştır (Şekil 1.5). Son zamanlarda, Avrupa’da, teknolojik ve mekanik açılardan yığma yapıları düzenleyen Eurocode 6 – Design of Masonry Structures (EC6) [7] and Eurocode 8 – Earthquake Resistant Design of Structures (EC8) standartları geliştirilmiştir.



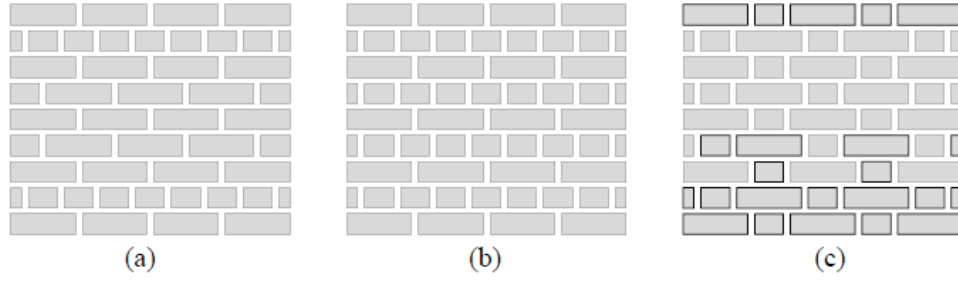
Şekil 1.5. Depremler a)S. Francisco, (1906), (b)Messina, (1908) (c)Tokyo, (1923) [19]

Yığma yapılarda tarih boyunca çok farklı yapım teknikleri kullanılmıştır. Duvarların teşkil edilmesinde, malzemelerin farklı dizilişleri, bir arada kullanımları da farklı yapım teknikleri şeklinde karşımıza çıkmıştır.

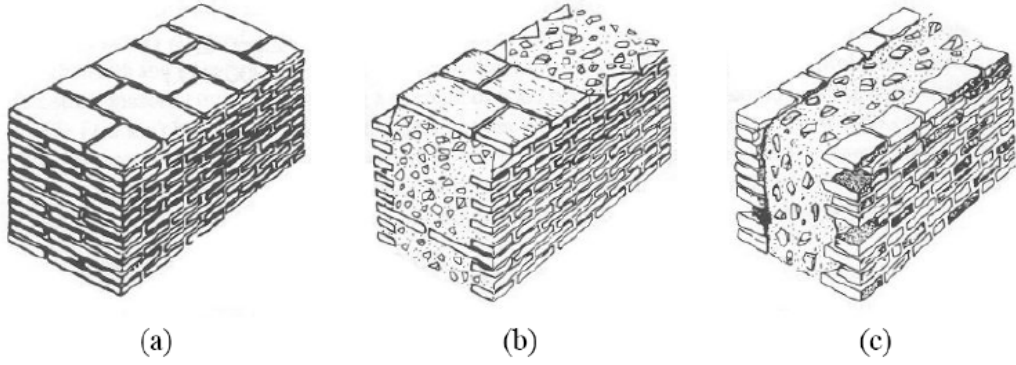
Yığma yapıların, tuğla ve taş yapı birimleri ve bu birimler arasındaki bağlantıyı sağlayan harç gibi malzemelerden oluşan, heterojen bir yapım tekniği vardır. Yığma yapıların yapım tekniği açısından basit bir sınıflandırması aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir (Şekil 1.6). Farklı yapı malzemelerinin bir araya getirildiği yığma yapım tekniğinde, yığma birim ve bağlayıcıya bağlı olan pek çok geometrik, örgü tarzı geliştirilmiştir (Şekil 1.7, 1.8) [20].



Şekil 1.6. Yığma Taş Yapılar a) Moloz taş, b) Kesme taş, c) İri Kesme Taş [20]



Şekil 1.7. Tuğla Örgü Teknikleri a) Basit, b) Çapraz, c) Flaman [20]



Şekil 1.8. Roma'da Duvar a) Bağlı b) Yastıklı-Ortası Dolgulu c) Tuğla Yüzlü-Dolgulu [12]

Tuğla ve taşın kullanılan harçlarla bir araya getirildiği, yer yer dolgu malzemeleri, kenetler ve gergiler gibi bağlantı elemanlarının da kullanıldığı yığma yapım tekniğiyle, bugün hâlâ hayranlıkla seyrettiğimiz mimari eserler gerçekleştirilmiştir. Yıllara meydan okuyan bu eserler mimari estetiği ve duruşuyla olduğu kadar yapım teknikleriyle de saygıyı hak etmektedir (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Göz Kamaştırıcı Tarihi Yığma Şaheserler

2. TARİHİ YIĞMA YAPILARIN DEĞERLENDİRİLMESİ İÇİN YAPILAN HAZIRLIK ÇALIŞMALARI

Tarihi yığma yapıların yapısal değerlendirmesi öncesinde kapsamlı bir araştırmaya ihtiyaç vardır. Yapılacak araştırmaların ilk ayağını gözlem ve araştırma başlığı oluşturur. Bu safhada tarihi araştırmalar, yerinde gözlem, tespit ve değerlendirmeler yapılır.

Sonraki safhada ise yapının malzeme özellikleri belirlenir. Bu özelliklerin belirlenmesi için yapılacak deneysel çalışmalar da bu ikinci safhada değerlendirilir.

Üçüncü aşamada ise yapının yer aldığı çevrenin sismik risk büyüklükleri ve yerel zemin şartları belirlenir. Yapının temel sistemi ve zemin davranışı ilişkisi araştırılır.

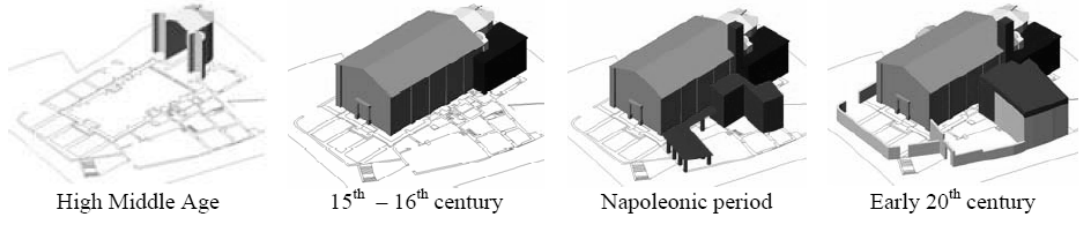
2.1. Gözlem ve Araştırma

2.1.1. Tarihi Araştırmalar

Tarihi yığma yapıları anlamak için yapılacak olan tarihi araştırmalar, yapı hakkında pek çok noktaya ışık tutacak birçok bilgiyi elde etmeye yardımcı olacaktır. Kronolojik olarak yapıyı etkileyen hadiseler, tabii afetler ve müdahaleler, tarihi bir araştırma ile gün yüzüne çıkarıldığında, yapının pek çok karanlık ve belirsizlikleri içeren bünyesine derin bir bakış kazanılmış olur. Bu aşamada yapılması lazım gelen araştırmaları şöyle sıralamak mümkündür:

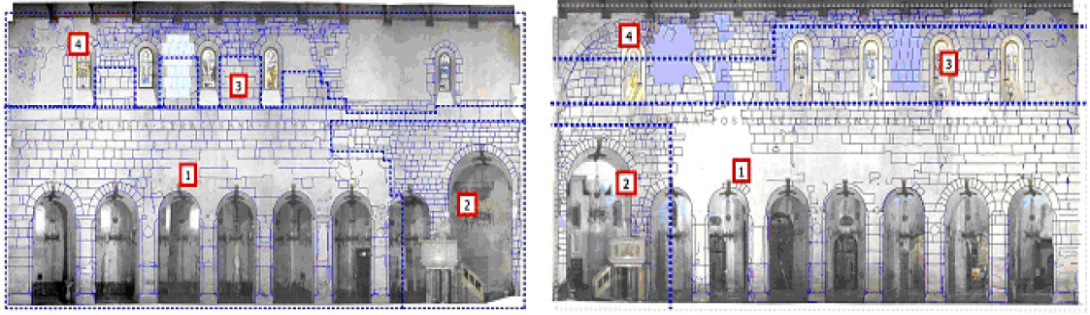
- Yapının, arşivlerde yer alan, her türlü kayıt ve belgeleri, planları, fotoğrafları ve her türlü çizimleri detaylıca incelenmeli ve derlenmelidir.
- Yapının inşa tarihi, inşaatındaki aşamalar, duraklamalar, sonradan yapılan ekler ve bunların yapım tarihleri, mimarları tespit edilmelidir (Şekil 2.1).
- Yapının tarih boyunca yaşadığı depremler, geçirdiği onarım ve güçlendirmeler, farklı dönemlerdeki çeşitli yapısal müdahaleler ve geçmiş hasarlar tespit edilmesi gereken önemli noktalardır.

- Yapım tekniği, özgün yapı malzemelerine günümüzde ulaşabilme imkânları da araştırılması gereken önemli konulardan birini teşkil eder.



Şekil 2.1. St. Michele Arcangelo Kilisesinin İnşaat Safhaları [22]

Yüzyıllardır ayakta duran bu yapılar birçok kez hemen hemen her depremin arkasından onarım görmüştür. Yığma yapı dokusundan çeşitli zamanlarda yapılmış müdahaleler tespit edilebilir. Aşağıdaki resimde bir yığma yapının farklı dönemlerdeki müdahaleleri yansıtan dokusundan yola çıkarak yapım aşamalarının tespit edilmesine dair bir çalışma görünmektedir (Şekil 2.2).

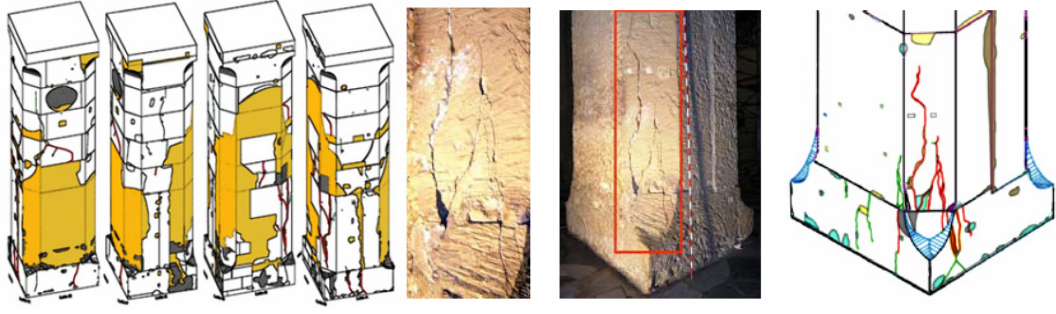


Şekil 2.2. Cephe Dokusundan Yapım Safhalarının Belirlenmesi [22]

2.1.1. Yerinde Gözlem ve İncelemeler

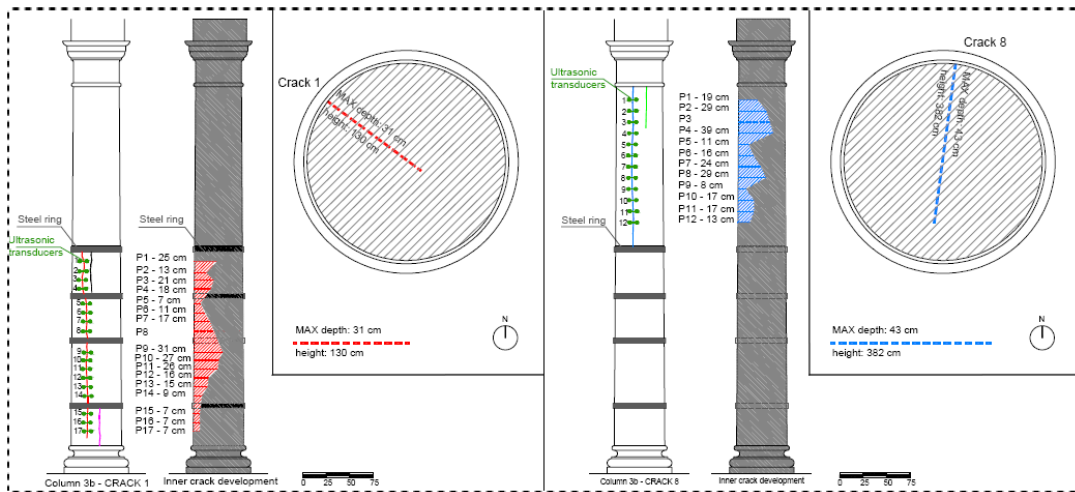
Bu safhada, yerinde incelemeler ve geometrik olarak gözlemler yapılmalıdır. Yerinde gözlem ve incelemelerde üzerinde durulması gerekli hususlar şöyle sıralanabilir:

- Yapı malzemelerinde ve yapı elemanlarındaki bozulmaların ve hasarların seviyesi, boyutları ve tipleri kaydedilmelidir.
- Görünen çatlaklar, hasarlar ve göçme biçimleri, taşıyıcı sistem, duvarlarda meydana gelebilecek düşeyden sapmalar ve eğilmeler basit aletlerle ölçümler yapılarak tespit edilmelidir. Bu tespitler fotoğraf ve video gibi ortamlara kaydedilmelidir. Hasar haritaları çıkarılmalıdır (Şekil 2.3, 2.4).



Şekil 2.3. Yapı Elemanlarında Hasarların Tespiti ve Sınıflandırılması [22]

- Ayrıca, yapının geometrisinde, boyutlarında meydana gelmesi muhtemel değişiklikler de tespit edilmelidir.
- Uzun vadeli araştırmalar, yapı hakkında paha biçilmez bilgiler sağlayabilir. Bu kapsamda, yapının nem durumu, sıcaklık değişimleri, çatlak genişliklerindeki değişimler, yapıdaki yer değiştirmeler, farklı oturmalar ve çevre titreşimi ölçümleri önemli bilgiler sağlayan çalışmalardandır. Yapıda kritik noktalara yerleştirilecek gerilme ölçen aletlerle, istenilen noktadaki gerilme dağılımı da tespit edilebilir. Farklı mevsimleri içeren uzun vadeli araştırmalardan elde edilecek veriler, malzeme bozulmalarını, yapıdaki taşıyıcı sistem zayıflıklarını, sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan problemlerin etkilerini anlamakta büyük fayda sağlar.
- Yapının taşıyıcı sistemi, detaylı olarak incelenmeli, yük taşıma mekanizması ve yük aktarımının hangi elemanlar vasıtasıyla gerçekleştiği incelenmelidir.



Şekil 2.4. Hasar Tiplerinin, Çatlak Biçimlerinin Belirlenmesi [22]

Yapıdaki çatlaklar alçı ile sıvanırsa, alçıdaki çatlamaya göre oturmalar ve yer değiştirmeler sürekliliği izlenebilir. Söz konusu çatlakların her iki yanına yerleştirilecek camlar yardımıyla izlenen süre sonunda yapıdaki çatlak genişliğindeki değişimler tespit edilebilir. Kumpas veya mikrometre ile ölçümler yapılabilirken fotoğraf tekniği de kullanılabilir. Çatlakların gelişiminden yapının zeminindeki oturmalar hakkında da bilgi sahibi olmak mümkündür [11].

2.2. Malzeme Özellikleri

Yapı malzemeleri, kullanıldıkları yapıların davranışlarında belirleyici bir rol oynarlar. Tarihi yığma yapılarda kullanılan harç, tuğla, taş ve ahşap gibi malzemelerin fiziki ve mekanik özelliklerinin anlaşılması, bu yapıları değerlendirmek üzere yapılacak çalışmaların vazgeçilmez bir parçasıdır. Bu kısımda tarihi yığma yapılarda kullanılan malzemelerin özellikleri incelenmiştir.

2.2.1. Harç

Yığma yapılarda kullanılan harç miktarı diğer malzemelere nazaran çok az olmasına rağmen, bu yapıların performansı büyük oranda kullanılan harcın bağlayıcı özelliği ve mukavemetine bağlıdır. Basınç, çekme ve kayma mukavemetleri ile yığma yapı birimleri arasındaki bağ (derz) mukavemeti, yığma yapıların önemli yapısal göstergeleridir. Bağlayıcı malzeme, dolgu malzemesi ve suyun belirli oranlarda karışımı ile elde edilen, katılaşma özelliğindeki hamurlara “harç” denir. Harçlar içinde bulunan bağlayıcıların niteliğine göre isimlendirilirler. Yapıda harç kullanımının temel amacı, yapı elemanlarını meydana getiren yapı birimlerinin birbirleriyle bağlantısını sağlayarak bir bütünlük teşkil etmektir. Ayrıca harç, yapı bileşenlerinin üzerine gelen yüklerin dağıtılmasına yardımcı olmakla birlikte bileşenin esnemesine, hareket etmesine de yardımcı olur. Bunun yanında harçların, dış hava şartlarının bozucu etkilerinden yapıyı korumaya yardımcı olduğu da bilinen bir gerçektir [10,12].

Topraktan elde edilen tuğla ve kerpicing yapı malzemesi olarak kullanılması, harcın doğmasına vesile olmuştur. Tarihte ilk olarak bağlayıcı malzeme ihtiyacı çamurla giderilmiş, Romalılarla birlikte, kireç harcı kullanılmaya başlanmıştır. Kireç harcından sonra, kum-kireç karışımının içine pişmiş kilin veya puzolan denilen volkanik tüflerin karıştırılması ile suyla reaksiyona giren ve sertleşen bir bağlayıcı

elde edilmiştir. Tarihi yığma yapılarda, özellikle Selçuklu ve Osmanlı mimarisinde ise horasan harcı adı verilen bağlayıcı kullanılmıştır [11].

Horasan yapımında kireç ve öğütölmüş tuğla tozu kullanılır. Horasanın mukavemeti kirecin kalitesine ve tuğla tozunun inceliğine bağlıdır. Bu sebeple eski yapılarda kullanılmış olan horasanın kalitesi ve mukavemeti, yerel şartlara bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Horasan'ın sertleşmesi çok uzun zaman alır ve gerçek mukavemetine ulaşması uzun zaman gerektirir. Eski mimarlar, horasanın bu özelliğini bildikleri için yapının temellerini inşa ettikten sonra uzun bir süre üst yapı inşaatına devam etmeden beklemişlerdir. Horasan'ın bu uzun süren mukavemet eksikliğini telafi etmek için harcın içine ince çakıl da katılabilir. Roma kalelerinde kullanılan horasan harcının içinde bu türden ince çakıllar kullanılmıştır. Ayrıca rötreyi önlemek maksadıyla harca saman da karıştırabilir. Horasan'ın muhtevası yerel şartlara göre değişmekle birlikte içerisinde, kil, kireç, taş tozu, taş kırıntıları, mermer tozu, su, keçi kılı ve hatta yumurta akı bulunduğu tarihi kayıtlardan anlaşılmaktadır [13,11].

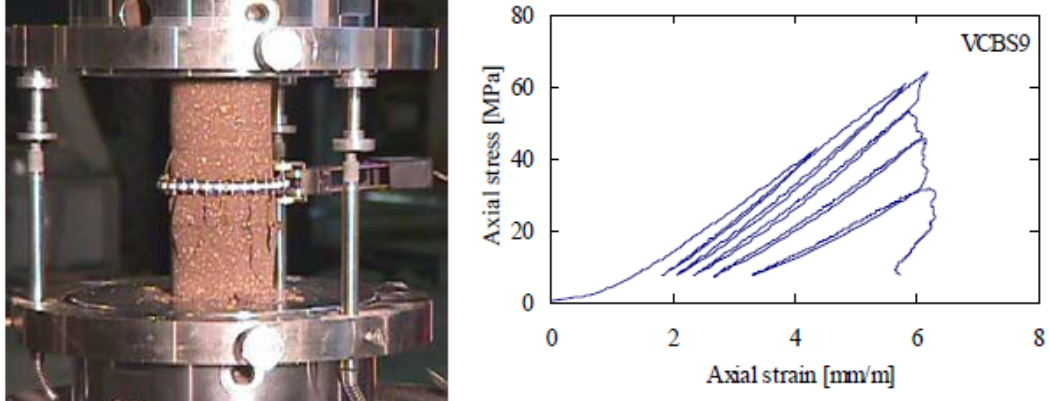
Harçların mukavemeti karışımlarındaki maddelerin oranına dayanır. Bununla birlikte tarihi yapılarda kullanılan harçların mekanik özelliklerini belirlemek için deney yapmakta büyük zorluklar vardır. Fakat aynı karışım oranlarında hazırlanacak olan harçlar üzerinde deneyler yapmak, bu harçların mekanik özellikleri hakkında fikirler verebilir. Bu bağlamda yapılan bir araştırmada üretilen test numunelerinde, yaklaşık olarak 5 MPa basınç mukavemeti ölçölmüştür [12].

Ayasofya'da kullanılan harç için yapılan bir araştırmanın sonuçları ise oldukça ilginçtir. Günümüz puzolanları ile üretilmiş bir harcın çekme mukavemeti, orijinal puzolan katkılı kireç harcından 15 kat daha az çekme mukavemeti göstermiştir. Ayasofya gibi birçok yapıda kullanılan bu harçlara puzolan çekme mukavemeti kazandırmıştır. Ayrıca, içinde agrega boyutlarında tuğla parçaları da bulunan bu harçların, kendi döneminin betonu olarak değerlendirilmesinin daha uygun olacağı belirtilmiştir [7].

2.2.2. Tuğla

Roma döneminden çok önceleri kullanılmış olan tuğla, kilin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesiyle elde edilen bir yapı malzemesidir. Tuğlalar, ebatları, görünüşleri ve işlevlerine göre çeşitli sınıflara ayrılırlar. Tarihi yapılarda kullanılan tuğlalar saf

kaolin ve kil karışımının fırınlarda yüksek ateş altında pişirilmesiyle elde edilir. Fırın teknolojisinin bulunmadığı yerlerde, bazı tarihi yapılarda kullanılan tuğlaların doğrudan güneş ısısı altında üretilmiş olanlarına da rastlanmaktadır [13]. Kerpiç ise pişirilmemiş tuğla eleman olarak görülebilir. Tuğlanın iyi pişirilmesi önemlidir. Ne kadar iyi pişmişse, mukavemeti ve çevre şartlarına karşı direnci de o kadar iyi olur.



Şekil 2.5. Silindirik Tuğlanın Çevrimli Basınç Deneyi ve Tipik Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi [19]

Tuğlanın elastisite modülü yüksek değildir. Tekrarlı yükleme ve boşaltmalardan oluşan yüklemelerde şekil değiştirmelerin elastik olduğu görülmektedir (Şekil 2.5). En büyük gerilme değerinden sonra elastisite modülünde azalmalar görülürken ilerleyen çatlaklarla mukavemet düşmeye başlar.

Tuğla, ahşap ve taşın zor elde edildiği bölgelerde, yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca yapım kolaylığı ve ucuz üretim sebebiyle geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur. Tuğla da taş gibi yapıda ancak basınç altında çalışabilir. Çekme mukavemeti oldukça düşüktür. Aşağıdaki tabloda tuğlalar için yaklaşık değerler verilmiştir (Tablo 2.1).

Tablo 2.1. Tuğlaların Ortalama Mekanik Özellikleri

Basınç Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
3 – 10	0.2 – 0.5	1000 – 5000

2.2.3. Taş

Doğal taş, basınca çok iyi çalıştığı halde çekme gerilmelerinde zayıf bir malzemedir. Bu sebeple, tarihi yığma yapılarda taş kullanılırken, özellikle kemer, kubbe, tonoz ve sütunlarda çekme gerilmesi almayacak şekilde kullanılmışlardır. Bununla beraber, yapıda çekme gerilmesi almasa bile, sıcaklık değişimleri, donma çözülme çevrimleri

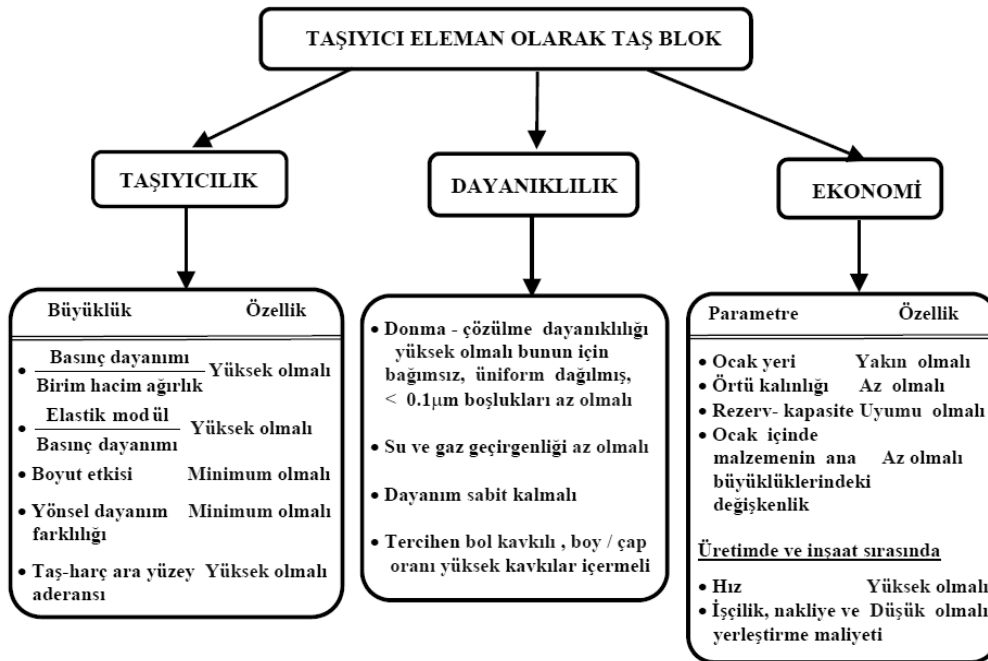
gibi olumsuz çevre şartları sebebiyle oluşan çekme gerilmeleri, taştan yapılmış elemanlarda çatlaklara sebep olabilir.

Taş malzemenin mukavemetinin boyutlarını anlamak için teorik olarak bazı bilgiler verilmiştir. Mesela, ortalama sağlamlıkta bir kum taşından 2 km yüksekliğinde bir sütun yapılabilir. Kum taşı bu uzunluktaki bir sütunun zati ağırlığını, ezilmeden taşıyabilir. Yine teorik olarak bir granit sütun da ezilmeden 10 km boyunca inşa edilebilir [2]. Tablo 2.2’de bazı taşların mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.2. Taşların Ortalama Mekanik Özellikleri [13]

Taşın cinsi	Basınç mukavemeti	Kayma mukavemeti	Çekme mukavemeti	Elastisite Modülü
	MPa	MPa	MPa	Gpa
Granit	30 - 70	14 - 33	4 - 7	30 - 55
Mermer	25 - 65	9 - 45	1 - 15	25 - 70
Kireç Taşı	18 - 35	6 - 20	2 - 6	10 - 55
Kum Taşı	5 - 30	2 - 10	2 - 4	13 - 50
Kuvars	10 - 30	3 - 10	3 - 4	15 - 55
Serpanti n	7 - 30	2 - 10	6 - 11	23 - 45

Uzun süreli mukavemet ve dayanıklılığın (durabilite) arandığı abidevi yapılarda kullanılacak taşların taşınması gereken bazı özellikler aşağıdaki şekilde toplu halde sunulmuştur (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Taşlarda Aranılan Özellikler [15]

Bu şekilden aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Basınç mukavemetinin birim hacim ağırlığına oranı mümkün mertebe yüksek olmalıdır. Ayrıca taş, yükler altında şekil değiştirme kapasitesini ifade eden sünek davranış da göstermelidir. Sünekliği karakterize etmek açısından taşın temel büyüklüklerinden olan Elastisite Modülü “E” ve basınç mukavemeti “ f_b ” oranı (E/f_b) mümkün olduğu kadar yüksek olmalıdır. Gevrek taşlarda bu oran yaklaşık 100-200 aralığında değişir.
- Taşın içyapısı donma-çözülme, sıcaklık farklılıkları, ıslanma-kuruma vb. dış etkilere minimum düzeyde etkilenmelidir.
- Taşın dayanıklılığını (fiziki, kimyevi ve mekanik büyüklüklerin zaman içindeki değişimini) kontrol eden en önemli özelliklerden biri de taşın “boşluklu” fakat “geçirimsiz” bir içyapıya sahip olmasıdır. Üiform dağılmış, birbirinden bağımsız ve 0.1 μ m den daha büyük çaplı boşluklara sahip bir taşta, dış etkilere dolayı iç yapıda oluşacak üniform gerilme yayılımı, belirli kesitlerdeki gerilme yoğunluklarını ve bu nedenle oluşacak mikro çatlakları minimize ederek yapının dayanıklılığı üzerinde olumlu etki yapar.
- Mukavemet ve dayanıklılık üzerinde etkin bir diğer parametre de taşın mikro yapısı içinde bütünleşmiş, lif gibi çalışan boy/çap oranı ve elastisite modülü yüksek kavkılarının varlığıdır. Söz konusu kavkılar yapıya "süneklik" ve dış etkilere “dayanıklılık” sağlamaktadır.
- Abidevi yapılarda kullanılan yapı taşlarında aranan önemli özelliklerden biri de ekonomiklik. Ocak işletmeciliği açısından bakıldığında örtü tabakası kalınlığı az ve rezerv-kapasite büyüklükleri uyumlu olmalıdır. Ocaktan çıkarma işlemi, inşaat alanına nakliyenin kolaylığı, işçilik ücretleri, hız gibi faktörler üzerinde en etkin faktör ise taşın birim ağırlığıdır. Hafif, ancak sağlam ve dayanıklılığı yüksek taşlar tarih boyunca anıtsal yapıların inşaatında her zaman tercih edilmiştir [15].

Taşlar arasında küfeki yığma yapılar açısından farklı bir yere sahiptir. Pek çok yapıda kullanılan bu taş, diğer taşlara göre çeşitli avantajlara sahiptir. En önemli avantajı ise mukavemet ve birim ağırlığı ile ilgilidir. Boşluklu yapısı sayesinde birim ağırlığı yüksek değildir. Aynı zamanda mukavemetini de artıran bu boşluklar küfekiye diğer taşlardan ayıran temel özelliklerindin birisidir.

Küfeki, yüksek boşluk oranına sahip bir kireç taşıdır. Yüksek boşluk oranına sahip olması küfekiinin sünek davranış göstermesini ve hafif olmasını sağlar. Basınç mukavemetinin çekme mukavemetine oranı $f_b/f_t = 11-12$ civarında tespit edilmiş olup bu değer küfekiinin enerji yutma kapasitesi yüksek, sünek bir malzeme olduğunu gösterir. Elastisite modülünün basınç mukavemetine oranı olan $E/f_b=720$ olarak tespit edilmiştir ki bu da günümüzde üretilen betonlarla iyi bir uyumu ifade eder [15] (Tablo 2.3 ve 2.4).

Tablo 2.3. Küfekiinin Fiziki  zellikleri [14]

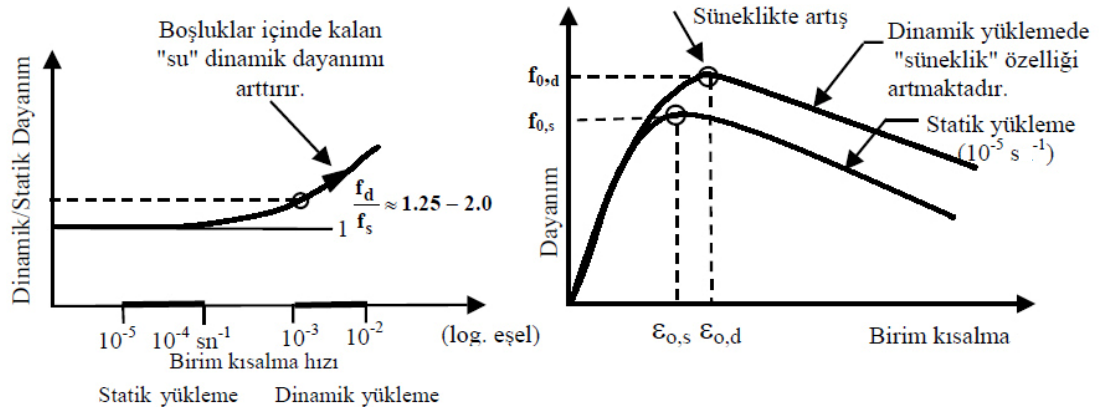
Birim Ağırlık g/cm ³	Boşluk Oranı %	Ağırlıkça Su Emme %	Hacimce Su Emme %	Kılcallık (3 aylık numune)	Donma-Çözülme Ortalama Ağırlık Kaybı %
2.19	12.6	5.70	11.08	4.93x10 ⁻⁶	0.28

Kimyevi bileşimi % 54.37 CaO, % 0.22 Fe₂O₃, % 0.39MgO, % 0.34SiO₂, % 0.11 H₂O, % 43.44 CO₂+H₂O şeklinde olan küfekiinin tek eksenli deneyle elde edilmiş olan mekanik özellikleri aşığıda verilmiştir (Tablo 2.4).

Tablo 2.4. Küfekiinin Mekanik (Tek Eksenli)  zellikleri (1-30 günlük) [15]

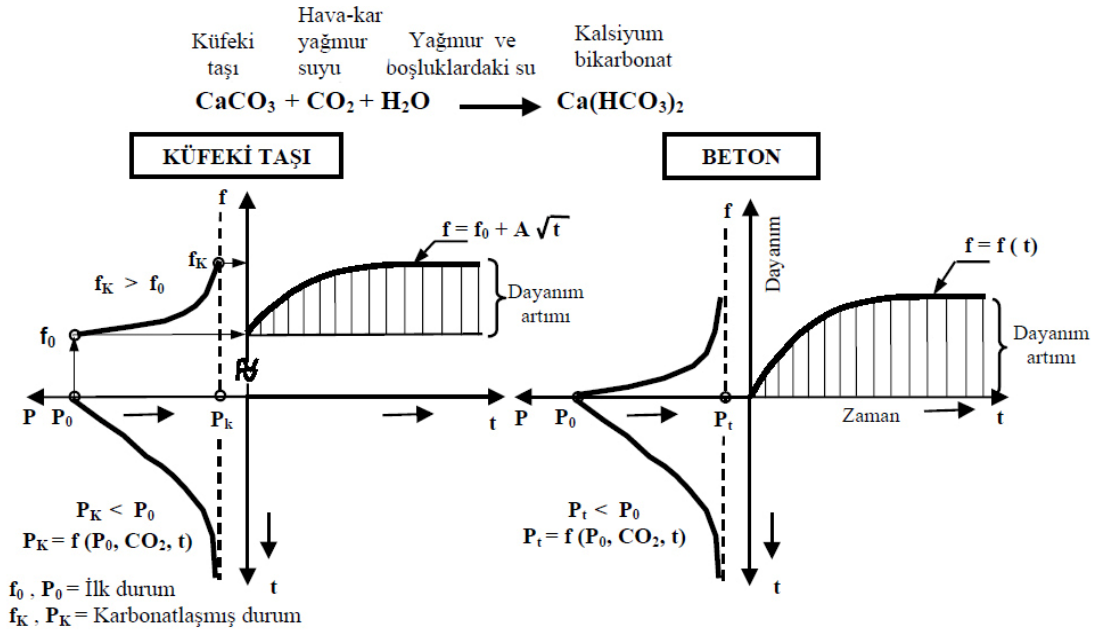
Basınç f _b MPa	Çekme f _ç MPa	Elastisite Modülü MPa	Yüzey Sertliğı R	Ultrasonic Hız	E / f _b	f _b / f _ç
33.2–45.5	3.6	24000	47.7–50.1	3.88–5.01	720	11–12

Küfekiinin yapısında su mevcuttur. Bu suyun bir bölümü zamanla buharlaşırken bir bölümü de dış çeperlerden içeriye doğıru zamanla gelişen kalınlıkta karbonatlaşmanın sonucunda oluşan katmanın içinde hapsolmaktadır. Bünyede suyun varlığı dinamik yükler altında yapının taşıma gücüne önemli bir ilave katkı getirmektedir. Küfekiinin içinde hapsolan su, mukavemet yanında s nekliğı de olumlu etkilemektedir [15] (Şekil 2.7).

**Şekil 2.7.** Küfekiinin Statik ve Dinamik Davranışı [15]

Bakırköy, Sefaköy, Halkalı, Hadım y, Sazlı Bosna İstanbul civarındaki küfekiinin çıkarıldığı yerlerin başında gelmektedir. Ocaktan çıkarıldığı andaki mekanik ve fiziki

özellikleri ile 30 gün sonraki özellikleri arasında farklar görünür. Küfeki, ocaktan çıktığı andan itibaren hızla karbonatlaşır ve boşluk oranı azalırken mukavemeti ve birim hacim ağırlığı da artmaya başlar. Betonda karbonatlaşma olumsuz etkilere yol açarken, küfekide karbonatlaşma etkisiyle mukavemet artışı gözlenmektedir [14] (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Küfeki ve Beton - Karbonatlaşmayla Mukavemet Değişimi [15]

2.2.3. Ahşap

Genellikle devlet eliyle gerçekleştirilen ve özellikle kamu hizmetine sunulmuş, cami, hamam, köprü, medrese vb. yapılar tabiatı güçlü ve sağlam olan taş malzeme ile yapılmıştır. Bu devletin devamlılığı, ferdin ise geçiciliği ve faniliğine ilişkin bir yaklaşımın eseri de sayılabilir. Ahşap malzeme ise daha çok konut yapılarında kullanılmış olmakla birlikte bazen de döşeme teşkilinde karşımıza çıkmaktadır.

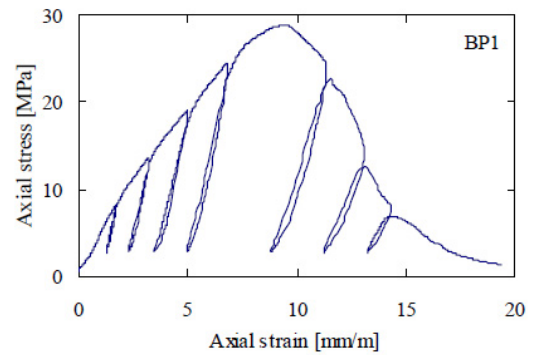
Ahşap, hem çekmeye, hem basınca çalışabildiği için eğilme elemanı olarak büyük açıklıkların geçilmesinde kullanılmıştır. Tarihi yığma yapılarda da ahşap, bu özelliğinden faydalanmak üzere döşeme taşıyıcısı vazifesini görmüştür. Ayrıca duvarlarda hatıl elemanı olarak kullanılmış, saçak ve cumba gibi mimari detaylarda da zaman zaman tercih edilmiştir.

2.2.4. Kâgir Malzeme ve Kompozit Malzeme Tanımları

Doğal taş veya tuğlanın, bir bağlayıcı harçla beraber kullanılması ile oluşan yapım tarzına kâgir (yığma) malzeme adı verilir. Kâgir malzeme ile duvar, payanda, kubbe,

tonoz ve kemer gibi monolitik taşıyıcı elemanlar inşa edilir. Kâgir malzeme homojen bir malzeme olmayıp heterojen bir özelliğe sahiptir. Birim ağırlığı 21-22 kN/m² arasında değişmektedir. Dış yükler altında farklı özellikler gösteren bu malzemenin taşıma gücü, yapımındaki hassasiyete, yapı birimi olarak kullanılan taş veya tuğlanın özelliklerine, harcın özelliklerine ve yapım tekniğine bağlıdır. Çevre şartlarına ve zamanın ilerlemesiyle oluşan yaşlanma etkilerine göre de farklı özellikler gösterebilen kâgir malzemenin basınca karşı davranışı iyi sayılırken, çekmeye karşı zayıftır. Kâgir malzemenin mukavemeti, içindeki harcın mukavemetine eşdeğerdir, zira tuğla veya taş birimlere kıyasla önce zayıf halka olan harç güç tükenmesine erişir. Kireç harcı kullanılmış bir malzemede emniyet gerilmesi $\sigma = 0.2-0.6 \text{ N/mm}^2$, horasan için ise $\sigma = 1.5-3.0 \text{ N/mm}^2$ mertebesinde [11].

Yığma yapılar, farklı malzemelerin birleştirilmesinden oluşan yapısındaki harç sebebiyle farklı doğrultularda farklı davranışlar gösterir. Yapı birimi ile bağlayıcı harç arasındaki bağ, yığma yapılarıdaki en zayıf bağlantıdır. Yığma yapıların davranışında en önemli konu, birim malzeme ile harç arasındaki ara yüzün lineer olmayan davranışdır. Bu ara yüzde iki ayrı göçme modu gerçekleşir. Birincisi, çekme kuvvetinden kaynaklanan göçme ile ortaya çıkan çekme modudur. İkincisi ise kayma modudur. Araştırmalardan anlaşıldığına göre, ara yüzdeki elastik ötesi davranış tamamen plastiktir [19].

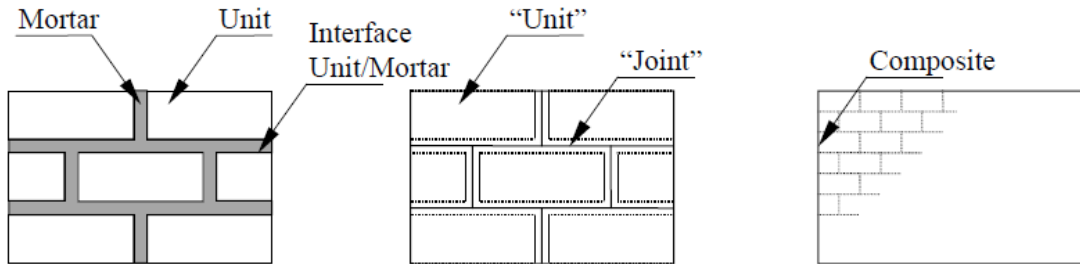


Şekil 2.9. Yığma Numune Tek Eksenli Tekrarlı Basınç Deneyi [19]

Tuğla ve taş ile harcın elastik ötesi davranışlarındaki farklılıklar, kompozit malzemenin göçmesinde öncülük eder. Tek eksenli çekme gerilmesine tabi tutulan kompozit numunelerde mukavemet, genellikle birim ile harç arasındaki bağ kuvvetine eşit olarak ortaya çıkar. Tek eksenli çevrimli basınç gerilmesine tabi tutulan bir numunenin deneyine ait bir gerilme-şekil değiştirme ilişkisi yukarıda

gösterilmiştir (Şekil 2.9). En büyük gerilmeye erişilen diyagramın tepe noktası ötesinde devam eden yükleme boşaltma çevrimleri ile rijitlikteki azalmalar ve enerji sönümleme verileri elde edilmeye çalışılmıştır. Bu deneyde, en büyük gerilme değerinden önce, büyük oranda lineer davranış gösteren numune, güç tükenmesine eriştiği andan sonra, elastisite modülü açısından monoton olarak azalan bir eğilim göstermiştir.

Yığma yapıyı oluşturan tuğla, taş ve harcın farklı mekanik özelliklerini dikkate alarak oluşturulacak sayısal analiz modellerinden çok detaylı veriler elde edilebilir. Bu yöntemde, yığma yapıdaki derzler, süreksiz elemanlar olarak modellenmek suretiyle yığma birimlerden farklı davranış gösterecek şekilde modellenebilir. Yığma yapı davranışının yerel bazda daha iyi anlaşılması için kullanılan bu yöntem, mikro modelleme adıyla bilinen bir yaklaşımdır. Öte yandan hesaplardaki yaklaşıklık düzeyi ile basitleştirme ve idealleştirme ihtiyaçları, yapıyı genel olarak değerlendirme isteği, makro modelleme yaklaşımını gerekli kılmaktadır. Makro modelleme yaklaşımında, yığma yapıyı teşkil eden bütün malzemeler tek bir kompozit malzeme olarak kabul edilir (Şekil 2.10).



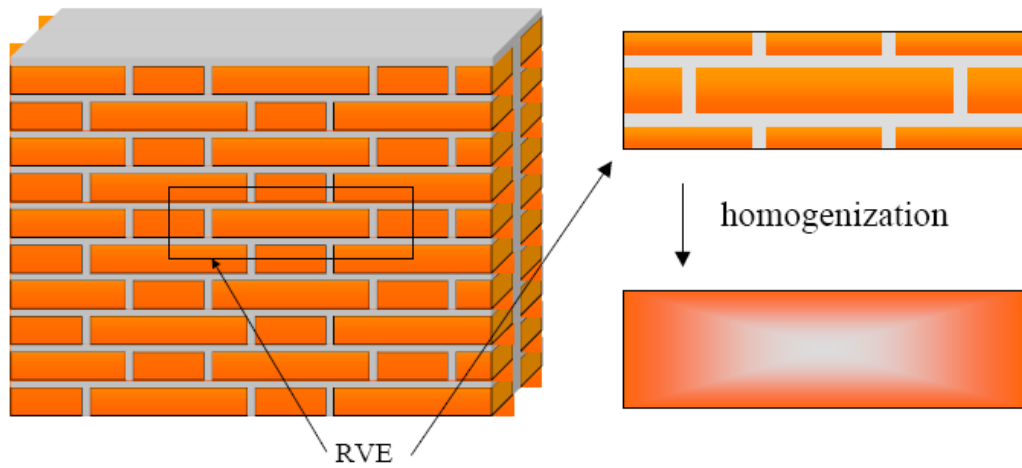
Şekil 2.10. Yığma Malzeme Modelleri, Sırasıyla Detaylı Mikro, Basit Mikro ve Makro Model [20]

İlk yaklaşımda, taş, tuğla ve harcın elastisite modülleri, poison oranları, elastik ötesi davranışları ayrı ayrı dikkate alınır. Diğer malzemeden ayrılması için başlangıçta hayali bir rijitliğe sahip olacak şekilde modellenen derzler, potansiyel çatlama ve kayma yüzeyini teşkil eder. Bu model tuğla veya taş ile harcın beraberce ve ayrı ayrı nasıl davrandığını mercek altına alabilen bir yöntemdir.

İkinci yaklaşımda ise her bir bağlantı, birim ile harç arasındaki iki ara yüz ve derzin kendisiyle birlikte ortalama tek bir ara yüze dönüştürülür. Yığma birimler ise geometriyi korumak için genişlemiş kabul edilir. Böylece yapı potansiyel kayma ile kırılma yüzeylerini oluşturan ara yüzler ile birbirlerine bağlanmış elastik bloklardan oluşan bir model ile temsil edilmiş olur. Bu basitleştirilmiş mikro modeli teşkil eden

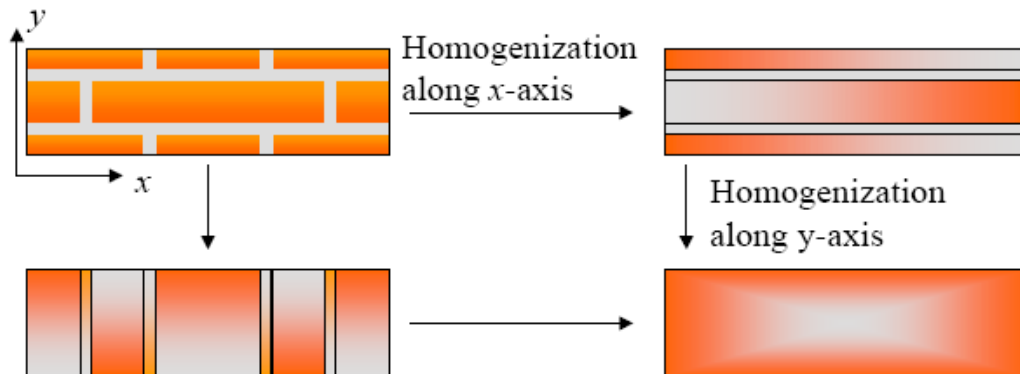
malzeme yaklaşımında, harcın poisson oranı dikkate alınamadığından hassasiyet kaybolur.

Üçüncü yaklaşım ise taş, tuğla ve harç arasında bir ayrım ve farklılık gözetilmeden yığma yapıyı homojen bir anizotrop ortam kabulüyle modelleme esasına dayanır. Makro modelleme olarak adlandırılan bu yaklaşım, daha az zamanda, daha az bir çalışma ile kolay ve pratik sonuçlar verebilen bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, verim ve hassasiyet kavramları uzlaştığında, en değerli yöntemdir. Kabul edilebilir bir hassasiyet tanımlanabiliyor ve bu hassasiyet makro modellemeye imkân tanıyacak kompozit malzeme idealleştirmesini yapmaya elverişli oluyorsa, bundan daha verimli ve değerli bir yöntem yoktur [20].



Şekil 2.11. Homojen Malzeme Tanımı (RVE: Representantative Volume Element) [1]

Yukarıdaki şekilde (Şekil 2.11) görüldüğü gibi; yığma duvardan alınan basit bir hücre incelendiğinde, harç ve tuğlanın katılım oranları dikkate alınarak malzeme parametrelerinde kullanılır ve tek bir malzeme olarak kabul edilebilir. Homojen malzeme tanımları doğrultuya göre de seçilebilir. Aşağıdaki şekilde yatay ve düşey doğrultuda yapılmış homojenleştirme işlemi görülmektedir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. İki Adımlı Homojenleştirme İşlemi [1]

Lourenço, çalışmasında tuğla ve harç için elastisite modülü başta olmak üzere diğer malzeme parametrelerinin hesabı için $E_k = (t_h + t_t) / [(t_h/E_h) + (t_t/E_t)] \times \rho_k$ ifadeleriyle verilen bağıntıyı önermektedir. Bu bağıntıda kullanılan E_k , elde edilen kompozit malzeme için eşdeğer elastisite modülü, t_h , harç kalınlığı, t_t , tuğla kalınlığı, E_h , harcın elastisite modülü, E_t , tuğlanın elastisite modülüdür. ρ_k ise tuğla ile harç arasındaki bağın, veya aderansın etkinliğini ifade eden, 0-1 arasında değişen bir katsayı olup ortalama bir yapı için 0.5 kabul edilebilir.

Taş duvarlar için de, bu yöntemle hesap yapılabildiği gibi değişik araştırmacılar farklı yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler farklı elemanların geometrisi ve malzeme özelliklerini dikkate alan eşdeğer malzeme özelliklerinin belirlenmesine dayanmaktadır. Eurocode8’de ise tuğla ve harçtan oluşan kompozit malzemenin mukavemeti $f_{bk} = K \times f_{tuğla/taş}^{0.65} \times f_{harç}^{0.25}$ bağıntısı ile verilmiştir. Burada K, 0.4 ile 0.6 arasında 0.05 adımlarla değişen bir sabiti ifade eder ki bu katsayı yığma yapının morfolojisine bağlıdır. [33]

Ayasofya’da yapılan araştırmada, ultrasonik testler neticesinde tuğlaya, harca ve ikisinden müteşekkil kompozit malzemeye ait elastisite modülleri sırasıyla $E_{tuğla}=4200$ MPa, $E_{harç}=900$ MPa ve $E_{kompozit}=1500$ MPa olarak hesaplanmıştır. Kompozit malzemenin elastisite modülünün hesabında $E_{kompozit}=(2E_{tuğla/taş} \times E_{harç})/(E_{harç}+E_{tuğla/taş})$ bağıntısı kullanılmıştır. Küçük Ayasofya Camii’nde gerçekleştirilen malzeme deneylerinde ise tuğla, harç ve taş malzemeler için $E_{tuğla}=9029$ MPa, $E_{harç}=8860$ MPa ve $E_{taş}=13727$ MPa değerleri elde edilmiştir. [7]

2.3. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Malzeme özelliklerinin tespiti için birçok test tekniği geliştirilmiştir. Bu deneylerden maksat, yapı elemanının homojenliğini kontrol etmek, taş, tuğla ve harç gibi malzemelerin mukavemet değerlerini, şekil değiştirme özelliklerini ve elastisite modüllerini belirlemektir. Ayrıca, yapı elemanlarının geçirimsizliği, boşluk yapısı, renk, çatlak yapısı ve genişlikleri ile yüzey hasarlarının belirlenmesi de önemlidir.

Tahribatsız olarak yapılan deneyler, genel olarak kesin bir sonuç vermezler. Ancak yaklaşık değerler dolaylı olarak elde edilebilir. Malzeme özelliklerinin kesin olarak belirlenmesinde en belirleyici deneyler laboratuvar ortamında yapılan deneylerdir. [7]

Tarihi yapılarda numune almanın pek çok zorlukları vardır. Bu sebepten tahribatsız test teknikleri de oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Zaten yapının analizinde belirli bir oranda yaklaşık sonuçlar kabul edilebilmektedir. Kesin bir yapısal analiz yapılamadığı için, malzeme özelliklerinin de yeterince yaklaşık bir değerinin tespit edilmesi yeterli olabilmektedir. Burada önemli olan nokta, hem malzeme karakteristiklerinde hem de hesap sonuçlarında bu yaklaşıklığın hangi mertebede gerçekleştiğini veya gerçekleşeceğini kontrol edebilmektir.

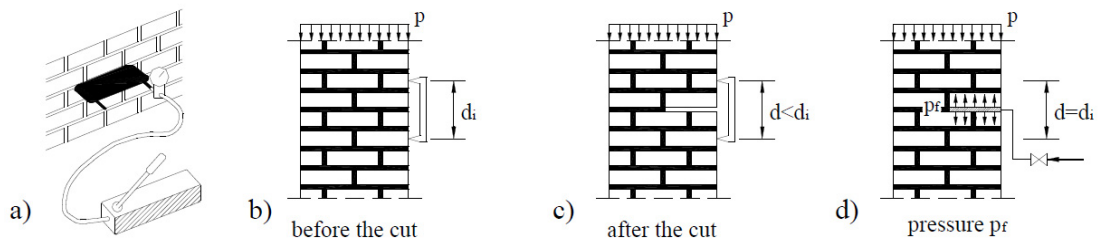
Yapının değerlendirilmesi için ayrılacak olan bütçe ve öngörülen değerlendirme zamanı, hangi seviyede araştırma yapılacağını, hangi test tekniklerinin kullanılacağını da belirleye faktörler olarak karşımıza çıkar. Bu faktörlerin belirleyici olduğu süreçte çok farklı seviyelerde araştırma ve deneyler öngörülebilir. Önemli olan değerlendirilecek yapıya uygun olan yöntem ve araştırma seviyesinin seçilmesidir.

2.3.1. Yerinde Yapılan Tahribatlı Deneyler

Tahribatlı test teknikleri, genel olarak laboratuvar ortamında gerçekleştirilen teknikler olmakla birlikte, yerinde yapılan tahribatlı test teknikleri de geliştirilmiştir.

2.3.1.1. Yerinde Basınç Deneyi (Flat-jack Deneyi)

Yığma yapı elemanı üzerinde iki nokta belirlenir ve arasındaki mesafe ölçülür. Daha sonra elemanın içine doğru dik bir kesim yapılır. Kesim yapıldıktan sonra noktalar arasındaki mesafe azalacaktır. Flat-jack ekipmanı kesilen boşluğa yerleştirilir ve hidrolik ekipman vasıtasıyla jack içine basınç verilir. Basıncın artmasıyla birlikte, küçülen mesafe büyümeye, ilk değerine yaklaşmaya başlar. İlk okunan orijinal mesafede ölçülecek olan gerilme değeri elemanın o noktasındaki gerilme seviyesini gösterir (Şekil 2.13). Bu test, mevcut gerilme dağılımı, mevcut mukavemet ve elastisite modülünün belirlenmesi için kullanılabilir [17].



Şekil 2.13. Flat Jack Ekipmanı İle Yerinde Basınç Deneyi ($d=d_i$ iken $p=p_f$)[18]

Flat-jack testinden elde edilen basınç değerlerini gerçek basınç gerilmelerine çevirmek gerekir. Gerçek gerilme $\sigma_m = K_m K_a p$ bağıntısından faydalanılarak hesaplanır. Burada K_m birden küçük bir kalibrasyon faktörünü, K_a ölçülen flat-jack alanının ortalama yarık alanına oranını ifade eden birden küçük bir değeri, p ise flat-jack basıncını gösterir [18].

Yığma yapılarda, ASTM C 1196-92 (Reapproved 1997)'ye uygun olarak gerçekleştirilen yerinde basınç deneyinde; elemana uygulanan kuvvetin (kN) ve kuvvete karşılık gelen boy değişiminin (mm) ölçülmesine imkân sağlayan flat-jack deney düzeneğinden faydalanılır. Bu deney düzeneği şekilde görüldüğü gibi basınç uygulayan bir kompresör ve bir basınçölçer, basınç kuvvetini yüzeye uygulamaya yarayan plaklar, yerdeğiştirmeyi ölçmeye yarayan komparatör ve komparatörü sabitlemeye yarayan pimlerden oluşmaktadır (Şekil 2.14) [8].

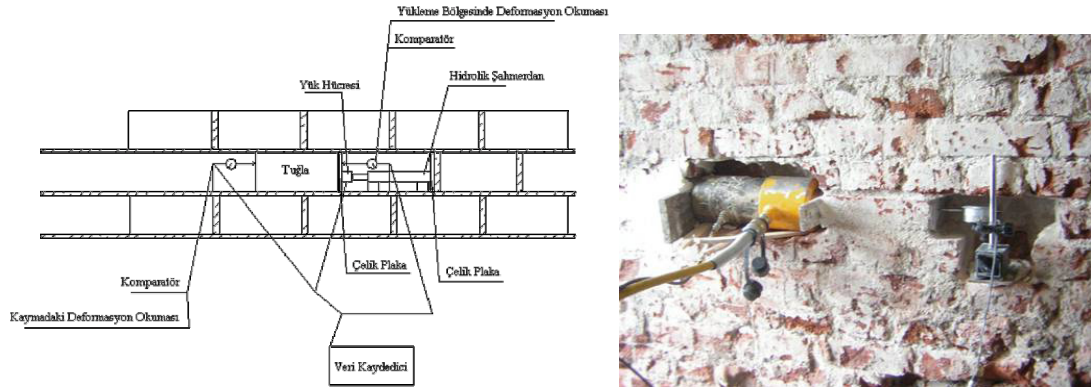


Şekil 2.14. Flat Jack Deneyi [42]

2.3.1.2. Yerinde Kayma Deneyi

Yığma yapıdaki kayma dayanımının ASTM 1531-03'e uygun olarak belirlendiği deney düzeneği, kuvvet uygulanan kompresör, kuvvetölçer ve yerdeğiştirmeyi tespit eden transducer'den (dönüştürücü) oluşur. Deneyin uygulanmasında Şekil 2.15'te görüldüğü gibi ölçüm yapılacak bölgenin iki tarafı açılır, bir taraftan yatay kuvvet (kN) uygulanır, diğer tarafa yerleştirilen transduserin yerdeğiştirmeyi kaydettiği andaki kayma gerilmesi, yapıdaki kayma dayanımı olarak tespit edilir [8].

Bu yöntem de flat-jack deneyinde olduğu gibi tahribatlı yöntemlerden olduğu için uygulama imkânı kolaylıkla bulunamayan bir yöntemdir. Yerinde yapılan tahribatlı yöntemler kesin sonuçlar ortaya koymak açısından en iyileridir. Fakat yaygın olarak kullanılmasına imkân tanınmamaktadır.



Şekil 2.15: Yerinde Kayma Deneyi [42]

2.3.2. Laboratuvar Ortamında Yapılan Deneyler

Laboratuvar ortamındaki deneyler, üç kısımda incelenebilir. Birinci kısım deneylerde, yapıdan alınan malzeme numuneleri laboratuvar ortamında çeşitli fiziki testlere, ikinci kısımda mekanik deneylere tabii tutulur. Üçüncü kısım deneyler ise, yapının bir bölümü veya bir yapı elemanı birebir ölçekte veya daha küçük ölçeklerdeki modelleri üzerinde yapılan çalışmaları kapsar.

Yapıdan alınan ve daha sonra laboratuvara getirilen taş, tuğla ve harç örnekleri, mekanik ve fiziki deneylere uygun hale getirilir. Fiziki ve mekanik deneyler yapıldıktan sonra gerekli görülürse onarım ve güçlendirmede kullanılacak malzemelerin mevcut malzemelerle uyum sağlaması için malzemelerde içyapı analizleri de gerçekleştirilebilir.

2.3.2.1. Fiziki Deneyler

Fiziki deneyler için hazırlanan numunelerde, kılcal su emme ve ağırlıkça su emme deneyleri yapılır, deney sonuçlarından boşluklu birim hacim ağırlık (gr/cm^3), ağırlıkça su emme (%), hacimce su emme (%) ve kılcal su emme katsayıları (cm^2/s) belirlenir. Fiziki ve mekanik özellikleri belirlenen malzemelerin, onarımda kullanılacak malzeme ile uyumunun araştırılması amacı ile taş, tuğla ve özellikle harç numunelerin mikro-yapısal özelliklerinin belirlenmesine de ihtiyaç duyulur [8].

2.3.2.2. Çekme, Basınç ve Kayma Deneyi

Yapıdan alınan taş numuneler, deneye hazırlık maksadıyla 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,

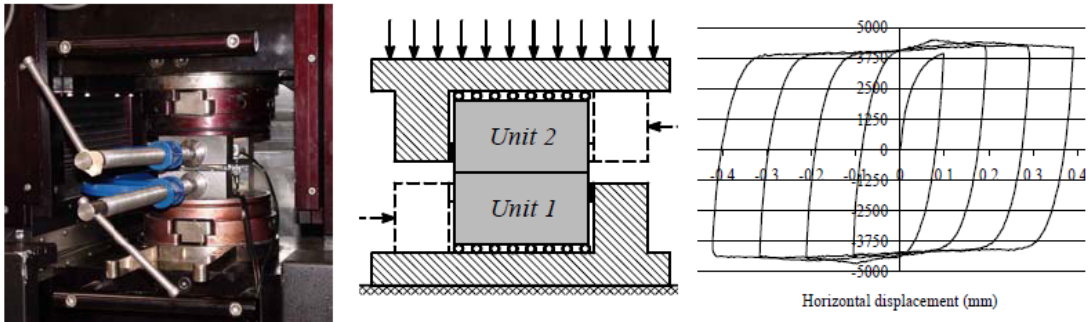
birim ağırlığının tespiti için tartılır, ses geçiş süresi ölçülür. Ölçüm ve tartım işleminden sonra düzeltilen yüzeylere alçı, çimento karışımı hamur ile toplam 5-6 mm kalınlığında başlık yapılır. Başlığın sertleşmesinden sonra başlıklı yükseklik (mm) ölçülür. Bu numunelerde tek eksenli basınç deneyi yapılır, basınç etkisinde meydana gelen boy değişimi (mm) yük-boy değişimi ve kırma yükü (kN) belirlenir, basınç mukavemeti (N/mm^2) hesaplanır.



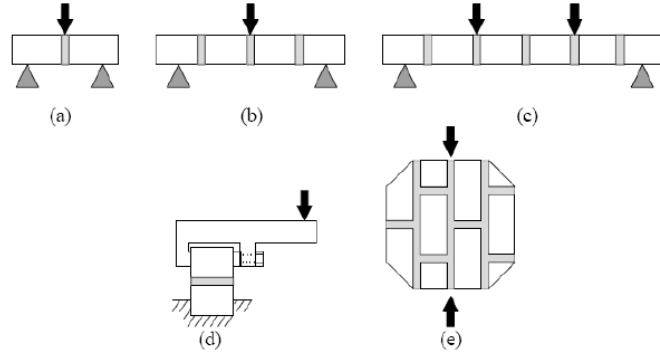
Şekil 2.16. Tek Eksenli Basınç Deneyi [42]

Tuğlalar üzerinde yapılacak mekanik deneyler için TS 4563 ve TS 705'e uygun olarak hazırlanan numuneler üzerinde, tek eksenli basınç deneyi yapılır, kırılma yükü (kN) belirlenir, kırılma yükünün kuvvet uygulanan yüzeye oranlanması ile basınç mukavemeti (N/mm^2) hesaplanır (Şekil 2.16). Deney sonuçların verildiği çizelgede tuğlaların nominal boyutları, dar kenarı, uzun kenarı ve kalınlığı da verilir [8].

Kayma deneyi ise yığma yapı birimleri olan tuğla ve taş elemanların bağlantı noktalarını teşkil eden ve temel derz malzemesi olan harçlar üzerinde gerçekleştirilir. Derz mukavemetini belirlemek için çeşitli deney düzenekleri geliştirilmiştir. Bu deneylerde doğrudan veya dolaylı olarak kayma ve çekme mukavemeti tespit edilebilmektedir (Şekil 2.17 ve 2.18).

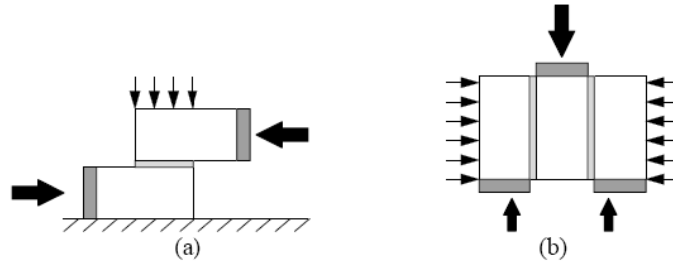


Şekil 2.17. Yığma Derzin Çevrimli Kayma Deneyi ve Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi [19]



Şekil 2.18. Derz Mukavemeti - Muhtemel Deneyler a), b) Üç Noktadan Eğilme c) Dört Noktadan Eğilme d) Derz-Burulma e) Dağılma [12]

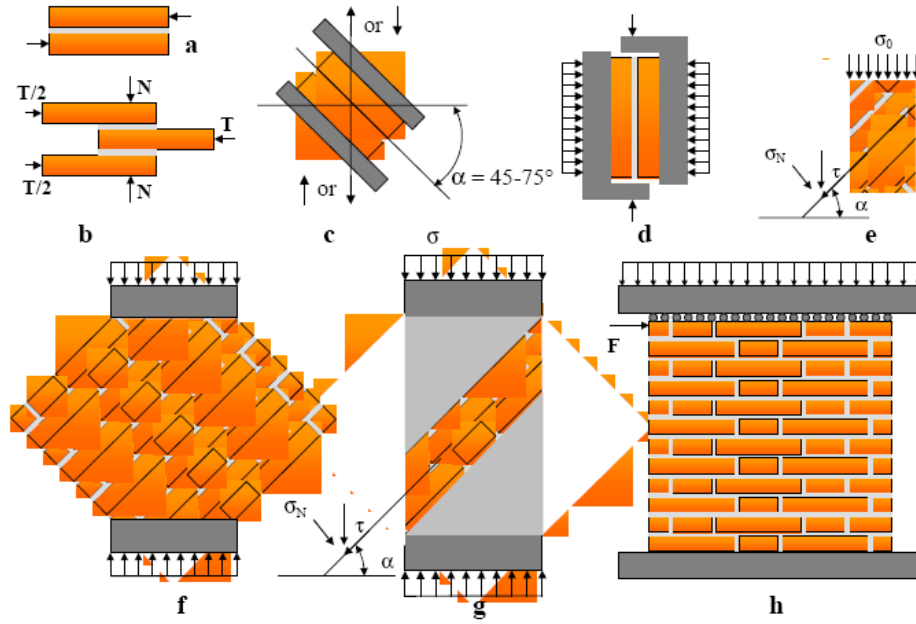
Yığma yapıların derz kayma mukavemetini belirlemek için de ikili veya üçlü deney düzenekleri kullanılır. Bu deneyde yığma blokları da üzerlerindeki normal gerilmeleri temsil edecek şekilde yüklemek gerekmektedir. Normal gerilmeler büyüdükçe kayma mukavemeti de büyümektedir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Derz Kayma Mukavemeti - Muhtemel Deneyler a) İkili b) Üçlü [12]

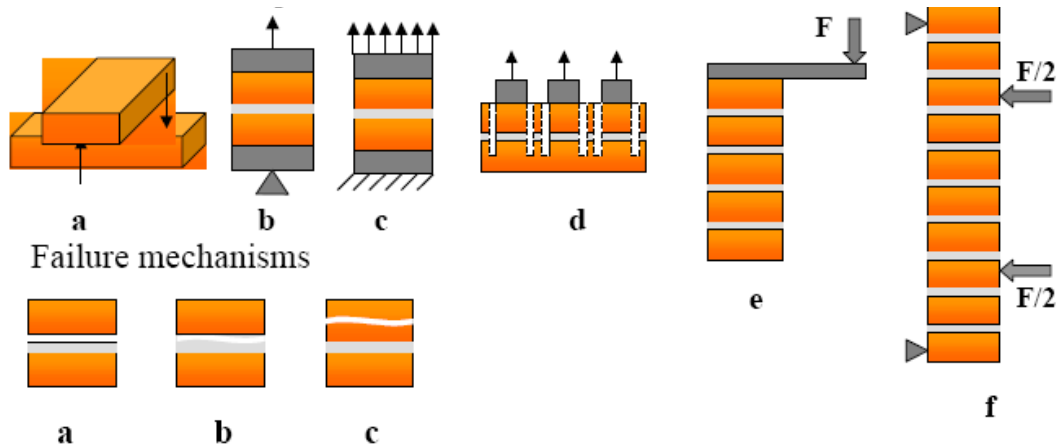
Aşağıda yığma elemanların kayma mukavemetinin belirlenmesi için geliştirilen bazı test düzenleri gösterilmiştir. Kayma deneylerinde normal gerilme seviyesi, kayma mukavemetini belirleyen bir faktör olduğu için dikkate alınması gerekir. Fakat deneylerde bu çeşitli zorluklara sebep olmaktadır.

Yığma yapıda, kayma mukavemetinin normal gerilme seviyelerine göre değişiklik gösterdiği de düşünüldüğünde bir yapı için tek bir kayma mukavemetinden söz edilemez (Şekil 2.20). Yapının en kritik bölgesi olan temele yakın kısımlarda veya pencere ile kapı boşlukları tarafından zayıflatılmış duvar parçalarında kayma gerilmeleri, düşey gerilme seviyesine bağlı olarak hesaplanacak kayma emniyet gerilmeleriyle karşılaştırılmalıdır. Deneylerde elde edilen kayma mukavemeti, düşey gerilme uygulandığı takdirde gerçek değerleri yansıtabilir.



Şekil 2.20. Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi - Muhtemel Deneyler [1]

Yığma yapılarda çekme mukavemeti genellikle dikkate alınmaz fakat bu çekme mukavemetinin bulunmadığı manasına gelmez. Az da olsa bir çekme gerilmesi taşıyabilen yığma yapılarda çekme kapasitesinin belirlenmesi için de bazı deneyler geliştirilmiştir. Aşağıda bazı deney düzenekleri gösterilmiştir. Ayrıca yığma yapılarda çekme gerilmelerinden kaynaklanan hasar ve göçme mekanizmaları da resmedilmiştir. Bu mekanizmalar, bağlayıcı ile yığma birim ara yüzündeki aderansın kaybolması, bağlayıcının kopması veya yığma birimin kopup kırılması şeklinde ortaya çıkabilir (Şekil 2.21).



Şekil 2.21. Çekme Mukavemetinin Belirlenmesi - Muhtemel Deneyler [1]

2.3.2.3. Model Deneyleri

Bazen yapıyı temsil edecek çeşitli ölçeklerde, orijinal malzemeye uygun malzemeler ve teknikler ile deney modelleri oluşturularak laboratuvar ortamında çeşitli dinamik ve statik deneyler yapılır. Bu yöntemde, yapının davranışına en yakın saptamalar ve malzemelerin özellikleri, elemanların davranışları belirlenebilir. Aşağıda bu tür deneylerden örnekler görülmektedir (Şekil 2.22).



Şekil 2.22. Laboratuvar Ortamında Gerçekleştirilen Model Deneyleri

2.3.3. Tahribatsız Deneyler

Tarihi yığma yapılarda, malzeme testleri için numune almak çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bu konudaki zorluklar tahribatsız, yerinde test tekniklerinin geliştirilmesini ve uygulamaların yaygınlaşmasını sağlayan bir etken olmuştur. Tahribatsız test teknikleri doğrudan doğruya malzemelerin özelliklerini tespit etmeye müsaade etmez. Ancak dolaylı yoldan malzeme karakteristiklerine bir geçiş yapılabilir. Dolaylı elde edilen değerler ise belli bir yaklaşıklıkta içinde barındıran, net ve kesin olmayan değerlerdir. Yığma yapılarıdaki malzemeler, yapım teknikleri ve analiz yöntemlerindeki yaklaşımlar dikkate alındığında, böyle bir yaklaşık malzeme karakteristik verisi kullanmak çok da sakıncalı değildir, çünkü değerlendirme süreci belirli yaklaşık hesapları kabul etmektedir.

2.3.3.1. Sertlik Deneyi

Bu deney, yığma yapılarıdaki doğal taş, tuğla, harç gibi gözenekli ve seramik bünyeli malzemelerin mekanik özelliklerinin tespitinde elle taşınabilir aletler ile laboratuvar dışında gerçekleştirilebilir. Sertlik deneylerinin yapılması kolaydır, deneyde malzeme tahrip edilmez. Malzemenin sertlik değerinden, malzemenin iç yapısına bağlı özelliklere geçilebilmesi için cismin homojen olması, yüzey özelliklerinin iç yapıdan farklı olmaması gerekir.

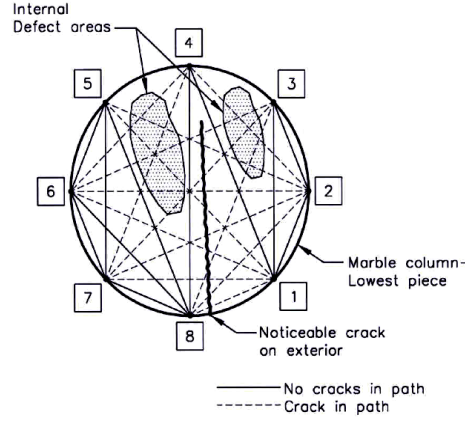
Malzemelerin en önemli mekanik özellikleri, elastisite, süneklik, dayanım, tokluk ve sertliktir. Sertlik, bir malzemenin yüzeyine batırılan sert bir cisme karşı gösterdiği dirence verilen isimdir. Malzemenin mukavemeti hakkında bir fikir verir, ancak mukavemet ya da süneklik gibi belirli bir karakteristiği tam olarak ifade etmez. Sertliğin belirlenmesi ile malzemenin kökeni hakkında bilgi edinilir, farklı iki numunenin aynı malzemeye ait olup olmadığı anlaşılır [8].

Schmidt Deneyi olarak da bilinen sertlik deneyi, elastik bir kütlenin, yüzey sertliğine bağlı olarak geri sekme prensibine dayanan bir tür çekiç vasıtasıyla gerçekleştirilir. Seramik bünyeli, gözenekli yapı malzemelerinde sertliğin belirlenmesi için çoğunlukla geri sıçramanın ölçülmesi prensibine dayanan N tipi veya P tipi Schmidt çekicinden yararlanılır. 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 [9].

2.3.3.2. Ultrases Deneyleri

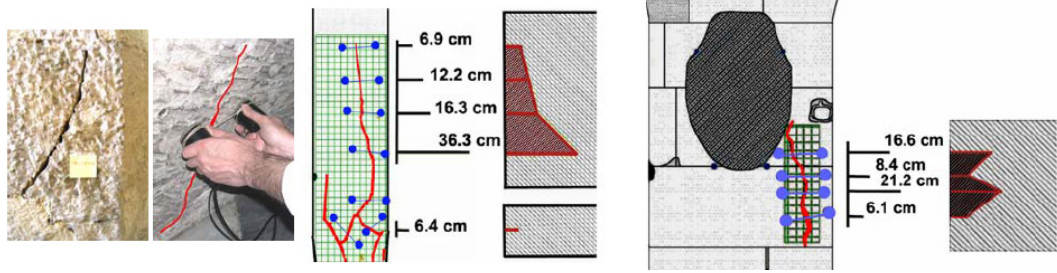
Frekansı 16.000'in üzerinde olan ve insan kulağı tarafından işitilemeyen ultrases dalgaları, katı, sıvı ve gaz içinde belirli bir hız ile yayılır. Bu dalgalar da ışık dalgaları gibi yayılır, yansır ve kırılır. Ultrases deney tekniğinde, ses dalgaları, cisme, boşluk bırakılmaksızın temas ettirilen piezoelektrik transduser ile gönderilir ve aynı özellikteki transduser yardımı ile alınır. Alıcı ve verici probler 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. [8]

Aşağıdaki şekilde (Şekil 2.23), bir mermer sütun üzerinde gerçekleştirilen ultrases deneyinden elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Şekilde kesik çizgiler, doğrultu üzerinde çatlak ya da iç kusurların olduğunu göstermektedir. Sürekli çizgiler ise herhangi bir içyapı kusuru veya çatlağın bulunmadığı yollardır. Yeterli sayıda noktada yapılan ultrases ölçümleri ile sütunun içyapısı neredeyse tamamen tespit edilmiştir. Bu teknik sayesinde tahribatsız olarak yapının ve yapı elemanlarının içyapısı hakkında detaylı bilgi elde edilmektedir.



Şekil 2.23. Bir Mermer Sütunun Ultrases Deneyi ile İncelenmesi

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. Ultrases tekniğinin kullanıldığı çok sayıda tahribatsız deney yöntemi geliştirilmiştir (Şekil 2.24).



Şekil 2.24 Ultrases Deneyi [22]

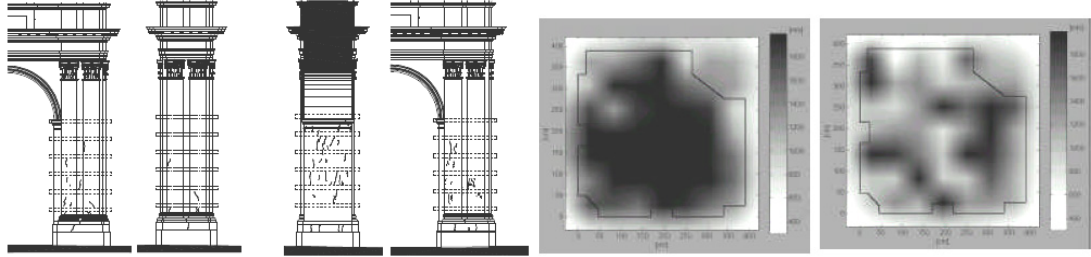
2.3.4. Görüntüleme (Monitoring) Teknikleri

Tarihi yapılar yapılarında görüntüleme teknikleriyle de önemli veriler elde edilebilir. Görüntüleme teknikleri, ısı farkları, rüzgâr şiddeti ve yönü, nem, yapının titreşim hareketleri, oturma ve yer değiştirmeleri hakkında uzun vadeli bilgi akışı sağlar.

Dinamik görüntüleme yöntemlerinde, ivmeölçer kullanılır. Bu sayede, yapının dinamik karakteristikleri olan mod şekilleri, periyot ve frekanslar elde edilmiş olur. Ayrıca, yapıda trafik vb. dış etkenler tarafından tetiklenen titreşimler de tespit edilebilir. Dinamik görüntülemeden elde edilen verilerle, yapının sonlu eleman modelleri de kalibre edilebilir.

Görüntüleme teknikleri başlığında çok çeşitli yöntemler geliştirilmiş olmakla beraber bu teknikler genel olarak, ses, ışık ve elektrik esaslı yöntemlerdir. Darbe-Radar (impulse radar), Darbe-Yankı (impact echo), darbe-tepki (impulse response), Ultrases Darbe Hızı (ultrasonic pulse velocity), Yüzey Dalga Spektrum Analizi

(spectral analysis of surface waves), Elektromanyetik Tarama (electromagnetic detection), Kapasitör Tekniği (capacitor technique), Kızılötesi Termograf (infrared thermography), Fiberoptik (fiber optics), Akustik Yayım (acoustic emission), Çevrimli Akım (eddy current), Tomoğrafi (tomography) (Şekil 2.25), Mikroskopik Analiz (microscopic analysis) yöntemleri, hâlihazırda kullanılan yöntemlerdir. Burada her birine ait detay verilmemiş olup ayrıntılı bilgi için [25] ve [26] numaralı kaynaklara müracaat edilebilir.



Şekil 2.25. İki Sütunun Hasar Bıçımı ve Yatay Kesit Tomografileri [26]

2.3.5. Serbest Titreşim Deneyi

Yapıda çeşitli sebeplerden kaynaklanan yatay ve düşey yönlerdeki küçük titreşimler özel titreşim ölçer (seismometer) yardımıyla, ivme, hız ve yer değiştirme cinsinden olmak üzere tespit edilip kaydedilebilmektedir. Kullanılan titreşim ölçerlerin titreşim genliği için sınırlar 0.005–3000 mikrondur. Daha güvenilir sonuç verdikleri periyot sınırları ise 0.01 ile 5 saniye arasındadır. Titreşim ölçerlerden gelen analog hız sinyalleri, gerilim düşürücüden geçtiği esnada istenirse ivme ve yer değiştirmeye dönüştürülebilir. Bu sinyallerin sayısal büyüklükler anlamında izlenmesi ve saklanması mümkündür. İkili sistemden onluk sisteme çevrilen sinyaller ASCII modunda kaydedilebilir. Titreşim ölçerlerden gelen kayıtların dalga formu çizilir ve hepsi için en uygun olan çalışma aralığı belirlenir. Bu zaman aralığındaki veri sayısı, uygulanacak hızlı Fourier dönüşümü gereği ikinin kuvveti olmalıdır. Eğer göreceli değerlerle çalışılacaksa, ilgili titreşim ölçerlere karşı gelen kayıtların farkları alınır. Tüm kanallar için Fourier dönüşümü uygulanır. Daha sonra birinci aşamada kritik bir kayıt için güç spektrumuna geçilir ve bu spektrum bir pencere yardımıyla yumuşatılır. Yumuşayan spektrumun tepe noktasına karşı gelen periyot değeri yapının en büyük serbest titreşim periyoduna karşılık gelmektedir. Tepe noktası ve yakın civarındaki noktalar dikkate alınarak geçirilen ikinci derece eğrinin katsayıları arasındaki ilişkiden de sönüm oranına geçilebilmektedir. İkinci aşamanın ilk adımı, seçilen iki kritik kanala ait Fourier Spektrumlarının oranlanması, oranın tepe

noktasının belirlenmesi ve bu noktayı esas alan bir pencerenin hesaplanmasıdır. İkinci adımda, hesaplanan pencere tüm kanallara uygulanıp oluşan dalgalar Ters Hızlı Fourier Dönüşümüne tabi tutulur. Bulunan dalgalarındaki tepe noktalarından hareketle aranan titreşim mod şekli belirlenir [7].

2.4. Zemin Araştırmaları

Tarihi yapıların değerlendirilmesinde önemli aşamalardan birisi de zemin özelliklerinin belirlenmesidir. Değerlendirme çalışmasından önce arazide bir takım inceleme ve araştırma çalışmalarının yapılması, alınacak numuneler üzerinde laboratuvar deneylerinin gerçekleştirilerek zeminin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Temel sistemi ve zemin sınıfı tespit edildikten sonra yapı hakkında yorum yapmak ve yapıyı değerlendirmek daha isabetli olacaktır. Nitekim zemin, yapılarda görülen problemlerden bazılarının kaynağını teşkil eder. Sağlıklı ve doğru bir şekilde tespit edilen zemin profili, yapılacak müdahalenin niteliği ve ekonomikliğinde önemli rol oynar.

2.4.1. Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi

Zeminler dane boyutlarına ve kohezyona göre üç ana grupta toplanabilir.

- Kum, çakıl gibi iri daneli (kohezyonsuz) zeminler
- Silt, kil gibi ince daneli (kohezyonlu) zeminler
- Turba gibi organik (lifli) zeminler

Zeminlerin sınıflandırılmasında en çok kullanılan sistem ise Birleşik Zemin Sınıflandırma sistemidir. Kohezyonsuz zeminleri sınıflandırırken elek analizi, kohezyonlu zeminler için de kıvam limitlerinin belirlenmesi yardımıyla sınıflandırma yapılmaktadır. Kil ve silt gibi zeminler için dane çapını belirlemek maksadıyla hidrometre deneyinden faydalanılmaktadır (Tablo 2.5).

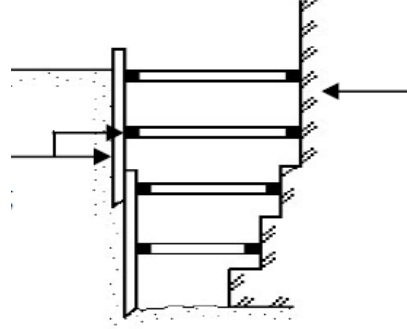
Zemin Cinsi	Dane Çapı (mm)
blok - iri taş	> 75.6
çakıl	75.6 - 4.76
kum	4.76 - 0.074
silt	0.074 - 0.002
kil	<0.002

Tablo 2.5. Birleşik Zemin Sınıflandırması

2.4.1.1. Arazi Çalışmaları

Yapının üzerine oturduğu zeminin sınıflandırılması ve özelliklerinin tespiti için arazide yeterli sayıda gözlem çukuru açılmalı ve uygun noktalarda sondajlar yapılarak numuneler alınmalı, yeraltı su seviyesi belirlenmelidir.

- Muayene Çukurları: Yapıların temelini incelemek için temel tabanına kadar açılacak bir muayene çukurundan faydalanılır (Şekil 2.26). Temel ebatlarının belirlenmesi için yapı kenarında yeterli sayıda muayene kuyuları açılır. Yüzeysel temellerin biçimi ve derinliği hakkında yeterli bilgi edinildiği kadar, kazıklı temellerde de kazığın başlık kotu ve yeraltı suyunun başladığı yer belirlenir. Gözlem çukurları genellikle 3.5-4.0 m derinliğe kadar açılabilir. 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.



Şekil 2.26. Muayene Çukuru / Galerisi Kesiti

- Sondaj çalışmaları: Yapılacak sondaj sayısı yapı alanıyla, sondaj derinliği ise temel genişliği ile orantılıdır. Kabaca 100 m² için bir sondaj yapılması, sondaj derinliğinin temel altında en az 5 m olacak şekilde seçilmesi uygun olmaktadır [4]. Zemin sondajları genellikle 3.0 m'den daha derin incelemelerde, muayene çukurları ile ulaşamayan derinliklerde ya da muayene çukuru için elverişsiz zemin şartlarında, yeraltı su seviyesi altındaki derinliklerde kullanılır. Sondaj çapları genel olarak 50 mm ile 250 mm arasında değişir.

Sıkı zeminlerde sondaj deliği desteksiz durabilirken, 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. Zeminin çok yumuşak kil veya su seviyesi altında çakıl olması durumunda darbeli sondajlar daha uygundur. Kil, kum veya yumuşak kaya zeminlerde dönel sondaj tekniği uygulanabilir. Sondajlar yapılara yakın fakat sınırları dışında yapılır.

- 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 durumu inceleyen kurumlardan da temin etmek mümkündür. Söz konusu kurumlar, yeraltı suyunun uzun zaman süreci içindeki değişimini saptadıklarından alınan veriler daha sağlıklı olacaktır.
- 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 muhtemel hataları önleyecektir [11].

Zeminlerde önemli bir problem olan sıvılaşma ihtimalinin belirlenmesi için kullanılan sıvılaşma analizinde ilk adım potansiyel olarak sıvılaşacak kumlu ve siltli zemin tabakalarının bulunup bulunmadığının belirlenmesidir. Bundan sonra yapılacak iş sıvılaşma ihtimalinin sayısal yöntemlerle belirlenmesidir. Bu amaca yönelik iki yöntem vardır. Bunlardan ilkinde örselenmemiş numuneler laboratuvar ortamında test edilmek suretiyle sıvılaşma riski belirlenir. İkincisinde ise arazi davranışları ile indeks test parametrelerine dayalı ampirik bağıntıların kullanılmasıyla sıvılaşma ihtimali incelenir.

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, testlerin zor ve pahalı olması bakımından kısıtlıdır. Arazi deneylerinin kullanımı mühendislik uygulamalarında oldukça yaygındır. Bu deneyler, Standart Penetrasyon Deneyi, Koni Penetrasyon deneyi, Arazi Kayma Dalga Hızının Ölçümü ve Becker Penetrasyon deneyidir.

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 63.5 kgf'lık ağırlık 0.76 m den standart uç tij üzerine düşürülerek sondaj deliği tabanından itibaren 0.15 m girmesi için gerekli düşüş sayısı bulunur. Bu deney, kohezyonsuz zeminlerin sıkılığı, kohezyonlu zeminlerin kıvamı hakkında bilgi verir. Bu deney ince çakıl, kum, silt ve kil zeminlerde uygulanır. Düşüş sayısının büyük olması, zeminin sağlam olduğunun göstergesidir [11].

Arazide uygulanan bir diğerk 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 açılmasına karşılık gelen burulma momentinden zeminin drenajsız kayma mukavemeti belirlenir. Bununla beraber, geleneksel zemin inceleme yöntemi olan sondajda sonuçları etkileyen faktörlerin çokluğu, uygulama ve yorum yanlışlıkları, örselenmemiş tabir edilen numunelerin laboratuvar deneylerinde doğal durumundan büyük oranda farklı durumda olduğu gerçeği Koni Penetrasyon Deneyi (CPT) gibi arazi deneylerine rağbeti artırmaktadır. Koni penetrasyon deneyi ucu koni seklinde olan bir silindirik borunun zemine itilmesi sırasında beliren dirençlerin ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Deney sırasında 1 m uzunluğundaki tijler zemine 20 ± 2 mm/sn hızla itilirken uç direnci, evre sürtünmesi ve boşluk suyu basıncı değerleri sürekli olarak kaydedilmektedir [29].

2.4.1.2. Zemin İndeks zellikleri ve Sınıflandırma Deneyleri

Arazi çalışmalarından sonra alınan numuneler, mühendislik özelliklerinin tespit edilebilmesi amacıyla laboratuvar ortamında bazı deneylere tabii tutulur.

Dane apı 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.

Su muhtevası ve Kıvam limitleri deneyi: Zemin içindeki su kütlesinin zeminin kuru kütlesine oranıdır. Su muhtevası; zeminin plastik, likit ya da katı kıvamlardan hangi kıvamda olduğunu belirlerken kullanılır. 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. Laboratuvar da 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.

Oturma (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.

Basınç ve Kayma mukavemeti 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-şekil değiştirme arasındaki ilişkiler tanımlanabilir. 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.

2.4.2. Zeminden Kaynaklanan Hasarlar

- 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. Yapı ve çevrede önemli ve ani bir değişiklik olmaksızın yıllarca yerinde durmuş bir yapının temel zemininde son yıllarda bir sorun çıkması pek muhtemel değildir. Bu tür yapılarda olası oturmalar yıllar önce tamamlanmış durumdadır [4]. Ancak temel kazıklarının çürümesi, yeraltı suyunun alçalıp yükselmesi, yapı altında veya çevresinde kazılarak açılan boşluklar ve deprem etkilerinde yeni oturmaların olması mümkün olmaktadır. Ayırık ve sürekli temellere oturan tarihi yapılarda oturma toleransı 2.5–4.0 cm arasındadır. Ayrıca yapının oturmalar sebebiyle

yapacağı en büyük eğim de $\tan \alpha = 0.005$ B/H bağıntısı ile hesaplanır. Bu bağıntıda B temelin küçük kenarı, H ise yapı yüksekliğidir.

- Yeraltı suyunun etkisi: Yumuşak zemine oturan yapılarda, yeraltı suyunun alçalıp 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. Yeraltı suyunun alçalması sonucu kuruyan zemin tabakalarında ayrıca rötre de meydana gelir. 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, zemin doymun hale geçer. Bu durumda zemin yumuşayarak, zeminin kayma direncinin azalması ile taşıma gücü azalır. Bu durumlarda oturmalar gerçekleşir ve yapıda hasarlar meydana gelebilir.
- Taşıma gücü: Her bir zeminin taşıyabileceği belirli bir azami yük vardır. Zeminin cinsine göre değişen taşıma yükünün aşılması neticesinde zemin hareketleri, hatta göçmeler gerçekleşir. Özellikle kohezyonsuz zeminlerde, aşırı yükleme sonucunda, zemin taşıma gücüne ulaşır ve göçmeler meydana gelir.
- Sıvılaşma: Sıvılaşma, yeraltı su seviyesinin altındaki tabakaların mukavemetini kaybederek, katı yerine sıvı gibi davranmalarıdır. Özellikle, kil bulunmayan kum ve silt, bazen de çakıl tabakaları sıvılaşma potansiyeline sahiptir. Deprem sırasında, dalgaların, özellikle kayma dalgaları, suya doymuş daneli tabakalardan geçerken, dane yerleşim düzenini değiştirir ve gevşek olarak bulunan danelerin göçerek yerleşmesine ve sıkılaşmasına sebep olur. Yerleşme sırasında daneler arasındaki su yol bulup kaçamazsa boşluk suyu basıncı yükselir. Eğer bu basınç üstte bulunan tabakaların ağırlığına yaklaşırsa, daneli tabaka geçici olarak sıvı gibi davranır. Zeminin sıvılaşması esnasında, zemine batma veya hafif yapılarda yukarı doğru hareket ederek yüzme eğilimi görülebilir. Sıvılaşarak kayma dayanımı kaybolan zeminde, yön değiştiren küçük kayma gerilmeleri büyük şekil değiştirmelere sebep olur ve yapılarda zemin göçmesi hasarları meydana gelir [11].

3. TARİHİ YIĞMA YAPILARIN MODELLENMESİ

Yapı tasarımı, uygulama ile mühendisliği dengeleme sanatıdır. Önceden, ampirik kurallara bağlı, büyük bir kısmı tecrübeye dayanan bir çizgiye sahip olan yapı tasarımı, sonraki dönemlerde matematik temellere oturtulmuş ve yöntemleri büyük oranda muntazam bir hale gelmiştir. Romalı mimar Vitruvius, Mimarlık Üzerine On Kitap isimli eserinde, farklı ocaklardan çıkarılan taşları, farklı ağaçlardan elde edilen ahşabı karşılaştırmıştır. Ayrıca sütunların hangi aralıklarla dizilmesi gerektiğinden ve bir tapınağın sütunlarının olması gerekenden daha fazla açıklıklar geçildiğinden bahsederken, herhangi bir yapısal hesaptan bahsetmemiştir. Daha sonra orta çağ ustaları, deneme yanılma metoduyla mimaride önemli gelişmelere öncülük etmişlerdir.

Taş ustalığının ihtişamını oluşturan eserlerin sütun, kemer, payanda, kubbe ve tonozlardan oluşan iskeleti, kırılğan ve oldukça ağır olan taşın tüm stabilite kurallarına muhalefetine rağmen soluk kesici bir zafere dönüşmüştür. Yapısal davranışın, bu eserlerin ustaları tarafından ne kadar bilindiği ise, tam olarak cevaplanamamış sorular arasında yer alır. Araştırmalardan elde edilen kanaate göre bu ustalar, yapısal güvenliğin sınırlarını tecrübe ve inceleme ile keşfetmişlerdi. Aynı zamanda, inşa ettikleri yapılarda stabilizeyi etkileyen geometrik oranlardaki isabetleri açısından şanslı da sayılabilirlerdi. Milan’da 1400 kadar uzmanın katıldığı bir araştırmanın raporunda, yapılarda kullanılan oranlar ve belirsizliklerin değerlendirilmiş; ‘eğer bir yapıda kullanılan geometrik oranlar doğru ise bu yapının taşıyıcı sisteminin de doğru olduğu anlamına gelir’ ifadesi kullanılmıştır [20].

Jean Mignot’a ait olan ‘yığma yapı inşaatı bir bilim değildir, yalnızca geometridir’ sözü, yığma yapılarda mimari oranların ne kadar önemli olduğunu gösterir. Mignot teknik ve estetiği beraber düşünmüştür. İkisini birbirinden ayırmak mantıksızdır, çünkü ona göre estetik kurallarla teknik kurallar örtüşür. Mignot’a göre yığma yapılarda tek mukayese edilebilecek kural, ayak veya sütuna orantılı olarak yapılacak payandaların doğru kalınlıkta seçilmesidir. Bu oranı kendisi 3:1 olarak tanımlarken 4:1 ve 1.5:1 oranlarını verenlerde olmuştur. En son oranı etkileyen faktör malzeme

mukavemetidir. Bu oranlarla büyük başarılar elde edilmiş olmasına rağmen, bir kısım yapısal hasarlar da ortaya çıktığından, söz konusu oranlarda bazı düzeltmelerin yapılması gerektiği de düşünülebilir. Sonraları Leonardo Da Vinci, geometriden yola çıkarak bir takım grafik metotlar geliştirmiştir. Bunlar arasında çokça uğraştığı kubbelerin yapımı için kullandığı zincir eğrisi yöntemi de bulunur [20].

Son yıllarda, yığma yapıların sayısal modellerle incelenmesi yaygınlaşmıştır. Gelişen bilgisayar teknolojisiyle beraber, yığma yapıların analizinde de çeşitli yaklaşımlar ve yöntemler ortaya çıkmıştır. Yığma yapılar yapım tekniği itibariyle birkaç farklı malzemenin bir araya getirilmesi şeklinde uygulandığı için, farklı doğrultularda farklı davranışlar gösteren bir karaktere sahiptir. Modellemede esas olan bu davranışın temsil edilebilmesidir. Yapının gerçek davranışını model yoluyla elde etmek için bazı idealleştirmeler ve basitleştirici kabullere ihtiyaç vardır. Yapının değerlendirilmesi için ayrılan zaman ve bütçenin de belirleyici olduğu bir süreçte, kabul edilen yaklaşım sınırları içerisinde hesaplar yapılması için farklı idealleştirmeler ve modelleme ilkeleri kullanılabilir. Mesela, yapıdaki bir elemanın yerel davranışını incelemek için kullanılacak model çok detaylı olarak hazırlanabileceği gibi, yapının genel değerlendirmesi için daha az detay kabul edilebilir. Bilgisayarların işlem ve hafıza kapasiteleri de bu konuda belirli sınırlamaları getirmektedir.

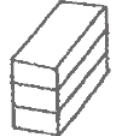
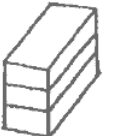
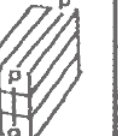
3.1. Modelleme İlkeleri ve İdealleştirmeler

3.1.1. Geometrinin İdealleştirilmesi

Tarihi yığma yapıların geometrisi oldukça karmaşık bileşenler içerir. Özellikle taşıyıcı sistem ve dekoratif elemanların aynı olduğu yapılarda, taşıyıcı elemanlarda mimari detaylar öne çıkmaktadır. Kemer, kubbe ve tonoz gibi elemanların geometrisi modelleme için doğrusal parçalara bölünerek ve mimari detaylar sadeleştirilerek gerçek eleman geometrileri oluşturulmaktadır. Yapının gerçek davranışını yansıtabilmek için bu geometrik basitleştirmeler ve kabuller kaçınılmaz olmaktadır. Geometrik idealleştirmeler hususunda aşağıdaki noktalara dikkat edilmesi önerilmektedir.

- Geometrik idealleştirmeler, mümkün olduğunca basit olmalıdır. İdeal ve ortogonal geometrili modeller analizde daha kararlı davranırlar.

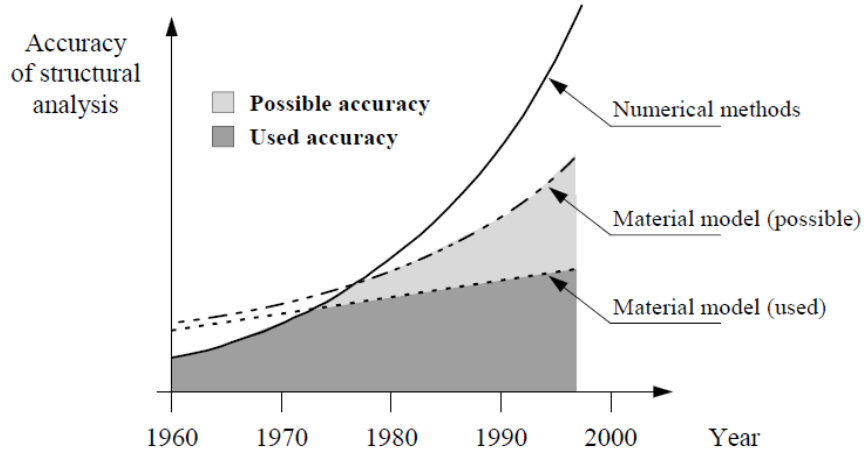
- 3 boyutlu modeller yerine, daha kolay kurulan ve analizi daha kolay ve kısa sürede gerçekleştirilebilen 2 boyutlu modelleme seçeneği unutulmamalıdır.
- Kabuk elemanların kullanılmasında dikkatli olmak gereklidir, çünkü kabuk elemanların kalınlıkları boyunca gerilme değişimi incelenemez.
- Yapı elemanlarının gerçek konumları ve şekillerine uygun, davranışını etkilemeyecek geometrik idealleştirmeler yapılmalıdır.
- Yapı davranışını en iyi hangi modelin temsil ettiğini tespit etmek için çeşitli analitik modeller arasında kıyaslamalar yapmak için çok alternatifli çözümler uygulanabilmektedir (Şekil 3.1).

Model	A	B	C	D
Kubbe				
Alt Yapı				

Şekil 3.1. Santa Maria del Fiore Modelinde Kullanılan 4 Farklı Analitik Model [7]

3.1.2. Malzemenin İdealleştirilmesi

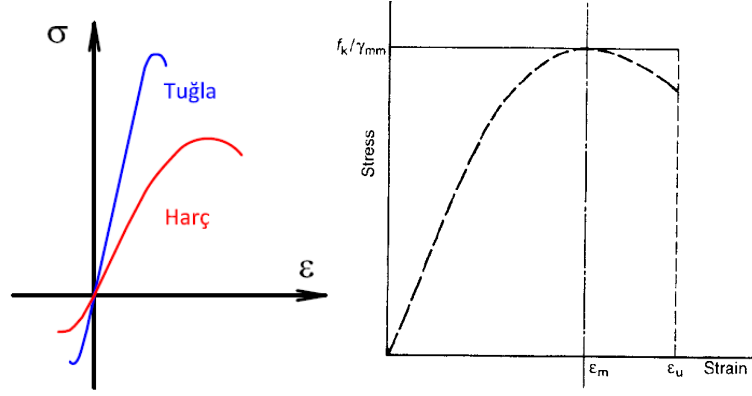
Malzeme davranışı gerilme - şekil değiştirme bağıntısını ifade eden bir matematik model ile tanımlanır. Malzemeye ait matematik modeller, uygun bir analiz modelinin kurulmasında en önemli kısmı teşkil eder. Bu matematik modele ‘esas model’ (constitutive model) adı verilir. Esas model, gerçek davranışın basitleştirilmiş bir şekilde temsil edilmesidir. Bir yapının gerçek davranışını anlamak için karmaşık ve detaylı kurulacak malzeme modelleri kullanılabilir. Fakat bu modellerin göçme yüküne yakınsayan sonuçlar vermediği tespit edilmiştir. Günümüzün yaygın olarak kullanılan yaklaşımı ise, lineer elastik davranıştan, yapının gerçek davranışını tahmin etme kapasitesine sahip sağlam sayısal araçların kullanılmasıdır. Bu araçların kullanılması, tamamen güç tükenmesine ulaşmadan önce meydana gelecek olan çatlak ve kırılmaların tespitiyle, kullanılabilirlik seviyesi, göçme mekanizmaları ve yapısal güvenliğin değerlendirilmesine imkân tanımaktadır [20].



Şekil 3.2. Tarih Boyunca Yapısal Analizlerin Doğrulukları [20]

Geçtiğimiz yüzyıl, yapısal analiz ve sayısal metotlar açısından fevkalade gelişmelere şahitlik etmiştir. Günümüzde bilgisayar vasıtasıyla, yüksek doğruluk ve güvenilirlik seviyelerinde analizler yapılabilmektedir (Şekil 3.2). Fakat yapı mühendisliğinde, mekanik, statik ve hesaplama metotlarına verilen ehemmiyet, malzeme bilimine verilmemektedir. Bu, yapısal analiz alanındaki gelişmeye malzeme davranışının ayak uyduramadığı anlamına da gelir. Bu sebeple, günümüzdeki esas malzeme modelleri, genellikle yapısal analizin doğruluk derecesini ve yaklaşıklığını da belirleyen bir faktördür. Malzemedeki her gerilmenin bir şekil değiştirme durumuna karşılık geldiğini anlatan ve $\sigma / E = \epsilon$ şeklinde R. Hooke tarafından homojen/elastik cisimler için ifade edilen elastisite kuralı, mühendisler tarafından yapı davranışını ve göçme yükünü belirlemek için kullanılmaktadır.

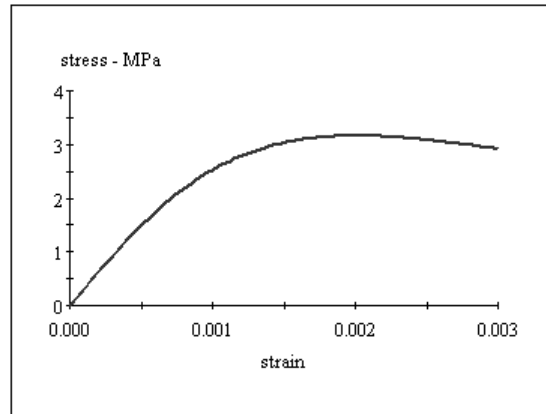
Güvenlik katsayıları kullanılmış olsa bile, tecrübeye ve deneylere dayanan değerlendirme yöntemleri, bir kısım yanlışlıklara yol açmıştır. Yığma yapılarda gerçekleştirilmiş olan malzeme davranış modellerine dair araştırmaların sayısı az olmakla birlikte, şimdiki bilgi seviyesinde, sayısal modeller, yapısal değerlendirme ve güçlendirme için yapı davranışının kavranmasında önemli bir yere sahiptir [20].



Şekil 3.3. Tuğla, Harç ve Yığma Eleman - Gerilme-Şekil Değiştirme Diyagramı [27][28]

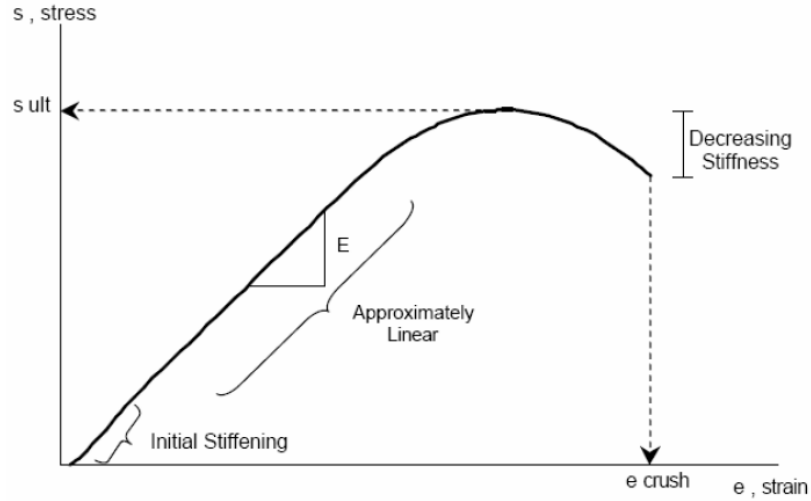
Yığma yapı malzemeleri homojen olmadığı için farklı davranışlar gösterebilirler. Ayrıca, inşa safhalarındaki süreksizlikler sebebiyle farklı türden malzemeler de birbirinin yerine kullanılmış olabilmektedir. Bunlar elbette farklı mekanik davranışlar gösterecektir. Yığma yapıların mekanik özellikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Mekanik davranış homojen değildir.
- Malzeme izotropik değildir, doğrultuya göre farklı davranışlar gösterir.
- Özellikle uzun vadeli yükler için çekme mukavemeti sıfır kabul edilir.
- Basınç gerilmeleri altında davranışı gevrekliktir. (akma bölgesine sahip değildir)
- Kayma gerilmeleri altında belirli bir oranda sünek davranış görülür.
- Elemanların gerçek rijitliklerinin hesabında çatlaklar ve elemanlar arasındaki bağlar dikkate alınmalıdır.
- Mekanik davranış lineer değildir ve sıklıkla da elastik değildir (Şekil 3.4)[27].



Şekil 3.4. İstanbul Ortaköy'deki Atik Ali Paşa Yalısı İçin Deneyler ve EC-6 Yardımı İle Oluşturulan Malzeme Modeli[41]

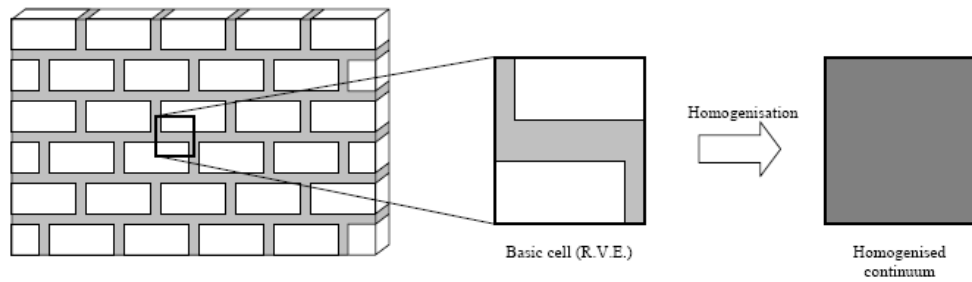
Gerilme şekil değiştirme veya yük ile yerdeğiştirme arasındaki ilişkiyi gösteren diyagramlarda, malzemenin başlangıç rijitliği, elastisite modülü, deformasyonlar karşısındaki rijitlik değişimi ve varsa tersinir yükleme altında elemanın rijitlik değişimi ile enerji sönümleme karakteristikleri hakkında bilgiler elde edilebilir.



Şekil 3.5. Basınç Altında Yığma Eleman Gerilme Şekil Değiştirme Diyagramı [12]

Malzeme idealleştirmesi yaparken, özellikle yapının bir bütün olarak değerlendirildiği makro modellemede aşağıdaki basitleştirme ve idealleştirmeler yapılabilir:

- Homojen ve İzotrop Malzeme: Malzeme homojen kabul edilebilir, bütün doğrultularda aynı davranışı gösterdiği kabulü yapılabilir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Yığma Malzemelerin Homojenleştirilmesi [31]

- Lineer-Elastik Davranış: Düşük gerilme seviyelerinde malzemenin lineer elastik davranış gösterdiği kabul edilebilir. Gerçekte bu kabul basınç gerilmeleri altında oldukça tutarlıdır. Çünkü yığma yapıların kesitleri zati yükler altında oldukça düşük seviyelerde gerilmelere sahiptir. Fakat çekme gerilmeleri küçük seviyelerde de olsa çatlaklara sebep olabilmektedir (Şekil 3.5).

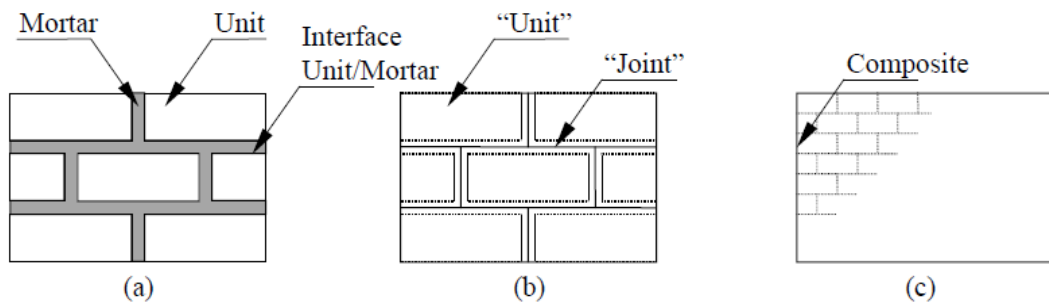
- Çekme Mukavemeti: Yığma malzemelerin çekme mukavemeti taşıdığı da kabul edilebilir. Bu gerçek davranışa aykırı gibi görülürse de çekme gerilmesi oluşan bölgeleri tespit etmek, muhtemel çatlakların yerleri hakkında bilgiler verdiği için faydalıdır. Ayrıca, çekme gerilmesi meydana gelen bölgedeki malzemeleri modelden çıkarmak suretiyle, lineer olmayan davranışın belirlenmesi de mümkündür.
- Lineer Olmayan Davranış: Doğrusal olmayan davranışı, yüksek gerilme seviyelerinde dikkate almak gerekir. Lineer olmayan davranış genellikle iki kriter şeklinde modellenir. Bunlar Mohr-Cloumb kriteri ve Drucker-Prager kriterleridir.

Yığma yapılar üzerinde yapılan çalışmalarda, malzemenin lineer kabul edildiği birçok çalışma bulunmaktadır. Santa Maria del Fiore için yapılan bir çalışmada ise tuğla elastik, harç ise elasto-plastik bir birleşim malzemesi olarak dikkate alınmıştır. Yığma malzemelerin, betonun akma kriterine benzer bir davranış gösterdiği de kabul edilerek yapılan çalışmalar literatürde bulunmaktadır.

3.2. Modelleme Yöntemleri

Yığma yapıların modellenmesinde, mikro modelleme ve makro modelleme şeklinde iki temel yaklaşım vardır. Mikro modelleme tekniğinde, bağlayıcıyı temsil eden harç ile taş veya tuğla ayrı ayrı modellenir. Makro modellemede ise malzemeler ayrı ayrı değil, genel bir ilişki içerisinde tek malzeme gibi modellenmektedir.

Mikro modelleme yaklaşımında, elastik ötesi davranış ara yüz elemanlarında oluşur ve dolayısıyla rijitliğin azalmasına yol açan gerilmeler ve yük akışı izlenebilir. Ara yüz elemanı için çeşitli göçme modlarını içeren modeller de geliştirilmiştir (Şekil 3.7).



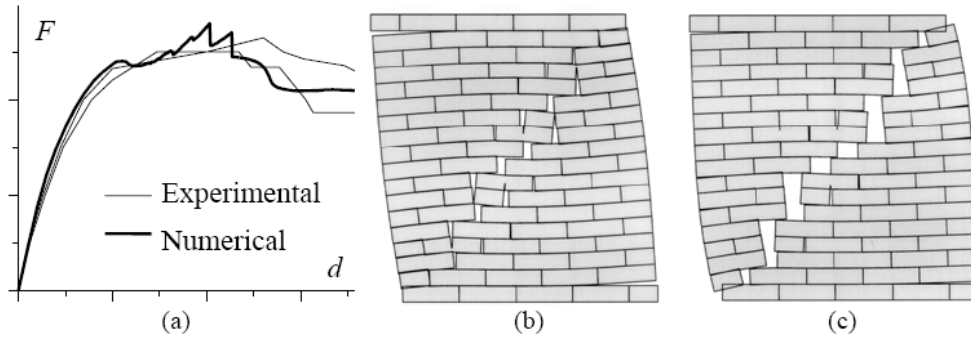
Şekil 3.7. Model Yaklaşımları a)Detaylı Mikro b)Basit Mikro c)Makro Modelleme [19]

3.2.1. Mikro Modelleme Yöntemi

Yığma yapıdaki derzler zayıflığın öne çıktığı düzlemler olarak görülür. Titiz bir modelde, tuğla veya taştan oluşan yığma birimlerle derzleri oluşturan harç ayrı ayrı modellenmek suretiyle davranış farklılığı dikkate alınır. Derzdeki harcın yığma birimlere nazaran zayıf olması sebebiyle, derzlere yoğunlaşan bir model yaklaşımı olan mikro modelleme tekniği, daha çok küçük ölçekli yapılarda ve özellikle yapı elemanlarının veya yapıların bir bölümünün detaylı analiz edilmesinde tercih edilen bir tekniktir. Mikro modelleme yaklaşımında yığma yapı birimleriyle bağlayıcıların mekanik özellikleri tam olarak bilinmelidir. Dolayısıyla mikro modelleme öncesinde detaylı bir malzeme çalışması yapılması şarttır. Mikro modellemede, tüm doğrusal olmayan davranış ara yüzlerde, muhtemel düşey kırılmalar da birimin ortasında yoğunlaştırılabilir. Daha sonra bu yaklaşımda genel olarak büyük bir hesap yüküyle karşılaşılır. Bu sebepten mikro modelleme yaklaşımı yerel analizler için yaygın olarak kullanılırken, büyük ölçekli yapının bütününe değerlendiren çalışmalarda ise tercih edilmemektedir. Uygulamalar ise sonlu elemanlar, ayrık elemanlar ve limit analiz kullanılarak gerçekleştirilebilir [19].

Ayrık eleman yönteminde, yapı ayrı blokların (katı ya da deforme olabilen) birleşimi olarak kabul edilir. Yöntem büyük yer değiştirme (derzler için) ve küçük şekil değiştirmeler (bloklar için) üzerine kuruludur. Her bir blok geometrik ve malzeme olarak modellendikten, hacim ve yüzey kuvvetleri tanımlandıktan sonra, zamana bağlı hareket denklemleri sayısal olarak çözülür (Şekil 3.8).

Sonlu eleman yöntemi ile Ayrık Eleman Yöntemi (FEM-DE) (Finite element method-Discrete Element) birlikte de kullanılabilir. Katı elemanlar sonlu eleman yöntemi ile modellenirken bağlayıcı harçlar için ayrık eleman yöntemi kullanılmaktadır. Büyük yer değiştirme olduğunda bu yöntemi kullanmak zorlaşır. Bu yöntemdeki en büyük zorluk, uygun malzeme parametrelerini belirlemektir. Tuğla/blok ve harç bağlayıcının karakteristiklerinin tespit edilmesinde pratikte zorluklar bulunur. Çünkü örme yapıları elemanlar genellikle alçı, sıva gibi malzemeler ile kapatılmaktadır [11].



Şekil 3.8. Yığma Duvarın Mikro Model Analizi a) Kuvvet-Yer değiştirme Diyagramı b,c) Maksimum ve Nihai Yüklerdeki Deformasyonlar [19]

Ayrık elemanlar metodunun en çok dikkat çeken karakteristikleri şunlardır:

- Rijit veya şekil değiştirebilen bloklar kullanılabilir.
- Yüzeyler ve köşe noktaları arasında bağlantı sağlanabilir.
- Elemanların birbirine girme imkânı vardır.
- Gerçek sönüm kat sayısı (dinamik problem) veya yüksek hayali sönüm kat sayısı (statik problem) kullanılabilir.

Bu tekniğin önemli avantajlarını ise büyük yer değiştirmelerin yeterli bir yaklaşımla formülize edilmesi, bağımsız hareket yapabilme kabiliyeti oluşturur. Olumsuz tarafları ise karşılıklı etkilerin doğru bir biçimde temsil edilebilmesi için çok sayıda temas yüzeyi gerektirmesi ve üç boyutlu problemler için çok zaman harcanması şeklinde sayılabilir [19].

Limit Analizin en çok dikkat çeken özellikleri şöyle sıralanabilir:

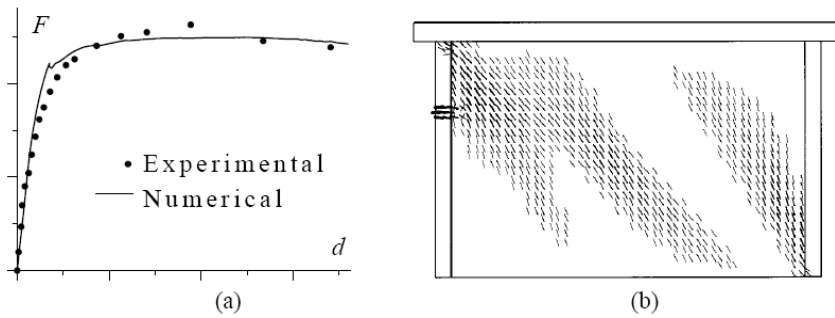
- Rijit bloklar kullanılır.
- Blokların birbirinin içerisine girmesine izin verilmez.
- Optimizasyon sağlayan bir matematik yöntem kullanılır.

Avantajları, hızlı analiz yapma imkânı ve tasarımda kullanılabilmesidir. Bu yöntemin olumsuz tarafları ise sadece göçme yükü ve mekanizmanın tespit edilebilir olması ve çekme gerilmelerinin modele dâhil edilememesidir. Ayrıca yükleme geçmişinin tanıtılması da zorluklar arasında yer alır.

Tam bir mikro modelde bütün göçme mekanizmaları, yani, birleşimlerdeki çatlaklar, derzde meydana gelebilen kaymalar, yığma birimin kırılması ve ezilmesi şeklinde sayılabilecek mekanizmalar bulunmalıdır [19].

3.2.2. Makro Modelleme Yöntemi

Makro modellerin kavranması ve uygulanmasında deneysel verilerin bulunmayışı ve izotrop olmayan malzeme davranışındaki karmaşıklık sebebiyle zorluklarla karşılaşmaktadır. Yeterli sayıda çalışmaların yapılmadığı özel modeller, makro modellemenin zorluklarını aşmak için yeterli görünmemektedir. Bazı çalışmalarda ise anizotrop malzeme davranışı ve plastisite kavramı kullanılarak, farklı yönlerde farklı sertleşme/yumuşama özelliği gösteren uygulamalar oldukça iyi sonuçlar vermiştir [19]. Buradan da anlaşıldığı gibi makro modellemede malzeme tanımları model ve analizin doğruluğunu belirleyen en önemli kriterdir. Aşağıdaki şekilde (Şekil 3.9) yığma bir duvara ait makro model analizi görülmektedir. Deney ile sayısal sonuçlar çok iyi bir benzerlik göstermiştir. Mikro model yöntemi olan ayrık eleman metodu ile aynı duvarın analiz edilmesinden benzer sonuçlar çıkmıştır. Burada uygun kabuller ve sınır şartları sağlandığı takdirde makro modelin kolay ve hız kazandıran bir teknik olduğu anlaşılmaktadır.



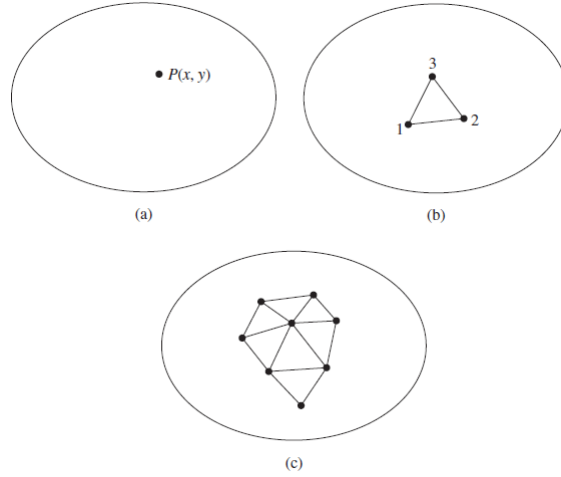
Şekil 3.9. Yığma Duvarın Makro Model Analizi a) Kuvvet-Yer değiştirme Diyagramı b) Nihai Yükle Deformasyon Şekli [19]

3.2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Elemanlar Yöntemi, genel olarak mühendislikteki sınır değer problemleri için yaklaşık sonuçlar elde etmeye yarayan bir sayısal hesaplama yöntemidir [23]. Yapı mühendisliğinde ise Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method), yapıların 3 boyutlu statik ve dinamik analizlerine imkân tanıyan, doğrusal ve doğrusal olmayan çözümlemelerin yapılabildiği ve sonuçların sayısal veya grafik olarak görüntülenebildiği bir analiz metodudur.

Yapıların statik ve dinamik yükler altındaki davranışının belirlenmesi ve yapı elemanlarının gerilme tespitinde sıkça kullanılan metot sonlu elemanlar metodudur. Zaman ve ekonomi yönünden tercih edilen bu yöntemde çeşitli yapı eleman

modellerini bir arada kullanmak da (çubuk, kabuk, plak, prizma (solid)) mümkün olmaktadır.

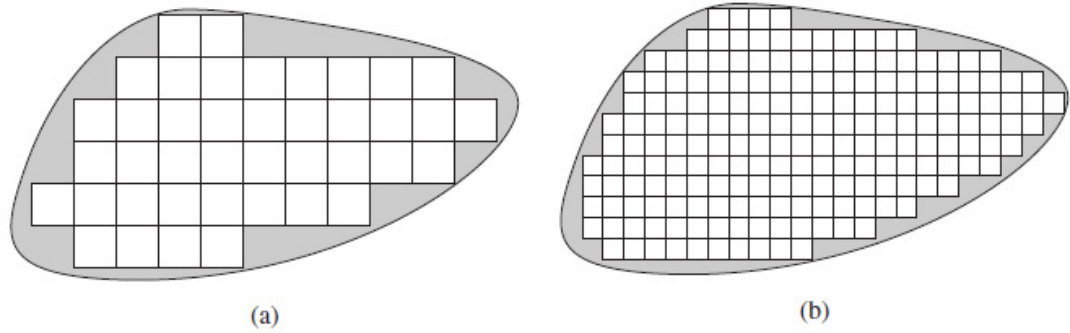


Şekil 3.10. FEM - Temel Kavramlar: a) Genel Bir $P(x,y)$ Değişkeni b) Üçgen Sonlu Eleman c) Üçgen Sonlu Eleman Ağı [23]

Sonlu elemanlar yönteminde, çözümü aranan sistem bir ağ ile idealleştirilerek ifade edilir. Sonlu eleman ağı olarak tanımlanan bu ağı, çeşitli şekillerdeki sonlu elemanlar teşkil eder. Sonlu eleman ağındaki çizgilerin kesim noktalarına düğüm noktaları denir. Sonlu elemanlar, ağı belirleyen çizgilerin arasında kalan iki veya üç boyutlu elemanlardan oluşur. Sonlu elemanlar düğüm noktalarından birbirine bağlanır (Şekil 3.10).

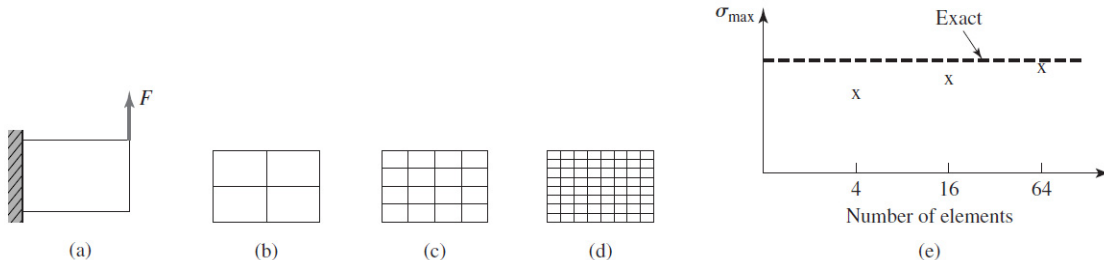
Her bir sonlu eleman için gerekli olan denklemler elde edildikten sonra tüm denklemler problemin tanım bölgesini ifade edecek şekilde birleştirilir. Böylece problemin bütününe ait sistem denklemleri elde edilir. Burada, temel değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri, bu düğüm noktaları ile tanımlı bölge içinde sürekli bir değişime çeviren şekil fonksiyonlarından yararlanılır. Böylece, sonsuz sayıdaki küçük elemanların bir bütünü olarak düşünülebilen sürekli ortam, sonlu sayıda ve büyüklükte sonlu elemanlardan müteşekkil yarı sürekli bir ortama dönüşür. Sonlu elemanlara ayrılmış problemin tanım bölgesini artık sonlu eleman ağı oluşturmaktadır. Sonlu elemanların birbiriyle ilişkisi esas alınarak birleştirilmiş bu modele matematik model adı verilir. Bir matematik modelin doğruluğu ve yaklaşıklığı, seçilen eleman tipine, eleman sayısına ve elemanların davranışına dair yapılan kabullere bağlıdır. Eleman sayısının artması, bilinmeyen sayısını da artırırken sonuçların doğruluğunu da artırır (Şekil 3.11, 3.12). Bilinmeyen olarak yer değiştirmeler, gerilmeler veya her ikisi birden seçilerek hesap yoluna

gidilebilmektedir. Daha sonra aranan diğer bilinmeyenler, çözümünden elde edilir. Mesela yer değiştirmeler bilinmeyen seçilirse türevlerinden gerilmelere ulaşılır [7].



Şekil 3.11. Amorf Bir Şeklin Sonlu Eleman Ağı a)41 Kare Sonlu Eleman b)Eleman Boyutlarını Değiştirerek Hassasiyetin Artırılması [23]

Burada modelleme aşaması oldukça kritiktir. Seçilecek sonlu eleman tipleri, büyüklükleri ve sonlu eleman ağı, problemi iyi tanımlamak zorundadır. Yapı sisteminin davranışını gerçeğe yakın bir tarzda görmenin yolu, iyi bir sonlu eleman ağı ile taşıyıcı sistemin hesap modelinin oluşturulmasından geçer. Yoksa yanlış bir model için doğru çözümler yapılmış olabilir.

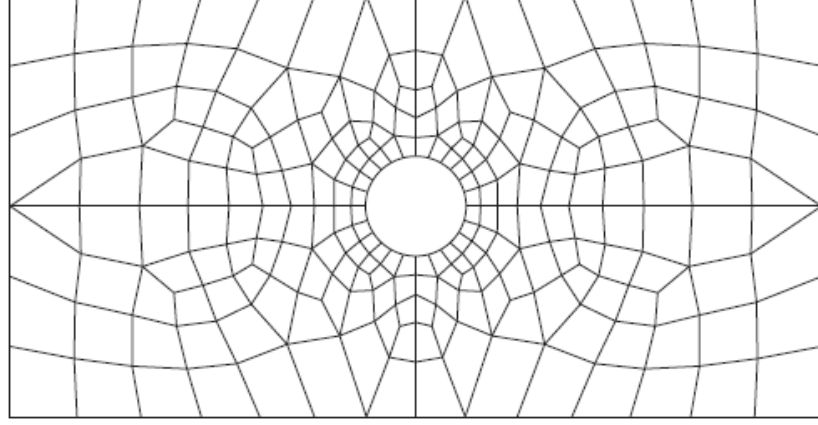


Şekil 3.12. Sonlu Eleman Sayısı İle Yaklaşık Sonuçların Yakınsama İlişkisi [23]

Çubuk eleman kabulünün yeterli olmadığı, malzemelerin ve geometrinin çok değişken olduğu, özellikle eğriliği bulunan elemanların tasarımında ve analiz edilmesinde çok büyük kolaylıklar sunan sonlu elemanlar metodu, yığma yapıların analizi konusunda da oldukça faydalı, sıkça kullanılan bir yöntemdir.

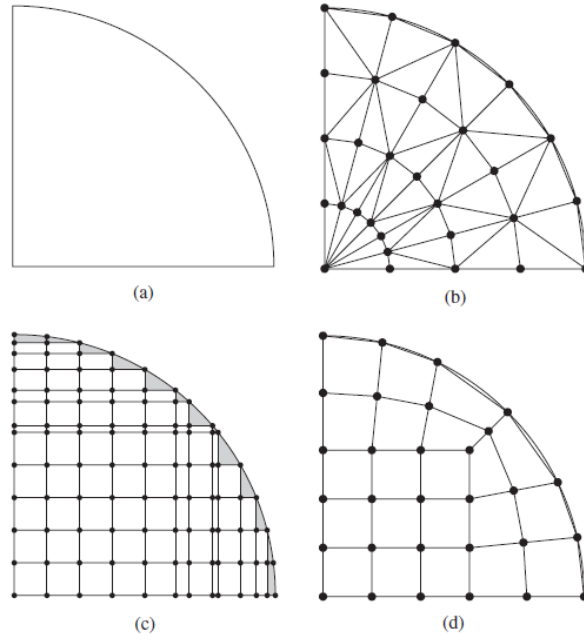
Sonlu Elemanlar Metodu ile çalışmanın getirdiği kolaylıklar şöyle sıralanabilir:

- Eğriliği bulunan, düzgün olmayan geometrilere sahip elemanlar ve amorf yapı elemanları rahatlıkla modellenebilir.
- Elemanlar istenilen boyutta parçalara ayrılarak istenilen hassasiyette sonuçlar elde edilebilir (Şekil 3.13, 3.14).



Şekil 3.13. Ortasında Boşluk Bulunan Bir Dikdörtgen Alanın Sonlu Eleman Ağı [23]

- Aynı yapı elemanı içerisinde uygun bir sonlu eleman ağı kullanmak suretiyle farklı malzeme özellikleri kullanmaya imkân sağlar.
- Farklı özelliklere sahip, farklı malzemeden oluşan yapı elemanlarının birleştirilmesine imkân tanır.
- Sınır şartlarını tanımlamak ve kontrol etmek oldukça kolaydır.
- Özellikle yığma yapılar gibi birçok elemanın birbirine bağlanması yoluyla oluşturulan yapı sistemlerinin gerçek yapım tekniğine uygun bir modelleme tekniğidir.
- Eleman boyutları kullanıcı tarafından değiştirilebilir. Böylece önemli değişiklikler beklenen bölgelerde daha küçük elemanlar kullanılarak hassas işlemler yapılabilirken, aynı parçanın diğer bölgeleri büyük elemanlara bölünerek işlem hızı arttırılabilir.
- Sonlu eleman metodunun çok yönlülük ve esnekliği karmaşık yapılarda, sürekli ortam, alan ve diğer problemlerde sebep sonuç ilişkilerini hesaplamak için etkin bir şekilde kullanılabilir



Şekil 3.14. Çeşitli Sonlu Eleman Modelleri a) Model Alanı b) Üçgen c) Dörtgen d) Dörtgen ve Yamuk Elemanlar [23]

3.2.3.1. Doğrusal Sistemlerde Sonlu Elemanlar Yöntemi

Bilgisayarda çözüm yapmak açısından daha az bilinmeyene sahip ve diğerlerine nazaran band genişliği daha küçük olan denklemler üretmesi sebebiyle yer değiştirme yöntemi doğrusal sistemlere uygulamalarında tercih edilmektedir. Bu yöntemin uygulaması aşağıdaki gibi yapılır.

- Sistem ya da sürekli ortam sonlu elemanlara ayrılarak düğüm noktalarından birbirlerine birleştirilir.
- Daha sonra sonlu eleman yüzeyinin şekil değiştirme düğüm noktalarının yer değiştirme parametrelerine bağlı olarak ifade edilir.
- Yer değiştirme parametrelerini, dik doğrultulardaki yer değiştirmeler ile dönme ve burulma eğriliği gibi vektörler oluşturur. Bu sayede eleman yer değiştirmeleri, seçilen şekil fonksiyonu vasıtasıyla düğüm noktaları yer değiştirmelerine bağlı olarak ifade edilmiş olur.
- Seçilen şekil fonksiyonları sistemi tam anlamda tarif edebilmelidir. Bu konuda son yıllarda farklı fonksiyonlar kullanılarak sonuçların yakınsaklığı iyileştirilmiştir.

Eğilme hesaplarında düğüm noktalarının yer değiştirme parametrelerinin bilinmesi, sistem yer değiştirme yüzeyinin ve her düğüm noktasındaki kesit tesirlerinin belirlenmesi açısından yeterli olmaktadır. Seçilen yer değiştirme parametreleri ve şekil fonksiyonları yardımıyla, sistemin malzeme özelliklerine göre rijitlik matrisi, sistemin yükleme durumuna göre de yük matrisi hesaplanır. Elemanların rijitlik ve yük matrislerinden yola çıkarak sistemin rijitlik ve yük matrisleri bulunur. Daha sonra sınır şartları göz önünde tutularak düğüm noktası bilinmeyenleri hesaplanabilmektedir [7].

Şekil fonksiyonlarının eleman koordinatları cinsinden ifade edilmesi, sonlu eleman yönteminin sistematik olarak formüle edilmesini kolaylaştırmakla kalmaz, boyutsuz parametrelerle işlem yapma rahatlığını da sağlar. Eğer sınır şartlarını sağlayacak tarzda seçilen şekil fonksiyonları, sonlu elemanın tipine göre (çubuk, dörtgen, hegzahedral vb.) tayin edilirse, bunlar yer değiştirme fonksiyonu olarak kullanılmakla birlikte sistemin geometrisini tanımladığı için bu yaklaşıma izoparametrik eleman yaklaşımı denilmiştir. İzoparametrik yaklaşım hesapları kolaylaştırmakta ve işlem yükünü azaltmaktadır [7].

3.2.3.2. Doğrusal Olmayan Sistemlerde Sonlu Elemanlar Yöntemi

Doğrusal olmayan sistemlerde, elastik ötesi davranış, malzemenin bünye denklemlerinin doğrusal olmaması ve geometrideki değişimler sebebiyle denge denklemlerinin doğrusal olmaması şeklinde ortaya çıkar. Hem malzemeden hem de geometriden kaynaklanan doğrusal olmayan davranış, sonlu elemanlar yönteminde dikkate alınabilmektedir. Bir yüzeyin ya da ortamın elasto-plastik davranışını sonlu elemanlar yöntemiyle modellemek için üç fonksiyona ihtiyaç duyulur:

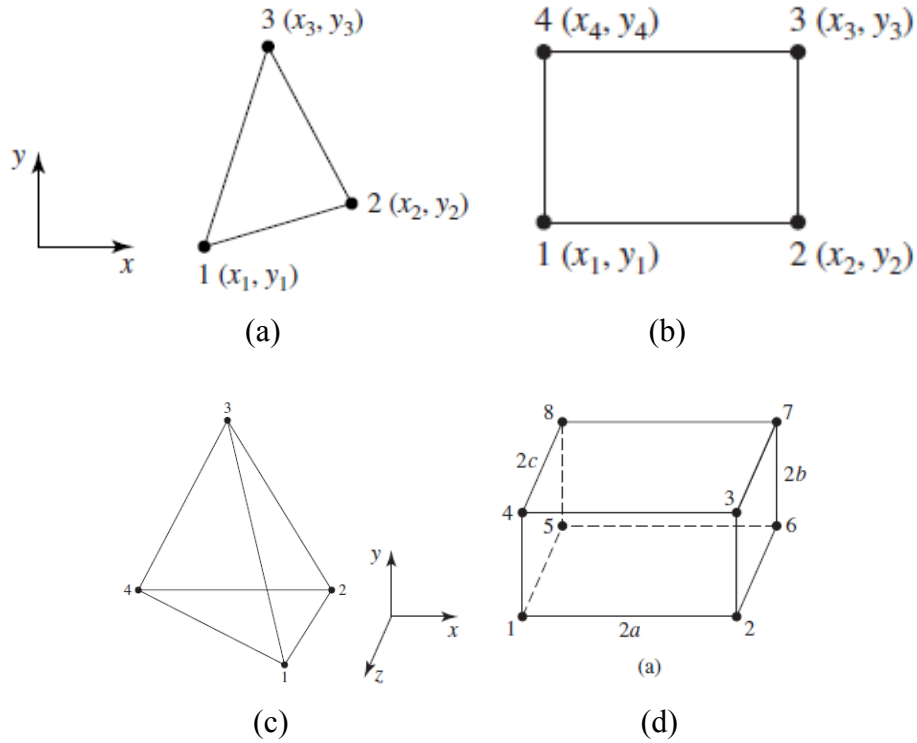
- Akma fonksiyonu: Malzemenin akmaya başlayıp başlamadığını ifade eder.
- Pekleşme fonksiyonu: Plastik şekil değiştirmeler sebebiyle akma fonksiyonundaki değişiklikleri ifade eder.
- Akma Kuralı (flow rule) : Plastik şekli değiştirmelerin yönünü belirler.

Sonlu elemanlar yönteminde doğrusal olmayan problemler için sayısal hesap tekniğine de ihtiyaç duyulur. Bu teknikler sayesinde yük artımlarına tekabül eden şekil değiştirmeler hesaplanır. Sayısal teknikler, Artımsal Yöntem, Ardışık Yaklaşım Yöntemi ve bunların karışımı şeklinde karşımıza çıkmaktadır [7].

3.3. Yapı Elemanlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modellenmesi

Sonlu Elemanlar Metodu ile yapı sistemlerinin analizinden önce izlenmesi gereken yol genel olarak şöyle sıralanabilir:

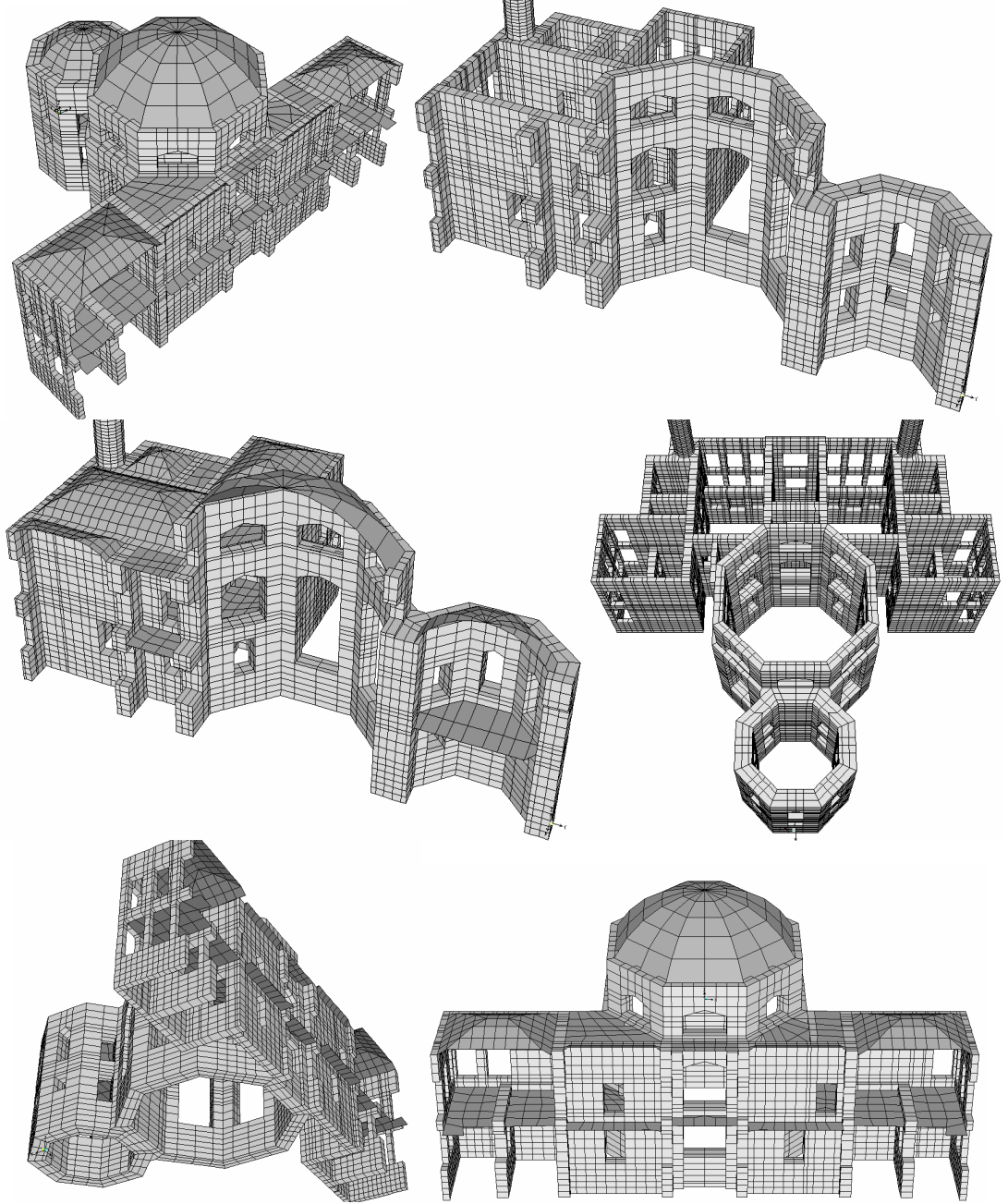
- Kullanılacak olan sonlu eleman tipleri belirlenir.
- Malzeme karakteristikleri tanımlanır.
- Sonlu elemanların en, boy, yükseklik ve alan gibi geometrik büyüklükleri belirlenir. Uygun sonlu eleman ağırları oluşturulur. Şekil fonksiyonları seçilir.
- Sınır şartları ve yükler tanımlanır
- Eleman matrisleri yardımıyla sistem matrisleri bulunur.
- Sistem denge denklemleri çözülür [13, 23].



Şekil 3.15. Bazı Sonlu Elemanlar a) Üçgen b) Dörtgen c) 3D Dört yüzlü d) 3D Dörtgen [23]

Yapıları modellerken izlenebilecek en basit yaklaşım farklı yapı elemanlarını, farklı model elemanlarıyla temsil etmektir. Mesela, sütunları çubuk (frame) elemanlarla, kubbe, tonozları kabuk (shell) elemanlarla, duvarları da katı (solid) elemanlarla modellemek sıkça kullanılan bir yaklaşımdır.

İncelenen yapının türüne göre değişkenlik gösterebilen bu yaklaşımlar, uygun kabullerle yeterli yaklaşıklıkta sonuçlar verebilir. Aşağıdaki şekilde (Şekil 3.16) bu çalışmada detaylı olarak incelemek üzere geliştirilen Hırka-i Şerif Camii'ne ait üç boyutlu sonlu eleman modeli görülmektedir. Bu modelde, kubbe, tonoz ve döşemeler kabuk (shell), duvarlar ise katı (solid) elemanlarla ifade edilmiştir.



Şekil 3.16. Hırka-i Şerif Camiinin Üç Boyutlu (3D) Sonlu Eleman Modeli

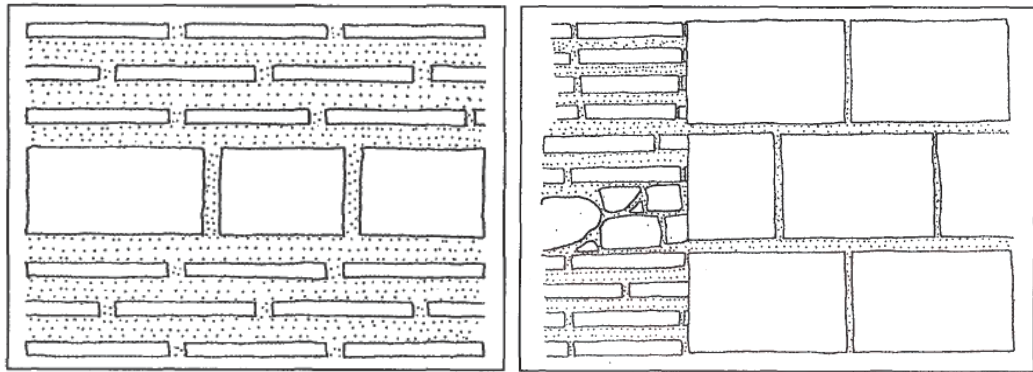
3.3.1. Duvarların Modellenmesi

Yığma duvarlar kalın kesitlere sahiptir. Modelleme esnasında duvar kesitlerinin tek eleman olarak modellenmesi çoğu zaman uygun olmaz. Özellikle en kesiti birkaç katmandan oluşan duvarların planda parçalara ayrılması önem kazanır.

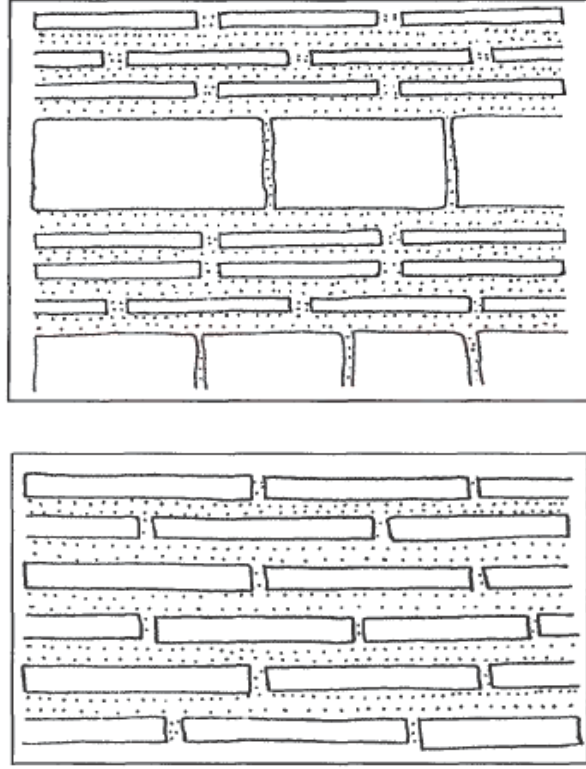
Kullanılan sonlu eleman boyutları küçüldükçe taşıma gücü değerleri de düşmektedir. Eleman boyutu küçüldükçe bir yükleme adımı sırasında rijitlik kaybına uğrayan eleman sayısı da artar. Diğer taraftan eleman boyutunun gereğinden büyük olması durumunda da rijitlik gerçek değerinden daha yüksek kalır. Dolayısıyla daha küçük elemanlardan oluşan modellerde, yapı gerçek taşıma gücünden daha önce, daha büyük elemanlı modellerde ise gerçek taşıma gücünden daha sonra güç tükenmesine erişir. Bu sebeple optimum bir eleman boyutu seçmek önemlidir. Genel olarak modelde kullanılan sonlu eleman boyutlarının, duvardaki tuğla ya da taş eleman boyutlarının en fazla 3-4 katı kadar olması uygundur. Mesela 20 cm yüksekliğinde taşlarla inşa edilmiş bir duvarda 60-80 cm yüksekliğinde sonlu elemanların kullanılması uygun bulunmaktadır. Ancak bu şekilde sistem homojen olarak ifade edilmiş olabilir [7].

Genel olarak yığma duvarlarda kullanılan harcın mukavemeti, duvarın mukavemetine eşdeğer durumdadır. Diğer bir deyişle, duvarda zayıf halkayı oluşturan harcın mukavemeti, yığma elemanın mukavemetinde belirleyici bir konumdadır. Güç tükenmesi harç ile tuğla veya taş arasında gerçekleşir [7].

Duvarların modellenmesi sırasında duvar dokusu ve yapım tekniği de dikkate alınmalıdır. Duvarın tuğla veya taş olması ya da almaşık düzende olması modelleme tekniği açısından değerlendirilmelidir (Şekil 3.17, 3.18).



Şekil 3.17. Atik Mustafa Paşa ve Bodrum Camilerinin Duvar Dokuları [7]



Şekil 3.18. Zeyrek ve Ayasofya'ya Ait Duvar Dokuları [7]

3.3.2. Kubbe ve Tonozların Modellenmesi

Kubbe ve tonozlar, kesitleri nispeten ince kabul edilebilen elemanlardır. Bu yüzden kabuk (shell) elemanlarla modellenmesi yaygın bir yaklaşımdır. Kabuk elemanlarda düzlem gerilme ve şekil değiştirme söz konusuyken katı (solid) elemanlarda üçüncü boyutta da gerilme ve şekil değiştirme hesaba girer. Kubbe ve tonozlarda üçüncü boyuta denk gelen kesit derinliği boyunca meydana gelen değişimler ihmal edilebilmektedir. Ancak kesit derinliği boyunca değişimin ihmal edilebilmesi için uygun boyutların seçilmesi gerekmektedir. Bu boyutlara bazı farklı denemeler sonucunda karar verilebilir.

3.3.3. Sütun ve Ayakların Modellenmesi

Sütunların mermer veya granit gibi tek bir elemandan oluştuğu durumlarda sütunlar çubuk (frame) eleman olarak modellenebilmektedir. Fakat çubuk elemanlarla katı ve kabuk elemanların bağlandığı düğüm noktalarında gerilme yığılmaları meydana gelmektedir. Bu sebeple uygun bir gerilme dağılımı elde edilmesi zorlaşmaktadır. Çubuk eleman yerine katı elemanlar kullanıldığında ise daha düzenli bir gerilme dağılımı elde edilebilmektedir. Ayaklarda ise çubuk eleman kabulü yapmak gerçeğe

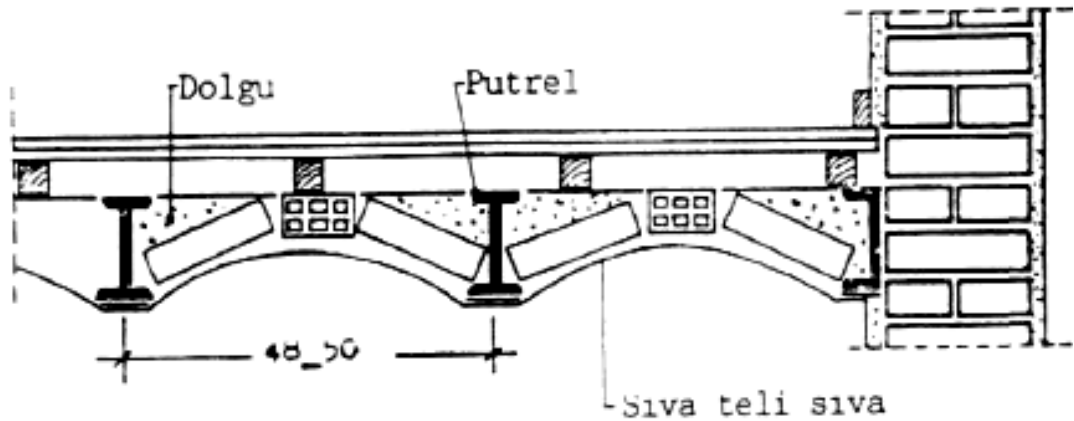
uygun olmamaktadır. Yine de çubuk eleman yapılmak istenirse, rijitlik ve sınır şartları açısından uygun kabul ve düzenlemelerin yapılması gerekir.

3.3.4. Kemerlerin Modellenmesi

Kemerlerin sayısal ortamda modellenmesi esnasında dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi kemeri oluşturan birimlerin yapım ve diziliş tarzına uygun modelleme yapmaktır. Daha çok mikro modelleme adıyla bilinen detaylı eleman analizlerinde bu husus öne çıkar.

3.3.5. Döşemelerin Modellenmesi

Yığma yapılarda döşemelerin modellenmesinde kabuk (shell) elemanlar kullanılmaktadır. Fakat rijit bir diyafram vazifesini bütün döşemeler göremez. Yapıya etkiyen yükleri dağıtım işlevi olmayan döşemeleri modellerken, eksenel yüklerin taşınmayacağı belirtilmelidir. Özellikle ahşap ve volta döşemelerin (Şekil 3.19) rijit diyafram olarak çalıştığını kabul etmek, zaten oldukça büyük rijitliklere sahip yığma duvarların yanında dikkate almak uygun olmayabilir. Kabuk elemanlarda S11 ve S22 gerilmeleriyle ifade edilen eksenel yük taşıma kapasitesi düşürülmeli veya sıfırlanmalıdır. Bunu, yazılımların imkânlarıyla gerçekleştirmek mümkündür.

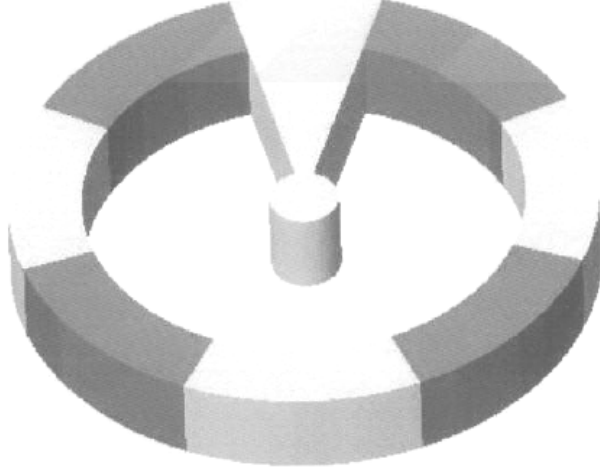


Şekil 3.19. Basit Volta Döşeme Kesiti [40]

Ayrıca yığma yapılarda zemine oturan döşemeler genel olarak modellenmemektedir. Dolayısıyla bu döşemedeki yükler de nazarı itibara alınmadığı gibi yapının kütesine de katılmaları doğru değildir.

3.3.6. Minarelerin Modellenmesi

Minarelerin mutlaka içindeki merdivenlerle beraber modellenmesi gerekir. Çünkü içerideki dönen merdiven minarenin rijitliğine katkıda bulunur. Çoğu minare hasarı da merdivenlerin bittiği ve sadece çevre duvarların devam ettiği şerefe sonrası kısımda görülür. Minarenin uç bölgesi olan bu bölümde, merdivenin bitmesi sebebiyle oluşan ani rijitlik değişimi hasarların başlıca sebebinin oluşturur. Aşağıdaki şekilde (Şekil 3.19) örnek bir minare kesiti merdiven ile beraber gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Merdivenli Minare Kesiti [27]

4. TARİHİ YIĞMA YAPILARIN ANALİZİ

Yığma yapılar, malzeme açısından basınç gerilmelerine oldukça dayanıklı, genel yapısı açısından ağır kütleli ve rijit, genel durum açısından da uzun yılların yorgunluğu ve ağır hasarların karakterize ettiği yapılardır. Yığma yapıların analizinde, farklı yükleme şartlarında taşıyıcı elemanlardaki gerilme seviyeleri, göçme mekanizmaları ve yer değiştirmelerin tespiti hedeflenir. Söz konusu hedefe ulaşmak için sayısal analize esas modelin geliştirilmesi yanında, göçme kriterleri, süneklik faktörü belirlenmesi gereken önemli hususlardır. Bu yapıların analizinde dört temel faktör ön plana çıkmaktadır.

- Sismik Faktör: Deprem sırasında oluşan yer hareketidir. Deprem merkezinin yapıya olan uzaklığı, büyüklüğü ve sıklığı gibi parametreler bu faktör içinde değerlendirilir.
- Zemin Faktörü: Yapı-zemin ilişkisini dikkate alabilmek için bilinmesi gereken zemin profili ve karakteristikleri bu faktör içinde yer alır.
- Davranış Faktörü: Yapı malzemelerinin ve yapı elemanlarının gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, şekil değiştirme kapasiteleri yapı davranışını belirler. Ayrıca, süneklik düzeyi de bu faktör içinde değerlendirilir.
- Dinamik Faktör: Yapının dinamik özellikleri olan periyot, mod şekilleri, sönüm oranları da yapının analizinde ve değerlendirilmesinde dinamik faktör içinde değerlendirilir [7].

Bununla birlikte yığma yapıların analizinde modern yapı ve binalarda kullanılan katsayıların kullanılması mümkün değildir. Özellikle deprem yükü azaltma katsayısı gibi dinamik hesaba esas olan değerler uygun kabullerle belirlenmelidir.

Tarihi yığma yapıların analiz edilip deprem performansının belirlenmesinden önce yapının rölövesinin çıkarılması gerekmektedir. Bu mimari rölöve olabileceği gibi sadece mühendislik hesapları için çıkarılmış olan taşıyıcı sistem rölövesi de olabilir. Her iki rölöve tekniğinde de yapının taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanlarının

beraberce gösterilmesi gerekmektedir, zira yapının geometrik olarak tanımlanması ve kütlesinin tayin edilmesinde hem mimari hem de taşıyıcı eleman boyutlarına ihtiyaç duyulur.

Yapının geometrik olarak tanımlanmasından sonra taşıyıcı sistemin net olarak tespit edilmesi ve geometrisinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu aşamada bazı idealleştirmeler yapmak, analiz sonuçlarının yorumlanabilmesi ve analizin uygun sonuçlar verebilmesi açısından kaçınılmaz olmaktadır.

Kullanılan malzemeler, malzemelerin mukavemet değerleri ve çeşitli mühendislik özelliklerinin de uygun test teknikleri ile belirlenmesi gerekir. Çoğu zaman tarihi yapılarda numune almak mümkün olmadığı için tahribatsız test tekniklerinin kullanılması uygun olmaktadır.

Yapının geçirmiş olduğu depremler ve bu depremlerin yol açtığı hasarların tespit edilmesi gereklidir. Önceden hasar gören elemanlar yine hasar görebilecek potansiyel risk bölgelerini oluşturduğundan dikkatle izlemek maksadıyla yapının geçmiş hasar durumları hakkında bilgi sahibi olmak lazımdır.

Zemin özellikleri de detaylı incelenmesi gereken konulardan birisidir. Yapı – zemin etkileşimli analiz yapabilmek için zemin parametrelerinin tespit edilmesi, uygun model verilerinin araştırılması gerekmektedir. Mümkünse detaylı bir zemin araştırması için muayene kuyuları açılması, sondaj yapılması suretiyle zemin özelliklerinin belirlenmesi yoluna gidilir.

Depremin yapılar üstündeki etkisi, depremin şiddetine, dinamik karakteristiklerine, zemin yapısına, yapının bulunduğu bölgeye, yapının şekline, temellerin durumuna, yapı malzemelerine, tasarım özelliklerine ve eleman detaylarına bağlıdır. En etkin faktörler ise, plan ve kesitteki düzen (yapı geometrisi) ile yapı malzemeleridir [19].

4.1. Yükler

Yığma yapılarda güz önüne alınabilecek yükleri şöyle sıralamak mümkündür:

Ölü yükler

Hareketli Yükler (yapıda ikinci bir kat veya galeri söz konusu olduğunda)

Kar Yüğü (daha çok tonozlarda ve yığılma meydana gelebilecek örtülerde)

Rüzgâr yükü (minarelerde)

Deprem Yükleri

Farklı Yer değiştirme, zemin ve temelde meydana gelen oturmaların meydana getirdiği etkiler

Sıcaklık değişimi, Rötre (kubbe tonoz gibi kabuk elemanlarda ve gergilerde)

4.2. Yığma Yapı Davranışı

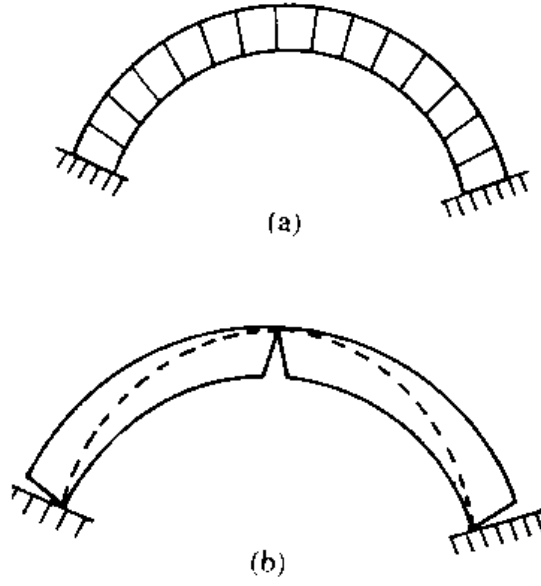
Tarihi yığma yapıların analizine yaklaşırken, geleneksel fikirler terk edilmelidir. Mesela, cami ve katedrallerin yapımında kullanılan taşlar, ayak ve sütunlarda, gç tükenmesine erişeceği gerilmelerin, ortalama % 10’undan, temel yapı elemanları olan payanda ve tonozlarda ortalama % 1’inden ve pendentif benzeri dolgu elemanlarında da % 0.1’inden daha az bir gerilme seviyesinde çalışır [2].

Betonarme ve elik yapıların tasarımındaki gerilme sınır şartları, yığma yapıların tasarımında geometrik sınır şartları haline dönüşür. Mesela uçan payanda gibi bir yığma yapı elemanının iç kuvvetleri, denge şartlarında payandanın sınırları içerisinde kalmalıdır.

4.2.1. Kubbe, Tonoz ve Kemerlerin Davranışı

Kemer bir düzlem eleman olarak kabul edildiğinde, tek yönlü dizilen kemerler tonozları meydana getirirken, bir kemerin düşey eksen etrafında döndürülmesiyle de kubbeler oluşur. Kemer davranışı kubbe ve tonozların davranışının da temelini teşkil eder.

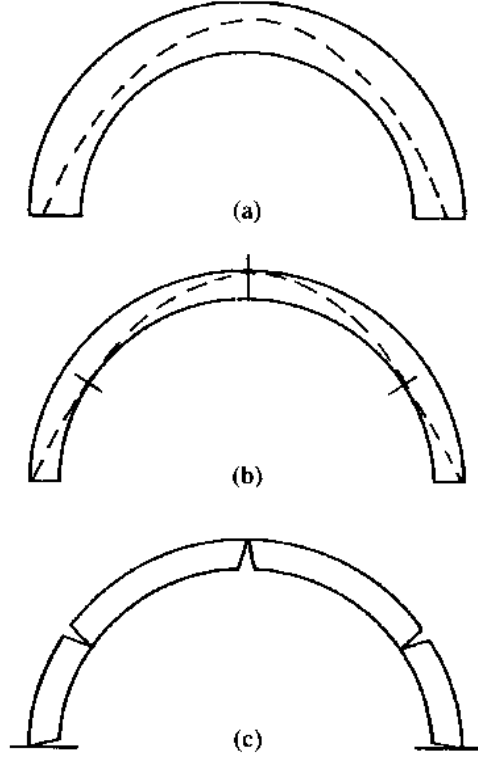
Yığma bir kemeri inşa etmek için iskele üzerine kama biçiminde kesilmiş kemer taşları yerleştirilir. Son taş olan kilit taşı yerine yerleştirilene kadar bu yapı ayakta duramadığı için iskele bir geçici destek olarak kullanılır. Destek kaldırıldığında, kemer mesnetleri itmeye başlar. Mesnetler kaçınılmaz olarak biraz bu itkiye yol verir ve kemer bu hareketle beraber hafifçe yayılır, açılır. Aşağıda bir kemerin mesnetlerinin izin vermesiyle genişlemiş olan açıklığa yerleşmesi mübalağalı bir çizimle gösterilmiştir (şekil 4.1). Kemer taşları, mukavemeti gösteremeyen ara yüzeylerden ayrılmasıyla birlikte kemer çatlar ve 3 mafsallı kemer oluşur. Bu 3 mafsallı kemer, iyi bilinen ve harika bir kararlılığa sahiptir. Bu şekilde kemer evre şartlarına makul bir cevap vermiştir.



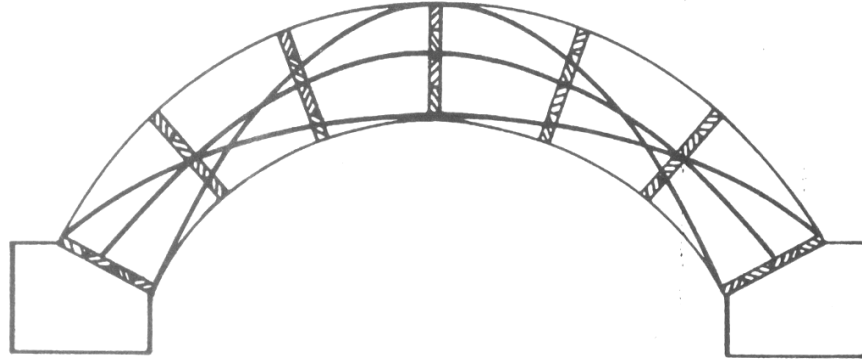
Şekil 4.1. Kemer Davranışı a) Yeni Yapılan Kemer b) Oturan 3 Mafsallı Kemer [2]

Kemer içindeki bileşke kuvvet çizgisi veya itki çizgisi, kemerin alt yüzeyi ile üst yüzeyi arasında kalmalıdır. Hooke tarafından geliştirilen bu anlayış plastik teorideki ‘güvenlik teoremi’ ile de doğrulanmıştır. Heyman da basınç kapasitesi çok yüksek, çekme mukavemeti çok az olan taş ve harcın birleştiği yığma yapı tekniğinin modern plastik teori ile incelenebileceğini belirtmektedir [2]. Bu teoreme göre dış yükler ile iç kuvvetler dengede iken itki çizgisi yığma elemanın içerisinde ise, bu yapı yıkılmaz. Yığma yapı elemanlarını inşa etmek için doğru şekilleri seçmek önemlidir. Bu şekiller de deneme yanılma ile bulunur ve kurallar haline getirilir. Mesela, bir sütunun boyu veya iki sütunun arasındaki açıklık, sütunun çapıyla orantılıdır.

Bir kemerin stabilitesi aşağıdaki şekilde (Şekil 4.2) gösterilmiştir. Şekil 4.2a’da görülen kemer kesik çizgilerle gösterilen ters bir zincir eğrisi olan itki çizgisini içine alacak kadar yeterli kalınlıktadır. Şekil 4.2b’de ise itki çizgisinin kemer kalınlığının azalmasıyla iç ve dış kenarlardan geçtiği görülmektedir. Bu kemer hemen hemen yıkılma aşamasındadır. Şekil 4.2c’de bu kemerin, oluşan mafsallarla nasıl göçme durumuna geldiği gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Kemerde İtke Çizgisi ve Çatlak İlişkisi [2]

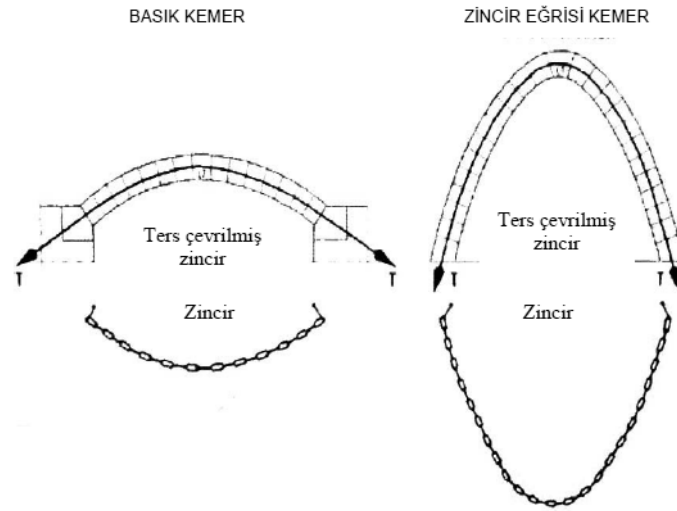


Şekil 4.3. Barlow Modeli Kemer ve İtke Çizgileri [2]

1846 yılında W. H. Barlow tarafından 6 adet kesme kemer taşından teşkil olunmuş bir kemer modellendi. Bu modelde taşların arasında birbirine 4 parçadan oluşan ve elle yerinden çıkartılabilen küçük ahşap parçalar bulunmaktaydı (Şekil 4.3). Bu modelde, itke çizgilerinin yerini tespit edebilmek ve yükün iletildiği noktaları belirlemek için 4 parçadan oluşan ahşap bağlantı elemanlarının 3 tanesi yerinden çıkarıldı. Daha sonra farklı konumlarda ortaya çıkan itke çizgileri Barlow tarafından çizildi. Tepe noktasında kemerin dış çeperine dokunan en dik itke çizgisine Barlow “direnme çizgisi” adını verirken en basık olan ve kemerin iç çeperine dokunan itke çizgisini ise “basınç çizgisi” olarak adlandırdı. Bu iki çizgi, ayaklara iletilen yatay

itki bileşeninin asgari ve azami sınırlarını ifade ediyordu ki bu da kemerin mesnedini oluşturan ayaklar için sırasıyla ayrılma veya yaklaşma şeklinde görülen küçük bir yer değiştirmeye tekabül ediyordu [2].

Geometrik olarak doğru kemer tasarımı yapabilmek için yaygın olarak zincir eğrisine başvurulmuştur. İki ucundan tutularak serbest bırakılan zincir, kendi ağırlığı altında bütün kesitlerde çekme oluşacak şekilde aşağıya sarkar. Bu şeklin ters çevrilmiş halinde inşa edilecek olan kemerde hiç çekme gerilmesi görülmeyecektir. Böylece tamamen basınca çalışan bir kemer elde edilmiş olur (Şekil 4.4).

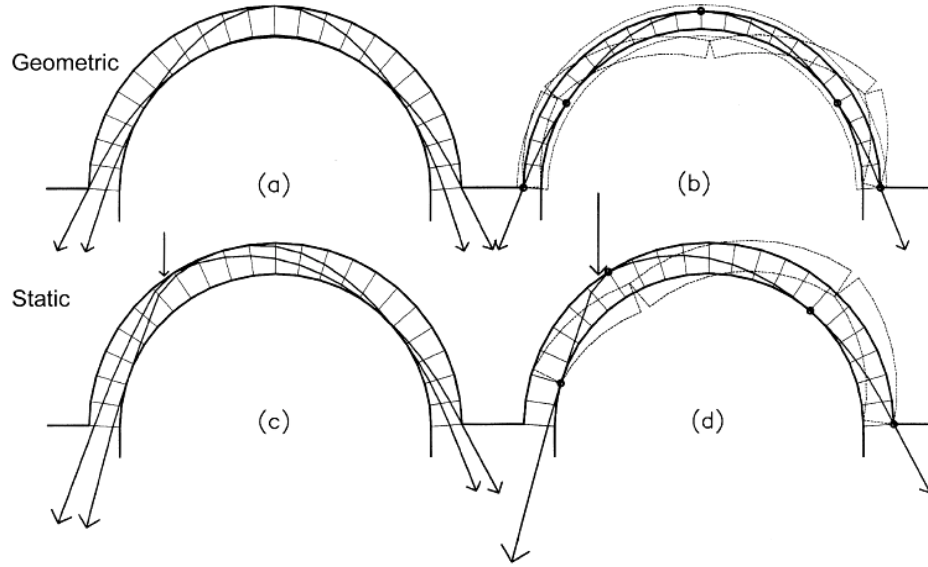


Şekil 4.4. Zincir Eğrisi ve Tersinden Elde Edilen Kemerler

İtki çizgisi kemerin merkezine yakın olduğunda, kemer yalnız basınç gerilmesi taşımaktadır. Bu sebeple kemerin arzu edilen şekilde davranması için, itki çizgisi merkeze mümkün olduğu kadar yaklaştırılmalıdır. Merkezine yakın konumda itki çizgisine sahip olan basık kemerler de bu nedenle sağlamdır. Yukarıdaki şekilde, zincir eğrisinden elde edilen ve gerilmeler altında kararlı olan sivri ve basık kemerler görülmektedir (Şekil 4.4). Zincir eğrilerinden elde edilen bu iki kemer tipinde, itki çizgisi kemerin ekseninden veya başka bir deyişle kemer taşlarının ortalarından geçtiği için, bu kemerler çok sağlamdır ve diğerlerine göre daha ince olmalarında bir sakınca yoktur. Esasında, itki çizgisi kemerin ana ekseninde tutulursa, kemer kalınlığını azaltmak mümkün olmaktadır.

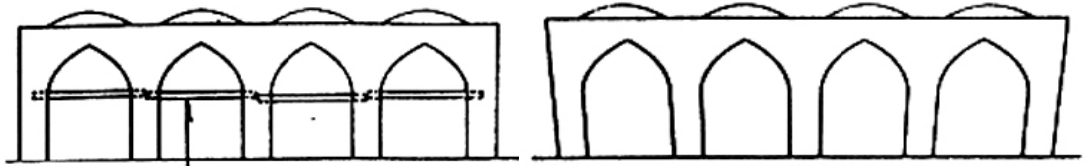
Aşağıdaki şekilde ise kemerlerin göçme mekanizması gösterilmiştir (Şekil 4.5). Kemerler, geometrik olarak doğru inşa edilmediği takdirde, itki çizgisinin kesit içinde kalmaması sebebiyle (alttaki şekil a ve b) göçecektir. Ayrıca yükleme durumuna göre yer değiştiren itki çizgisi de kemerin kararlı yapısını bozabilir. İtki

çizgisi kesit içinde kalmadığı durumda, kesitin dışına çıktığı bölgelerde çatlaklar ve bu çatlakların artmasıyla da göçme beklenir. Bu durumda, kemerin iki parametreye uygun olarak tasarlanması mümkündür. Birincisi geometrik uygunluk şartları, ikincisi de yükleme durumu ve buna karşı gelen kapasitedir. Kemer her iki şartı da sağlıyorsa ayakta kalabilecektir.



Şekil 4.5. Kemerlerde Göçme Mekanizması - İtke Çizgisi İlişkisi [1]

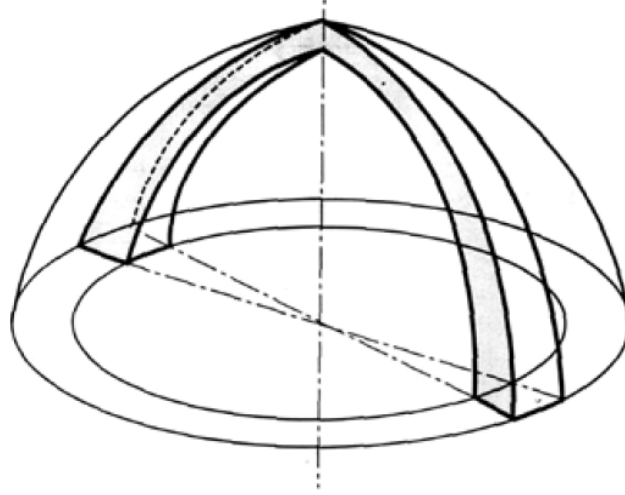
Yığma yapılar genel olarak deprem etkisi altında oldukça zayıftır. Elemanları bir arada tutacak güçlü bağlara ihtiyaç duyulan yığma yapılarda, en çok hasarlar minareler ve kubbeler ile kemerlerde meydana gelir.



Şekil 4.6. Kemerlerde Gerginin Etkisi [17]

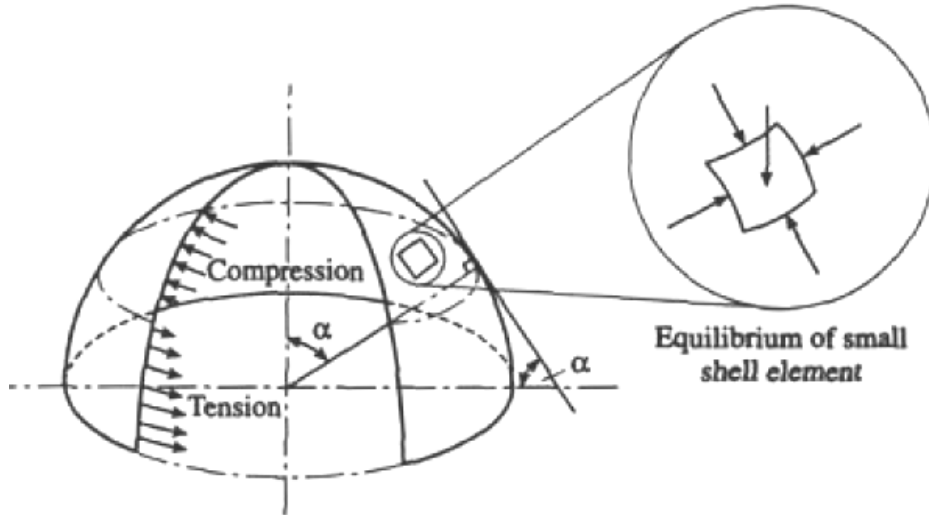
Kemerlerde mesnetlerin açılmasını önlemek amacıyla ahşap veya demir gergiler kullanılır. (Şekil 4.5) Yukarıdaki şekilde, gergili bir dizi kemerin, gergiler kaldırıldıktan sonra yaptığı şekil değiştirme gösterilmiştir. Gergilerde oluşan çekme kuvveti, kemerin açılmasına mani olur. Basınca çalışan kemer ve tonozlarda ortaya çıkan çekme gerilmelerinin yanında mesnetlerin açılmasını önleyen gergi demirlerinin paslanması, burkulması vb sebepler de hasara sebep olur. Demir gergilerde ekseriyetle görülen bozulma biçimi, gergide oluşan aşırı korozyondur. Yapıdaki hareketler sonucu gergilerde burkulma ve kopma sıkça izlenen hasar

biçimleridir. Ahşap gergilerde ise çoğunlukla çürüme, mantarlaşma gibi bozulmalar vardır. [4]



Şekil 4.7. Kubbede Kemer Dilimi [16]

Kubbeler sadece basınca çalışacak şekilde tasarlanmalarına rağmen, kasnağa yakın bölgelerde, derin olmayan çevre boyunca dağılan çekme gerilmeleri görülür. Kubbe, aslında bir kemerin düşey eksen etrafında çevrilmesinden oluşan bir geometriye sahip bir dizi kemerden meydana gelir (Şekil 4.7). Kubbelerin geometrik tasarım kuralları kemerler ile benzerlik taşır. Çift yönlü eğrilik sebebiyle, bir yöndeki gerilmeler diğer yöndeki davranışı da etkiler. Poisson oranı kubbelerde önem kazanır.



Şekil 4.8. Kubbede Gerilme Dağılışı ve Bir Kabuk Elemanın Dengesi[16]

Kubbeden kesilen kemer dilimi, üzerindeki yüklerin etkisi altında oluşan itki çizgisi iç ve dış çepere çok yaklaşmayacak (taş malzeme için onda bir, tuğla içinse beşte bir

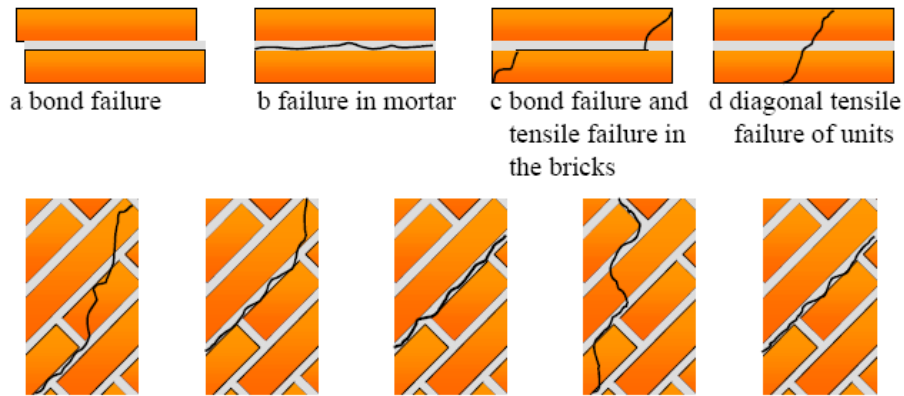
oranı uygun değerler olarak kabul edilir) şekilde tasarlanmışsa, bu kemer kararlı bir yapıya ve mukavemete sahiptir. Bu kemer dilimi kararlı ve güçlü bir yapıya sahipse, kubbe eteklerinde çatlaklar görünse bile bu kemerlerden teşkil edilen kubbe de kararlı bir yapı gösterecektir (Şekil 4.8).

Kasnağın kubbeden gelen yükleri taşıyamaması neticesinde kubbede çekme gerilmeleri oluşur. Kubbeler basınç altında çalışan elemanlar olduğu için kubbede oluşabilecek çekme kuvveti düşeyde çatlak oluşumuna, dolayısıyla kubbenin hasar görmesine sebep olur.

Kubbenin maruz kaldığı yükün düşey bileşeni, kubbeyi taşıyan kemer, duvar vs elemanlarla zemine aktarılırken, yatay bileşen de payandalar ve gergilerle karşılanarak kubbenin açılması önlenir. Kubbede açılmaya sebep olan yatay kuvvet, kalın beden duvarlarıyla karşılanabileceği gibi ağırlık kuleleri yardımıyla kuvvetin düşey bileşenini büyütmek suretiyle kısa yoldan aşağıya doğru yönlendirilmesi vasıtasıyla daha ince duvarlarla da taşınabilir. Bu yatay kuvvet, kubbeye mesnetlik yapan ve kubbenin açılmasını önleyen kasnak kısmında yatay doğrultuda çekme, düşey doğrultuda kayma gerilmeleri meydana getirir.

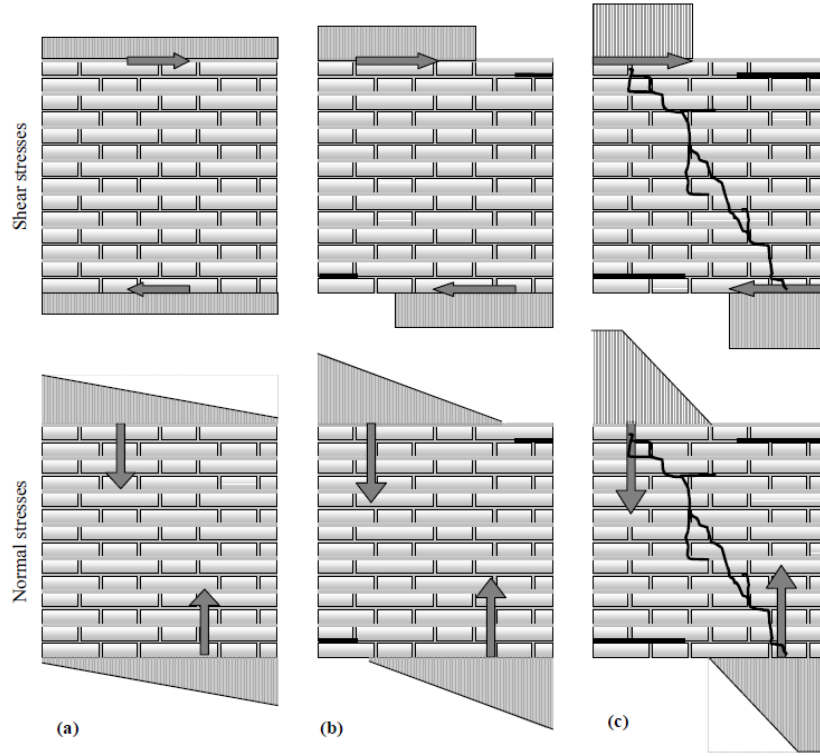
4.2.2 Duvarların Davranışı

Yığma yapılarda duvarlar genel olarak düzlem dışı etkiler ile kayma etkileri altında güç tükenmesine ulaşır. Oldukça büyük en kesitlere sahip olan duvarlarda, normal gerilmelerden kaynaklanan hasar tiplerine pek rastlanılmaz. Genellikle yığma duvarlar kapasitelerinin çok küçük bir oranında normal gerilme taşırlar. Duvarda normal gerilmeler mevcut kapasitenin % 10-15'ini geçmez.



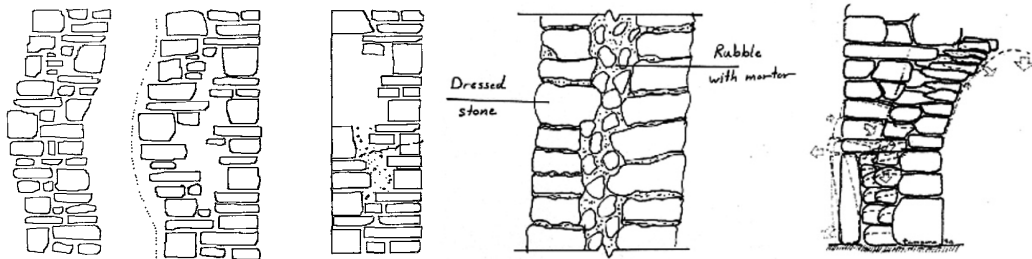
Şekil 4.9. Deneylerde Gözlenen Kayma Mekanizmaları [1]

Şekil 4.9 ve 4.10'da, kayma deneyine tabii tutulan duvar numunelerinin hasarları gösterilmiştir. Bağlayıcı harcın güç tükenmesine erişmesi veya yığma birim ile bağlayıcı arasındaki aderansın kaybolması sebebiyle kayma mekanizması oluşur. Bu mekanizmalardan bazılarında ise yığma birim derzden önce güç tükenmesine ulaşmaktadır.



Şekil 4.10. Kayma Etkisi Altında Duvar-Göçme Mekanizmaları ve Gerilme Dağılımı [1]

Duvar kesitlerinin geniş olması sebebiyle en kesitte meydana gelebilecek ayrılmalar da hasarlara sebep olmaktadır. Düzlem dışı etkiler, yığma duvarlar için çoğu zaman karşı konulması zor etkilere maruz kalan duvarlar, yatay harekete direnmek için diğer yöndeki duvarlara iyice mesnetlenmiş olmalıdır. Aşağıda düzlem dışı etkiler sebebiyle oluşan hasarlar gösterilmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Yığma Duvarlarda Düzlem Dışı Etkiler [11] [16]

4.3. Sismik Risk

Tarihi yığma yapılar, kalın duvarları, büyük kesitli devasa ayakları, kemerleri ve kubbeleriyle ağır bir kütleyle sahip oldukları için deprem etkisinde genellikle rijit cisim hareketine benzer bir davranış gösterirler. Bu yapıların kütle ve yükseklikleri nazara alındığında benzer yükseklikteki çağdaş yapılara göre periyotları oldukça kısadır. Genellikle periyotların $T = 0.15 - 0.45$ s aralığında değiştiği görülür [24].

Söz konusu kısa periyotlarda deprem etkisinin büyüklüğü ve tarihi yığma yapıların büyük kütlelerine tesir edecek olan deprem kuvvetlerinin fazlalığı düşünülürse, bu yapıların yer hareketlerinde oldukça büyük riskler taşıdığı söylenebilir.

Zamanla taşıyıcı eleman rijitlikleri ve mukavemetlerinde meydana gelebilecek zayıflıklar, zemine bağlı farklı oturmalar, çok sayıda deprem etkisine tarih boyunca maruz kalan elemanlar göz önüne alındığında ise riskin boyutu anlaşılır.

4.3.1. Tarihi Depremler

Analiz öncesinde, yerel sismik risk seviyesi, yapının tarihte yaşadığı depremler, bu depremlerin büyüklüğü, şiddeti ve dönüş periyotları ile gerçekleşme ihtimalinin tespit edilmesi gerekmektedir. Ayrıca zemin profiline ait özelliklerin tespiti için sahada ve laboratuvar ortamında zemin deneyleri yapılmalıdır.

Zemin sınıfına göre hangi spektrumun kullanılacağı, zemin hâkim periyotları, zemin yatak katsayısı, zeminin elastisite modülü ve taşıma gücü, poisson oranı belirlenmelidir. Bununla birlikte, yer altı suyunun seviyesi, su muhtevası, özgül ağırlık gibi fiziki özelliklerin de bilinmesine ihtiyaç duyulur.

Aşağıdaki tarihi kayıtlarda ve tabloda (Tablo 4.1) İstanbul'un tarih boyunca yaşadığı önemli depremler ve bu depremlerin yol açtığı hasarlara dair kayıtlar verilmiştir. Bu depremlerin merkezine olan uzaklık, depremlerin şiddeti, büyüklüğü ve en büyük deprem ivmesinin yer çekimi ivmesine oranı 1557 yılından 1967 yılına kadar tabloda listelenmiştir.

- 24 Ağustos 358: İstanbul'da hasar
- 2 Aralık 362: Henüz bitirilmiş Ayasofya'da hasar
- 396 İstanbul'da şiddetli bir deprem
- Haziran 402 İstanbul'da şiddetli bir deprem

- 403 İstanbul'da şiddetli bir deprem
- 1 Nisan 407 Bakırköy'de pek çok binada hasar ve Tsunami
- 412 Surlarda hasar
- 6 Kasım 447 Pek çok binada hasar, Surların önemli bir bölümünde göçme
- 25 Eylül 478 İstanbul'da büyük hasar, iç surların kısmen yıkılması
- 16 Ağustos 542 İstanbul'da büyük hasar, Costantin ve Arcadius Kilisesinde hasarlar.
- 6 Eylül 543 İstanbul'da şiddetli bir deprem. Ayasofya'da hasar
- 16 Ağustos 554 Pek çok binada ve surlarda, Ayasofya ana doğu kemerinde hasar
- 14 Aralık 557 Pek çok binada hasar, Ayasofya'nın önceden hasar gören doğu ana kemeri ve kubbenin doğu bölümünde göçme.
- 26 Ekim 740 İstanbul'da büyük hasar, özellikle surlarda ve Aya İrini Kilisesinde.
- 10 Nisan 861 Pek çok binada hasar
- 9 Ocak 869 Ayasofya'da kısmi göçme, pek çok binada göçme
- 25 Ekim 989 Ayasofya'nın batı ana kemerinde kubbede ve batıdaki yarım kubbede hasara yol açan göçmeler, Valens (Bozdoğan) Kemerinde hasar,
- 1 Haziran 1296 Pek çok binada hasar
- 1323 Pek çok binada hasar
- 18 Ekim 1343 Pek çok binada hasar, tsunami görüldü, Ayasofya'da hasar
- 6 Kasım 1344 İstanbul'da şiddetli bir deprem, surlarda kısmi hasarlar
- 19 May 1346 Ayasofya'nın doğu tarafında, doğu kemerinin yıkılmasıyla göçme
- 16 Ocak 1489 Pek çok minarede göçme, İstanbul'u vuran en büyük depremlerden birisi, hemen hemen her binada hasar, sivilaşma görüldü, takriben 1000 ev ve pek çok cami hasar gördü, nüfusun % 5'i (5000 kişi) yaralandı, Ayasofya, Beyazıt, Fatih Atik Ali Paşa, Davut Paşa Camileri, Topkapı Sarayı, Galata Kulesi Theodosius Obelisk, Anadolu ve Rumeli Hisarı ve surlar hasar gördü.
- 10 May 1556 Birçok binada hasar, Fatih Camii'nde ve Ayasofya'nın duvarlarında çatlaklar.
- 17 Şubat 1659 Pek çok eski binada ve Süleymaniye'de hasarlar,
- 25 Nisan 1689 İstanbul'da hafif hasarlar.
- 11 Temmuz 1690 Fatih Camii, Topkapı sarayı ve bazı binalarda hasarlar.
- 25 May 1719 40 adet Cami, 27 kule ve Beyazıt, Bayazıt, Sinan Paşa, Bali Paşa and Pertev Paşa Camilerinde hasarlar.

- 2 Eylül 1754 Birçok binada hasarlar, Üsküdar ve Balat'ta ağır hasarlar.
- 22 May 1766 Birçok binada hasar, Ayasofya, Beyazıt, Fatih ve Süleymaniye ve birçok camide hasarlar
- 10 Temmuz 1894 İstanbul'da ağır hasarlar, Ayasofya, Fatih Camileri ile pek çok cami ve kilise ve Topkapı Sarayında hasarlar

Tablo 4.1. İstanbul'da Yaşanan Tarihi Depremler [37]

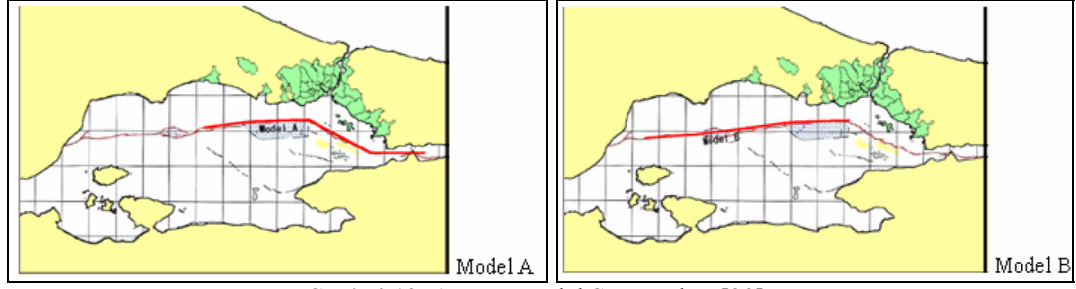
	Date	Epicenter N	Epicenter E	Magnitude	Intensity (MM) (at epicenter)	Distance from Epicenter (km)	Intensity (MM) In İstanbul	Acc %g
1	30-04-1557	41	29	6,4	VIII	0	VIII	12
2	30-07-1633	41	29	5,5	VII	0	VII	-
3	28-06-1648	41	29	7,0	IX	0	IX	18
4	1718	41	29	6,2	VII	0	VII	-
5	25-05-1719	40,8	29,4	7,3	X	25	IX	18
6	03-09-1763	41	29	5,8	VII	0	VII	-
7	23-04-1766	40,8	28,2	7,6	X	72	IX	17
8	28-02-1855	40,2	29,1	7,7	X	90	VIII	14
9	10-07-1894	40,6	28,7	7,8	X	54	IX	21
10	09-08-1912	40,5	27,0	7,8	X	177	VII	-
11	04-01-1935	40,5	27,5	6,9	IX	137	VI	-
12	18-03-1953	40,0	27,3	8,0	XI	182	VII	-
13	06-10-1964	40,3	28,2	7,0	IX	102	VI	-
14	22-07-1967	40,7	30,8	7,2	IX	150	VI	-

Yukarıdaki tablodan ve kayıtlardan görüldüğü gibi İstanbul, hemen hemen her yüzyılda en az bir büyük deprem yaşamış, hatta bazı yüzyıllarda bu sayı ikiye ve üçe de çıkmıştır.

4.3.2. İstanbul İçin Deprem Senaryoları

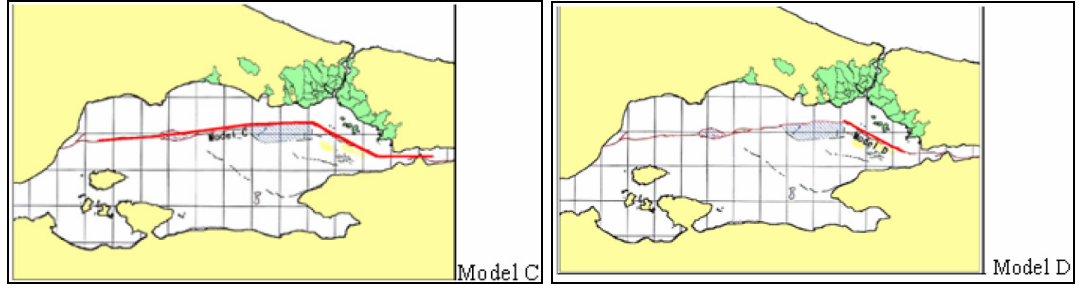
İstanbul Büyükşehir Belediyesi ve JICA ortaklığıyla yapılan İstanbul Mikro Bölgeleme çalışmasına göre 4 ayrı muhtemel deprem senaryosu öngörülmüştür.

- Model A: Bu modelde, Kuzey Anadolu Fay hattının İzmit'ten başlayıp Silivri'ye kadar devam eden 120 km'lik kısmında doğudan batıya doğru sismik hareket görüleceği tahmin edilmiştir. Bu modelin diğer modellere göre gerçekleşme ihtimali daha yüksektir. Söz konusu sismik hareket 7.5 büyüklüğünde bir depreme yol açacağı hesaplanmıştır.(Şekil 4.12)



Şekil 4.12. A ve B Model Senaryoları [39]

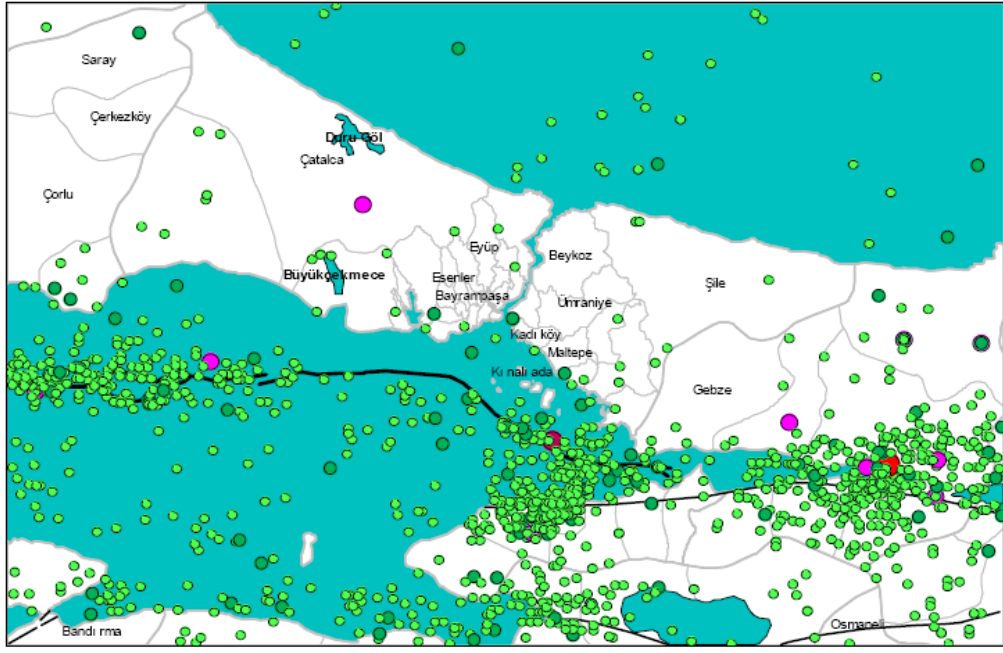
- Model B: Bu modelde aktif fay hattı uzunluğu 110 km olarak belirenmiş ve Mürefte-Şarköy'den başlayıp Bakırköy kıyılarına kadar devam edeceği öngörülmüştür. Bu modelin öngördüğü sismik hareket 7.4 büyüklüğünde bir depreme sebep olabilecektir (Şekil 4.12).
- Model C: Bu model, Kuzey Anadolu Fay hattının Marmara Denizi içindeki kısmının tamamen kırılacağını ve sismik hareketin 170 km uzunluğunda olacağını öngörmektedir. Söz konusu hareketin 7.7 büyüklüğünde bir depreme yol açacağı hesaplanmıştır. Tarihi depremlere bakıldığı zaman en büyük depremin 7.6 büyüklüğünde gerçekleştiği görülmektedir. C modelinde ise bu güne kadar görülen depremlerden daha büyük bir deprem söz konusu olmaktadır ki bu en kötü senaryodur (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. C ve D Model Senaryoları [39]

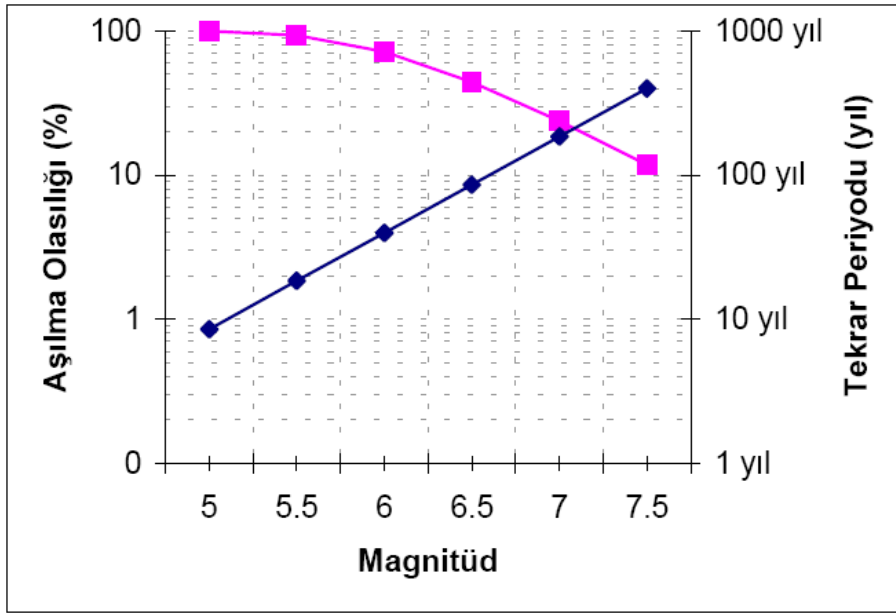
- Model D: Bu modelde fay hattı İzmit körfezinden başlayarak kuzey Marmara'dan ilerlemektedir. Söz konusu sismik hareketin 6.9 büyüklüğünde bir deprem oluşturacağı hesaplanmıştır (Şekil 4.13).

Şekil 4.14'te Marmara bölgesinin depremselliği gösterilmiştir. 1900-2003 yılları arasında bölgede $3 < M < 8$ aralığındaki depremler harita üzerinde gösterildiği gibi Kuzey Anadolu Fay hattının geçtiği Marmara Denizi'nde, özellikle 3 önemli noktada yoğunlaşmaktadır. Bu faydaki hareketlilik İstanbul'u, kalitesiz yapı stoğu ve yoğun nüfusu sebebiyle tehdit etmektedir.



Şekil 4.14. Bölgenin 1900-2003 Arası $3 < M < 8$ Depremleri [41]

Aşağıdaki şekilde (Şekil 4.15) ise İstanbul için muhtemel deprem büyüklükleri, bu depremlerin aşılma olasılıkları ve dönüş periyotları gösterilmiştir.



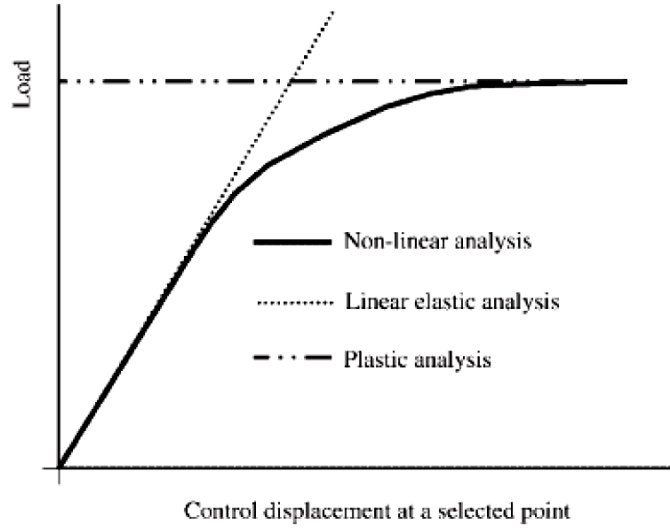
Şekil 4.15. Deprem Büyüklükleri, Aşılma Olasılıkları ve Periyotları [41]

4.4. Analiz Yöntemleri

Tarihi yapıların analizinde, Doğrusal Analiz, Doğrusal Olmayan Analiz ve Plastik Analiz olmak üzere 3 farklı analiz yöntemi öne çıkmaktadır.

Doğrusal (Lineer) Analiz: Yapının lineer analizi, malzemenin lineer-elastik davranış kabulüne dayanır. Lineer davranışla yapının limit durumları analiz edilebilir. Ayrıca,

yapıda meydana gelen tedrici çatlak ve hasarların incelenmesiyle kullanılabilirlik sınırları da elde edilebilmektedir. Çatlamış elemanların rijitliklerinde azaltmalar yaparak yeniden gerilmelerin dağılımı yardımıyla limit yük analizi de yapılmaktadır. Aşağıdaki şekilde analiz yöntemleri grafik olarak gösterilmiştir (Şekil 4.16).



Şekil 4.16. Analiz Tiplerinin Karşılaştırılması [30]

Doğrusal Olmayan (Non-Lineer) Analiz: Doğrusal olmayan analizle, yapıda başlangıçtan itibaren limit duruma kadar meydana gelen tüm hasarlar ve tepkiler incelenebilir. Yapım sırası, daha önceki yüklemelerin etkileri de bu analizde dikkate alınabilir. Yapılarda doğrusal olmayan davranışı etkileyen iki faktör vardır. Birincisi malzemenin elastik ötesi davranışdır. İkincisi ise geometriden kaynaklanan, ikinci mertebe etkileri adıyla bilinen, yüklemeye geometride meydana gelen değişimleri dikkate alan etkileri kapsar. Doğrusal olmayan analiz hem limit yük analizinde, hem de kullanılabilirlik analizlerinde uygulanabilir.

Plastik Analiz: Yapının plastik bir davranış gösterdiği esasına dayanan ve limit yük analizinde kullanılan bir yöntemdir. Genellikle doğrulama çalışmalarında kullanılır. Plastik mafsallı hipotezine dayanan bir yapısal davranış modelidir. Plastik analizde önceki yüklemelerin etkisi göz önüne alınmazken, yüklerin yoğunlaşması dikkate alınabilir ve yüklerin monoton artış gösterdiği kabul edilir. Bu metod alt sınır veya üst sınır teoremlerinin birine göre uygulanabilir. İtke çizgisi analizi statik bir alt sınır teoremi uygulamasıdır. Plastik mafsallı analizi de kinematik bir üst sınır uygulaması olarak karşımıza çıkmaktadır. Plastik davranış, çekme gerilmeleri sıfır kabul edilirse, tarihi yığma yapılar için yeterli bir yaklaşım olabilmektedir [30].

Bütün analiz metotları birbirinden malzeme davranışı ve sonuçlar açısından farklılıklar gösterir. Basit yapılar için çekme mukavemeti sıfır kabul edilmek kaydıyla non-lineer analiz ile limit yük analizi benzer göçme mekanizmalarıyla sonuçlanır. Fakat karmaşık yapılar için limit yük analizini yapmak zordur ve sonuçlar yanlışlıklar içerebilmektedir. Çekme mukavemeti tarihi yapıların analizinde önemli bir meseleyi oluşturur. Sıfırdan farklı, düşük veya azalan çekme mukavemeti analizde dikkate alınırsa sonuçların güvenilirliği artmaktadır. Bununla beraber çekme gerilmelerini değerlendirmek kolay değildir [30]. Aşağıdaki tabloda analiz yöntemleri ile giriş ve sonuç verileri toplu olarak gösterilmiştir (Tablo 4.2).

Tablo 4.2. Analiz Tiplerinin Karşılaştırılması [30]

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

4.4.1. Düşey Yükler Altında Statik Analiz

Bir yapının incelenmesi ve analizi söz konusu olduğunda mutlaka gerçekleştirilen bir analiz olan düşey yükler altında statik analiz, düşey yükleme (ölü yükler, hareketli yükler ve kar yükü de dâhil edilebilir) durumlarında yapıda oluşan yer değiştirme ve gerilme durumunu görmek amacıyla gerçekleştirilir. Genel olarak yapının düşey yükler altında bir problemi olmayacağı beklenir. Fakat bazen yapıda meydana gelen hasarlar, düşey yüklerin taşınması konusunda da zayıflıklara yol açabilir. Bu durumların statik analizde dikkate alınması ve muhtemel hasar bölgelerinin incelenmesi gerekir.

4.4.2. Dinamik Analiz

4.4.2.1. Modal Analiz

Modal analiz yönteminde, yapının serbest titreşim periyotları, mod şekilleri ve kütle katılım oranları belirlenir. Yapı sisteminin davranışına, yapıya ait her bir serbest titreşim modunun katkısının bulunduğu, bu katkıların ayrı ayrı belirlenip, her bir moda ait katkının birleştirilmesi yoluyla yapının dinamik davranışın belirlenmesi

esasına dayanan davranış spektrumu analizi, mod birleştirme esasına dayanır. Bu yöntemde yapı kütlelerinin, belirli seviyelerde toplandığı kabulüyle, iki ötelenme ve bir dönme hareketine bağlı olarak yapının davranışı ifade edilir. Matematik olarak sağlam bir temele dayanmasına rağmen, gerçek taşıyıcı sistem davranışını temsil etmek ve açıklamadaki eksiklikleri nedeniyle dikkatli kullanılması önerilen bir yöntemdir. Çoğu zaman modal analiz sonuçlarının, lineer statik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması önerilir.

4.4.2.2. Davranış Spektrumu Analizi

Zaman alanında sayısal çözümleme, yer değiştirme veya kesit etkisi gibi bir sistem parametresini 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 hareketinin spektrumu kullanılarak, en elverişsiz değerlerin elde edilmesi önemli ölçüde kolaylık sağlar. Spektral eğriler sadece en büyük değeri verecek şekilde hazırlandıkları ve belirli bir anda çeşitli modların katkılarının bulunmasında yeterli olmadığı için, matematiksel bir yaklaşıklığın yapılması gerekli olur. Matematik yaklaşımlardan biri olan Mutlak Değerlerin Toplamı (ABS) yönteminde, 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 Karelerinin Toplamının Karekökü (SRSS) yöntemiyle elde edilen değer, serbest titreşim frekansları ayrık olan sistemlerde, zaman tanım alanında çözümleme ile elde edilen sonuçlara oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu kuralın sınırlandırmasını 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 [24].

Matematik birleştirme yöntemlerinin kullanılmasıyla, sistemin zaman alanında dinamik bir çözümünün yapılmasına ihtiyaç kalmaz. 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 yöntemdir. Daha önceki 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. [24]

4.4.2.3. Zaman Tanım Alanında Analiz

Zaman tanım alanında analiz, gerçek bir deprem kaydının esas alınmasıyla yapılır. Bu analiz yönteminde yapıya, söz konusu yer hareketi, hareketin gerçekleştiği sürede yaşatılır. Zaman tanım alanında analiz yöntemi, ayrıntılı araştırmalar veya diğer çözümlerde bulunan sonuçların yorumlanması maksadıyla kullanılmaktadır.

4.5. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Analiz sonuçlarının yorumlanması ve güçlendirme veya onarım kararı en önemli safhalardan birisidir. Yapılan analizler sonucunda, yapının güvenlik seviyesi değerlendirilir. Sağlaması gereken performans seviyesine uymadığı takdirde güçlendirme önerileri, çeşitli önlemler gündeme gelecektir.

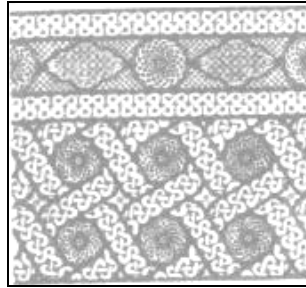
Değerlendirme kısmında tavsiye edilen yaklaşım, çeşitli analizlerden elde edilen sonuçların birbiriyle mukayese edilmesi yönündedir. Sonuçların uyumu yada uyumsuzlukları yapı hakkında ve kullanılan yöntemlerin güvenilirliği hakkında ipuçları içerebilir.

5. ÖRNEK ÇALIŞMA: HIRKA-İ ŞERİF CAMİİ

5.1. Genel Bilgiler

5.1.1. Hırka-i Şerif'in Tarihçesi

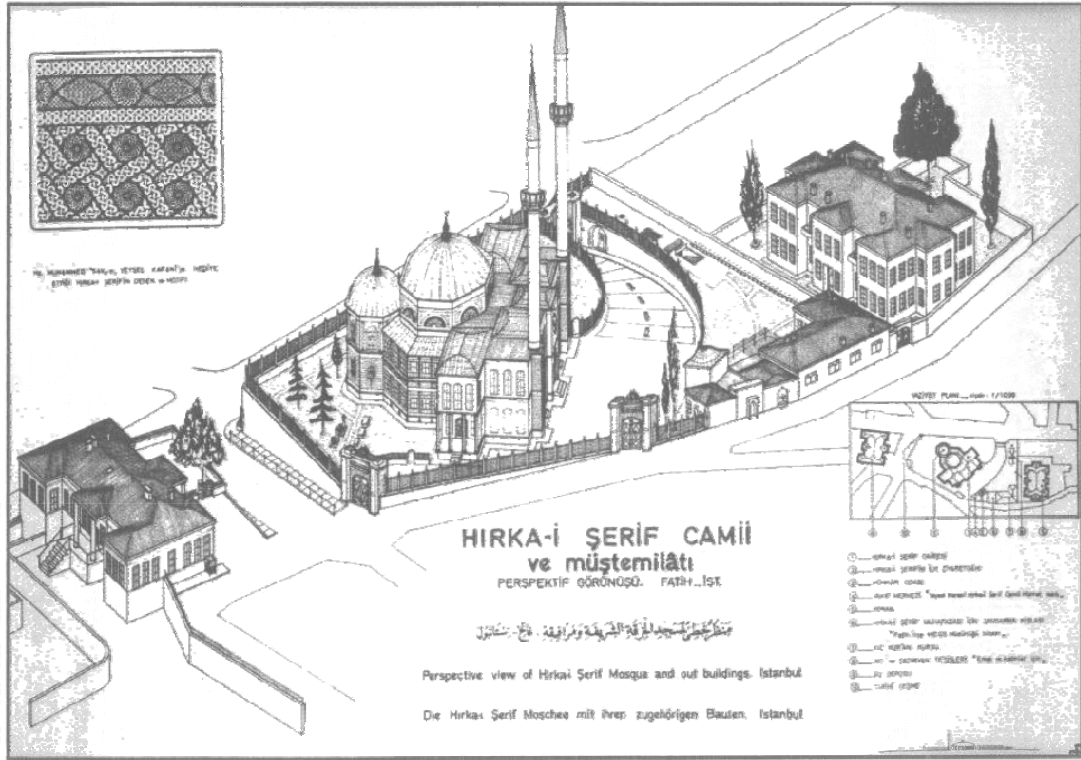
İstanbul'da Hz. Muhammed'e (sav) ait olduğu bilinen iki hırka vardır. Birincisi Hırka-i Saadet adıyla bilinen ve Topkapı sarayında saklanan hırkadır. İkinci hırka ise sekiz parçadan oluşan, 1.20 metre uzunluğundaki Hırka-i Şerif adıyla anılan hırkadır ki Hırka-i Şerif Camii'ne ismini veren de bu hırkadır (Şekil 5.1). Hırka-i Şerif, elden ele geçer ve Van civarında hüküm süren İrisan Beyleri'ne daha sonra da Hicri 1028, Miladi 1617–1618 yıllarında İstanbul'da bulunan el-Karani sülalesinden Şükrullah Üveysi'ye gelir. Kendilerine 'Hırka-i Şerif Şeyhleri' adı verilen bu aile 17. yüzyıl başlarına kadar Hırka-i Şerif'i, Fatih'deki evlerinde muhafaza etmiştir. Söz konusu evin ziyaretler açısından yetersiz kalması sebebiyle, I. Abdülhamid, bugün Hırka-i Şerif Camii'nin bulunduğu avluya bir oda inşa eder ve Hırka-i Şerif 1780 yılından 1851 senesine kadar burada muhafaza edilir. Zamanla bu oda da yetersiz kalınca, Sultan Abdülmecid 1847 senesinde bir cami yaptırmaya karar verir. 1851 yılında cami tamamlandığında, Hırka-i Şerif de cami içindeki özel dairesine nakledilir. Her yıl Ramazan ayının yarısından itibaren ziyarete açılan Hırka-i Şerif'in bulunduğu dairenin anahtarı el-Karani sülalesinin 57. kuşak torunu olan Gülay Köprülü'de bulunmaktadır. [43,44]



Şekil 5.1 Hırka-i Şerif'in Deseni

Cami yapılırken civardaki birçok yapı kamulaştırılmış, caminin yanı sıra Üveysi ailesinin en yaşlı ferdi için bir meşruta, vekil dairesi, muhafızlar için kışla (halen Hırka-i Şerif İlkokulu olarak kullanılan bina), vazifeliler için odalar yapılarak bir

külliye oluşturulmuştur. Köprülü ailesi, kendi ikametleri için yaptırılmış olan konakta 1960'lı yıllara kadar yaşamıştır. Osmanlı arşivlerinde bulunan, camiye ait 1/50 ölçekli vaziyet planında, caminin kuzeybatısında dört bölümden oluşan büyük bir ev görülür. Günümüze bu yapılardan sadece cami girişinin karşısındaki bina ulaşabilmiştir. Konağın arka bahçesinde, binanın hamamı olduğu düşünülen bir yapıya ait kalıntılar mevcuttur (Şekil 5.2) [43,44].



Şekil 5.2. Hırka-i Şerif Camii ve Müstemiâtı – Perspektif Çizim

5.1.2. Mimari Özellikler

Fatih semtinde bulunan Hırka-i Şerif Camii'nin sağındaki avlu kapısı üzerinde 1267 (1850) tarihli kitabe ve Abdülmecit tuğrası vardır. Tek şerefeli iki minaresi bulunan sekizgen biçimindeki cami, sekiz pencereli bir tek kubbe ile örtülüdür. Kuzeyinde iki katlı hünkâr dairesi, güneyinde mihrap duvarına bitişik yine sekizgen planda kubbeli Hırka-i Şerif dairesi vardır (Şekil 5.3). Hünkâr dairesinin iki köşesindeki minarelerin korent başlıklı şerefeleri sekiz volütlü ve korkulukları içe girintilidir. Çok büyük ve geniş pencerelerle aydınlanan camide Hattat Mustafa İzzet'in 1267 tarihli sekiz adet kitabesi, sekiz levha halinde kubbenin eteğini sarmaktadır. Caminin içi baştanbaşa alçı kabartmalarla doludur (Şekil 5.4, 5.5) [43,44].



Şekil 5.3. Hırka-i Şerif Camii – Sekizgen Kaideye Oturan Kubbe ve Tonozların Minarenden Görünüşü



Şekil 5.4. Hırka-i Şerif Camii – Minareler ve İçeriden Ana Kubbe

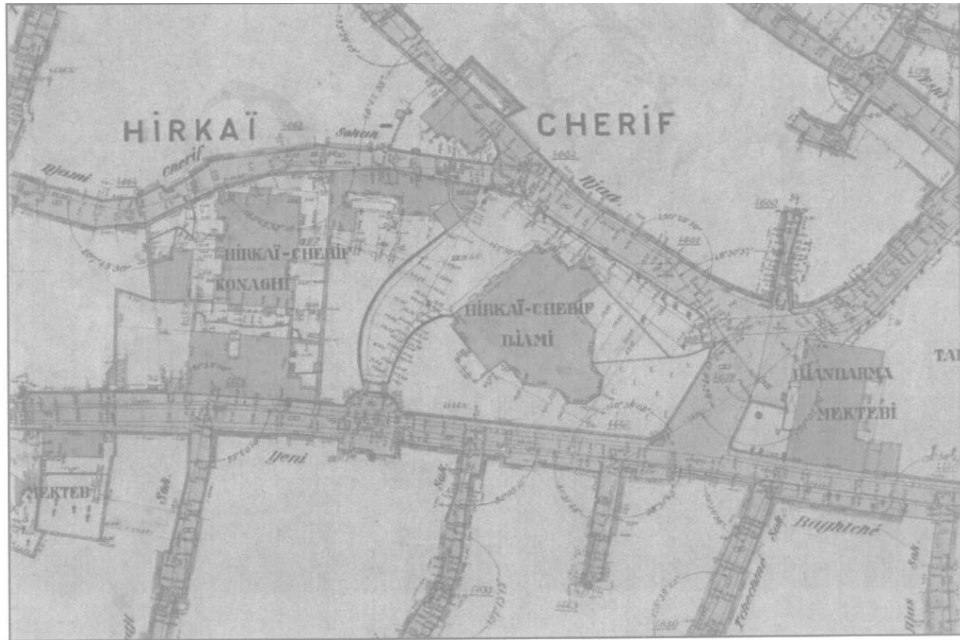


Şekil 5.5. Hırka-i Şerif Camii – Merkezi Mihrap Aksından İç Görünüm, Dıştan bir görünüm

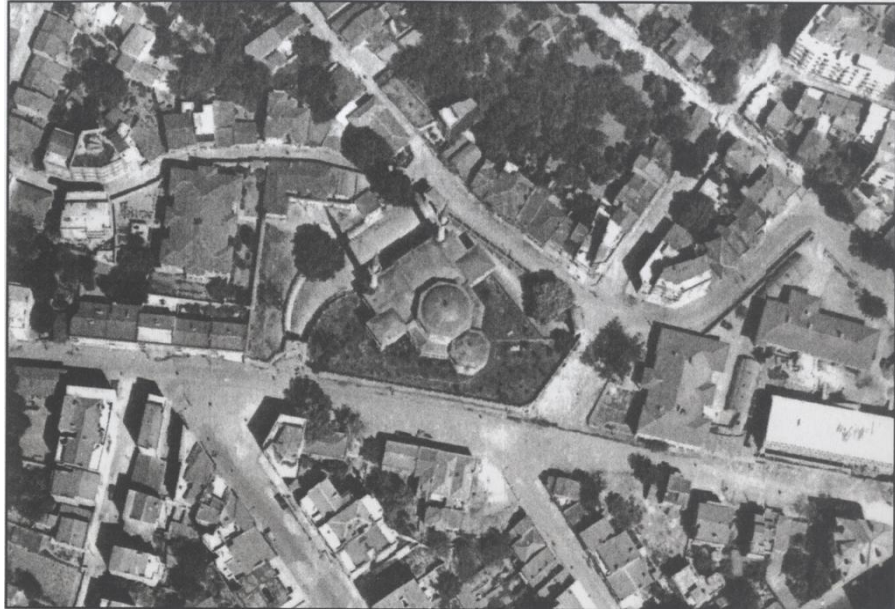
Mozaik mermerden mukarnaslı geniş bordürlü mihrap nişi rokokoya çalan bir üslûptadır. Aynı üslûpta kırmızı somaki mermerden minberin kapısı üzerindeki Kelime-i tevhit, “Ketebehu Abdülmecit bin Mahmut hane sene 1267” tarih ve imzası ile Sultan Abdülmecit hattıdır. Kubbe altında Kazasker Mustafa İzzeddin’e ait 8 ayetin yer aldığı levhalar sıralanmıştır. Sultan Abdülmecid’in yazarak imzasını attığı 8 levha minberin üstünde yer almıştır. Vaiz kürsüsü, mihrabı ve minberi kırmızı somakiden yapılmıştır. Mahfilleri, hünkâr daireleri ve Hırka-i Şerif dairesi bulunan camide, mihrap, minber ve kürsü rokoko tarzı işlenmiş mozaik taştır. Caminin diğer hatları Hattat Mustafa Efendi’nindir [43,44].

Hırka-i Şerif dairesine üst kattan, kadınlar mahfilinin iki tarafındaki camekânlı geçitten girilir. Cami avlusunda bulunan bina ise II. Sultan Mahmut’un 1227’de yaptırdığı eski Hırka-i Şerif dairesidir (Şekil 5.6, 5.7).

Cami avlusuna abidevi görünümlü kesme küfekiden yapılmış üç kapı ile girilir. Bahçenin sağındaki kapı üzerinde Sultan Abdülmecid’in tuğrası, altında Hattat Kazasker Mustafa İzzeddin’in hattıyla bir kitabe yer alır. Camiyi yapan Ermeni Mimar Balyan kardeşlerdir. Barok ve Rokoko tarzıyla inşa edilen camide erguvan yapraklarının süslediği alçı motifler dikkat çeker.



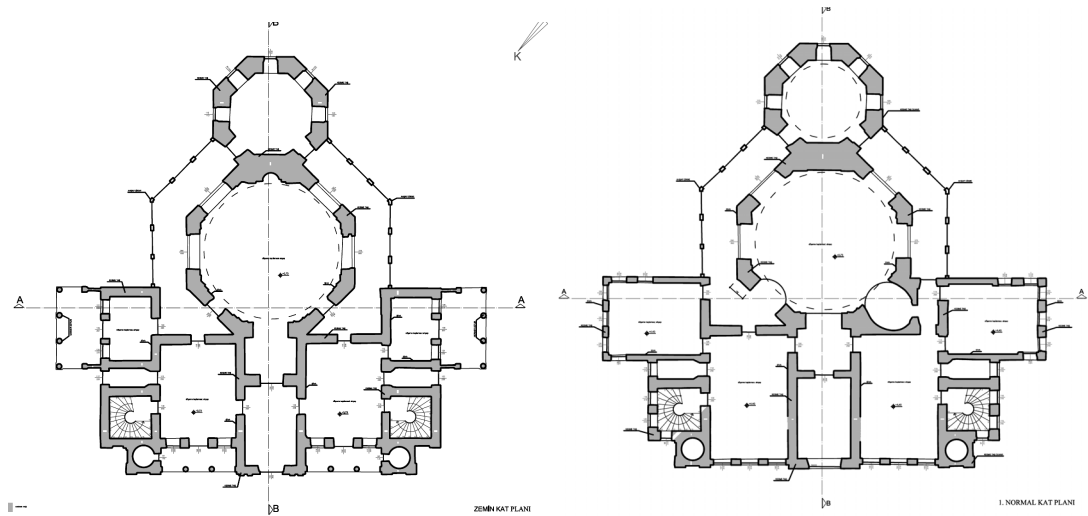
Şekil 5.6. Alman Mavisi Haritası Pafta No: L9-4 Hırka-i Şerif Camii ve Çevresi (1913)



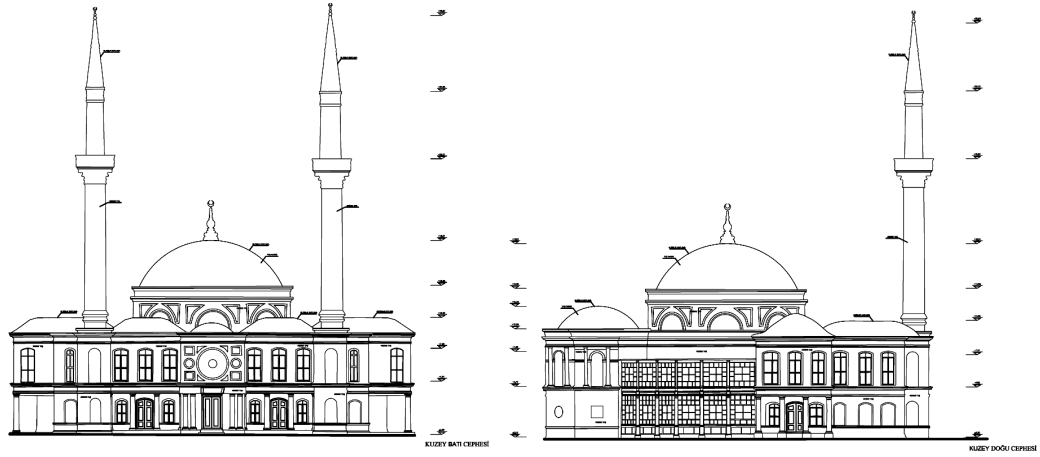
Şekil 5.7. Hırka-i Şerif Camii ve Çevresinin Hava Fotoğrafı (1966)

5.1.3. Geometrik Özellikler

Taban alanı 750 m² olan Hırka-i Şerif Camii 13 m çapında kubbenin örttüğü harim, 2 katlı sekizgen prizma şeklinde basık kubbeli Hırka-i şerif kısmı ve 2 katlı hünkâr dairelerinden oluşan kanat kısmından ibarettir. Harim kısmında hünkâr ve müezzin mahfillerine ait 3 adet çıkıntı mevcuttur. Ana kubbenin dış yüksekliği 18 m olan cami iki minarelidir. Hırka-i Şerif dairelerinin 6.22 m çaplı kubbesi ise yerden 12.73 m yüksekte yer alır. Minare üst kotları 38.50 m'dir. Kubbe ve tonozların kalınlığı 60 cm'dir. Duvar kalınlığı, harimde 1.15 m, Hırka-i Şerif dairelerinde 1.40 m ve hünkâr mahfilleri ile yardımcı giriş kısımlarında 0.80 m'yi bulmaktadır. (Şekil 5.8, 5.9)



Şekil 5.8. Hırka-i Şerif Camii Zemin ve Birinci Kat Planı



Şekil 5.9. Hırka-i Şerif Camii Ön ve Yan Görünüş

5.1.4. Taşıyıcı Sistem ve Malzeme Özellikleri

Cami, plan olarak giriş – mihrap aksına dik bir eksene göre simetrik olan yığma kâgir taşıyıcı sistem ile inşa edilmiştir. Kalın taş duvarlar, kemerler, bunlara mesnetlenen kubbeler, volta döşemeler taşıyıcı sistemi oluşturan elemanlardır. Ön cepheden arka kısımlara geçişi sağlayan yan koridorların ahşap dikmeler üzerine kurulduğu ve daha sonra yakın zamanda çelik profillerle güçlendirildiği görülmüştür. Cephe elemanlarının dökme demir ile teşkil edildiği, ayrıca ahşap döşeme elemanlarının da kullanıldığı tespit edilmiştir. Hünkâr mahfilini oluşturan yardımcı bölümlerde volta döşeme kullanılmıştır. Açıklıkları oldukça büyük olan bu döşemelerde sehim problemi gözlenmiştir. Özellikle duvarlara mesnetlenen döşeme uçlarında çeşitli büyüklük ve genişlikte çatlaklarla karşılaşmaktadır.

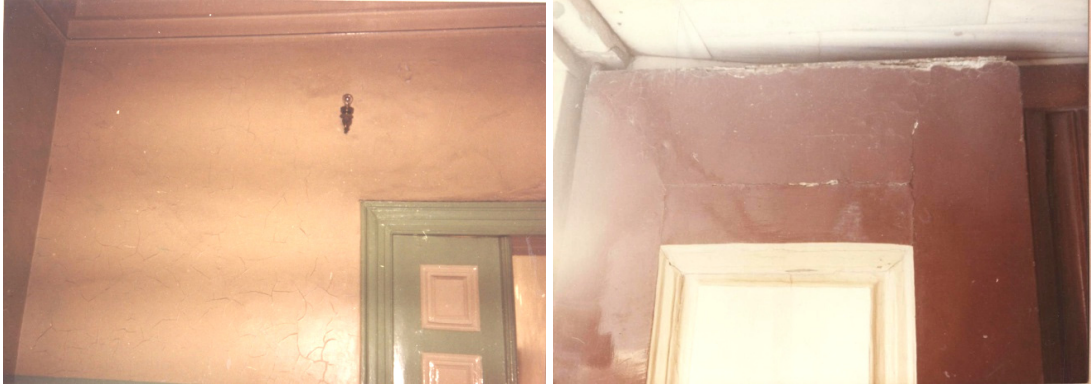
Caminin beden duvarları kesme taş ile örülmüş olup giriş kısmını Hırka-i Şerif kısmına bağlayan galeriler ahşap dikmeler üzerine inşa edilmiştir. Üst yapıyı oluşturan kubbe ve tonozlar tuğla ile örülmüştür. Caminin iki minaresi kesme taştan yapılmıştır. Kesme küfekiden yapılan duvarlar, iç cephede sıvalı ve boyalıdır. Caminin Hırka-i Şerif dairesi hariç olmak üzere tüm mekânlardaki döşemesi ahşaptır. Hırka-i Şerif Camii’ni örten kubbe ve tonozların tümü kurşun kaplıdır.

5.1.5 Yapının Mevcut Durumu

Caminin bulunduğu bölge genel olarak ön cepheden arka cepheye doğru eğimli olup cami dolgu zemin üzerinde bulunmaktadır. Arka cepheye bakan kısımlarda Keçeciler Caddesi ve buna dik yol boyunca taş istinat duvarları inşa edilip arkasında dolgu

yapılarak camii bahçesi düzeltilmiştir. Taş duvarların yükseklikleri 5.00 m ile 7.00 m gibi değerlere ulaşmaktadır.

Yapı 17 Ağustos 1999 Kocaeli ve 12 Kasım 1999 Düzce depremlerinden etkilenmiş ve taşıyıcı sisteminde hasarlar meydana gelmiştir. Yapının ana girişinde sol taraftaki duvarda düşeye yakın diyagonal çatlak ve ayrılma olduğu, taş duvar örgüsünün uygun yapılmadığı görülmüştür.



Şekil 5.10. Duvarlarda Görülen Diyagonal Çatlaklar



Şekil 5.11. Duvar ile döşemelerin birleşim noktalarında ve pencere üstü kemerlerdeki hasarlar



Şekil 5.12. Tavanlarda meydana gelen hasarlar

Minarelerin bulunduğu köşelerde, deprem sırasında minarelerin daha büyük salınımlar yapması sebebiyle, ana yapıya birleşim bölgelerinde çatlak ve ayrılmalar belirlenmiştir. Cephede ise çatlak ve ayrılmaların harç ile doldurulduğu görülmüştür. İki adet merdivenkovalarının köşelerinde, duvarlarda düşey ayrılmalar, basamaklarda

sehim, tavanlarında çatlamalar, sıvalarda yer yer dökülmeler tespit edilmiştir (Şekil 5.10). Bazı duvarlarda, kemerlerin özellikle tepe noktalarında ve kubbelerde çatlak ve ayrılmalar belirlenmiştir. Ana kubbenin altındaki tek katlı kısımdaki duvarların mermer kaplamalarında ve büyük pencerelerin alt kısmındaki büyük mermerlerde ayrılmalar, çatlamalar ve yarılmalar, çökmeler olduğu gözlenmiştir. Üst kattaki lavabo ve tuvalet bölümündeki orijinal mermerlerde çökmeler ve ayrılmalar meydana gelmiştir (Şekil 5.11, 5.12) [45].

Binanın iki yanında arka kısma ulaşan koridorların dış cephesini teşkil eden döküm taşıyıcı sistemde farklı oturmalar, çökmeler, düşeyden sapmalar sebebiyle stabilite bozuklukları olduğu tespit edilmiştir. Caminin ön kısmında yer alan Keçeciler caddesindeki mevcut taş istinat duvarında, düşeyde boydan boya çatlama ve ayrılma meydana geldiği de görülmüştür.

Ayrıca yerinde tespit edilememekle birlikte 1999 Marmara Depremi'nden sonra caminin pencere üstü kemerlerinde de büyük çatlaklar ve yapısal hasarlar meydana geldiği kaydedilmiştir. Anlaşıldığı kadarıyla cami bir tamirattan geçirilmiş ve söz konusu çatlaklar doldurulmuştur. Bu tamirat çalışmalarında geliş güzel bir takım uygulamaların yapıldığı da tespit edilmiştir. Koruma kurulundaki dosyada bu tamiratlarla ilgili bir kayıt bulunamamış, yapılan tamiratın niteliği, boyutu ve yöntemi hakkında herhangi bir bilgiye ulaşılamamıştır. Özgün mimarinin bir kısmının da yapılan bu tamiratta tahrip edildiği gözlenmiştir. [45]

5.1.6. Zemin ve Sismik Risk

Hırka-i Şerif Camii zemini için detaylı bir çalışma Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kurulu'ndaki dosyada tespit edilmiştir. "İstanbul ili, Fatih ilçesi Hırka-i Şerif Camii Zemin Etüdü Geoteknik Raporu" ismiyle düzenlenen rapor 2003 yılı Ağustos ayında, Geos Geoteknik ve Sondajcılık Ltd. Şti. tarafından gerçekleştirilen zemin çalışmalarına dayanmaktadır. Bu rapor aşağıda başlıklar halinde özetlenmiştir.

5.1.6.1. Amaç ve Kapsam

İstanbul ili, Fatih ilçesi, İskender Mahallesi, Keçeciler Caddesi, 195 Pafta, 1530 Ada, 1 Parselde bulunan, İstanbul 1 numaralı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kurulunun 12.07.1995 Gün ve 6848 sayılı karar ile belirlenen " Kentsel ve Tarihi Sit Alanı" içersinde kalan, tescilli, vakıf mülkiyetindeki Hırka-i Şerif Camii 17.08.1999

ve 12.11.1999 tarihlerinde meydana gelen depremlerden hasar görmüş olup, cami temelini ve içersinde bulunduğu platformun güçlendirilmesi için bilinmesi gerekli olan zemin profilinin ve mühendislik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla zemin etüt çalışmaları yapılmıştır.

Zemin etüdü kapsamında derinlikleri 30.45 m olan 7 adet sondaj kuyusu, 3 adet 1.5 x 1.5 x 4.00 m araştırma kuyusu açılmış, 2 adet sismik kırılma ölçüsü alınmıştır. Yapılan sondajlar, sismik etüt, laboratuvar deneyleri, kesitler ve logları GeoYapı Zemin Mühendisliği tarafından yapılmış, değerlendirme çalışmaları ise Geos Geoteknik ve Sondajcılık Ltd. Şti. tarafından hazırlanmıştır.

Yapılan tüm çalışmalar sonucunda hazırlanan raporun konusuna, mevcut zemin profili, zemin emniyet gerilmesi, oturma tahkiki, kazılabilirlik, yatak katsayısı, dinamik parametreler (Yoğunluk, Kayma modülü, Bulk modülü, Poisson oranı, Young modülü, Zemin hâkim titreşim periyodu), P ve S dalga hızları, kalınlıkları bölgenin depremselliği ve diğer tavsiyeler oluşturmaktadır.

5.1.6.2. İklim, Meteoroloji, Su Bilançosu ve Yer Altı Suyu

Bölgenin meteorolojik özelliklerinin incelenmesi için gerekli veriler Kartal Devlet Meteoroloji Gözlem istasyonundan sağlanmıştır. Bu verilerden hareketle, bölgenin ortalama yağış yüksekliği 680.2 mm bulunur. En fazla yağış düşen aylar, Aralık (112.3 mm) ve Ocak (99.6 mm), en az yağış düşen aylar ise Haziran (18.9 mm). Temmuz (18.6 mm) ve Ağustos (17.0 mm) aylarıdır. Buna göre yıllık yağışın % 74'ü yağışlı dönemde, %26'sı ise kurak dönemde gerçekleşmektedir. Yağışlı dönem zeminin suya tamamen veya kısmen doygun olduğunu, kurak dönem ise zeminde hiç su bulunmadığını ifade eder.

Sıcaklığın aylık değişimi incelendiğinde en düşük sıcaklığın Ocak(6.5 C°) ve Şubat (7.1C°), en yüksek sıcaklığın ise Temmuz (24.0 C°) ve Ağustos (24.2 C°) aylarında olduğu görülür. Uzun yıllar sıcaklık ortalaması ise 15.4 C°'dır.

İnceleme alanının su bilançosunun hazırlanabilmesi için gerçek ve potansiyel buharlaşma değerlerinin nispi nem ve rüzgar hızı gibi parametrelerin bilinmesi gerekir. Bu amaçla ortalama sıcaklık, ortalama nispi nem, ortalama güneşlenme müddeti ve ortalama rüzgâr hızının aylara göre değişiminden hareketle "PENMAN" yöntemi uygulanmış ve " Potansiyel Buharlaşma" değerleri hesaplanmıştır. Buna göre yıllık potansiyel buharlaşma 739.53 mm/yıl'dır. Potansiyel buharlaşmanın en

yüksek olduğu aylar Haziran (133.2 mm). Temmuz (144.15 mm) ve Ağustos (124.3 mm), en düşük olduğu aylar ise Kasım (7.2 mm), Aralık (0.62 mm) ve Ocak (4.03 mm), aylarıdır. Bu değerlere göre yıllık Gerçek Buharlaşma 271.44 mm su/yıl'dır.

Bilanço çizelgesine bakıldığında bölgedeki potansiyel buharlaşmanın yağıştan fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca, potansiyel buharlaşmanın kurak dönemini oluşturan Mayıs-Eylül ayları arasında zemin neminin bulunmayışına bağlı olarak gerçek buharlaşmadan yüksek olduğu görülür. Yağışlı dönemi oluşturan Ekim-Nisan aylarında ise zeminin suya tamamen veya kısmen doymuş oluşuna bağlı olarak potansiyel buharlaşma büyüklükleri, zeminden ve yağışlarla karşılanabilmekte ve bu dönemde buharlaşma gerçek buharlaşmaya eşit olmaktadır.

Ekim -Mart ayları arasında var olan fazla su, yağışın gerçek buharlaşmadan fazla oluşuna ve ortamın suya doymuş olmasına bağlı olarak akışa geçebilir. 680.2 mm'lik uzun yıllar yağış ortalamasının 271.44 mm'lik bölümü, (% 40'ı) gerçek buharlaşma sonucu atmosfere geri dönmektedir.

Sonuç olarak zeminde rezerv suyun bulunmadığı Mayıs-Eylül döneminin birinci derecede, yeterli rezerv suyunun az bulunduğu Nisan-Ekim aylarının ise ikinci derecede su ihtiyacı olduğu tespit edilmiştir.

İnceleme alanı ve yakın çevresi Süleymaniye formasyonu ile kaplıdır. Bu formasyonu oluşturan kil ve marn birimleri geçirimsiz olarak kabul edilmiş olup su vermedikleri kabul edilir. Ancak kil içinde bulunan kum tabakalarından düşük debili su deşarjları bulunmaktadır. Bununla birlikte kum tabakasının kil arasında yanal/düşey yönde devamlılığının bulunmaması durumunda, su dolaşımı gerçekleşmediğinden, tünek su şeklinde sular bulunmaktadır. Açılan sondaj kuyularında kuyu derinlikleri içinde statik su seviyesine rastlanılmamıştır.

İnceleme alanı ve yakın çevresinde kullanılan sular belediye şebekeleri aracılığı ile sağlanmakta olup civarda bulunan bazı yerleşimlerde açılmış derin su kuyuları bulunmaktadır. Bu sular içme suyu olarak kullanılmamakta ve daha çok bahçe sulama, üretim ve inşaatlarda kullanılmaktadır.

5.1.6.3. Genel Jeoloji

İnceleme alanı ve yakın çevresi Süleymaniye ve Trakya formasyonu ile bu formasyonları örten kontrolsüz dolgu zemin tabakası ile kaplıdır.

Trakya Formasyonu yörede ana kayayı temsil etmektedir. Birim kumtaşı-kil taşı-silt taşı birimlerinden oluşmuştur. Tabakalanmaları ince-orta kalınlıkta olup çok sık ve değişik yönde eklem takımı sunması sonucunda çoğunlukla tabaka düzlemlerini belirlemek zordur.

Kıvrımlı ve kırıklı bir yapı kazanan bu tabakaların eğim ve doğrultuları sık sık değişmekle birlikte kıvrımların genel doğrultusu kuzey-güney yönündedir. İki defa mekanik deformasyon geçiren bu Paleozoik temel, şist yapılı olup muhtelif doğrultuda makaslama bölgeleri ve mevzii faylar ihtiva eder. Bu faylar, çatlak sistemlerinden sızan yağmur sularının nüfuz etmesine ve kaya birimlerinin kolayca ayrışmasına sebep olmaktadır. İnce kesit incelemelerinde köşeli kuvars ve feldspat daneleri ile bükülmüş muskovit pulları, ince kuvars ve feldspat zerrecikleri ihtiva eden killi ve demirli bir çimento ile birleşmiş olup, ortoklazların bir kısmı ayrılmış durumdadır.

Yukarıda belirtilen mekanizma ile zemine sızan sular yoluyla meydana gelen ayrışma ve çok sık kırıklı yapısı nedeniyle bu formasyonun yatay stabilitesi oldukça düşüktür. Bunun sonucunda dik eğimli şevlerde ve kazılarda sık olarak ölçeği büyük olmayan kaymalar meydana gelmektedir. Tabakalar yer yer mevzii kıvrımlar ve tavlalar ihtiva etmekle beraber genel olarak güneye dalarlar.

Süleymaniye formasyonu kum-kil ve marn birimlerinden oluşmaktadır. Alttaki Paleozoik üzerine Sarmasien'e ait kumlar yerleşmiştir. Ancak Saraçhane ile Aksaray arasında temelin üzerinde doğrudan kil ve marna oturmaktadır. Bu durum kıvrımlı eski temelin aşınma yüzeyinde transgresif olarak gelen kumların çukur yerlerde, marnların ise tepelerde depolandığına işaret etmektedir. Kumlar homojen bir kalınlık arz etmemekte ve bazen kil-marn mercekleri de ihtiva etmektedir. Kumlar, kuvars daneleri ve muskovit pullarından oluşmuş olup demir-oksitin tesiri ile sarı renkleriyle kolayca tanınırlar.

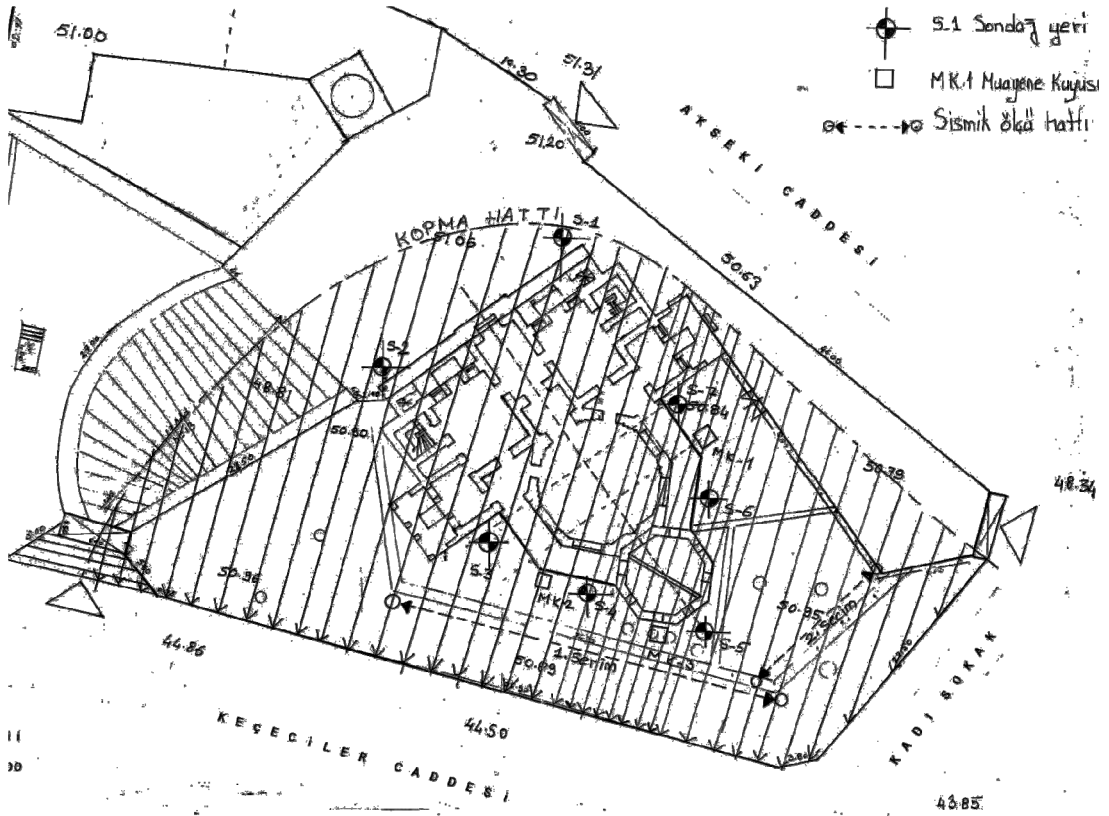
Kil ve marn tabakaları kumların üzerinde yer alır. Kalınlıkları yer yer 120 -150 m dolayındadır. Aşırı konsolide ve fisürlü olan bu kohezyonlu zeminlerin kıvrımları genelde serttir. Silt ve kum düzeyleri düşük olduğundan genelde yüksek plastisitelidir.

5.1.6.4. Hırka-i Şerif Camii Zemininin Yerel Jeolojisi

İnceleme sahasında yapılan sondajlarda kalınlığı 0.30 m olan beton tabakası altında 3.25 m ile 6.20 m arasında değişen dolgu zemin tabakası tespit edilmiştir. Dolgu zemin tabakası herhangi bir zemin ıslahı görmemiştir. İçerisinde iri bloklu, bol kumlu, kil ve beton parçaları bulunmaktadır.

Bu tabaka altında ise kalınlığı sondaj derinliği boyunca devam eden Süleymaniye Formasyonuna ait birimler yer almaktadır. Süleymaniye formasyonu sahada siltli kum ve kil olmak üzere 2 ayrı zemin türüne ayrılmaktadır.

- Sıkı konumlu, kısmen orta sıkı, bejimsi-açık yeşil renkli, az mikalı siltli KUM
- Sert kıvamlı, kısmen çok katı, beyazımsı gri - açık yeşil renkli, KİL



Şekil 5.13. Hırka-i Şerif Camii Zemininde Yapılan Sondaj Çalışması ve Arazi Deneyleri

5.1.6.5. Sondaj Çalışması

İstanbul İli, Fatih İlçesi, Hırka-i Şerif Camii üzerinde yerleri vaziyet planında gösterilen, tümü 30.45 metre derinlikte 7 adet sondaj yapılmış ve ayrıca 3 adet de muayene kuyusu açılmıştır. (Şekil 5.13) Sondajlar GMS-300 Model sondaj makinesi ile gerçekleştirilmiştir. GMS-300 model sondaj makinesi ile yapılan sondajlarda

sirkülasyon sıvısı olarak su kullanılmıştır. Sondajlarda kot ± 0.00 kabul edilmiştir. Sondajlar sırasında yapılan Standart Penetrasyon Deney tüpünden alınan örnekler cam kavanozlar içinde temsili zemin örnekleri olarak muhafaza edilmişlerdir. Kohezyonlu tabakalarda kıvamın müsait olduğu kesimlerden shelby tüpü ile örselenmemiş zemin numuneleri alınmıştır. Alınan örneklerin tip ve derinlikleri sondaj loglarında işaretlenmiştir.

5.1.6.6. Standart Penetrasyon Deneyi

Sondaj kuyuları içinde zemin tabakalarının kıvamını tespit etmek için SPT deneyi yapılmıştır. Deney, dış çapı 50.8 mm. iç çapı 34.9 mm olan yarıklı tüpün 635 Newton ağırlığında bir tokmak ile zemine 15'er cm'lik 3 adet giriş için vurulan darbe sayılarak yapılmıştır. Tokmağın serbest düşüş yüksekliği 0.76 m'dir. Son iki 15 cm'lik giriş için vurulan darbe sayıları toplamı standart penetrasyon direnci (N) sayısını vermektedir.

5.1.6.7. Sismik Kırılma Ölçümleri

İnceleme sahasında tespit edilen zemin cinslerinin yerinde dinamik özelliklerinin tespiti (yoğunluk, kayma modülü, Bulk Modülü, Poisson oranı, Young modülü, zemin hâkim titreşim periyodu) amacıyla sahada yerleri vaziyet planında gösterilen 2 adet sismik kırılma ölçüsü alınmıştır. Sismik ölçümlerde, Geometrics marka 12 kanallı, sinyal biriktirmeli SmartSeis Exploration sismograf cihazı kullanılmıştır. Cihazın belleğine alınan kayıtlar Rimrock Geophysic şirketi tarafından geliştirilen Sipik, Sipin, Spedit ve Sipt2 programları kullanılarak ilk varış zamanları, dalga hızları ve tabaka derinlikleri belirlenmiştir. İnceleme sahası beton ile kaplı olması sebebiyle sismik ve rezistivite ölçüleri yan parselde alınmıştır. Yapılan sismik ölçüden 2 ayrı tabaka tespit edilmiştir.

- a. Dolgu zemin: Alınan ölçü noktasında mevcut zemin yüzeyinden itibaren kalınlığı 3.20 ile 4.00 m arasında değişen dolgu zemin tabakasına rastlanılmıştır. Bu tabakanın kayma dalgası hızı 94-113 m/s bulunmuştur.
- b. Süleymaniye Formasyonu: Dolgu zemin tabakası altında ise kalınlığı açılım derinliği boyunca devam eden orta sıkı konumlu, kum tabakası bulunmuş olup bu tabaka içinde kayma dalgası hızı 195-253 m/s arasında değişmektedir.

5.1.6.8. Sismik Parametreler

Yapılan sismik etüt sonucunda bulunan sismik dalga hızları aşağıda verilen dinamik parametrelere karşılık gelmektedir.

- a. Sismik kayma dalgası (V_s) ve Sıkışma dalgası (V_p): Zemin hâkim periyodunu, katman sıklılığını, elastik parametreleri, katman konumlarını ve zeminin deprem şiddetini arttırma özelliklerini saptamak için kullanılan bir parametredir.
 - 1. tabaka P dalgası hızı: 188-226 m/s, S dalgası hızı: 94-113 m/s
 - 2. tabaka P dalgası hızı: 471-583 m/s, S dalgası hızı: 195-253 m/s
- b. Dinamik Young Modülü (E_d): Birim kesit alana yüklenen yükün birim uzunluktaki uzamaya olan oranıdır.
 - 1. tabaka Elastisite Modülü 385-560 kg/cm²
 - 2. tabaka Elastisite Modülü: 1799-3041 kg/cm²
- c. Bulk Modülü: Birim alana gelen tanjansiyel veya sıkıştırma kuvvetinin birim hacimde yapmış olduğu hacim değişikliğine oranıdır. Hacimsel elastisite de denir.
 - 1. tabaka Bulk Modülü: 38.5-56.0 MPa
 - 2. tabaka Bulk Modülü: 289.9-436.9 MPa
- d. Kesme (shear) veya Rijidite Modülü: Birim alana gelen tanjansiyel kuvvetin meydana getirdiği açısal deformasyona oranıdır.
 - 1. tabaka Kesme Modülü: 38.6-56.0 MPa
 - 2. tabaka Kesme Modülü: 179.9-304.1 MPa
- e. Zemin İvme Spektrum Katsayıları (T_A - T_B) Zemin Hâkim Periyodu: İnceleme sahasında tespit edilen zemin cinslerine göre (2. tabaka için) C grubu zemin, yerel zemin grubuna göre ise Z3 cinsidir. Z3 için $T_A = 0.15$ s ve $T_B = 0.60$ s olarak verilmiştir. Ancak bu parametreler oldukça düşük değerde olup yapılan sondajlardan elde edilen köşe periyodu değerlerine uymamaktadır.
- f. Zemin Hâkim Titreşim Periyodu (T_0): Alınan jeofizik sismik kırılma ölçümlerinden bulunan kayma dalgası hızı V_s , tabaka kalınlığı h ,

hesaplanarak $T_0 = 4 \times h/V_s$ formülünde yerine konularak zemin hâkim titreşim periyodu hesaplanabilir. Yapılan çalışmada $T_0 = 0.87-1.00$ s arasında bulunmuştur.

Ancak üstte bulunan ve kalınlığı 4.0 m olan dolgu tabakası ihmal edilmesi durumunda zemin hâkim titreşim periyodu $T_0 = 4 \times h/V_s$ eşitliğinden $h = 46$ m alınırsa, bu durumda $T_0 = 0.72 - 0.96$ s arasında alınabilecektir. Ancak yapılan sismik etüt sonucunda elde edilen değerler yapılan sondajlar sonucu elde edilen değerler ile uyumlu değildir.

5.1.6.9. Laboratuvar Deneyleri

Sahada yapılan sondajlarda kohezyonlu özellik gösteren kil numunesi üzerinde Atterberg limitleri, su muhtevası deneyleri, granüler özellikler gösteren kısımlarda ise elek analizi yapılmıştır. Yalnızca bir numune üzerinde üç eksenli basınç (UU) ve şişme deneyi yapılabilmektedir.

- a. Zemin Profili: İnceleme alanında S1 ve S2 nolu sondajlarda mevcut zemin yüzeyinden itibaren kalınlığı 0.30 m olan beton tabakası bulunmuştur. S1 ve S2 nolu sondajlarda beton tabakası altında, S3, S4, S5, S6 ve S7 nolu sondajlarda ise mevcut zemin yüzeyinden itibaren 3.25 m ile 6.20 m derinliğe kadar kontrolsüz dolgu zemin tabakası ile karşılaşmıştır. Bu dolgu tabakası herhangi bir zemin ıslahı görmemiş olup heterojen yapı sunmaktadır. Dolgu zemin iri bloklu, bol kumlu ve killidir. Bu tabaka içinde yapılan SPT deneylerinde penetrasyon direnci $N = 3-18$ değerleri arasında değişmektedir

S1, S2, S5 ve S6 nolu sondajlarda dolgu zemin tabakası altında S3, S4 ve S7 nolu sondajlarda ise dolgu zemin ve çok katı kıvamlı kil tabakası altında kalınlığı 1.50 m ile 7.20 m arasında değişen kısmen orta sıkı, genellikle sıkı konumlu, bejimsi-açık yeşil renkli, az mikalı-siltli KUM tabakası bulunmuştur. Bu tabaka içinde yapılan SPT deneylerinde penetrasyon direnci $N = 32-40$ değerleri arasında değişmektedir.

Sıkı kum tabakası içinden alınan örnekler üzerinde yapılan laboratuvar deneyinde zeminin indeks özellikleri aşağıdaki gibi bulunmuştur. + 4 nolu elekten geçen % 61-81, -200 nolu elekten geçen % 18.6-31 olarak tespit edilmiştir. Ancak S1 nolu sondajda bu tabaka çok sıkı konumlu kum

özelliğinde olup penetrasyon direnci; $N=57-60$ değerleri arasında değişmektedir.

Tüm sondajlarda dolgu zemin tabakası ile orta sıkı konumlu kum tabakası altında ve üstünde kalınlığı sondaj derinliği boyunca devam eden kısmen çok katı genellikle sert kıvamlı, beyazımsı gri-açık yeşil renkli, fisürlü, siltli KİL tabakası bulunmuştur. Bu tabaka içerisinde yapılan SPT deneylerinde penetrasyon direnci $N = 22-25$ değerleri arasında bulunmuştur.

- b. Sert kıvamlı kohezyonlu zemin üzerinde yapılan laboratuvar çalışmalarından olan, zeminin indeks özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan atterberg limitleri deneyinde bulunan değerler aşağıda verilmiştir.

Su Muhtevası, w : % 26-60

Likit Limit, LL : % 41-70

Plastik Limit, PL : % 17-24

Plastisite İndisi, PI : % 17-30

- c. Aynı tabakadan alınan örnekler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde ise kohezyon ve iç sürtünme açısı aşağıdaki değerler arasında değişmektedir.

Kohezyon $C = 7.3$ N/cm

İçsel sürtünme açısı $\phi = 20^0$

Kohezyon değerinin düşük olmasının sebebi ise kil tabaklarının fisürlü olması ve suyla bu fisürlerde meydana gelen gevşemedir. Tüm sondajlar sert kıvamlı kil tabakası içinde bitirilmiştir.

5.1.6.10. Zemin Hasar Tespitleri

İnceleme sahasındaki yapının durumu İTÜ Geoteknik Ana Bilim Dalının hazırlamış olduğu Şubat 2003 tarih ve 048 sayılı Ön Teknik Raporda belirtildiği gibi parselin Keçeciler caddesindeki giriş kapısı ile Kadı Sokağı giriş kapısını birleştiren hat üzerinde yarılmalara mevcuttur. Bu hatta Kuzeybatı-Güneydoğu (NW-SE) istikametinde 10 cm'e kadar yatma söz konusudur. Ayrıca Keçeciler caddesi üzerindeki istinat duvarlarında da hasarlar mevcuttur.

5.1.6.11. Sismik Risk

Marmara denizi içinde oluşan tarihi depremler, Kuzey Anadolu Fayının kuzey bölümünün daima aktif durumda olduğunu gösterir. İnceleme alanı 1766 ve 1894 depremlerinde ve 1999 depremlerinden etkilenmiştir. 1. derece deprem bölgesi için en büyük zemin ivmesi değerine göre, 1881-1986 yılları arasında yapılan istatistikî gözlemler vasıtasıyla Deprem Araştırma Enstitüsü tarafından yapılan hesaplar aşağıda gösterilmiştir.

5.5 büyüklüğünde bir depremin oluşma riski;

25 yıllık periyot için % 83.3

49 yıllık periyot için % 97.0

73 yıllık periyot için % 99.5

97 yıllık periyot için % 99.9

6.5 büyüklüğünde bir depremin oluşma riski;

25 yıllık periyot için % 46.2

49 yıllık periyot için % 70.4

73 yıllık periyot için % 83.7

97 yıllık periyot için % 91.0

7.5 büyüklüğünde bir depremin oluşma riski;

25 yıllık periyot için % 19.3

49 yıllık periyot için % 34.4

73 yıllık periyot için % 46.6

97 yıllık periyot için % 56.6

5.1.6.12. Zemin İnceleme Sonuçları ve Öneriler

Fatih, Hırka-i Şerif Camii'nde meydana gelen yapısal hasarların ve zemin hareketlerinin sebeplerini incelemek için parsel içersinde 7 adet sondaj ve 3 adet muayene çukuru açılmış, yapılan bu sondajlar neticesinde zeminde 2 ayrı tabaka tespit edilmiştir. Birinci tabaka dolgu bir zeminden ibarettir. İkinci tabaka ise Süleymaniye Formasyonu olarak tanımlanmaktadır.

Açılan muayene çukurlarından temellerin 4.00 m derinlikte olduğu görülmüştür, bu duruma göre cami temelleri Süleymaniye formasyonuna ait sıkı konumlu, siltli kum ve sert kıvamlı kil tabakasına oturmaktadır. Caminin yapılışının üzerinden yaklaşık 150 yıla yakın bir süre geçmiş olması sebebi ile oturmalar tamamlanmış sayılabilir. Ancak bu süreç içerisinde yapı taşıyıcı sisteminde, kubbesinde ve kemerlerinde çatlaklar oluşmuş caminin taban döşemesinde 5-10 cm arasında oturmalar gözlenmiştir.

Süleymaniye formasyonu yüksek plastisiteli ve aşırı konsolide kil olduğu göz önüne alındığında bu çatlakların yüzey sularının etkisiyle meydana gelen şişmeden kaynaklandığı düşünülmüş ancak bu tabaka içinden alınan numuneler üzerinde yapılan şişme analizinde şişme basıncı $S = 0.97 \text{ N/cm}$ bulunmuş olup bu değer çok düşük bir şişme potansiyeline işaret etmektedir.

Hırka- i Şerif Camii platformu Akseki Caddesi tarafında yol ile hemzemin olmasına karşın Kadı Sokağı tarafında 2.5-6.30 m Keçeciler Caddesi tarafında ise yoldan 6.30 m yükseklikte kalmaktadır. Caminin yaklaşık döşeme platformunu oluşturan + 50 m kotundan itibaren oluşan bu şev, kalın bir istinat duvarı ile desteklenmiştir. Ancak duvar ve cami arasındaki bahçeden zemine sızan yüzey suları ve sulama sularının drene edilmediği görülmüştür. Zaman içinde yüzey sularının ve cami içersindeki fosseptik kuyusunun suları ile cami temellerinde ve istinat duvarında meydana gelen aşınma ve yıkanma etkisi ile zeminde zayıflamalar oluşmuştur.

İstinat duvarı arkasına yüzey suları toplanmaktadır. Bu suların drenajı için yağmur oluğu yapılmış ise de, bahçe yüzey suyunun drenajına, fosseptik kuyusunun iptaline yönelik bir işlem yapılmamıştır. Kubbenin sağ ve sol yanal itkilerini karşılayacak kirişleme sisteminin geçiş koridorları zemininde yapılmış olması doğru bir karar olup tamamlayıcı olarak Keçeciler Caddesi tarafında zemine yönelik bir çalışma yapılması gerekli görülmektedir.

Yukarıda belirtilen sebeplerle 17 Ağustos 1999 tarihinde meydana gelen deprem sonucunda caminin taşıyıcı sistemiyle sağ ve sol ziyaretçi geçiş koridorlarının taşıyıcı sisteminde önemli sayılacak hasarlar meydana gelmiştir. Bu hasarların oluşmasında cami zemininin hareketine sebep olan Keçeciler Caddesi ve Kadı Sokak tarafında oluşan kot farkı önemli etmendir. Yapılan gözlemler sonucu her iki sokak kapı girişini birleştiren çizgi üzerinde kopma ve ayrılmalar meydana geldiği

görülmüştür. Zeminde görülen bu yer değiştirmeler kuzeybatı-güneydoğu (NW-SE) doğrultusundadır. Bu hareketin durdurulması için kopma hattını destekleyecek bir istinat sistemi teşkil edilmesi önerilmektedir. Keçeciler Caddesi ve Kadı Sokak tarafında kalan istinat duvarı, zemin hareketini önlemekten uzaktır. Söz konusu cephelerden, caminin üzerinde bulunduğu dolgu platformunun desteklenmesi önerilmiştir. Destek yapısı olarak bir başlık kirişi ile bağlanmış, zemine ankastre delme kazıklar önerilmiştir. Kazıkların, yapı çevresindeki alanın darlığı da dikkate alınarak mini kazık şeklinde teşkili tavsiye edilmiştir.

Zati ağırlığı 500-600 kN olan büyük delici makineler, zeminde oluşturacağı titreşimler sonucu yapıda olumsuz etkilere sebep olabileceğinden tavsiye edilmemektedir. Ancak mini kazıklar kesitleri itibari ile yatay yükleri karşılamayacağından S2 - S6 sondajları arasında 3 sıralı, geri kalan bölümlerinde ise 2 sıralı mini kazık teşkili önerilmiştir. Mini kazıkların 250 mm çapında seçilmesi ve kazık araları su drenajına imkân verecek şekilde planlanması gerekmektedir. İstinat duvarı veya kazık sisteminin projelendirilmesinde aşağıdaki zemin parametrelerinin seçilmesi tavsiye edilmiştir.

Dolgu Zemin:

Kohezyon, $c = 0$

İç sürtünme açısı, $\phi=25^0$

Hacim ağırlığı $\gamma=16.0 \text{ kN/m}^3$

Yanal Yatak Katsayısı $k_s=32000 \text{ kN/m}^3$

Sıkı Kum-Sert Kil:

Kohezyon, $c = 0$

İç sürtünme açısı, $\phi=35^0$

Hacim ağırlığı $\gamma=19.0 \text{ kN/m}^3$

Yanal Yatak Katsayısı $k_s=32000 \text{ kN/m}^3$

Ayrıca, caminin bahçesinde yeni bir peyzaj düzenlemesine gidilerek uygun bir su drenaj sisteminin kurulması, sert zemin oranının da artırılması önerilmektedir. Bahçede, fazla sulama suyu isteyen bitkiler tercih edilmemelidir.

İnceleme sahasında tespit edilen Süleymaniye Formasyonunu oluşturan sıkı-çok sıkı konumlu kum ile sert kıvamlı kil tabakaları için bir sıvılaşma riski bulunmamaktadır.

5.1.7. Yapının Rölöve Çizimleri

İstanbul Deprem Master Planı Fatih Kentsel Dönüşüm Projesi kapsamında hazırlanan taşıyıcı sistem rölöveleri, Bimtaş A.Ş.'den temin edilmiştir.

Caminin 3 boyutlu ölçümleri lazer tarama cihazı ile yapılmış; gerçek 3 boyutlu nokta bulutu modeli elektronik ortamda oluşturulmuştur. Bu model üzerinde yapıyı tam

olarak ifade edecek şekilde, özellikle duvar kalınlıklarını ve duvarlarda bulunan boşlukları tanımlayan kotlardan planlar, en ve boy kesitler alınarak CAD ortamında rölöve paftaları çizilmiştir. Bu rölöveler, mimari detayları tam olarak içermeyen, taşıyıcı sistemi tespit etmek maksadıyla çıkarılan rölövelerdir. Söz konusu rölöveler, planlar, görünüşler ve iki noktadan alınan kesitlerden ibaret olup, çalışmanın sonunda EK A’da verilmiştir. Bu kapsamda ölçümlerden elde edilen nokta bulutları ve ölçüm cihazına kalibre edilmiş yüksek çözünürlüklü fotoğraf makinesiyle çekilmiş gerçek “ortho-photo”lar kullanılarak fotogrametrik cepheler hazırlanmıştır. Oluşturulan fotogrametrik cephe çizimleri CAD ortamına aktarılarak yapıya ait cepheler elektronik olarak çizilmiştir.

5.2. Yapının Sonlu Elemanlar Modeli

5.2.1. Malzeme Özellikleri

Hırka-i Şerif Camii, beden duvarları küfekiden ve kubbeler ile tonozları da tuğladan inşa edilmiş bir yapıdır. Caminin ziyaret esnasında kullanılan yardımcı mekânlarında ise volta döşeme görülür. Hırka-i Şerif dairesinde ise ikinci kat tuğla bir kubbeye benzer tonozla geçilmiştir. Camide kullanılan malzemeler için aşağıdaki değerler analize esas kabul edilmiştir (Tablo 5.1).

Tablo 5.1: Modelde kullanılan malzemeler ve özellikleri

Yapı elemanı	Yapı Birimi	Eleman Tipi	Elastisite Modülü (MPa)	Özkütle (kg/m ³)
Kubbeler	Tuğla	Kabuk	3000	1800
Tonozlar	Tuğla	Kabuk	3000	1800
Beden Duvarları	Taş	Katı	10000	2200
Minare	Taş	Katı	10000	2200

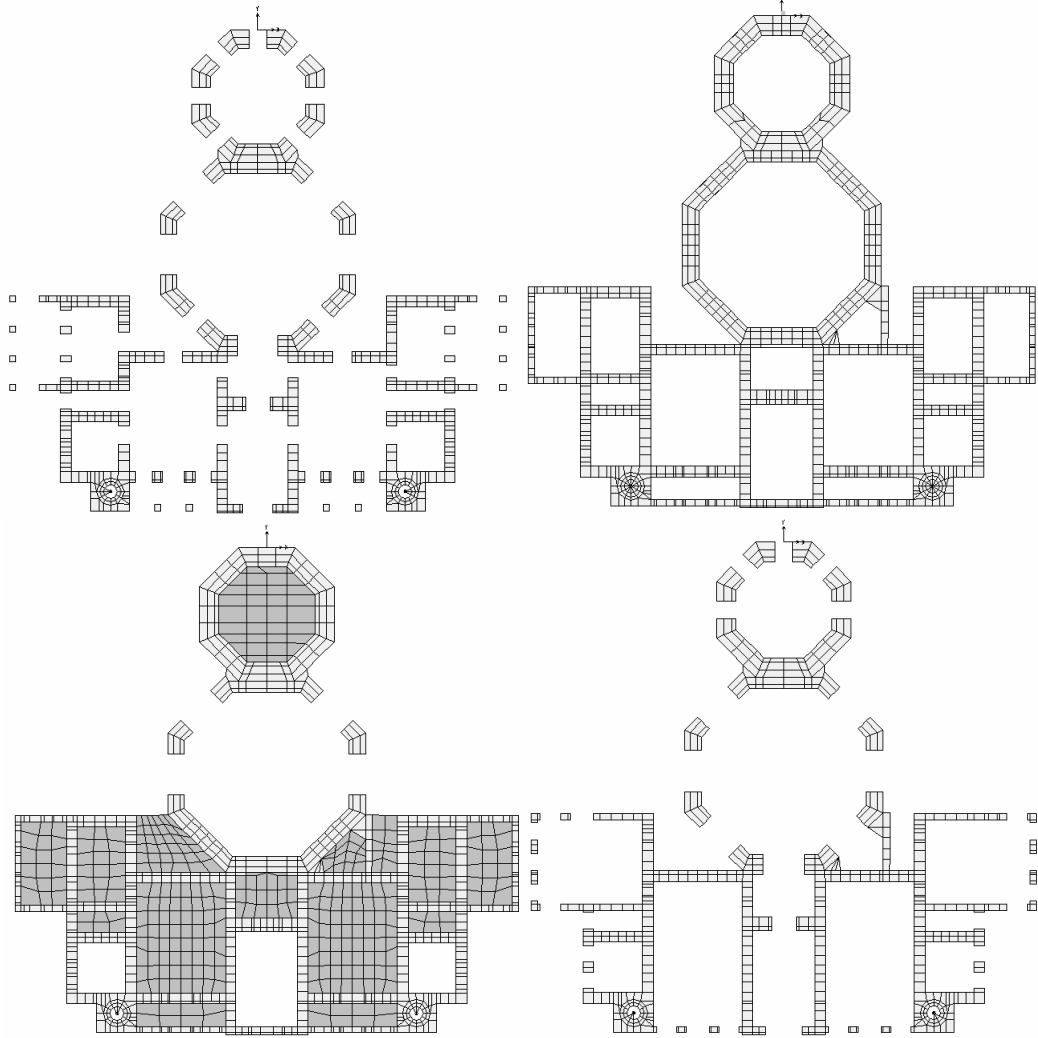
5.2.2. İdealleştirmeler

Modelleme esnasında, duvarlar ve diğer taşıyıcı elemanlarda, geometrik düzenleme ve basitleştirmelere ihtiyaç duyulmuştur (Şekil 5.14).

Döşemeler: Mahfil kısmında ikinci katın teşkili için yapılan volta döşemelerin, rijit bir diyafram olarak çalışmayacağı düşünülerek, eksenel yük kapasiteleri azaltılmıştır. Oldukça kalın duvarların bulunduğu çevre mesnetlere nazaran zayıf kalan

döşemelerdeki sehim problemi de düşünüldüğünde tam bir rijit diyafram şeklinde çalışmayacağı öngörülmüştür.

Tonoz ve Kubbeler: Tonoz ve kubbeler, uygun sonlu eleman büyüklüklerine göre parçalara ayrılmıştır. Kubbelerde kar yükü dikkate alınmazken, tonozlar için yönetmelikte belirtilen kar yükü hareketli yük parametresi içerisine dâhil edilerek tanımlanmıştır.



Şekil 5.14. 3D Sonlu Eleman Modeli Çeşitli Plan Seviyeleri ve Döşemeler

Duvarlar: Kalın duvarlar yatay kesitinde ikiye veya üçe bölünmek suretiyle modellenmiştir. Özellikle kalınlığının arttığı duvarlarda, tek bir elemanla tüm kalınlığı göstermek uygun olmamaktadır. Ancak nispeten ince duvarlar ise tek bir eleman genişliği ile tanımlanmıştır.

Sütunlar: Sütunlar, geometrisinde model birleşim bölgelerine uyum açısından ortogonal bir hale getirilmiştir.

Temeller: Yapının temellerinin 2 m derinlikte bulunduğu kabul edilerek, duvarlar camii giriş kotundan 2 m aşağıya kadar indirilmiştir.

5.2.3. Model Özellikleri

Analize esas olan modelin kurulmasında 2 tip elemandan faydalanılmıştır. Duvarlar, minareler ve sütunlar için katı (solid) elemanlar kullanılmış, kubbe ve tonozlar ile döşemelerde ise kabuk (shell) elemanlar tercih edilmiştir. Genel olarak sütunların çubuk (frame) eleman olarak modellenmesi de mümkün olmasına karşın, birleşim bölgelerindeki gerilme yığılmaları ve bağlantı zorluğu sebebiyle, az sayıdaki sütunun modellenmesinde de katı (solid) elemanlar tercih edilmiştir (Şekil 5.15).

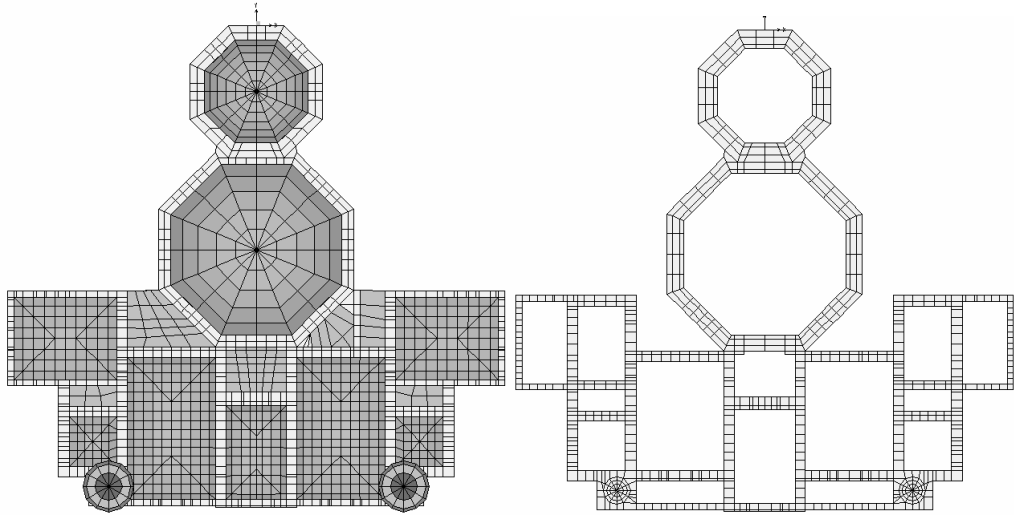
Modelde kullanılan eleman sayıları

Katı (solid) Eleman Sayısı : 19355

Kabuk (shell) Eleman Sayısı : 1568

Düğüm Noktası (node) Sayısı : 34227

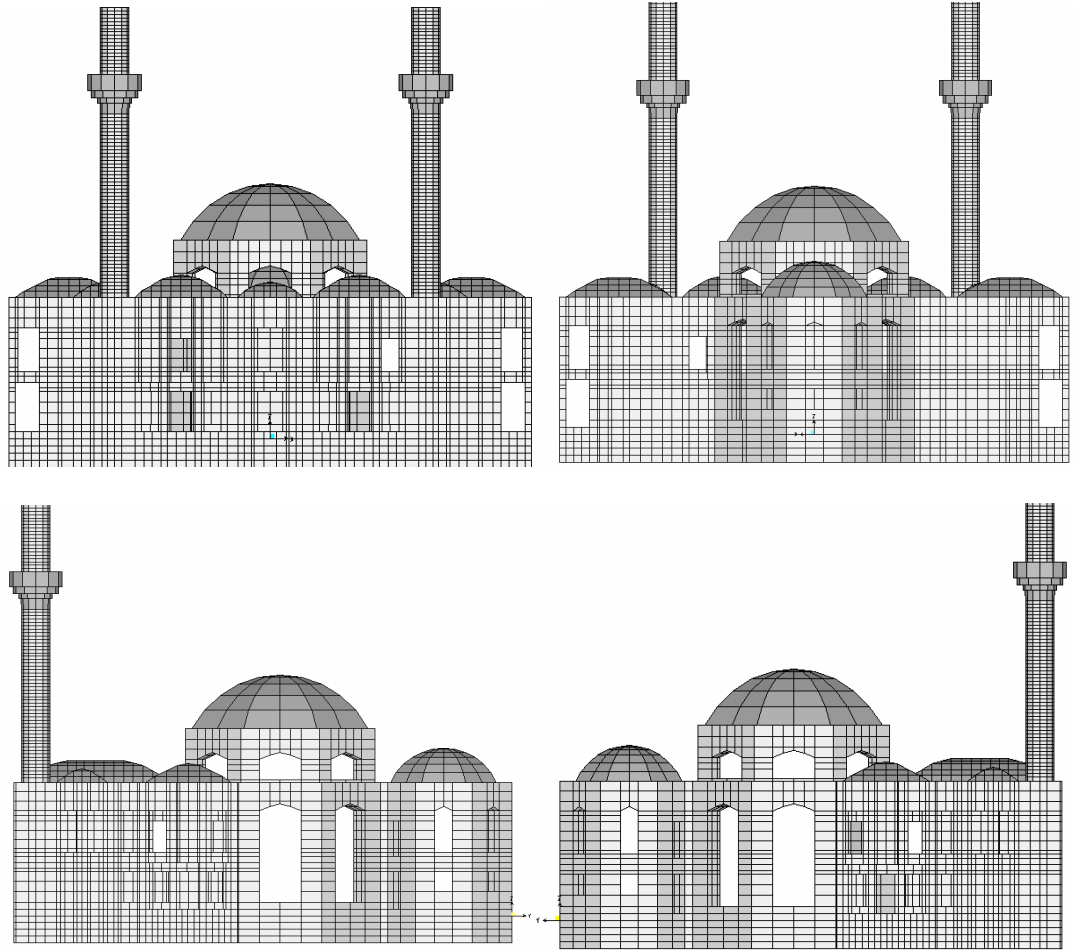
Yukarıda verilen eleman sayılarına bakıldığı zaman oldukça detaylı bir model hazırlandığı görülür.



Şekil 5.15. 3D Sonlu Eleman Modeli Plan Görünüşü

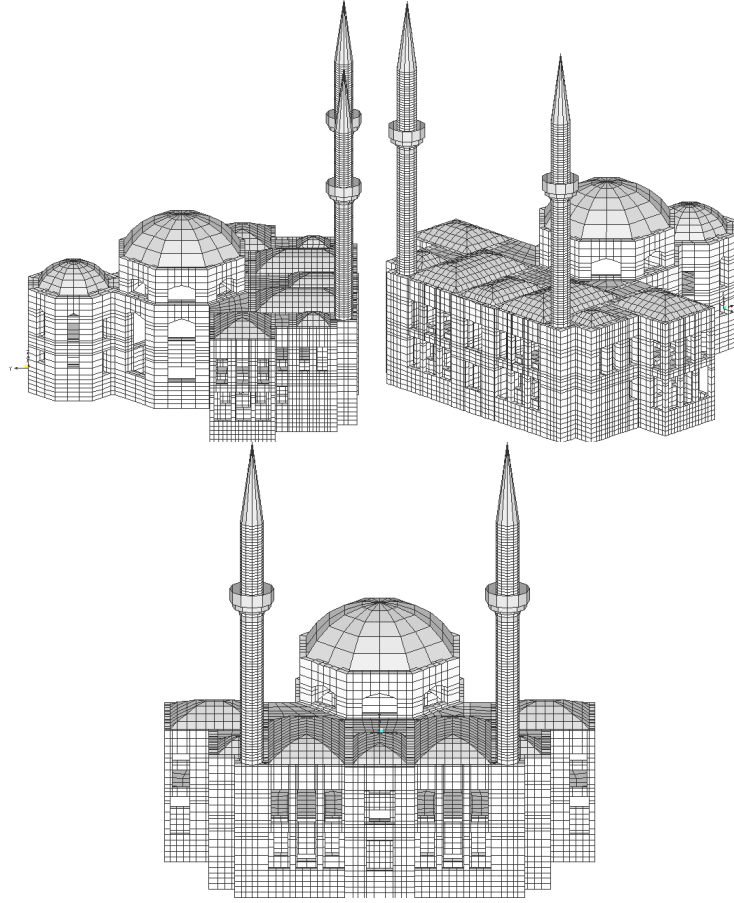
Hırka-i Şerif dairesi ve harime ait kalın duvarlar (sırasıyla 140-115 cm) plan düzleminde üç parçaya ayrılmıştır. Daha ince olan mahfil duvarları ise eleman sayısındaki büyük artışların önlenmesi ve model entegrasyonu göz önüne alındığından tek parça şeklinde modellenmiştir. Kubbe ve tonozlarda kullanılan

kabuk elemanlar da, mesnetlerindeki elemanların sınır şartlarına uyacak şekilde uygun boyutlarda sonlu elemanlara bölünmüştür. (Şekil 5.16, 5.17)



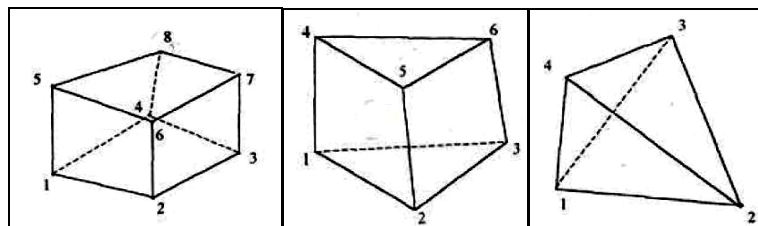
Şekil 5.16. 3D Sonlu Eleman Modeli, Sağ Yan ve Sol Yan Görünüş

Hırka-i Şerif Camii'nin sonlu eleman modeli Sap2000 yazılımında geliştirilmiştir. Caminin tavan iz düşüm alanı 750 m^2 'dir. Kubbe ve tonozların kalınlığı 60 cm'dir. Kubbenin dış çapı 13 m, yüksekliği ise 4.90 m dir. Yapının toplam ağırlığı 60.000 kN civarındadır. Modelde, caminin temelini 2 metre aşağıda olduğu kabul edilerek çözümleme yapılmıştır. Duvarlar ve minareler, taş malzeme, kubbe ve tonozlar ise tuğla malzeme özellikleri ile modellenmiştir. Döşemeler için de volta döşemeye uygun davranış ve yük kabulleri yapılmıştır.

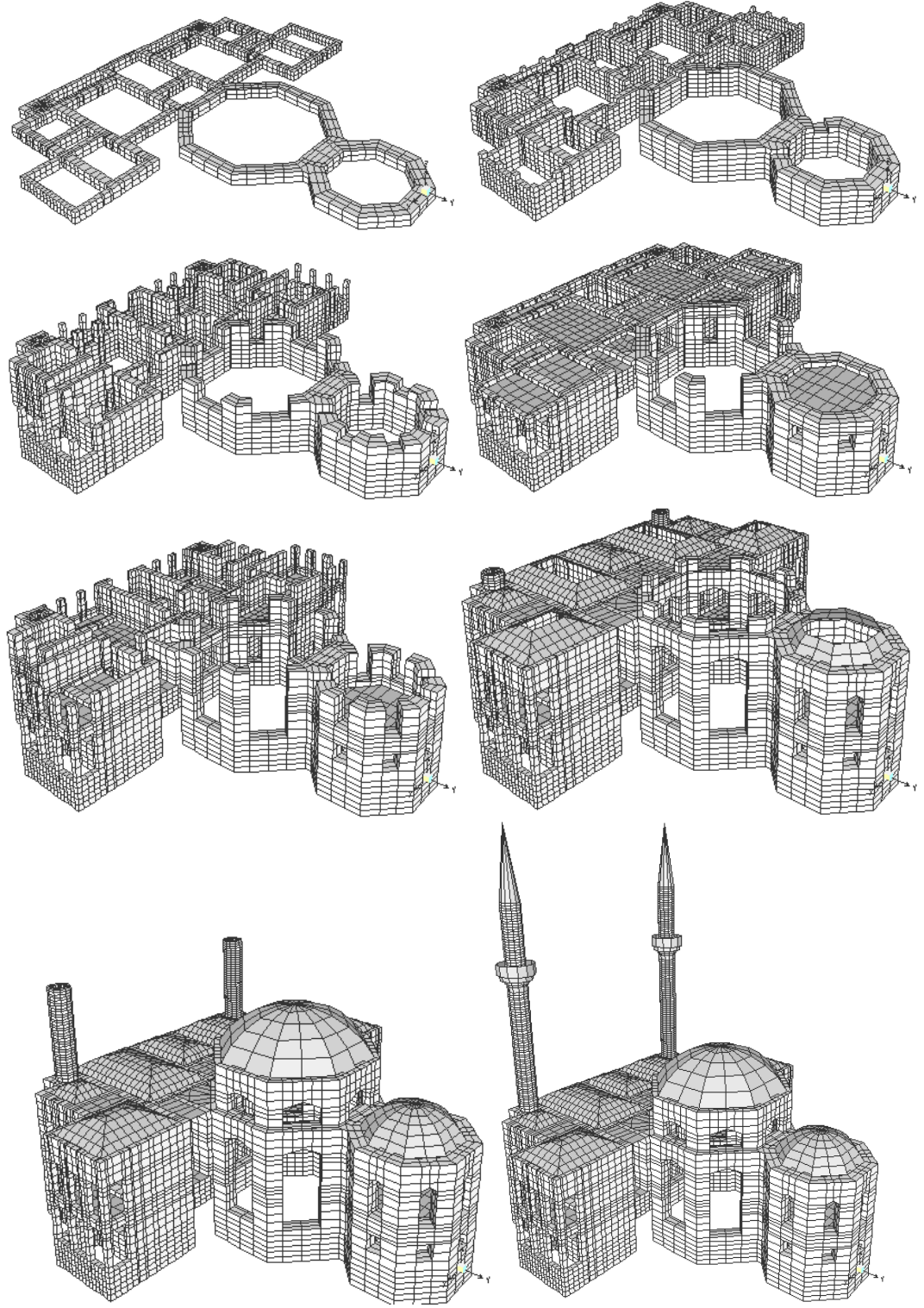


Şekil 5.17. 3D Sonlu Eleman Modelinden Çeşitli Görüntüler

Analiz sonuçlarında gösterilen maksimum (S_{max}) ve minimum (S_{min}) gerilmeler elemanlarda oluşan en büyük basınç ve çekme gerilmelerini göstermektedir. Yığma yapı elemanlarının basınç dayanımının çekmeye göre çok daha yüksek olması sebebiyle, analiz sonuçlarında yapının daha zayıf olduğu çekme gerilmelerini tanımlayan S_{max} değerleri dikkatle izlenmelidir. Sonlu eleman modelinde kullanılan katı elemanlar düğüm noktası sayılarına göre sınıflandırılmaktadır. Modelin genelinde sekiz düğüm noktasına sahip hekzahedral katı eleman kullanılmış, geometri gereği ihtiyaç duyulan yerlerde altı düğüm noktasına sahip pentahedral ve özel köşelerde de dört düğüm noktasına sahip tetrahedral katı elemanlar kullanılmıştır. (Şekil 5.18)



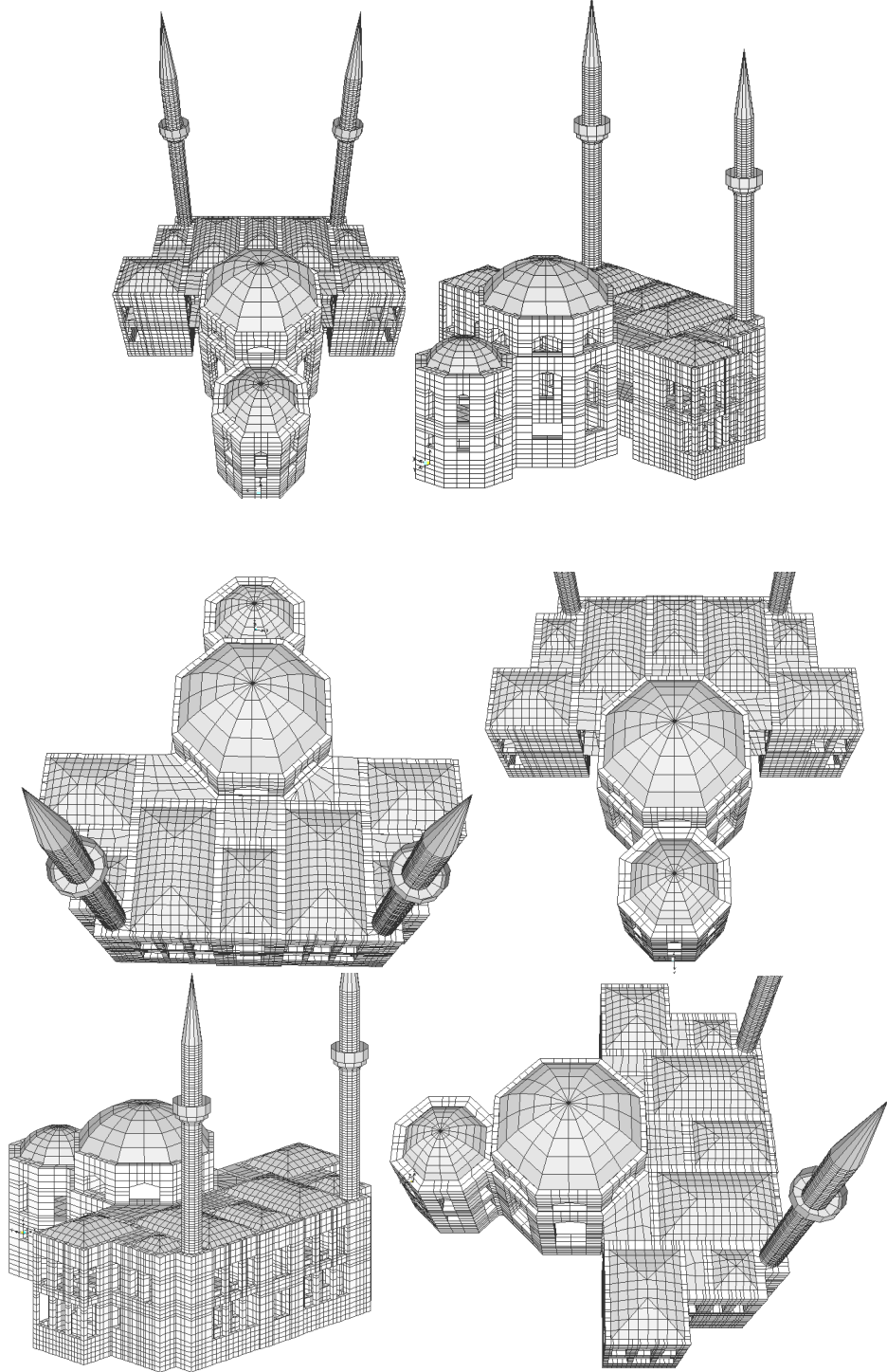
Şekil 5.18. Hekzahedral, Pentahedral ve Tetrahedral Elemanlar



Şekil 5.19. 3D Sonlu Eleman Modelleme Aşamaları

Yapının sonlu eleman modelinde, kubbelerde ve tonozlarda tuğla, beden duvarları ve minarelerde ise taş malzeme tanımı kullanılmıştır. (Şekil 5.19)

Sonlu eleman büyüklüğü olarak 80 cm'den daha büyük elemanlar kullanılmamaya çalışılmış, modelin genel yapısında homojen bir eleman büyüklüğü elde edilmesine gayret gösterilmiştir (Şekil 5.20).

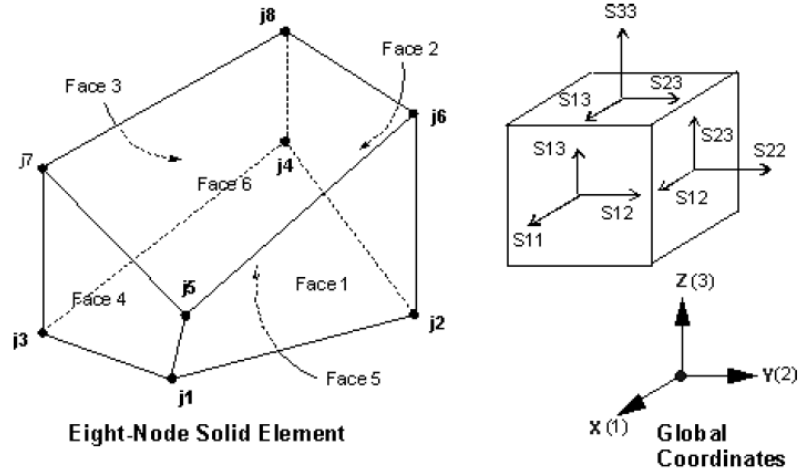


Şekil 5.20. 3D Sonlu Eleman Modelinden Çeşitli Görüntüler

5.3. Yapının Sonlu Elemanlar Analizi

5.3.1. İşaret Uyumluğu ve Yön Kabulleri

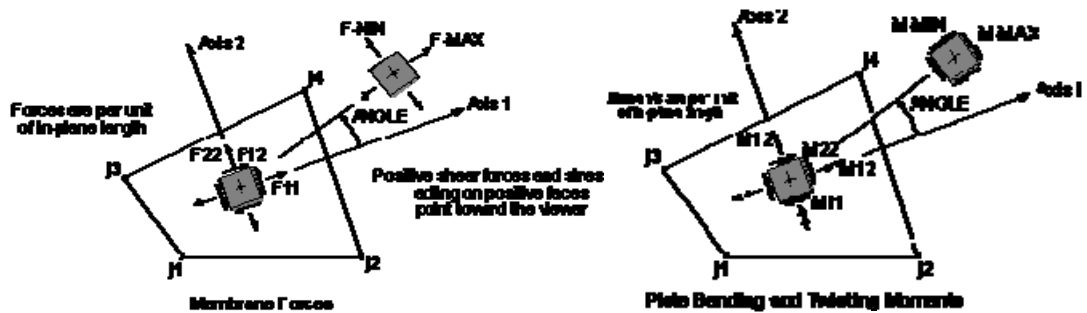
Yapının sonlu eleman modelinde kullanılan katı ve kabuk elemanların gerilmelerine ait yön kabulleri ve işaret uyumu ile gerilme isimleri aşağıda gösterilmiştir. Bu işaret uyumu Sap2000 yazılımında kullanılan kabullerinden alınmıştır.



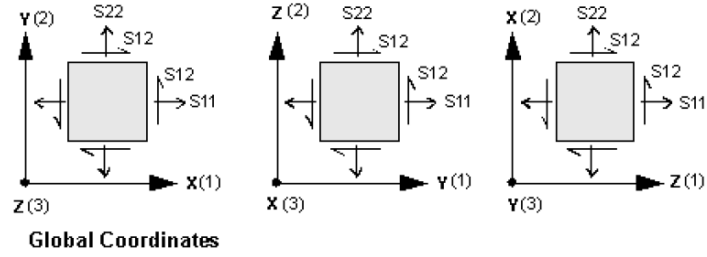
Şekil 5.21.8 Noktalı Katı Eleman ve Gerilmeler [35]

Katı elemana ait S_{11} , S_{22} ve S_{33} gerilmeleri sırasıyla x,y ve z eksenlerindeki normal gerilmelere tekabül eder. S_{12} gerilmesi x eksenine doğrultusunda uzanan, yz düzleminin y doğrultusundaki gerilme bileşenini ifade eder ki S_{21} ile aynı değerde olup kayma gerilmesine karşılık gelir. Modelde z eksenini düşey eksen kabul edildiği için deprem kuvvetlerinden oluşan kayma gerilmeleri, deprem yükünün yönüne uygun olmak şartıyla S_{13} ve S_{23} gerilmeleri şeklinde ortaya çıkar (Şekil 5.21).

Aşağıdaki şekillerde ise kabuk elemanlara ait iç kuvvetlerin isimlendirilişi gösterilmiştir. F harfi kuvveti, M harfi ise momenti göstermektedir (Şekil 5.22). Ayrıca düzlem kabuk elemanların gerilmeleri ise aşağıda gösterilmiştir (Şekil 5.23).

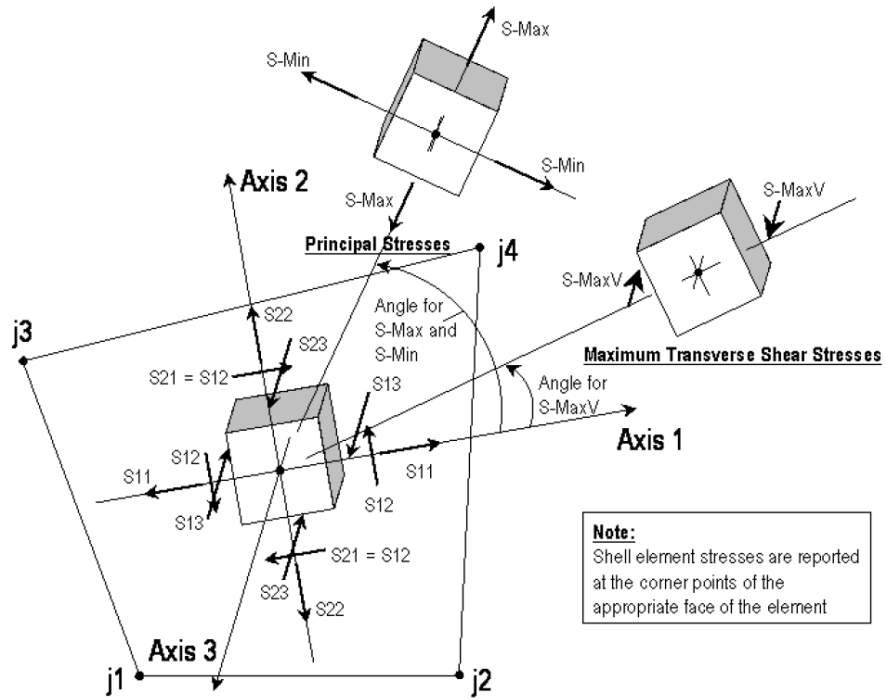


Şekil 5.22. Düzlem Kabuk Elemanda İç Kuvvetler [35]



Şekil 5.23. Düzlem Kabuk Elemanda Gerilmeler [35]

Her hangi bir eleman için her hangi bir açıdaki gerilme değerleri asal gerilmelere çevrilebilmektedir.



Şekil 5.24. Katı Elemanların Normal, Kayma ve Asal Gerilmeleri [35]

Normal gerilmelerde olduğu gibi kayma gerilmelerinde de yukarıdaki şekilde gösterilen formül ile en büyük kayma gerilmeleri hesaplanır (Şekil 5.24).

5.3.2. 2007 Türk Deprem Yönetmeliği'nde Yığma Yapılar

2007 yılında yürürlüğe giren Afet Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmeliğin yığma yapılar bölümünde, düşey yükler ve deprem hesap yüklerinin etkisi altında oluşacak basınç ve kayma gerilmelerinin, duvarda kullanılan yığma duvar cinsine göre izin verilen basınç ve kayma gerilmelerini aşmadığının gösterilmesi istenmiştir.

Yapıdaki kayma gerilmeleri, düşey gerilmelere bağlı olduğu için öncelikle düşey gerilmelerin hesaplanması gerekmektedir. Aynı zamanda, duvarlarda oluşan basınç gerilmelerinin yığma duvar cinsine göre izin verilen gerilmelerle karşılaştırılması da gerekmektedir. Buna göre, duvardaki kapı ve pencere boşluk en kesitleri kadar azaltılmış duvar en kesit alanına bölünerek bulunacak gerilme, duvar cinsine göre izin verilen basınç gerilmesinden büyük olmayacaktır.

Duvarlarda basınç emniyet gerilmesinin hesaplanması için bazı yöntemler verilmiştir.

- Basınç deneylerinden hesaplanan duvar mukavemetinin 0.25'i duvar basınç emniyet gerilmesi olarak alınabilir.
- Duvar parçası basınç mukavemeti deneyi yapılmamışsa duvarda kullanılan bloğun deneysel olarak elde edilen serbest basınç mukavemetinin 0.50'si f_d duvar basınç dayanımı ve bu dayanımın 0.25'i f_{em} duvar basınç emniyet gerilmesi olarak alınabilir.
- Duvarda kullanılan kâgir birimin basınç mukavemeti belli değilse veya duvar mukavemeti deneyi yapılmamış ise duvarda kullanılan kâgir birim basınç emniyet gerilmesinin tablodan alınacağı belirtilmiştir. Bu tabloya göre tarihi yığma yapılarıdaki kullanıma benzeyen duvar tiplerinin basınç emniyet gerilmesi için aşağıdaki değerler verilmiştir:

Dolu blok tuğla veya harman tuğlası (çimento takviyeli kireç harcı ile) 0.8 MPa,

Taş duvar (çimento takviyeli kireç harcı ile) 0.3 MPa.

Yönetmeliğe göre, ayrıca duvarlarda narinlik oranına göre bu emniyet gerilmelerinin azaltılması da gerekmektedir. Hesaplanacak kayma gerilmeleri ise $\tau_{em} = \tau_0 + \mu\sigma$ denkleminde bulunacak duvar kayma emniyet gerilmesindeki τ_{em} ile karşılaştırılacaktır. Bu denklemde τ_{em} duvar kayma emniyet gerilmesi, τ_0 duvar çatlama emniyet gerilmesi, μ sürtünme katsayısı (0.5 olarak alınabilir), σ ise duvar düşey gerilmesidir (bütün gerilme birimleri MPa).

Yönetmelikte, yığma duvarda kullanılan kâgir birim cinsine göre duvar çatlama emniyet gerilmesi τ_0 değeri için bir tablo verilmiştir. Bu tabloda, tarihi yığma yapılarıda kullanılan duvar tiplerine benzer olarak verilen dolu blok tuğla veya harman tuğlası (çimento takviyeli kireç harcı ile) 0.15 MPa, taş duvar (çimento

takviyeli kireç harcı ile) 0.10 MPa değerlerini kullanmak mümkün olabilir. Buna göre aşağıdaki ifadelerden kayma emniyet gerilmeleri hesaplanabilmektedir.

- Taş duvarlar için kayma emniyet gerilmesi $\tau_{em} = 0.10 + 0.5 \sigma$
- Tuğla duvarlar için kayma emniyet gerilmesi $\tau_{em} = 0.15 + 0.5 \sigma$
- Ayrıca, duvarda kullanılan kâgir birimlerin Elastisite Modülü $E_d = 200f_d$ denkleminle hesaplanacaktır.

5.3.3. Düşey Yükler Altında Statik Analiz

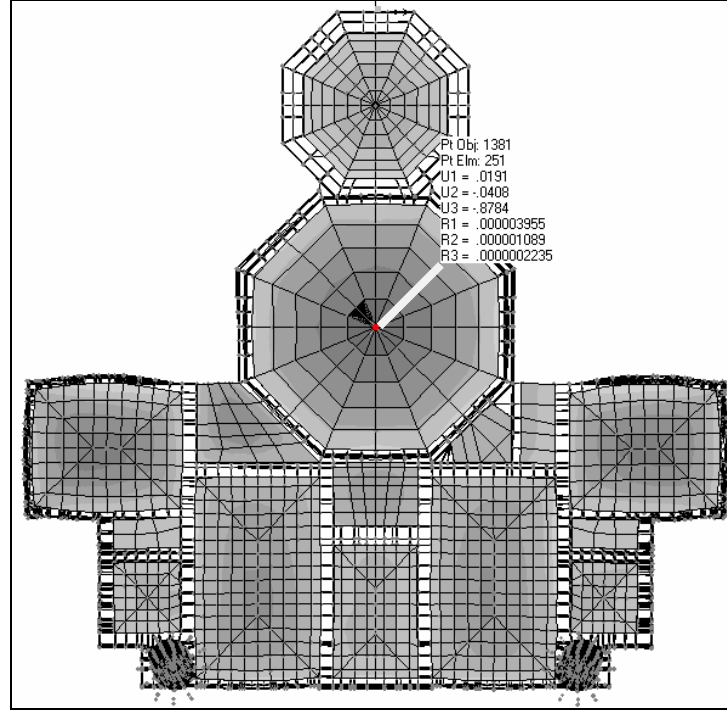
Yapının düşey yükleri altında statik analizi, düşey yükler altında yapıda meydana gelen gerilme dağılımını ve muhtemel çatlak ve yer değiştirmeleri görmek açısından önemlidir. Diğer etkilerden bağımsız olarak yapılan bu analizde, düşey yüklerin meydana getirdiği problemler açıkça görülüp önlem alınabilir. Aslında yapının devamlı olarak taşıdığı yükler altında davranışını görmek manasına gelen düşey yükler, genel olarak sorunsuz olarak taşınması beklenir. Düşey yükler, yapının ölü yükleri, hareketli yükler ve kar yükleri şeklinde sayılabilir. Hırka-i Şerif Camiinde, düşey yüklerden kaynaklanan bazı hasarlar görülmüştür. Özellikle, ikinci katta yer alan büyük açıklıklı döşemelerin mesnet bölgelerinde yaygın çatlaklar görülmüştür. Bu çatlakların, büyük açıklıklı döşemelerdeki aşırı sehimlerden kaynaklandığı söylenebilir. Özellikle Hırka-i Şerif'in ziyareti esnasında artan hareketli yük döşemelerde büyük sehimlere sebep olmaktadır.

Statik analizde, şekil değiştirme ve yer değiştirmeler için Sap2000 aşağıdaki lineer eşitliği kullanmaktadır.

$$[K] \{u\} = \{R\}$$

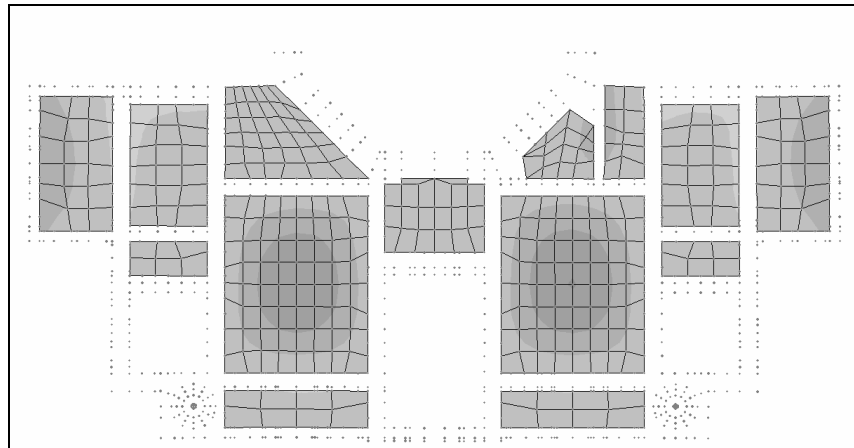
Bu eşitlikte $[K]$, rijitlik matrisi, $\{u\}$ ise yer değiştirme vektörüdür. $\{R\}$ ifadesiyle de dış yükler gösterilmiştir.

Yapıda, ölü yükler malzeme birim ağırlıkları ile tanımlanmıştır. Ayrıca kaplama yükleri de zati ağırlığın belirli bir yüzdesi (%10) gibi bir oranla zati yüklere dâhil edilmiştir. Hünkâr mahfili ve Hırka-i Şerif dairesindeki döşemelerde hareketli (5 kN/m²) yükler de dikkate alınmıştır. Ayrıca, tonozlarda kar yükü de (0.75 kN/m²) hareketli yük içerisine dâhil edilmek suretiyle hesaba katılmıştır. Düşey yükler altında analizden bahsedilirken G + Q yüklemesi kastedilmektedir.

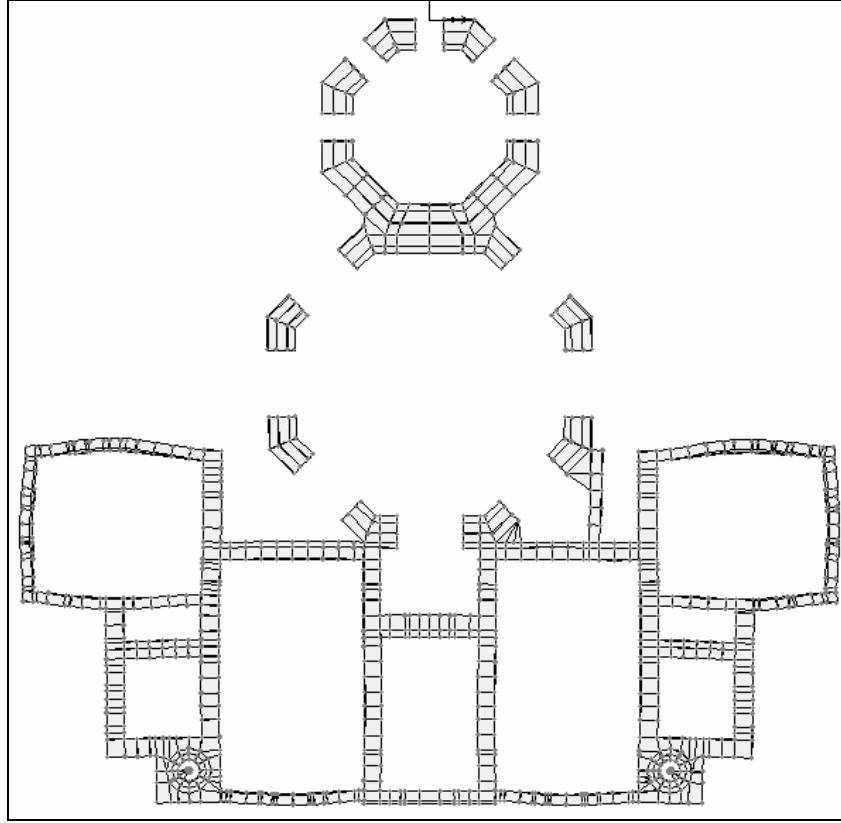


Şekil 5.25. (G + Q) Ana Kubbe Tepe Noktasında Yer Değiştirme: 0.88 mm)

En büyük yer değiştirme, harimi örten büyük kubbenin tepe noktasının düşey 3 eksenli (z eksenli) üzerindeki 0.88 mm değeriyle gerçekleşmiştir. (Şekil 5.25) Ayrıca caminin ikinci katını oluşturan volta döşemelerde de aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi, döşeme ortasında yer değiştirmeler artmaktadır. Hünkâr mahfili olarak kullanılan kısımlarda ise altta sütunlara oturan döşeme bölümünde daha fazla düşey yer değiştirmeler görülmektedir. Grafikteki tonlar koyulaştıkça yer değiştirme artmaktadır. (Şekil 5.26)

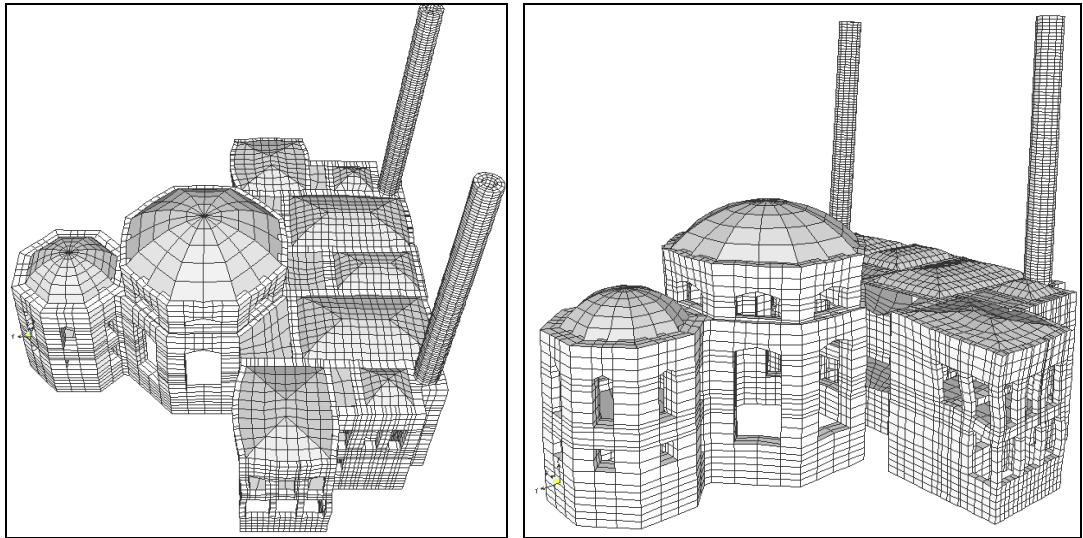


Şekil 5.26. (G + Q) Büyük Döşeme Ortasında Yer Değiştirme (maks: 4 mm)

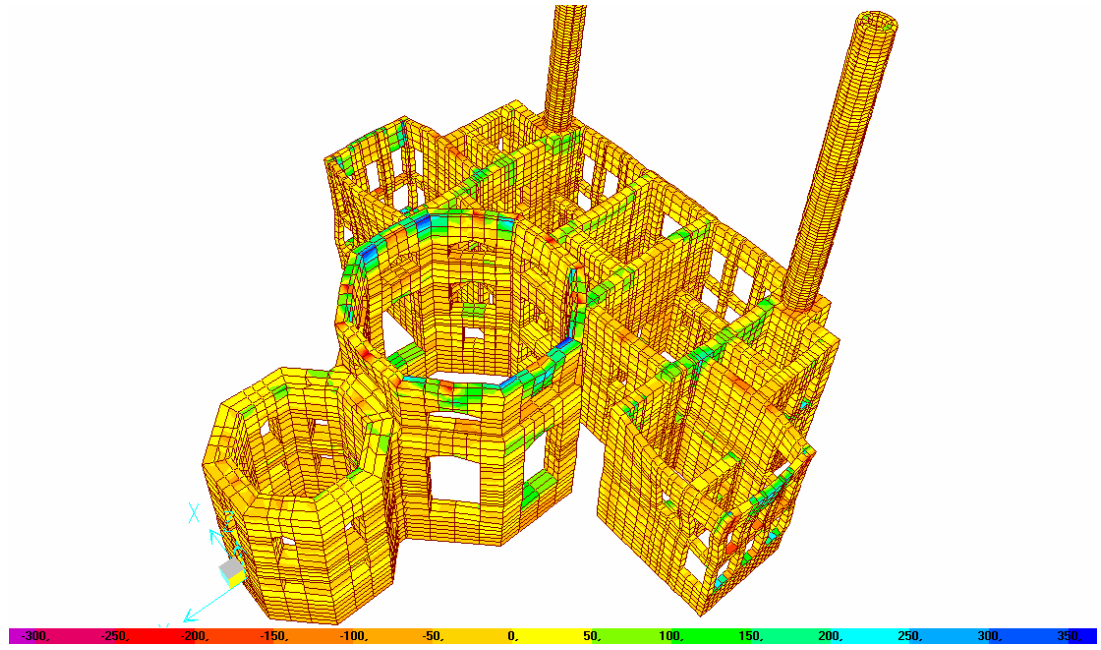
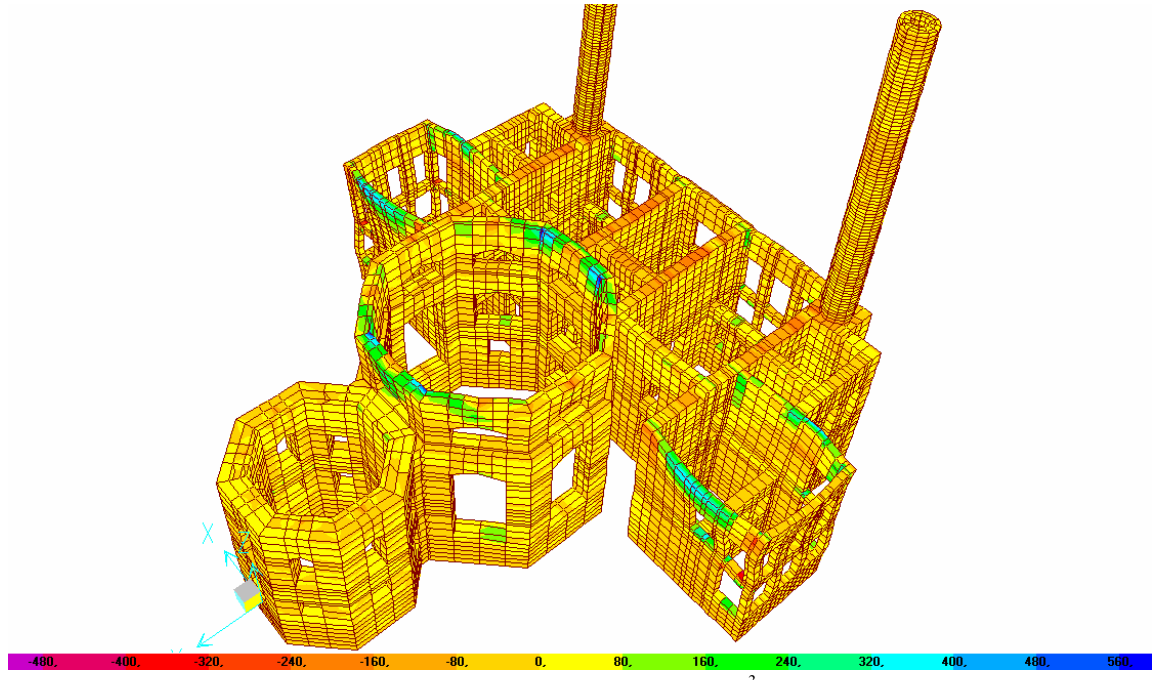


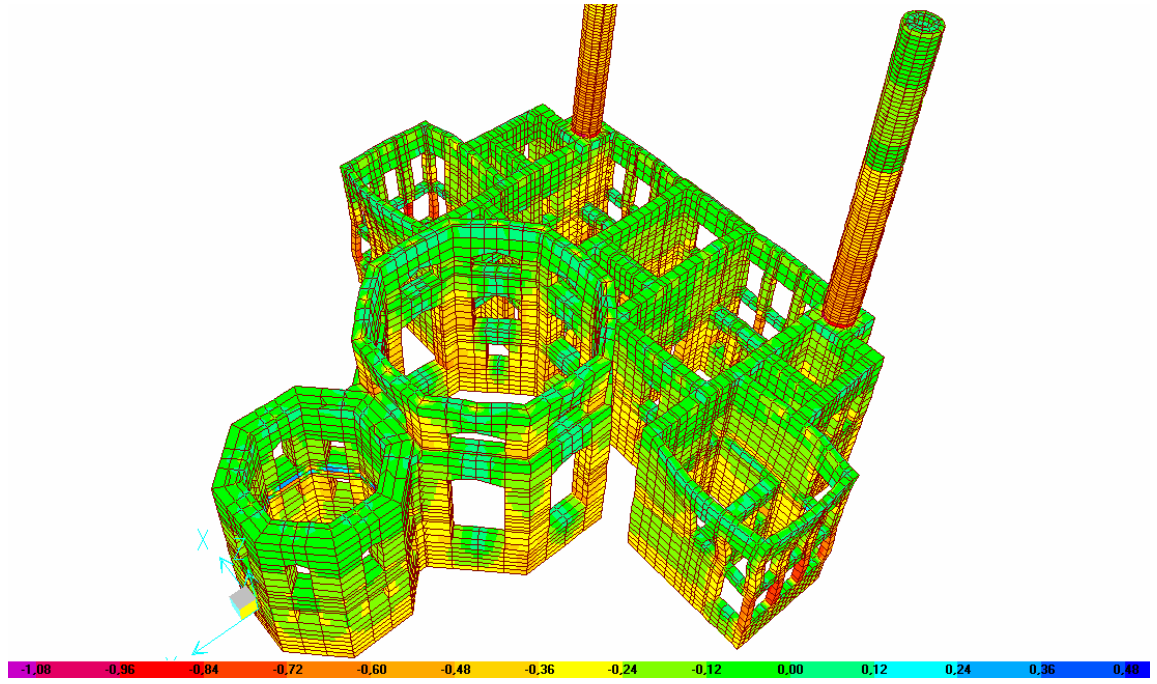
Şekil 5.27. (G + Q) Duvarlarda Düzlem Dışı Hareketler (max: 0.24 mm)

Düşey yükler altında, caminin sağ ve sol yanında yer alan hünkâr odalarını örten tonozlar ve iki büyük döşemeyi örten tonozun ön cephe hattındaki bölümü, kendilerine mesnetlik yapan duvarları düzlem dışı harekete zorladığı görülmektedir. Bunların dışında düşey yükler fazla etkili görünmemektedir. (Şekil 5.27)

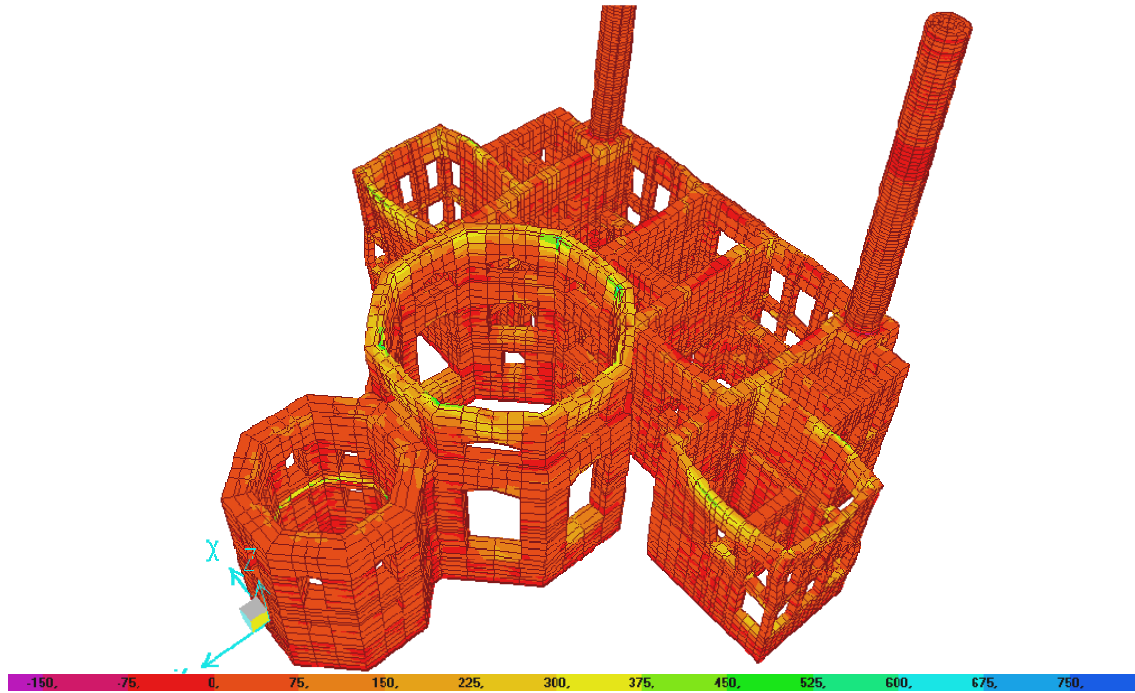


Şekil 5.28. (G + Q) Yapının Şekil Değiştirmiş 3D Görüntüsü

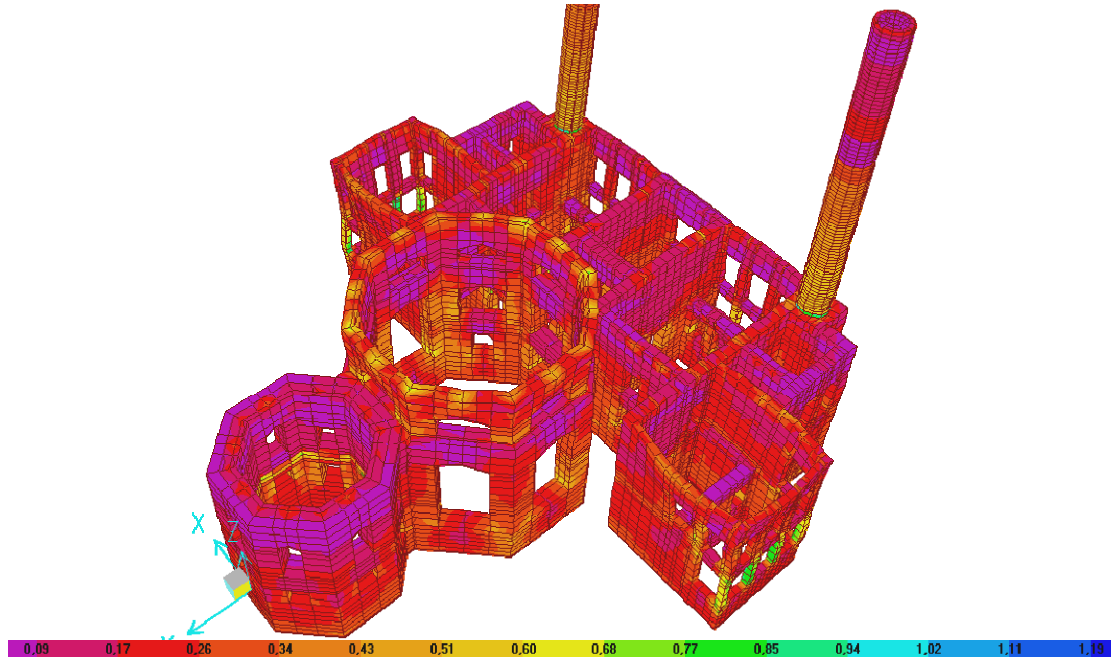




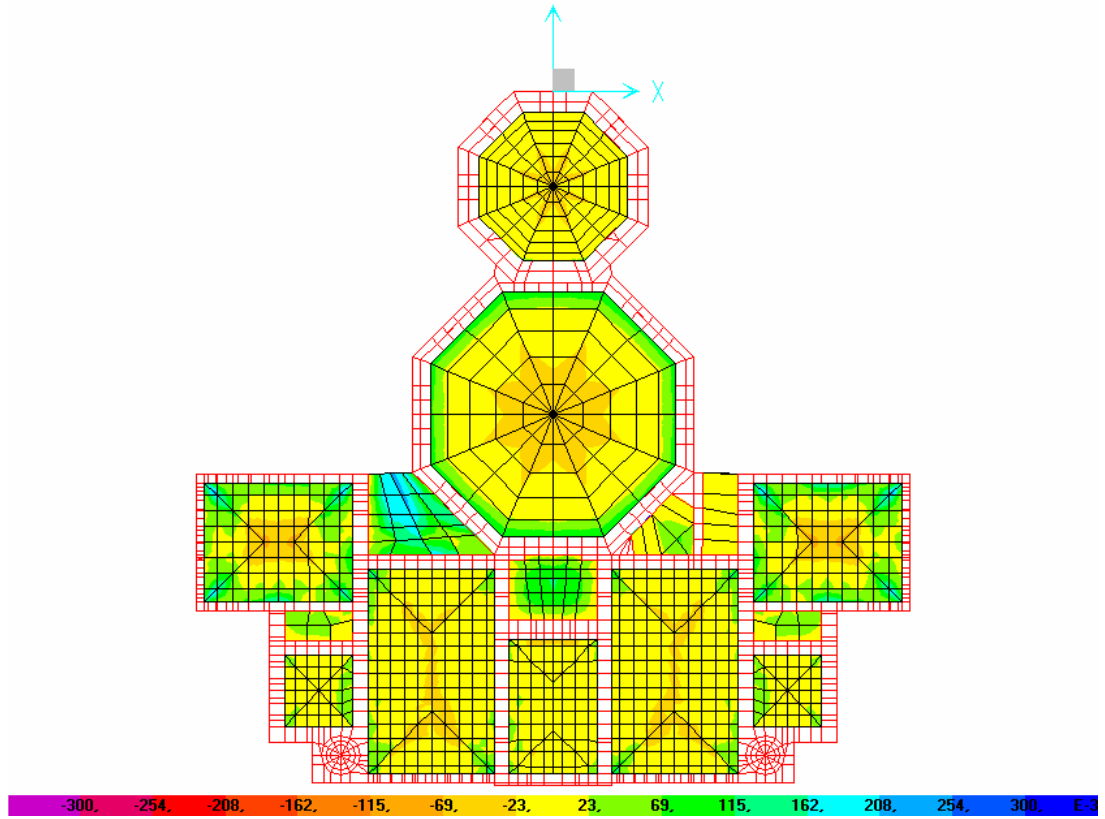
Şekil 5.31. (G + Q) S33 Gerilmeleri, MPa



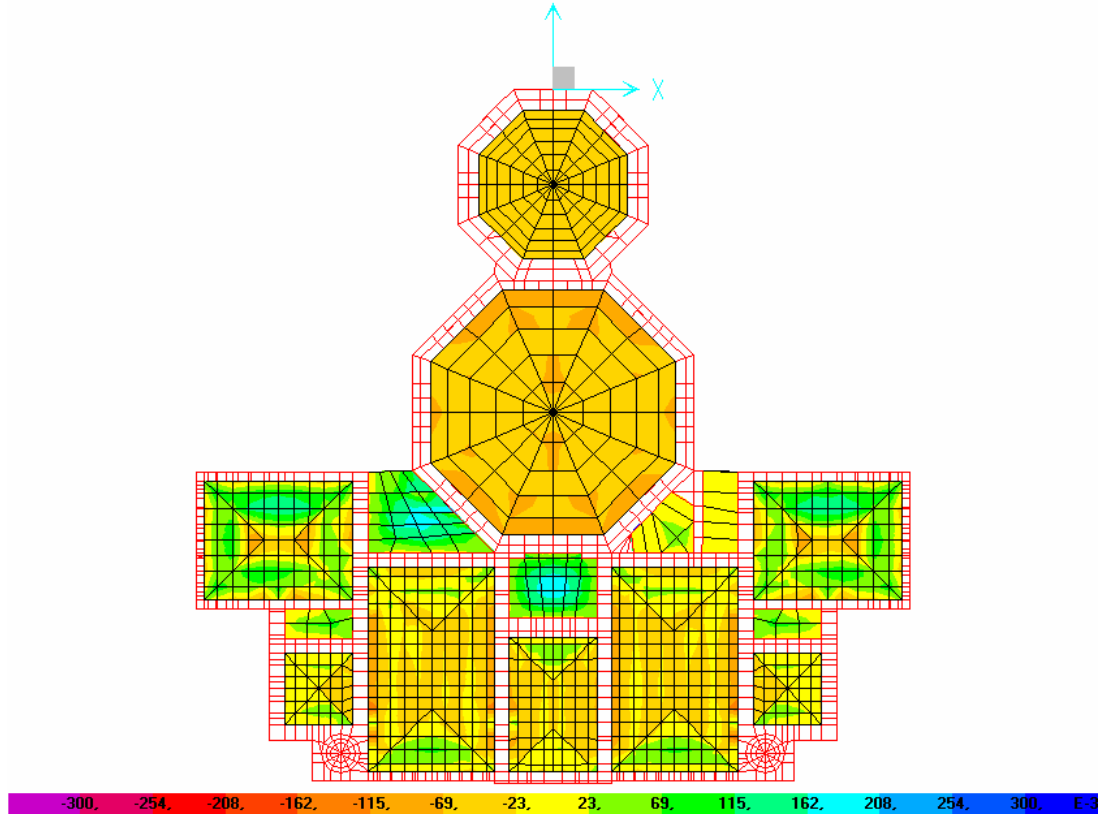
Şekil 5.32. (G + Q) SMax Gerilmeleri, 10^{-3} MPa



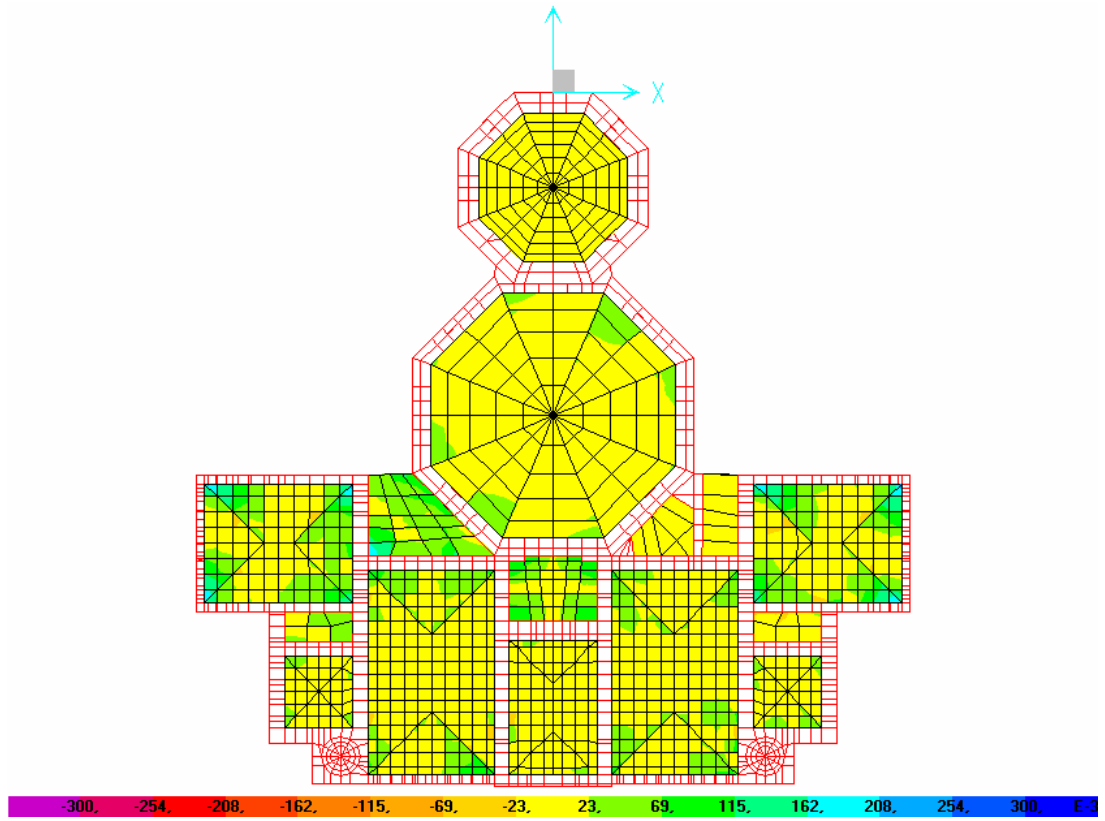
Şekil 5.33. (G + Q) SVmax Gerilmeleri, MPa



Şekil 5.34. (G + Q) Kabuk Elemanlar S11 Normal Gerilmeleri, 10^{-3} MPa



Şekil 5.35. (G + Q) Kabuk Elemanlar S22 Normal Gerilmeleri, 10^{-3} MPa



Şekil 5.36. (G + Q) Kabuk Elemanlar S12 Kayma Gerilmeleri, 10^{-3} MPa

Hırka-i Şerif Camii'nin G+Q düşey yükleri altında beklendiği gibi güvenli olduğu görülmektedir. Ancak büyük açıklıklı volta döşemelerdeki büyük yer değiştirmeler düşey yükler altında ön plana çıkmaktadır. Mevcut mahfil döşemelerinin, özellikle büyük açıklıklı olanları, düşey yükler altında yeterli rijitliğe sahip olmadıklarından büyük sehim yapmaktadır. Bu durum yapıdaki çatlaklardan da yerinde görülerek tespit edilen sorunlarla örtüşmektedir.

Yapının duvarlarında düşey yükler altında hünkar mahfilinin düzlem dışı zorlanan duvarı ve büyük kubbe kasnağında S11 gerilmelerinin 0.5 MPa değerine yakın olduğu görülmektedir. Bu değer söz konusu bölgelerde çatlak ihtimalini göstermektedir. S22 gerilmelerinde ise yine ana kubbe kasnağında en büyük gerilme değeri 0.35 MPa civarındadır. Bu değerler yerel olarak görülmekte olup yaygın bir gerilme dağılımı şeklinde olmadığı için tehlikeli görülmemiştir.

Yapıda S33 düşey normal gerilmelere bakıldığında zaman, en büyük gerilmelerin (0.9 MPa) hünkar mahfillerinin altında bulunan sütunlarda ortaya çıktığı görülmüştür. Minarelerin kaideye birleştiği bölgelerde ise düşey gerilme 0.8 MPa değerine ulaşmakta olup düşey gerilme açısından yapı güvenli kabul edilebilir. Duvar kalınlıkları oldukça iyi olan yapıda düşey gerilmeler açısından bir sorun görülmemiştir.

Kayma gerilmeleri açısından bakıldığında $\tau_{em} = 0.10 + 0.5 \sigma$ bağıntısında düşey gerilme kritik kesitler için 0.9 MPa alınırsa $\tau_{em} = 0.1 + 0.5 \times 0.9 = 0.55$ MPa olarak bulunur. Yapıda bazı elemanlar düşey yükler altında kayma gerilmeleri açısından sınır gerilmelere yakın görülmektedir. Minarelerin kaideye birleştiği noktalar, büyük kubbenin kasnağı ve hünkar mahfillerinin altında bulunan sütunlarda 0.7-0.8 MPa aralığında kayma gerilmeleri görülmektedir. Kayma emniyetinden büyük olarak ortaya çıkan bu değerler, ana kubbenin kasnağı açmaya zorlamasından, mahfillerdeki döşemelerin büyük yerdeğiştirmeleri sonucunda oluşan zorlamalardan kaynaklanmaktadır.

Kabuk elemanlar olan kubbe ve tonozlara bakıldığında zaman ise büyük kubbenin kasnağına yakın eteklerinde ve hünkâr mahfillerinin üzerini örten tonozların mesnet bölgeleri yakınlarında 0.15 MPa civarında çekme gerilmeleri görülmektedir. Ayrıca duvarların farklı hareketleri üst örtüde zorlanmalara sebep olmaktadır.

5.3.4. Dinamik Analiz

Dinamik analizde, zamana bağılı olarak değişen yükler altında yapının davranışı incelenir. Statik analiz ile dinamik analiz arasındaki en büyük farkı, dinamik yer değiştirme sırasında ortaya çıkan atalet kuvvetleri teşkil eder. Yapıya etkiyen yükler dinamikse, zamana bağılı olarak meydana gelecek olan yer değiştirmelerin ivmeleri d'Alambert ilkesine göre atalet kuvvetleri ortaya çıkarır. Bu durumda yapı iki tür yükün etkisi altında kabul edilebilir. Bunlardan ilki, harekete sebep olan dış yük ve ikincisi de hareketin ivmelenmesine karşı koymaya çalışan atalet kuvvetleridir. Yapının kesitlerinde bu iki etkiye karşı koyacak kesit tesirleri meydana gelir. Bu sebeple iç kuvvetlerin hesap edilmesi için atalet kuvvetlerinin belirlenmesi lazımdır. Ancak atalet kuvvetleri de yer değiştirmelere ve dolayısıyla da iç kuvvetlere bağlıdır. Bu birbirine bağılı kapalı devreyi çözüp hesap yapabilmek, sistemin hareketi için yazılacak diferansiyel denklemin uygun sınır ve başlangıç şartları altında çözülmesi ile mümkün olur. Fakat bu çözümün yapılabilmesi için, problemin başlangıç koşullarının ve mesnedi ifade eden sınır şartlarının bilinmesine ihtiyaç vardır. Statik ve dinamik yükleri beraber taşıyan sistemlerin ekserisinde dinamik etkiler statik etkilere nazaran küçüktür. Bu durumda dinamik yüklerin etkisi, eşdeğer statik yükleme ile veya çarpma katsayısı gibi katsayılarla ya da güvenlik katsayısının değiştirilmesi yoluyla dikkate alınabilir. Ancak, kule türünden yüksek yapılarda, ağır makinelerin dinamik etkisi söz konusu olduğunda ve büyük açıklıklı köprülerde dinamik hesap yapılmalıdır [34].

Kule türünden yapılara minareleri de dâhil etmek mümkündür. Ayrıca, tarihi yığma yapılar gibi davranışı tam kestirilemeyen yapılarda da dinamik hesap yapmak oldukça faydalı bilgiler sağlar.

5.3.4.1. Modal Analiz

Modal analiz, öz değer analizi ya da Eigen-value analizi olarak bilinen, yapının serbest titreşim periyotları ve mod şekillerini belirlemek maksadıyla kullanılan bir araçtır. Yapı sisteminin kütle ve rijitlik matrisleri kullanılarak serbest titreşim periyotları ve modları belirlenebilmektedir.

Hırka-i Şerif Camii'ne ait sonlu eleman modeli Sap2000 yazılımı vasıtasıyla modal analize tabii tutulmuştur. Hesaba 50 adet mod dâhil edilmiştir. Genel olarak bu

modlar fazla sayıda görünse de kütle katılım oranları incelendiğinde daha fazlasının bile alınabileceği görülmektedir.

Bir serbest titreşim periyoduna ait olan mod şeklindeki titreşimin, yapının toplam kütlelerinin ne kadarını harekete geçirip salınım hareketine dâhil edebildiği kütle katılım oranı ile ifade edilir.

Türk Deprem Yönetmeliği'nde etkin kütle olarak tanımlanan modal kütlelerin toplamı için bir alt sınır verilmiştir. Hesaba katılması gereken yeterli titreşim modu sayısı, göz önüne alınan birbirine dik x ve y yatay deprem doğrultularının her birinde, her bir mod için hesaplanan etkin kütlelerin toplamının hiçbir zaman bina toplam kütlelerinin %90'ından daha az olmaması kuralına göre belirleneceği ifade edilmiştir. Fakat bu sınırı yakalamak tarihi yığma yapılarda az sayıda mod hesaba katılırsa mümkün olmamaktadır.

Betonarme veya çelik çerçeveli ve kat döşemeleri rijit diyafram olarak çalışan binalar için verilmiş olan bu oran tarihi yığma yapılarda, yapının geometrisine göre değişmekle birlikte, ancak 100 ve üzeri mod sayısında mümkün olabilmekte, bazı durumlarda da bu orana pratik olarak hiç ulaşamamaktadır.

Hırka-i Şerif Camii'nin modal analizinde ilk 50 modun kütle katılım oranları toplamı x ve y doğrultularında %70 olmaktadır. X doğrultusunda, yaklaşık 10 modda % 1 değişim görülmektedir. Bu değerler, mod sayısının daha da artırılması halinde çok yakınsak olmayan bir mod sayısında ancak bütün kütleyi harekete dahil etmek söz konusu olabileceğini gösterir. Ancak bu teorik hesabın pratik bir karşılığı ve önemi yoktur. Daha fazla mod sayısı ile hesap yapmak, işlem süresi ve pratik neticeler açısından değerlendirildiğinde dikkate değer bir hesap boyutu oluşturmaz (Tablo 5.2).

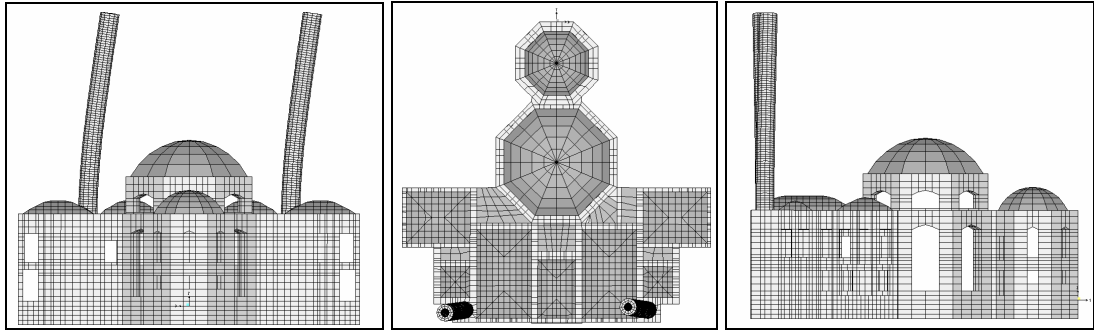
Y doğrultusunda ise durum daha katıdır. 38. moddan sonra bu doğrultuda kütle katılım oranı sabit bir şekilde seyretmektedir. Bağımsız kütle oranları her iki doğrultuda da 38. moddan sonra % 1'in altına inmektedir. Pratik olarak 50 mod sayısı ile elde edilen toplam etkin kütle oranının yükseltilemeyeceği söylenebilir. Bu, artan modlar titreşimlerin yapının genelini değil bir kısmını harekete geçirebilen yerel titreşimler olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.2. Serbest Titreşim Periyotları ve Kütle Katılım Oranları (U:Yer değiştirme, R:Dönme)

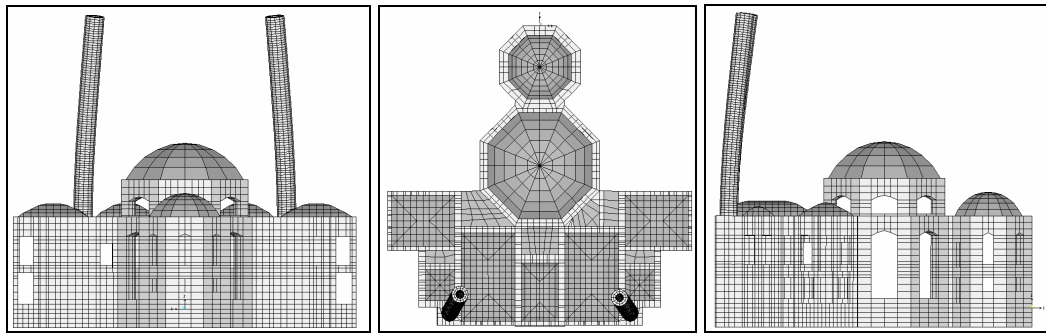
Modlar	Period (sn)	UX	UY	UZ	ΣUX	ΣUY	ΣUZ	ΣRX	ΣRY	ΣRZ
Mode 1	1,075	0,04	0,00	0,00	0,036	0,000	1,4E-10	0,00	0,19	0,06
Mode 2	1,074	0,00	0,03	0,00	0,036	0,026	4,5E-08	0,03	0,19	0,06
Mode 3	1,073	0,00	0,00	0,00	0,036	0,026	4,5E-08	0,03	0,19	0,07
Mode 4	1,072	0,00	0,01	0,00	0,036	0,036	9,3E-08	0,04	0,19	0,07
Mode 5	0,204	0,01	0,00	0,00	0,047	0,036	1,1E-07	0,04	0,20	0,09
Mode 6	0,203	0,00	0,01	0,00	0,047	0,045	4,6E-06	0,04	0,20	0,09
Mode 7	0,203	0,00	0,00	0,00	0,05	0,05	0,00	0,04	0,20	0,09
Mode 8	0,202	0,00	0,00	0,00	0,05	0,05	0,00	0,04	0,20	0,09
Mode 9	0,102	0,45	0,00	0,00	0,50	0,05	0,00	0,04	0,49	0,29
Mode 10	0,100	0,00	0,50	0,00	0,50	0,55	0,00	0,12	0,49	0,30
Mode 11	0,099	0,06	0,02	0,00	0,56	0,57	0,00	0,12	0,53	0,53
Mode 12	0,093	0,00	0,00	0,00	0,56	0,57	0,00	0,12	0,53	0,53
Mode 13	0,093	0,00	0,00	0,00	0,56	0,57	0,00	0,12	0,53	0,54
Mode 14	0,089	0,00	0,00	0,00	0,57	0,57	0,00	0,12	0,53	0,54
Mode 15	0,088	0,00	0,00	0,00	0,57	0,57	0,00	0,12	0,53	0,54
Mode 16	0,085	0,00	0,05	0,00	0,57	0,62	0,00	0,12	0,53	0,54
Mode 17	0,083	0,00	0,00	0,00	0,57	0,62	0,00	0,12	0,53	0,55
Mode 18	0,080	0,03	0,00	0,00	0,60	0,62	0,00	0,12	0,53	0,64
Mode 19	0,079	0,00	0,00	0,00	0,60	0,62	0,00	0,13	0,53	0,65
Mode 20	0,072	0,00	0,00	0,00	0,60	0,62	0,00	0,13	0,53	0,65
Mode 21	0,065	0,05	0,00	0,00	0,65	0,62	0,00	0,13	0,54	0,66
Mode 22	0,062	0,00	0,02	0,01	0,65	0,65	0,01	0,14	0,54	0,66
Mode 23	0,061	0,00	0,00	0,01	0,65	0,65	0,02	0,14	0,54	0,66
Mode 24	0,060	0,01	0,00	0,00	0,66	0,65	0,02	0,14	0,55	0,66
Mode 25	0,058	0,00	0,03	0,00	0,66	0,67	0,02	0,14	0,55	0,66
Mode 26	0,056	0,00	0,01	0,07	0,66	0,68	0,09	0,25	0,55	0,67
Mode 27	0,056	0,00	0,00	0,00	0,66	0,68	0,09	0,25	0,61	0,67
Mode 28	0,056	0,00	0,00	0,00	0,67	0,69	0,10	0,25	0,61	0,67
Mode 29	0,053	0,00	0,00	0,00	0,67	0,69	0,10	0,25	0,61	0,67
Mode 30	0,052	0,00	0,00	0,00	0,67	0,69	0,10	0,25	0,61	0,67
Mode 31	0,049	0,00	0,00	0,00	0,67	0,69	0,10	0,26	0,61	0,67
Mode 32	0,049	0,00	0,00	0,01	0,67	0,69	0,10	0,26	0,61	0,67
Mode 33	0,047	0,00	0,00	0,04	0,67	0,69	0,15	0,28	0,61	0,67
Mode 34	0,047	0,00	0,00	0,00	0,68	0,69	0,15	0,28	0,61	0,68
Mode 35	0,046	0,00	0,00	0,01	0,68	0,69	0,16	0,28	0,61	0,68
Mode 36	0,045	0,00	0,00	0,00	0,68	0,69	0,16	0,29	0,62	0,68
Mode 37	0,045	0,00	0,00	0,01	0,68	0,70	0,17	0,29	0,63	0,68
Mode 38	0,045	0,00	0,00	0,00	0,68	0,70	0,17	0,29	0,63	0,68
Mode 39	0,044	0,01	0,00	0,00	0,69	0,70	0,17	0,29	0,63	0,69
Mode 40	0,043	0,00	0,00	0,00	0,69	0,70	0,17	0,29	0,63	0,69
Mode 41	0,043	0,00	0,00	0,00	0,69	0,70	0,17	0,29	0,63	0,70
Mode 42	0,043	0,00	0,00	0,00	0,69	0,70	0,17	0,29	0,63	0,70
Mode 43	0,042	0,00	0,00	0,00	0,69	0,70	0,17	0,29	0,63	0,70
Mode 44	0,042	0,00	0,00	0,00	0,69	0,70	0,17	0,29	0,63	0,70
Mode 45	0,041	0,00	0,00	0,00	0,69	0,70	0,17	0,29	0,63	0,70
Mode 46	0,040	0,00	0,00	0,00	0,69	0,70	0,17	0,29	0,63	0,70
Mode 47	0,040	0,00	0,00	0,00	0,69	0,70	0,17	0,30	0,63	0,70
Mode 48	0,040	0,00	0,00	0,00	0,70	0,70	0,17	0,30	0,63	0,71
Mode 49	0,040	0,00	0,00	0,00	0,70	0,70	0,17	0,30	0,64	0,71
Mode 50	0,040	0,00	0,00	0,00	0,70	0,70	0,17	0,30	0,64	0,71

Ana kütleinin X doğrultusunda yanal yer değiştirme ve dönme hareketini gösteren 9. modun kütle katılım oranı % 45, Y doğrultusunda yanal yer değiştirme hareketini gösteren 10. modun kütle katılım oranı ise % 50 olarak hesaplanmıştır. Bu iki doğrultu arasındaki fark, yapının söz konusu doğrultularda sahip olduğu rijitlikle bağlantılıdır.

Modal analiz neticesinde elde edilen yapı serbest titreşim modlarının ilk yirmisine ait titreşim şekilleri aşağıda verilmiştir. (şekil 5.37-5.50) İlk modlar, minarenin X ve Y doğrultularındaki yanal hareketini göstermektedir. Ana yapı kütleline oranla ince ve uzun bir yapıda olan narin minarelerin titreşimleri, ilk modlara tamamen hakimdir. Minareye ait modlar 9. moda kadar devam etmektedir. 9. ve 10. modlar yapının tümünde hâkim olan X ve Y doğrultularındaki yanal yer değiştirme ve dönme hareketlerini kapsar. Sonraki modlarda ise kütle katılımı oldukça düşük seviyelerde gerçekleşmektedir.

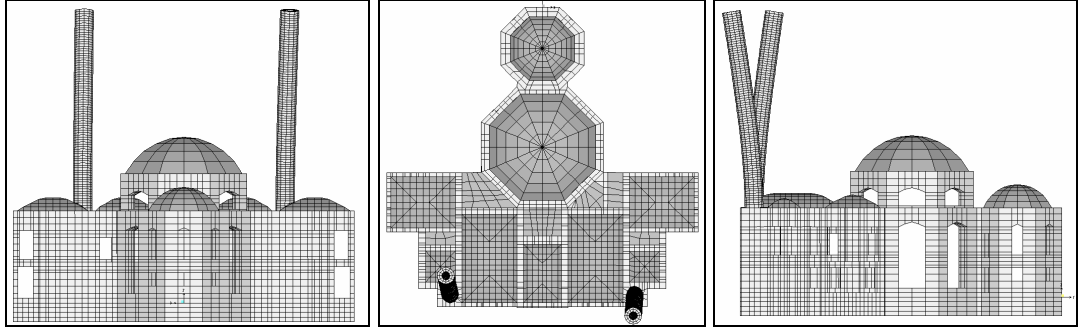


şekil 5.37. Mod 1, $T = 1.075$ s – Minarelerin x doğrultusunda yanal hareketi

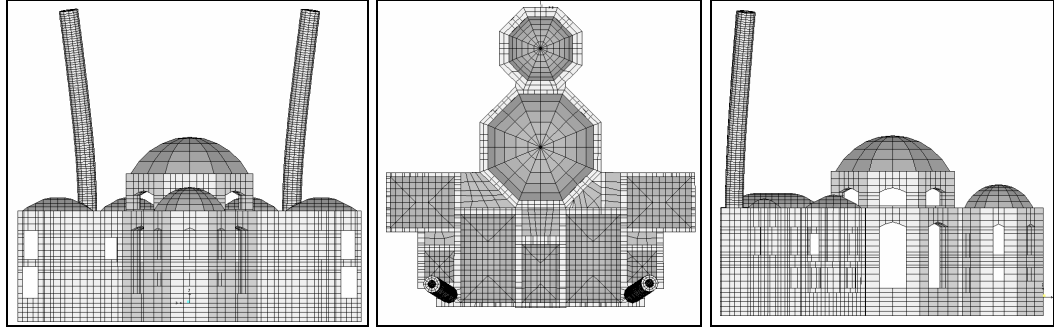


şekil 5.38. Mod 2, $T = 1.074$ s – Minarelerin x ve y doğrultusunda yanal hareketi

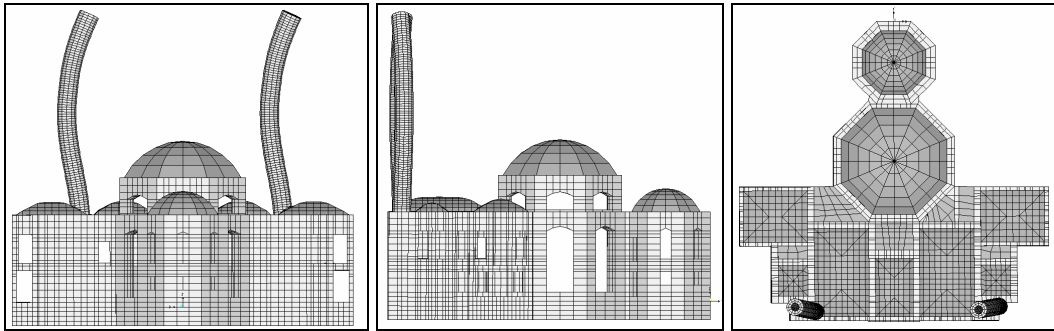
İlk 20 mod arasında kubbelerin açılmaya zorlandığı bir mod şekli görülmemektedir. Aynı durum tonozlar için de söz konusudur. Dolayısıyla kubbe ve tonozlarda etkin bir mod şekli bulunmadığından örtü sisteminin oldukça rijit ve küçük periyotlarda titreşim yapmakta olduğu sonucuna varılmıştır. şekillerde yapının ilk 20 modu önden, yandan ve plan düzleminde üç ayrı şekilde gösterilmiştir.



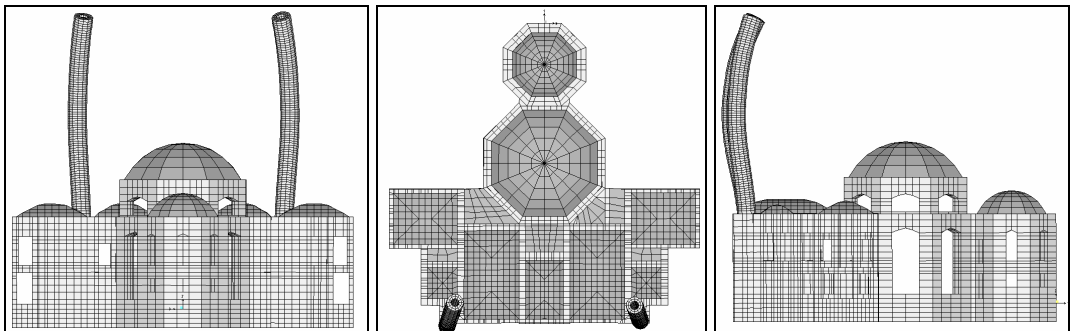
Şekil 5.39. Mod 3, $T = 1.073$ s–Minarelerin y doğrultusunda yanıl hareketi



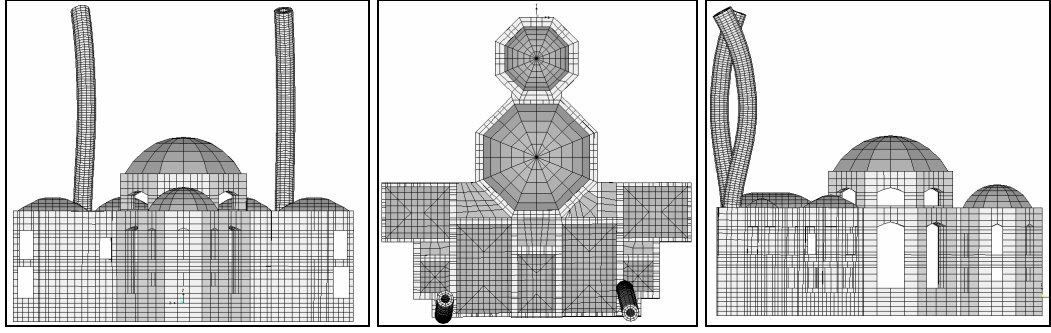
Şekil 5.40. Mod 4, $T = 1.072$ s–Minarelerin x ve y doğrultusunda yanıl hareketi



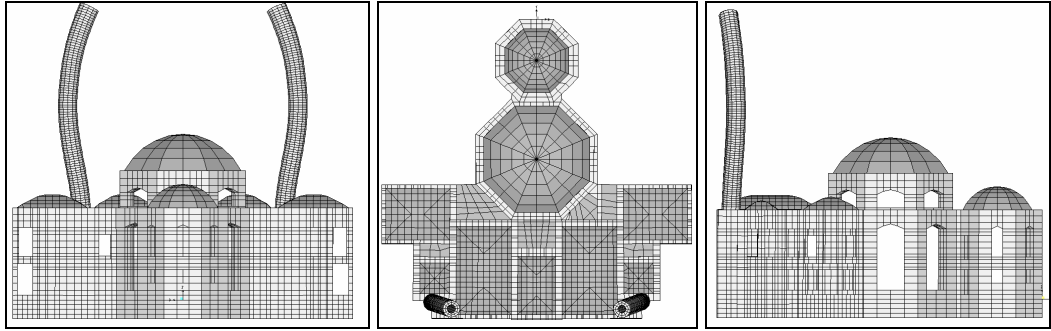
Şekil 5.41. Mod 5, $T = 0.204$ s–Minarelerin x doğrultusunda yanıl hareketi



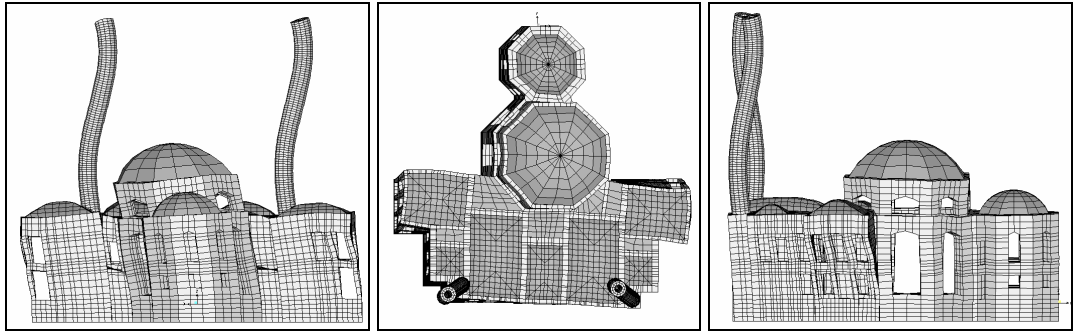
Şekil 5.42. Mod 6, $T = 0.203$ s–Minarelerin x ve y doğrultusunda yanıl hareketi



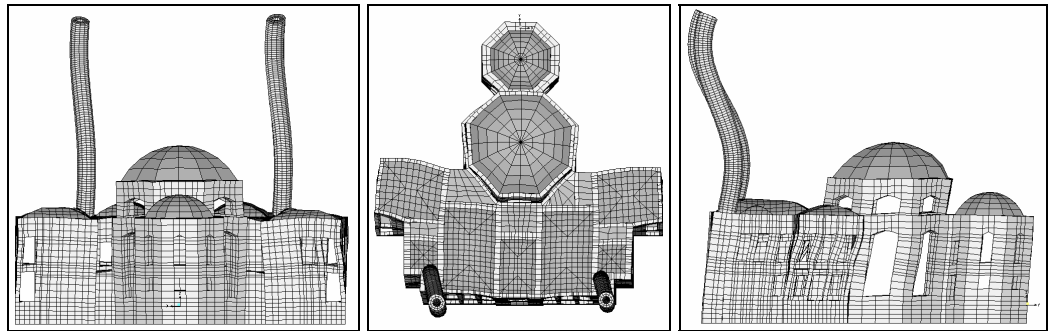
Şekil 5.43. Mod 7, $T = 0.203$ s–Minarelerin y doğrultusunda yanıl hareketi



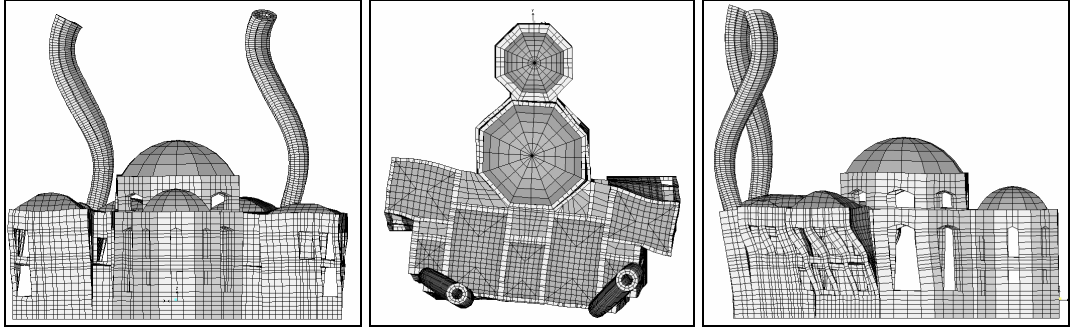
Şekil 5.44. Mod 8, $T = 0.202$ s–Minarelerin x doğrultusunda yanıl hareketi



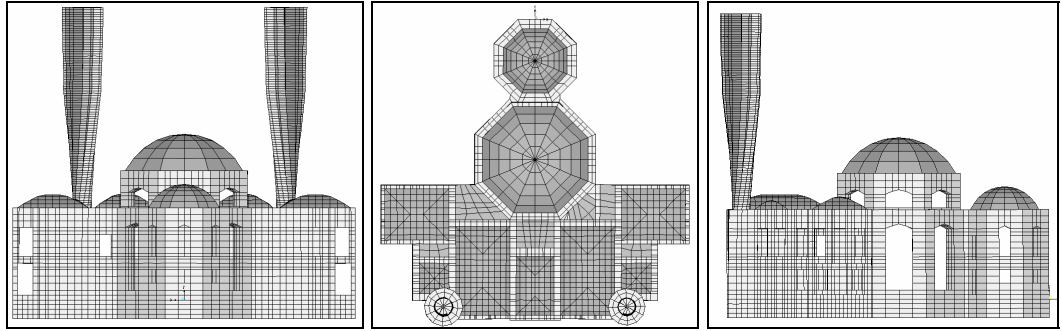
Şekil 5.45. Mod 9, $T = 0.102$ s–Burulma hareketi (1.Hâkim Mod)



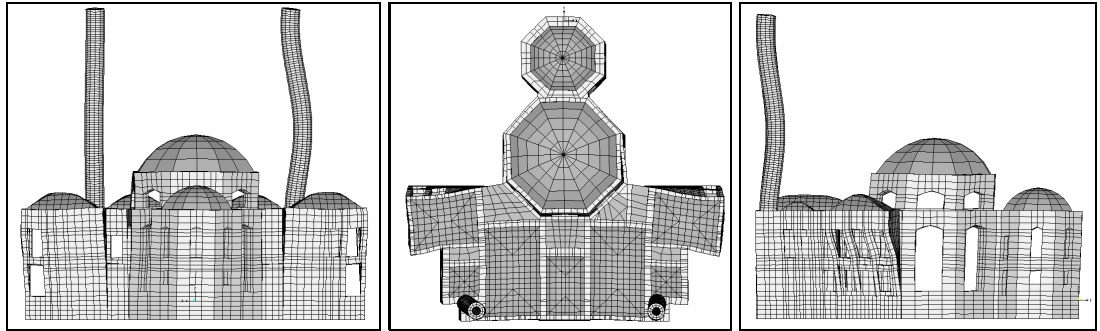
Şekil 5.46. Mod 10, $T = 0.100$ s – y doğrultusunda ötelenme hareketi (2. Hâkim Mod)



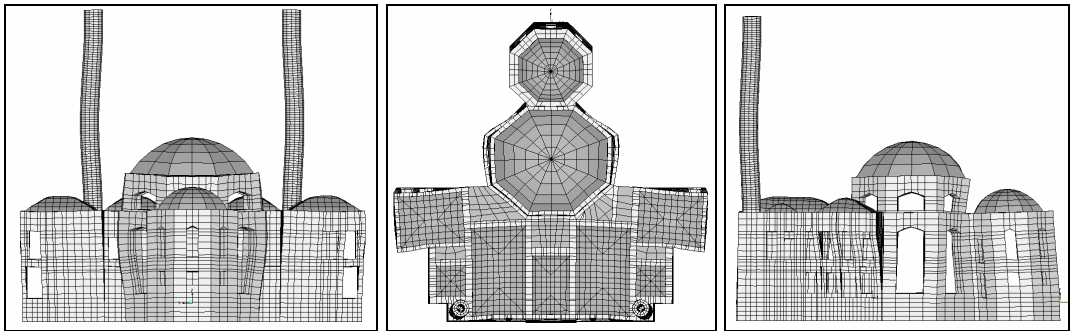
Şekil 5.47. Mod 11, $T = 0.099$ s – Burulma hareketi



Şekil 5.48. Mod 12, $T = 0.093$ s – Minarelerin açılma hareketi

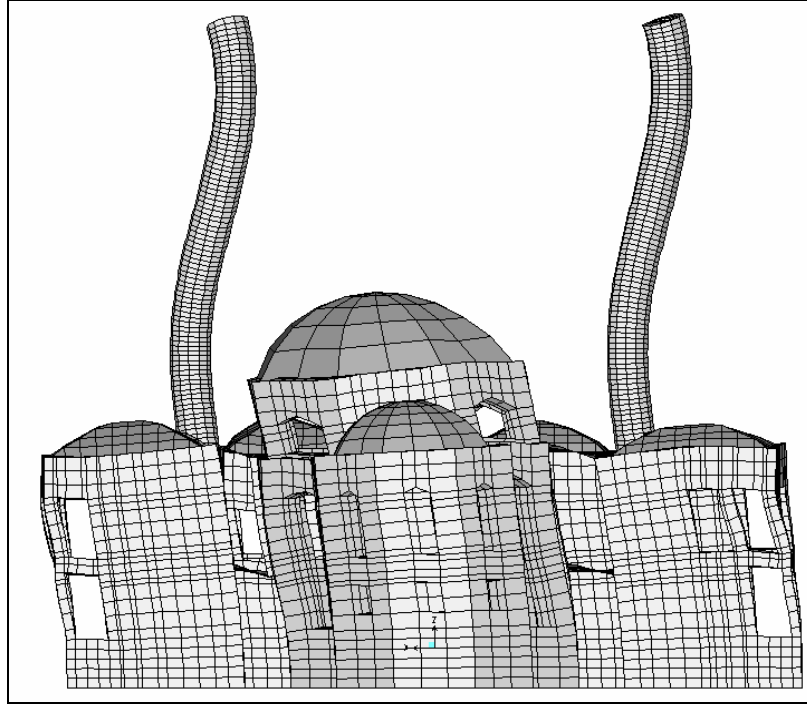


Şekil 5.49. Mod 19, $T = 0.079$ s – Yapının y doğrultusunda hareketi

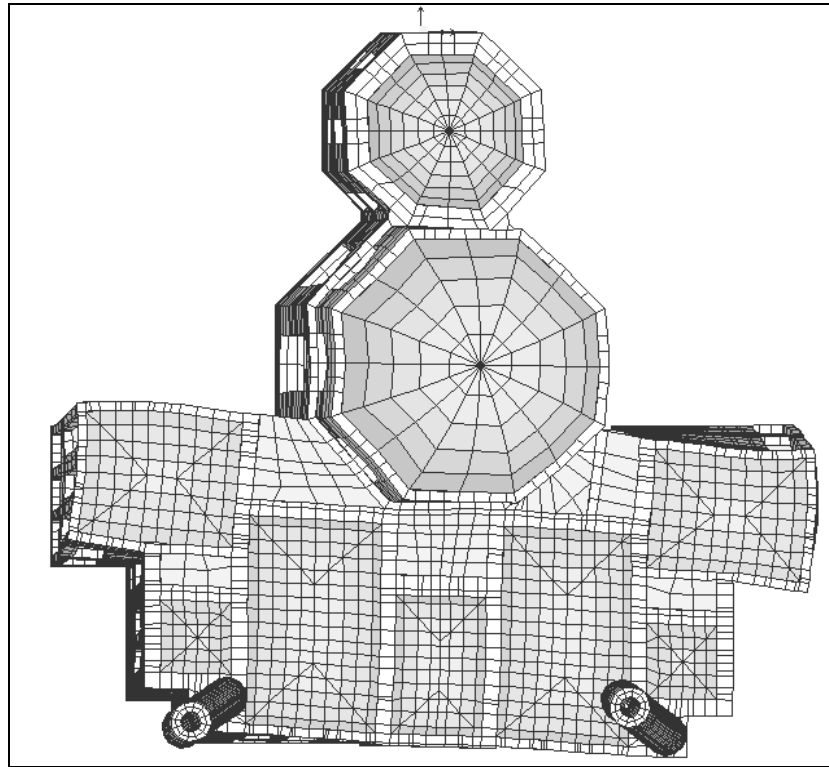


Şekil 5.50. Mod 20, $T = 0.072$ s – Yapının y doğrultusunda hareketi

Yapının hâkim modları ise aşağıdaki şekillerde detaylı olarak gösterilmiştir (Şekil 5.51-56).



Şekil 5.51. Mod 9, $T = 0.102$ s – Burulma hareketi - Önden (1.Hâkim Mod)

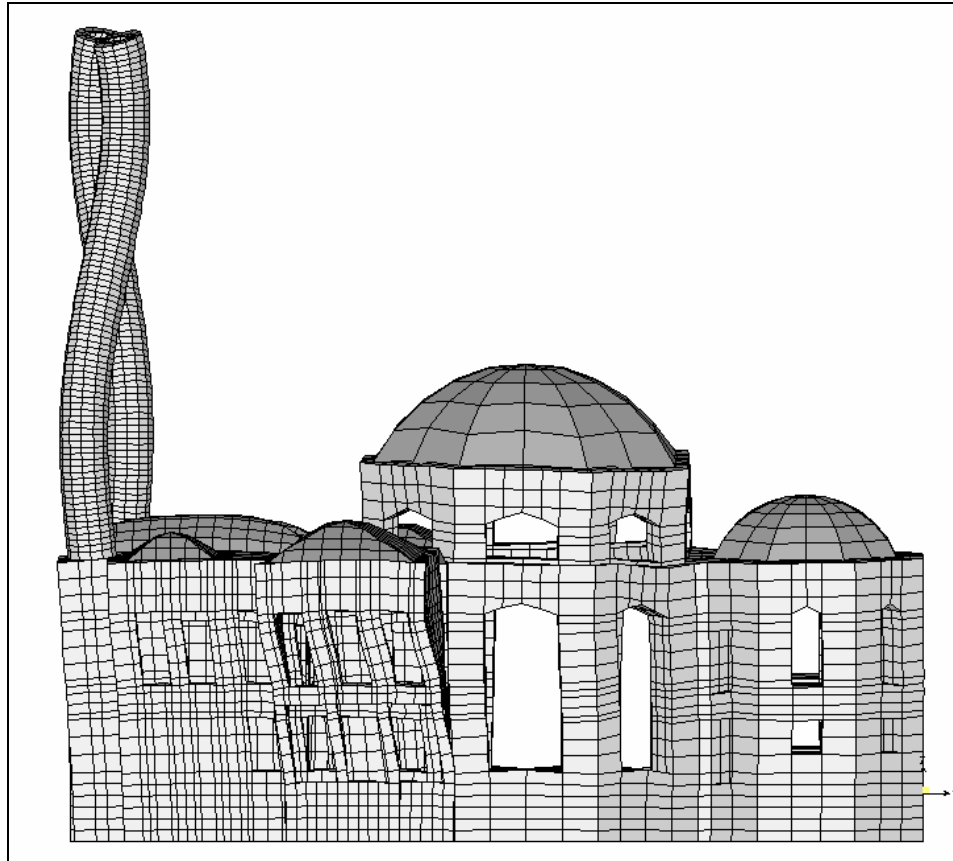


Şekil 5.52. Mod 9, $T = 0.102$ s–Burulma hareketi-Plan (1.Hâkim Mod)

Yapının plan düzleminde görüldüğü gibi ilk hâkim periyodu burulma şeklindedir. İlk hâkim modun burulma modu şeklinde ortaya çıkması yapının planda düzensiz olması ve mekânların plan düzleminde düzgün dağılmamasından kaynaklanmaktadır. Bu modun şekil değiştirmiş halinden izlendiği üzere, Hırka-i Şerif dairesi ile caminin

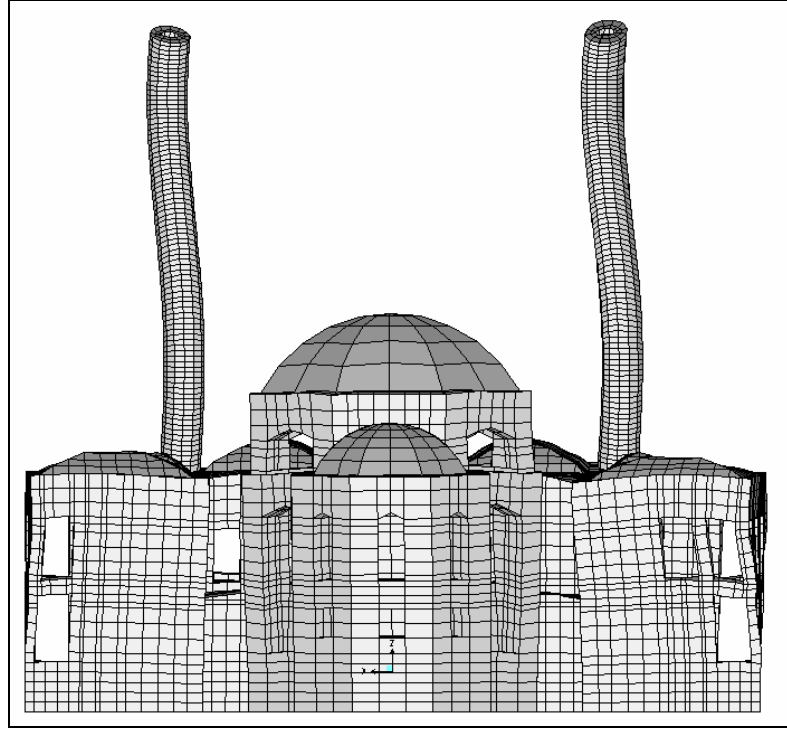
ana mekânı olan harim, x doğrultusunda büyük, y doğrultusunda ise küçük bir hareketle burulma şekil değiştirmesine katılmaktadır. Bu harekette, y doğrultusunda küçük şekil değiştirmeler, o doğrultuda iki kubbeli yapının birbirini desteklemesinden kaynaklanmaktayken, x doğrultusunda her iki yapı da desteksiz olduğu için x doğrultusundaki şekil değiştirmeler beklendiği gibi de büyük olarak ortaya çıkmıştır. Aşağıdaki şekilde ise yan cepheden 1. hâkim titreşim moduna ait şekil değiştirmiş durum gösterilmiştir.

Birinci hâkim titreşim modu, yapının modal çözümlemesinde 9. Modda ortaya çıkmaktadır. Bu modun kütle katılım oranlarına bakıldığında zaman X yönünde yer değiştirmeye binanın toplam kütlelerinin % 45'i katılmıştır. Y yönünde ise kütle katılım oranı % 1'den daha küçük bir değerde kalmıştır. Bu etkin kütle oranlarına bakıldığında zaman birinci modun aslında X doğrultusunda olduğu görülür. X doğrultusunda alenen baskın olan bu modun burulma hareketinin altında, $R_y = \% 49$ ile, dönme hareketini ifade eden oranın ulaştığı değer yatmaktadır (Tablo 5.2).

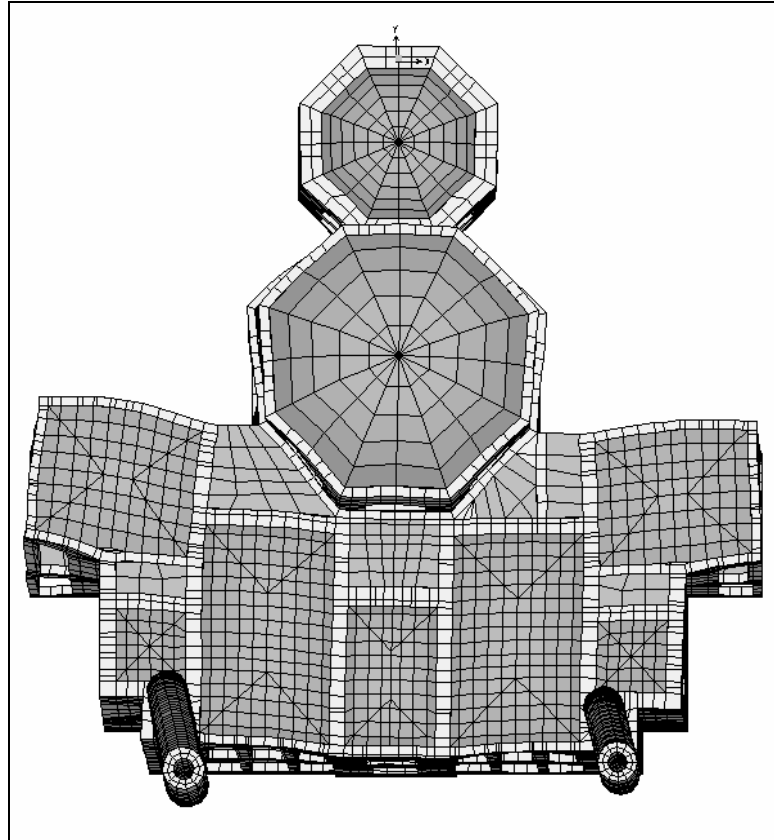


Şekil 5.53. Mod 9, $T = 0.102$ s –Burulma hareketi-Yandan (1.Hâkim Mod)

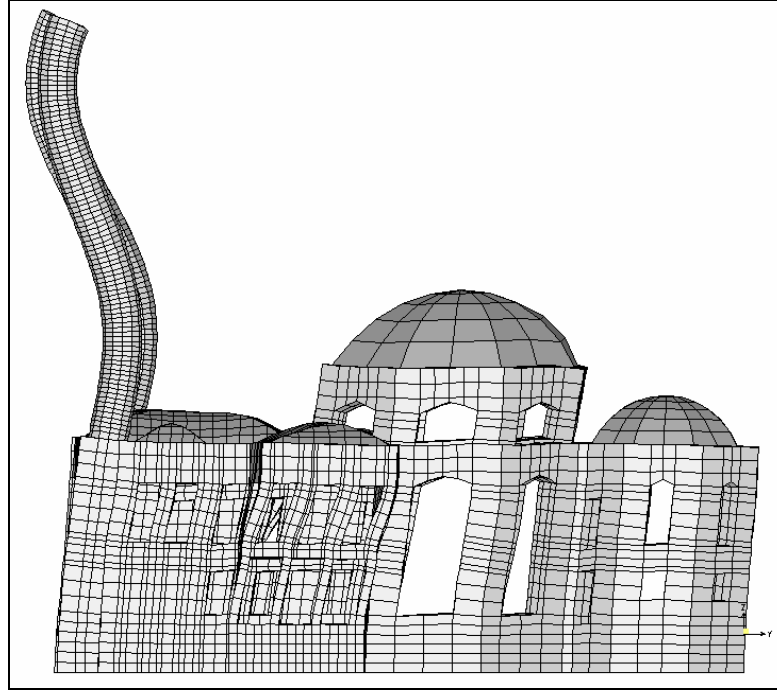
Yapıya ait 2. Hâkim titreşim moduna ait şekil değiştirmiş durum aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir (Şekil 5.54, 5.55, 5.56).



Şekil 5.54. Mod 10, $T = 0.100$ s – y doğrultusunda hareket - Önden (2.Hâkim Mod)



Şekil 5.55. Mod 10, $T = 0.100$ s – y doğrultusunda hareket - Plan (2.Hâkim Mod)



Şekil 5.56. Mod 10, $T = 0.100$ s – y doğrultusunda hareket - Yandan (2.Hâkim Mod)

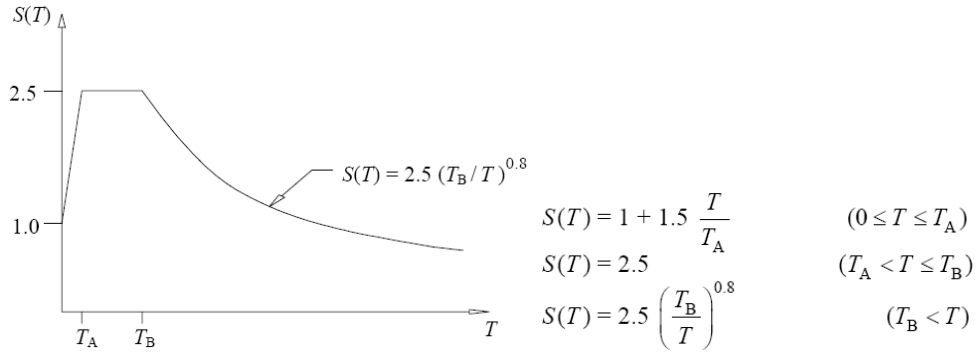
5.3.4.2. Davranış Spektrumu Analizi

Gelecek yıllarda İstanbul’u etkilemesi muhtemel depremlerin, şehrin takriben 20 km güneyinden geçen Kuzey Anadolu Fay Hattı’nın Marmara Denizi’ndeki uzantısı olan graben sistemindeki hareketten kaynaklanacağı tahmin edilmektedir. Alet büyüklüğü yaklaşık olarak $M_s = 7$ tahmin edilen bu depremin dönüş periyodu 100 yıldır. Bu depremden daha küçük depremlerin olma ihtimali de mevcuttur. Daha sık görülme ihtimali bulunan bu nispeten küçük olan depremler, (aletsel büyüklüğü $M_s=5$ civarında olan depremler) için de analiz yapmak, yapı davranışını görmek ve muhtemel hasarları öngörmek açısından faydalı olabilir. Yapının yer hareketi karşısındaki dinamik davranışı aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{1\}\ddot{u}_g$$

Bu denklemde, $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ yapının sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini ifade eder. $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$ ve $\{u\}$ sırasıyla yapının ivme, hız ve yer değiştirme vektörlerini, $\ddot{u}_g$ ise yer ivmesini göstermektedir. Bu denklem sistemi, davranış spektrumundan her bir mod için elde edilen değerlerin süperpozisyonu ile çözülür. Yer ivmesi yapıya sayısal davranış spektrumu şekline getirilerek uygulanır. 3 doğrultuda uygulanan yükleme ile yapıdaki gerilme ve yer değiştirmeler izlenir. En büyük gerilme ve yer değiştirme değerleri her bir mod için ayrı ayrı hesaplanır.

Spektral eğriler sadece en büyük değeri verecek şekilde hazırlandıkları için ve belirli bir andaki çeşitli modların katkılarının bulunmasında yeterli olmadığından matematiksel bir yaklaşıma ihtiyaç duyulur. Bütün modların en büyük katkılarının aynı zamanda olduğunu kabul ederek bir üst sınır elde edilir. Mutlak Değerlerin Toplamı şeklinde tüm modların katkıları birleştirilebilir. Fakat bu abartılı büyüklükte bir değere ulaştığı için genellikle boyutlamada kullanılmaz. Bunun yerine Karelerin Toplamının Karekökü (SRSS) kuralı ile serbest titreşim frekansları ayrık olan sistemlerde elde edilen değer zaman tanım alanındaki çözümlere oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu kuralın kısıtlamalarını ise Tam Karesel Birleştirme (CQC) kuralıyla ortadan kaldırmak mümkün olmuş, bu kural serbest titreşim frekansları birbirine yakın olan sistemler için de kullanılabilmiştir. Modların karşılıklı etkileşimi ihmal edildiği takdirde CQC ve SRSS kuralları aynı sonucu vermektedir. Bu birleştirmelerle birlikte zaman tanım alanında dinamik bir hesaba gerek kalmadığı söylenebilir. Fakat depremin dinamik özelliklerini içeren spektrum eğrileri kullanıldığı için bu yöntem de aslında dinamik bir yöntemidir. Davranış spektrumu analizinin, zaman tanım alanında analize göre büyük kolaylıklar sağladığı da söylenebilir [24].



Şekil 5.57. 2007 Türk Afet Yönetmeliği Elastik İvme Spektrumu

2007 Deprem Yönetmeliği'nde, deprem yüklerinin belirlenmesi için esas alınacak olan Spektral İvme Katsayısı, $A(T) = A_0 \times I \times S(T)$ şeklinde ifade edilmiştir. %5 sönüm oranı için tanımlanan Elastik İvme Spektrumu'nun ordinatı olan ve $S_{ae}(T) = A(T) \times g$ ifadesiyle gösterilen Elastik Spektral İvme, Spektral İvme Katsayısı ile yerçekimi ivmesi g 'nin çarpımına karşı gelmektedir (Şekil 5.57). Ayrıca, aynı yönetmeliğin 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 önerilmiştir.

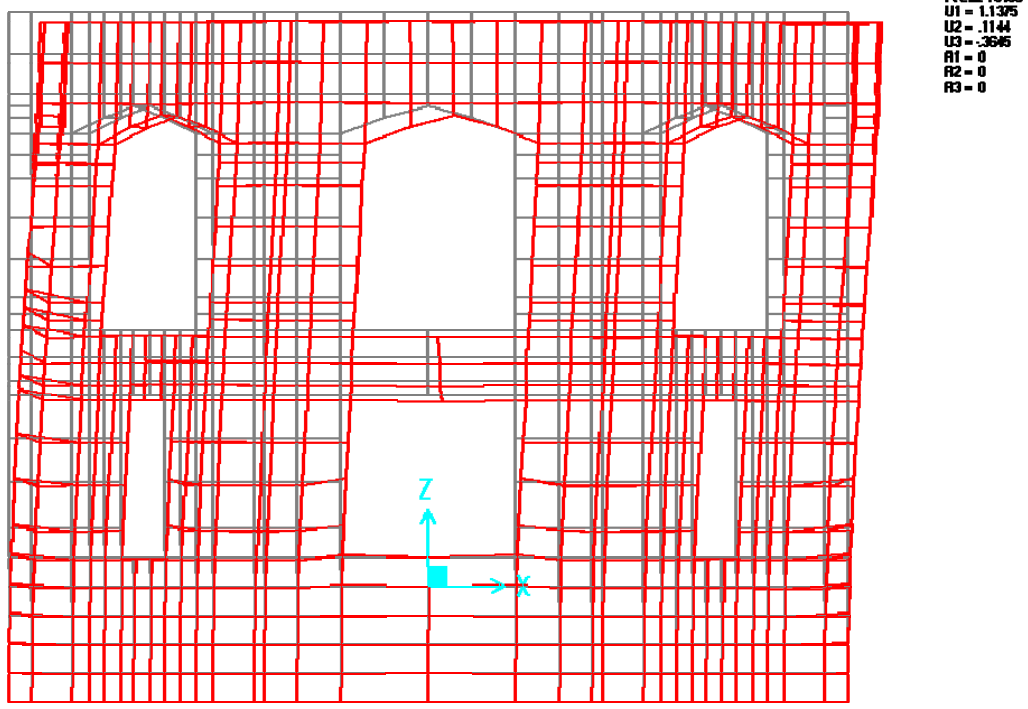
Yapının davranış spektrumu analizine ait şekil değiştirmiş hali aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 5.58). Minareler deprem kuvvetine, narin yapılarıyla ana yapıya göre oldukça fazla yer değiştirmeye cevap vermektedir.

X yönündeki deprem yüklemesine ait şekil değiştirme ve gerilme diyagramları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Bu yöndeki depremde yapı y doğrultusuna göre daha zayıftır. Yapıda kritik değerlere ulaşması beklenen bölümler, harim mekânının kemerleri, büyük kubbe ve hünkâr mahfilleridir. Ayrıca minarelerin yapıya bağlandığı kesitlerde de önemli gerilme ve şekil değiştirmeler gözlenmesi beklenmektedir. Özellikle harim bölümünde saçak kotunda 1.14 mm mertebesinde bir yer değiştirme görülmektedir (Şekil 5.58).

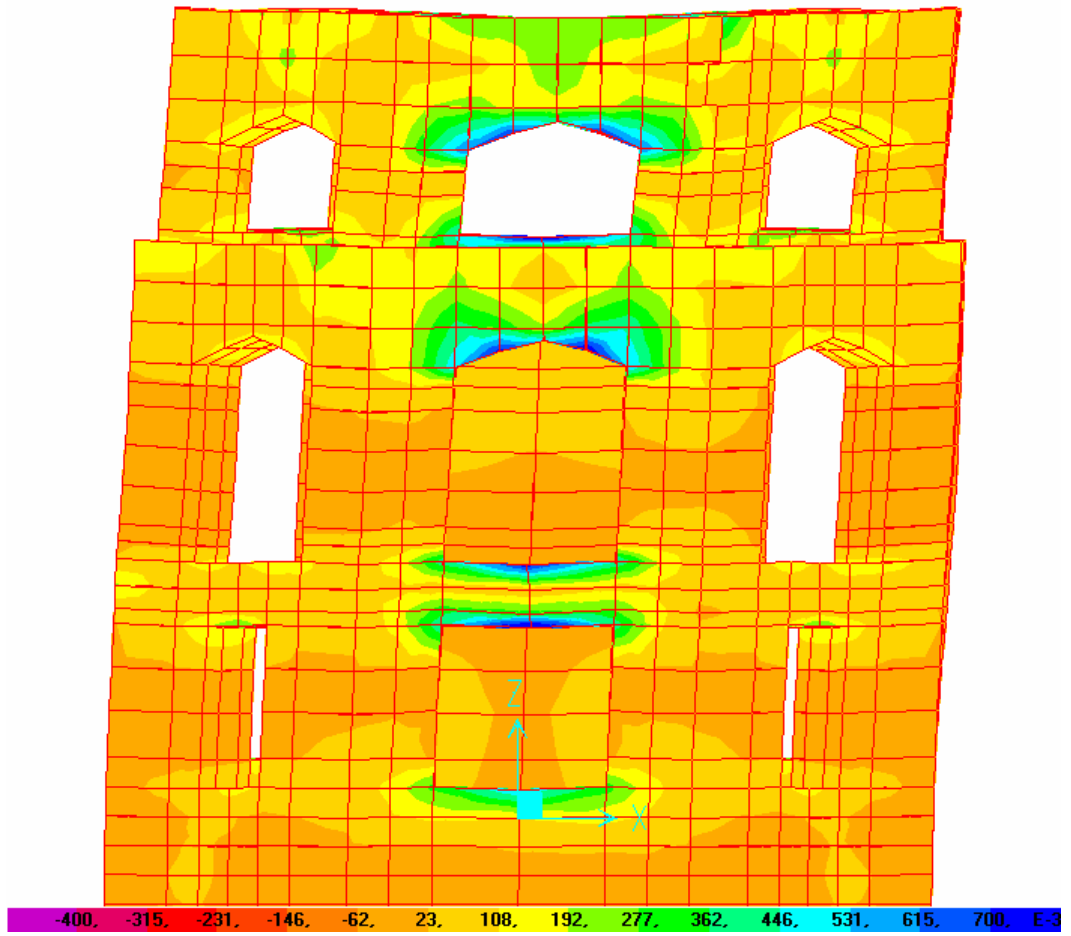
Performans seviyeleri yer değiştirme sınırlarının Hasarsızlık Beklentisi Performansı için d/h oranı için 0.0005 değerinin dikkate alınacağı hatırlanırsa ana kubbe kaidesindeki saçak kotu yer değiştirmesi 1.14 mm ve yapının yüksekliği 13885 mm alınarak $1.14/13885 = 0.000082$ değeri bulunur. Bu durumda yapının Hasarsızlık beklentisi performans seviyesinde olduğu söylenebilir. Kültürel değer korunması performans seviyesinde ise bu sınır 0.001 şeklindedir.

Hünkâr mahfillerindeki saçak kotu yer değiştirmesi 0.95 mm hesaplanmıştır. Yukarıdaki hesabı hünkâr mahfilinin saçak yüksekliği 9030 mm alarak tekrarlırsak $0.95/9030 = 0.0001$ değerine ulaşılmaktadır. Bu değer yine hasarsızlık beklentisi performans seviyesinde kalmaktadır.

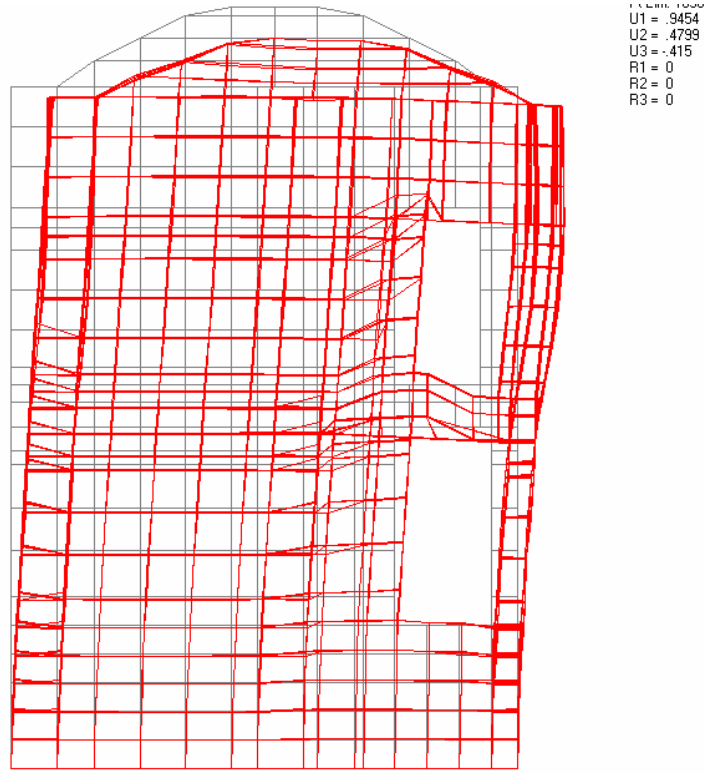
G+Q+EX yüklemesinde gerilme diyagramına da bakıldığında, giriş aksında bulunan kemerlerin alt bölümlerinde 0.7 MPa'a varan çekme gerilmeleri görülmektedir. Bu çekme gerilmelerinin kemerde çatlağa sebep olacağı söylenebilir. Fakat yerinde böyle bir çatlağa rastlanılmamaktadır. Camiyle ilgili kayıtlarda harim mekânının kemerlerinde çatlaklardan bahsedilmektedir. Muhtemelen depremde böyle bir çatlak oluşmuş olsa da yapılan onarımlar sırasında çatlaklar doldurulmuştur.



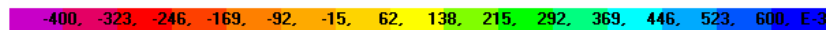
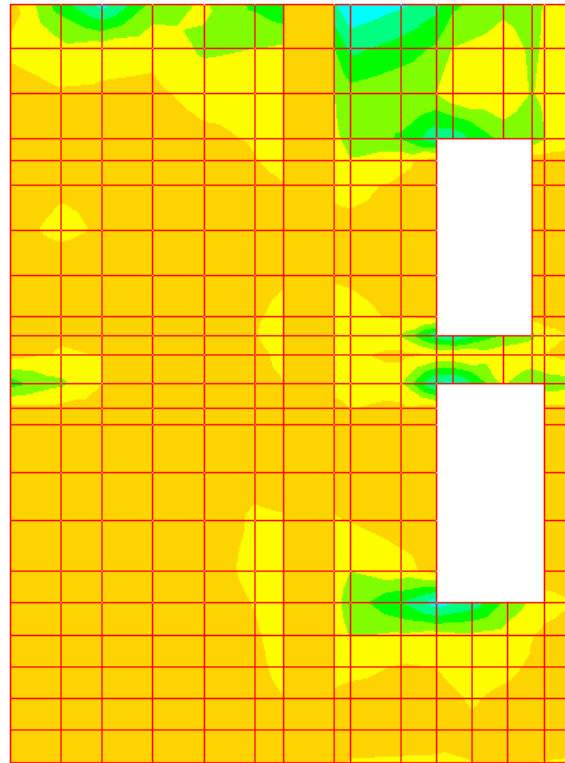
Şekil 5.58. (G + Q + EX) Ana Kubbe Kaidesindeki Yer Değişirme = 1.14 mm



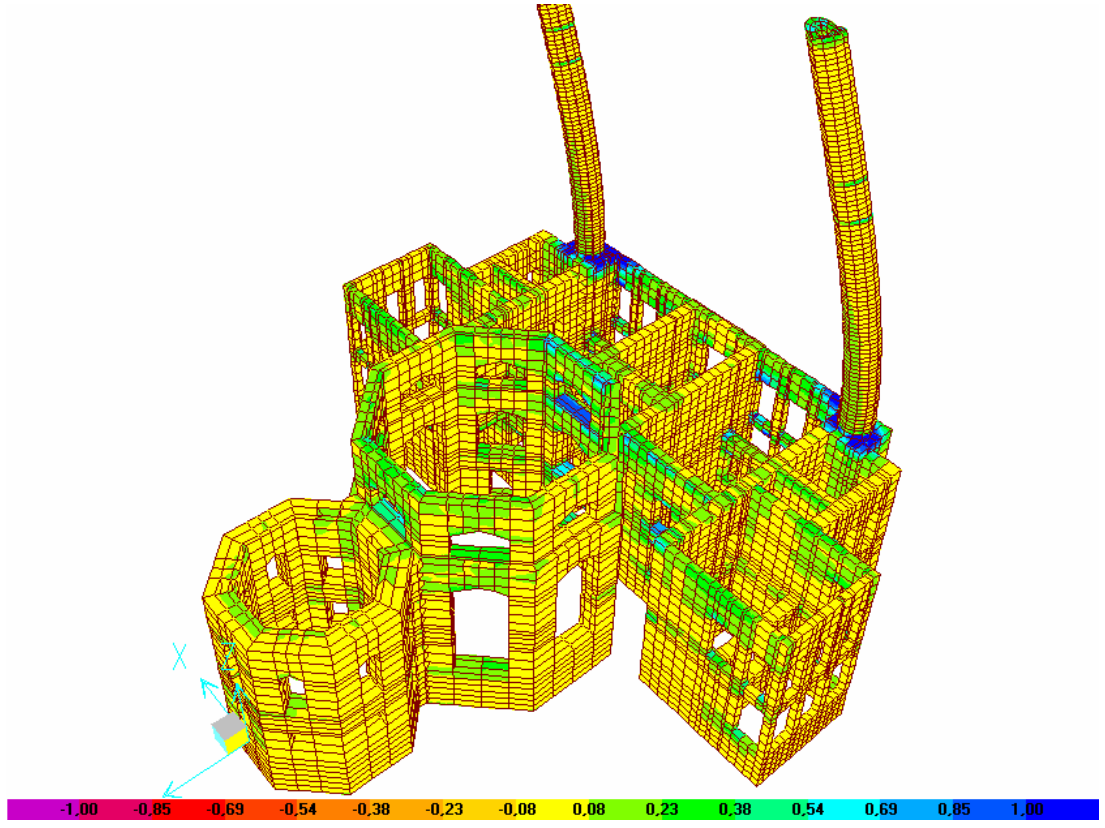
Şekil 5.59. (G + Q + EX) Cami Harim Duvarlarında S11 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa



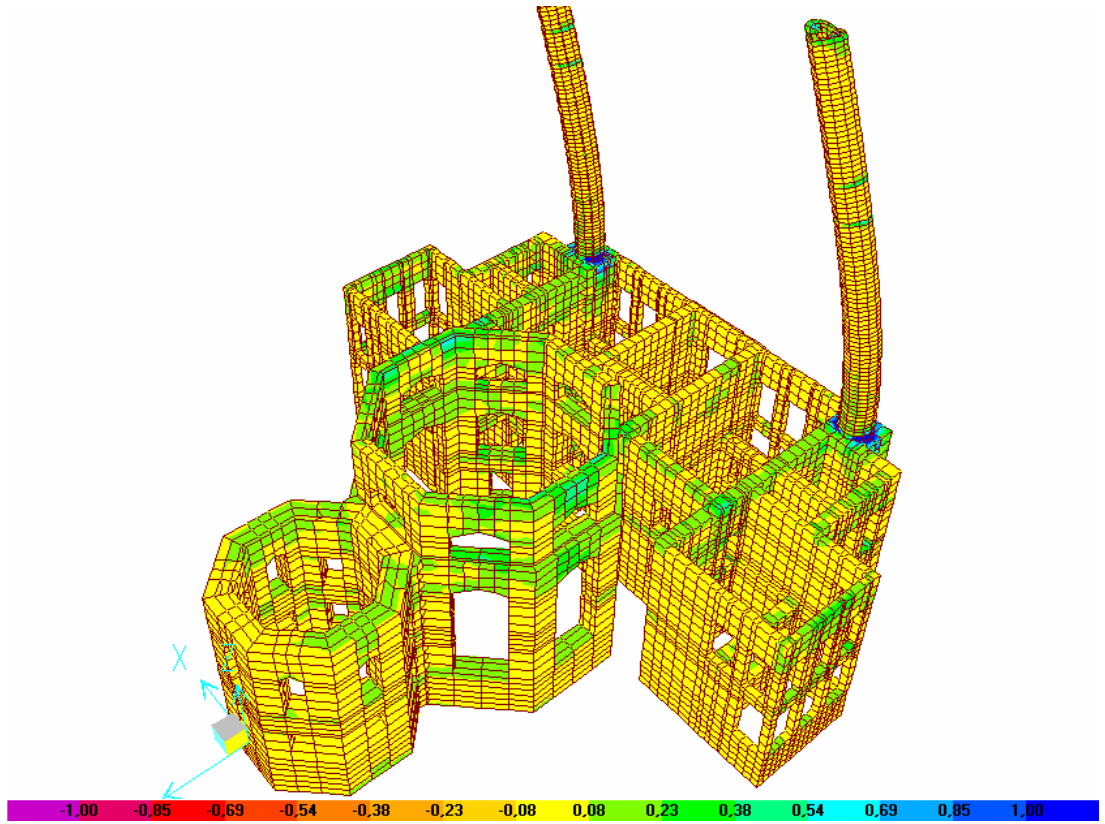
Şekil 5.60. (G + Q + EX) Sağ Hünkâr Dairesi Saçak Yer Değiştirmesi = 0.95 mm



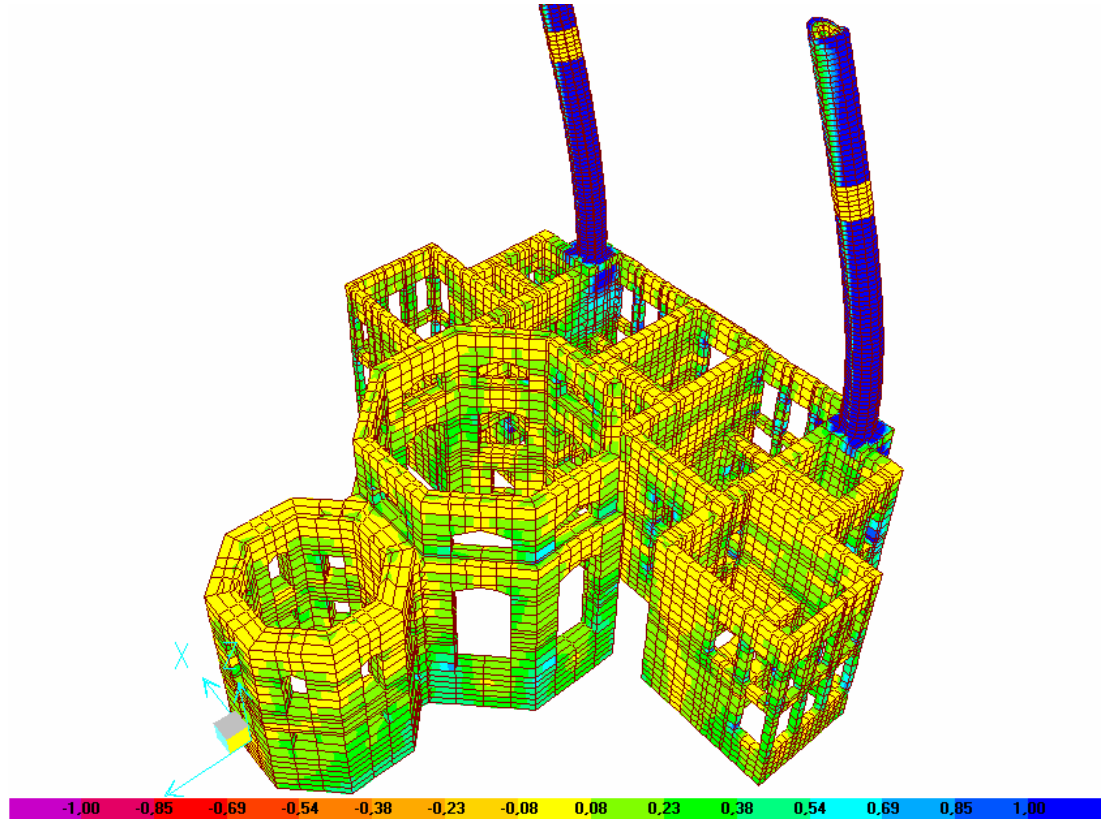
Şekil 5.61. (G + Q + EX) Sağ Hünkâr Dairesinin Duvarında Gerilmeler 10^{-3} MPa



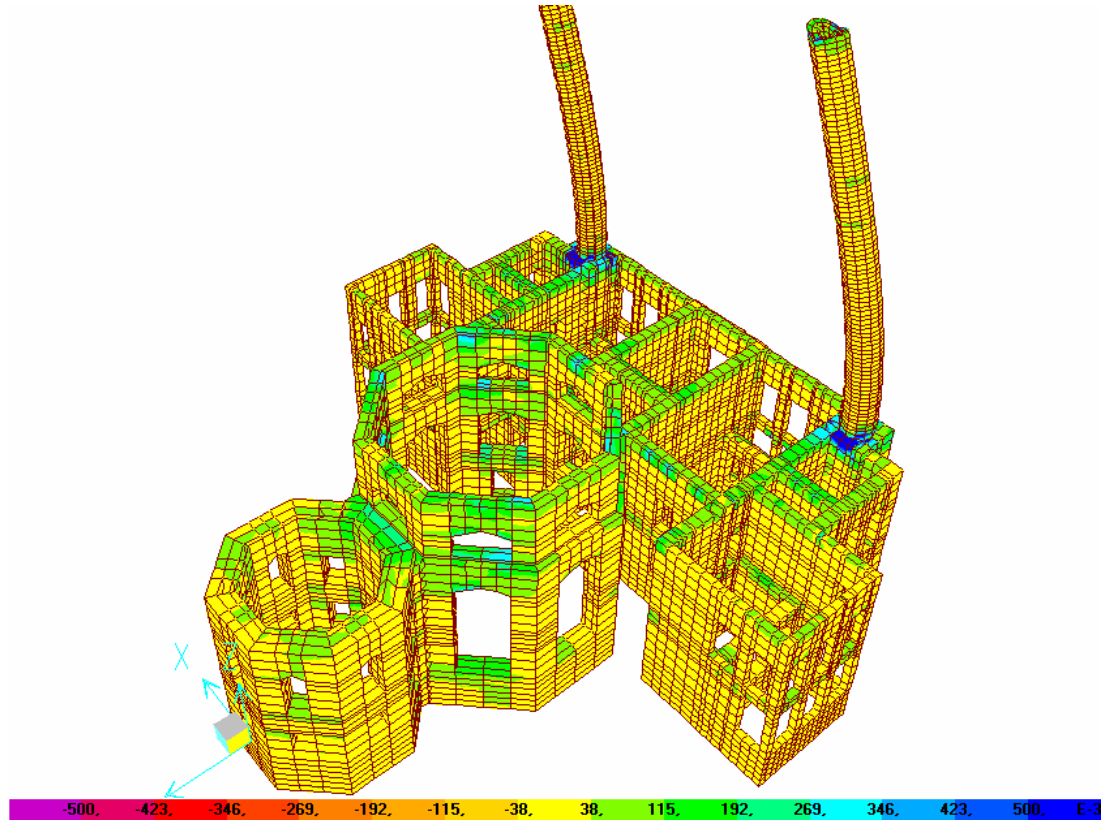
Şekil 5.62. (G + Q + EX) S11 Gerilmeleri, MPa



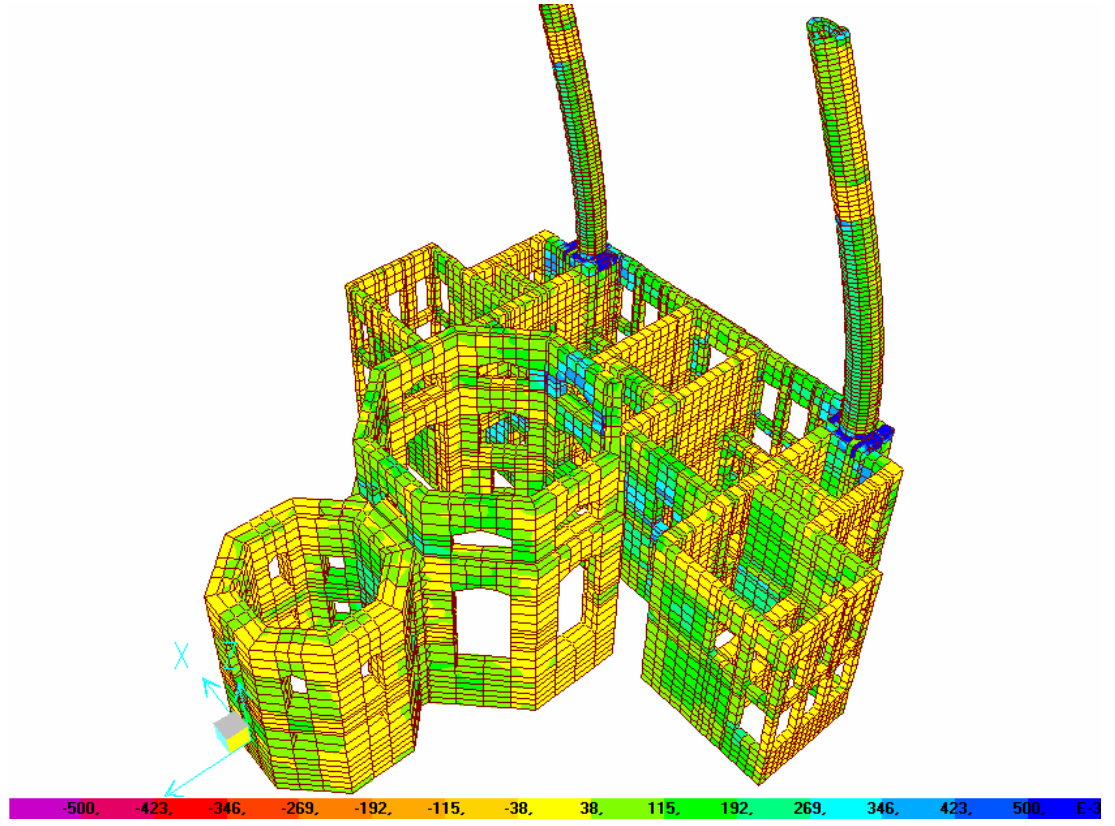
Şekil 5.63. (G + Q + EX) S22 Gerilmeleri, MPa



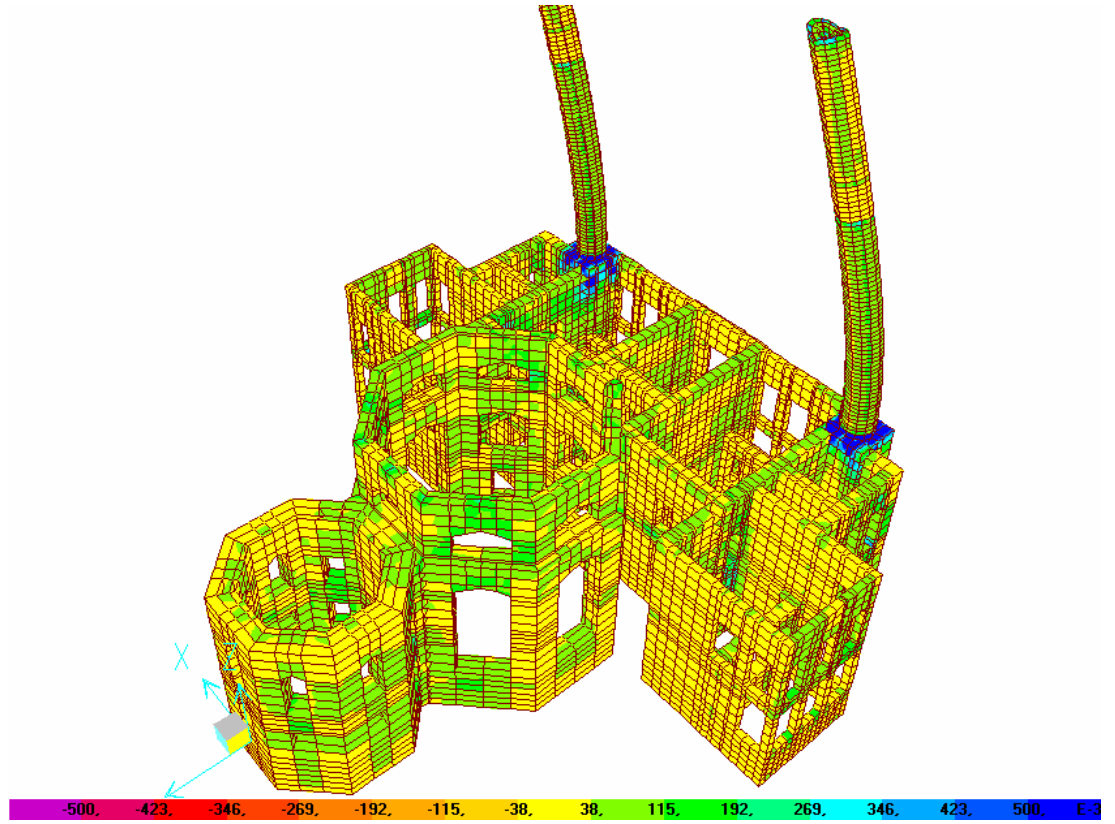
Şekil 5.64. (G + Q + EX) S33 Gerilmeleri, MPa



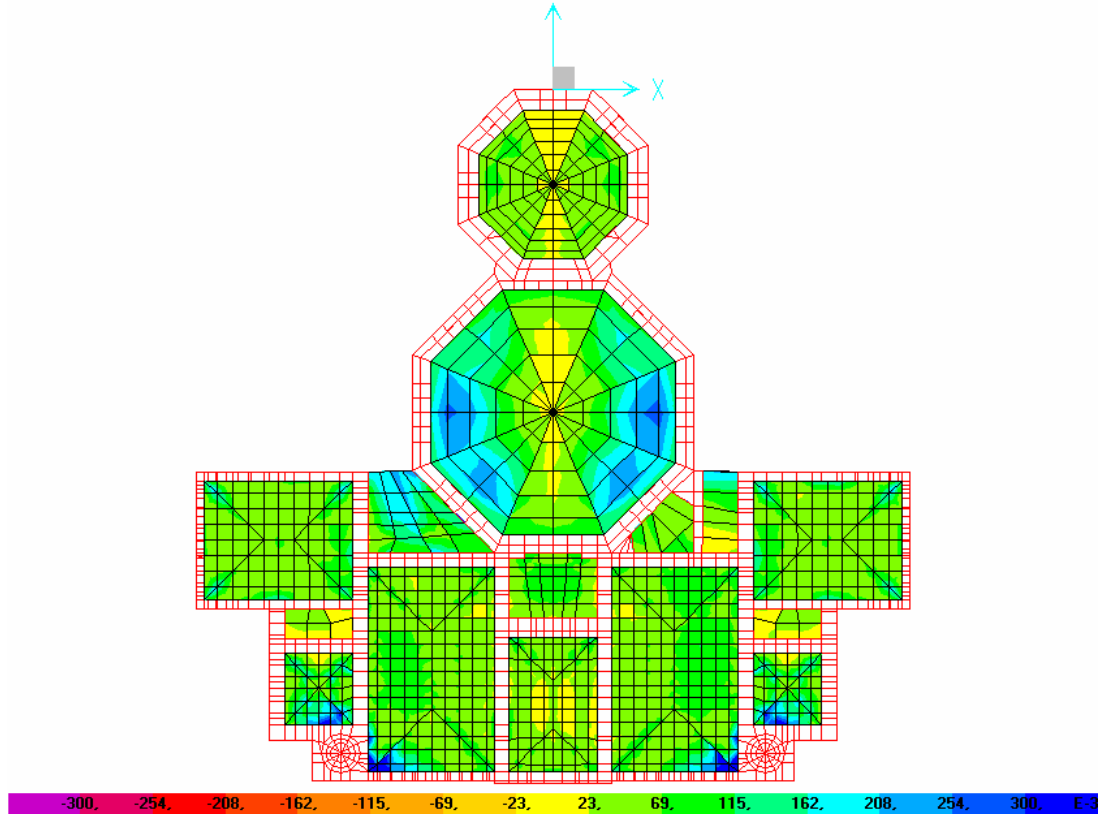
Şekil 5.65. (G + Q + EX) S12 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa



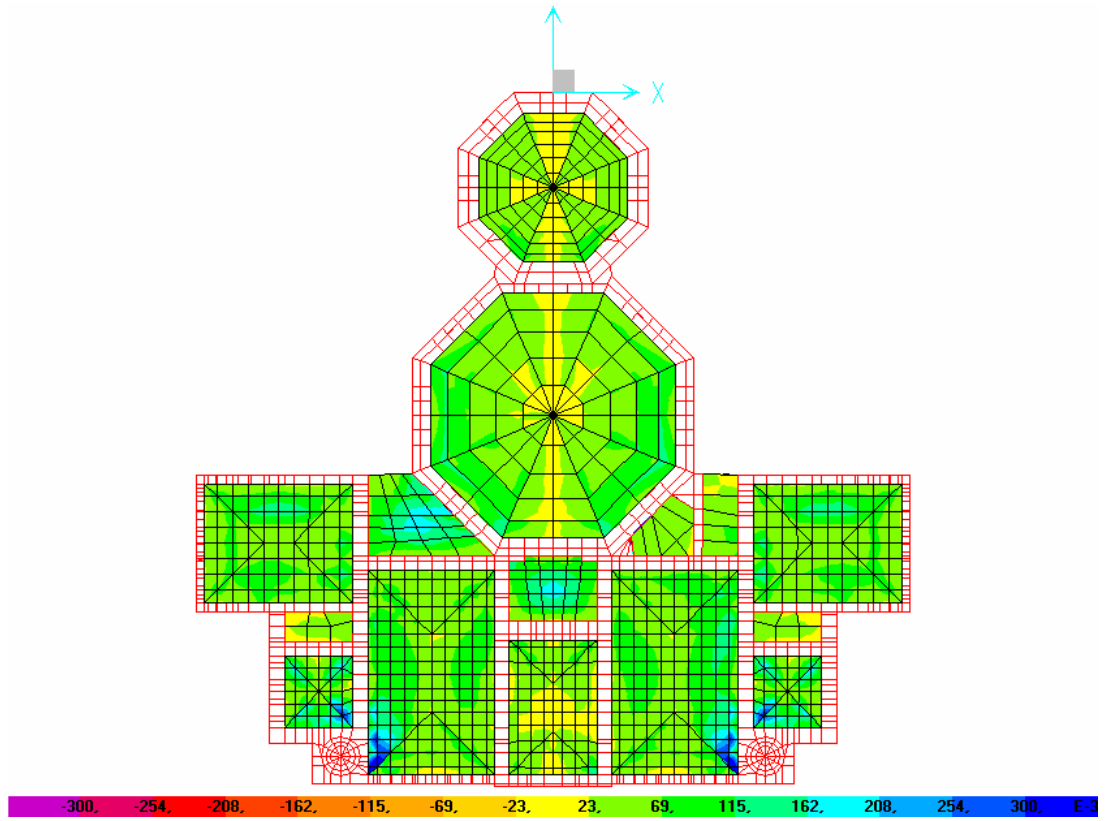
Şekil 5.66. (G + Q + EX) S13 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa



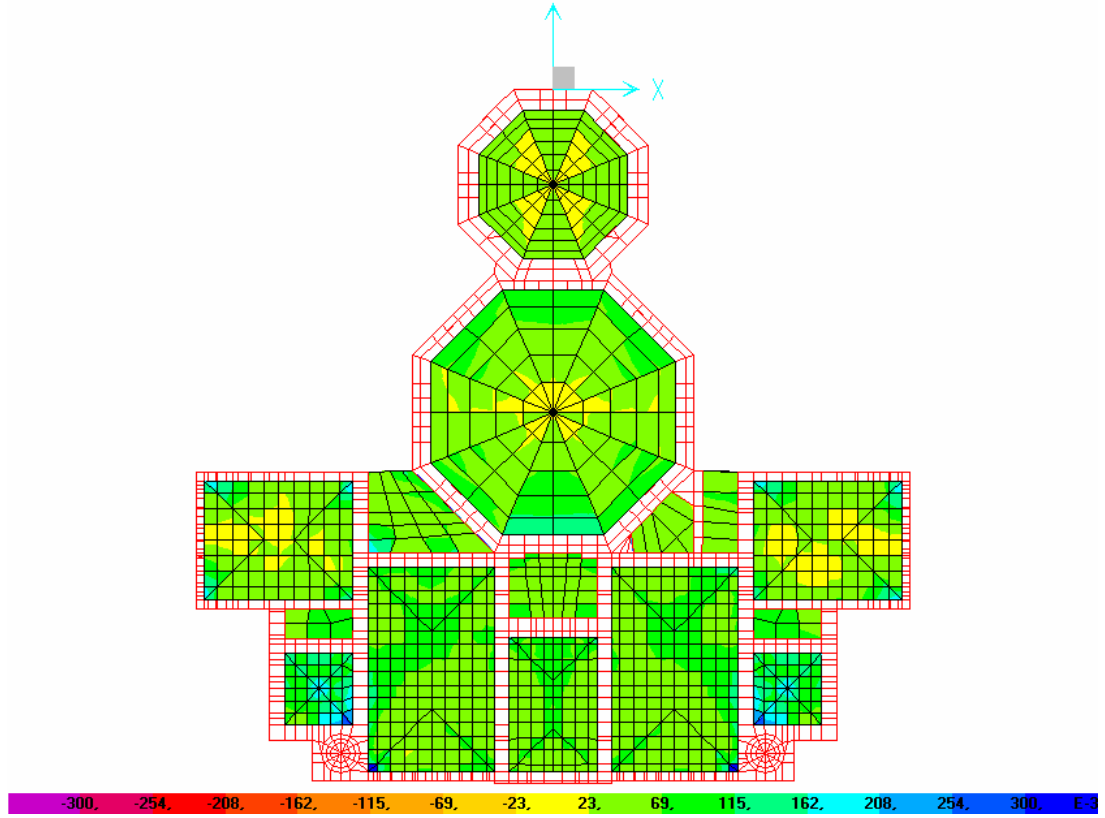
Şekil 5.67. (G + Q + EX) S23 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa



Şekil 5.68. (G + Q + EX) Kabuk Eleman S11 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa



Şekil 5.69. (G + Q + EX) Kabuk Eleman S22 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa



Şekil 5.70. (G + Q + EX) Kabuk Eleman S12 Kayma Gerilmeleri, 10^{-3} MPa

G+Q+EX yüklemesindeki gerilme seviyelerine bakıldığında durumu şöyle özetlemek mümkündür:

- S11 gerilmelerinde minarelerin yapıya birleştiği noktada gerilme yığılmaları göze çarpmaktadır. Çekme gerilmelerinin bu bölgede 1.0 MPa değerini aştığı görülmektedir. Bu bölgede büyük çatlakların oluşması beklenmektedir. Minarelerin büyük hareketinden kaynaklanan bu gerilmeler ön cephe beden duvarına doğru da yayılmıştır. Ayrıca ana kubbenin altında bulunan giriş aksındaki pencere altında da 1.0 MPa civarında bir gerilme yığılması görülmüştür. Daha düşük bir gerilme seviyesi olan 0.2-0.5 MPa aralığında zorlanan elemanların sayısı ise daha fazladır. Ana kubbe kasnağı, harım duvarlarındaki büyük pencerelerin üstündeki kemerler, hünkar mahfillerinin X doğrultusundaki duvarları da çatlak oluşturabilecek seviyelerde gerilmelere maruz kaldığı görülmüştür.
- S22 gerilmelerinde durum S11'e göre daha iyidir. S22 gerilmelerinin yine minare kaidelerinde 1.0 MPa değerine ulaştığı görülmektedir. 0.2-0.5 MPa

aralığında kubbe kasnağı, harim pencereleri üstündeki kemerler ve Y doğrultusundaki duvarların zorlandığı görülmektedir.

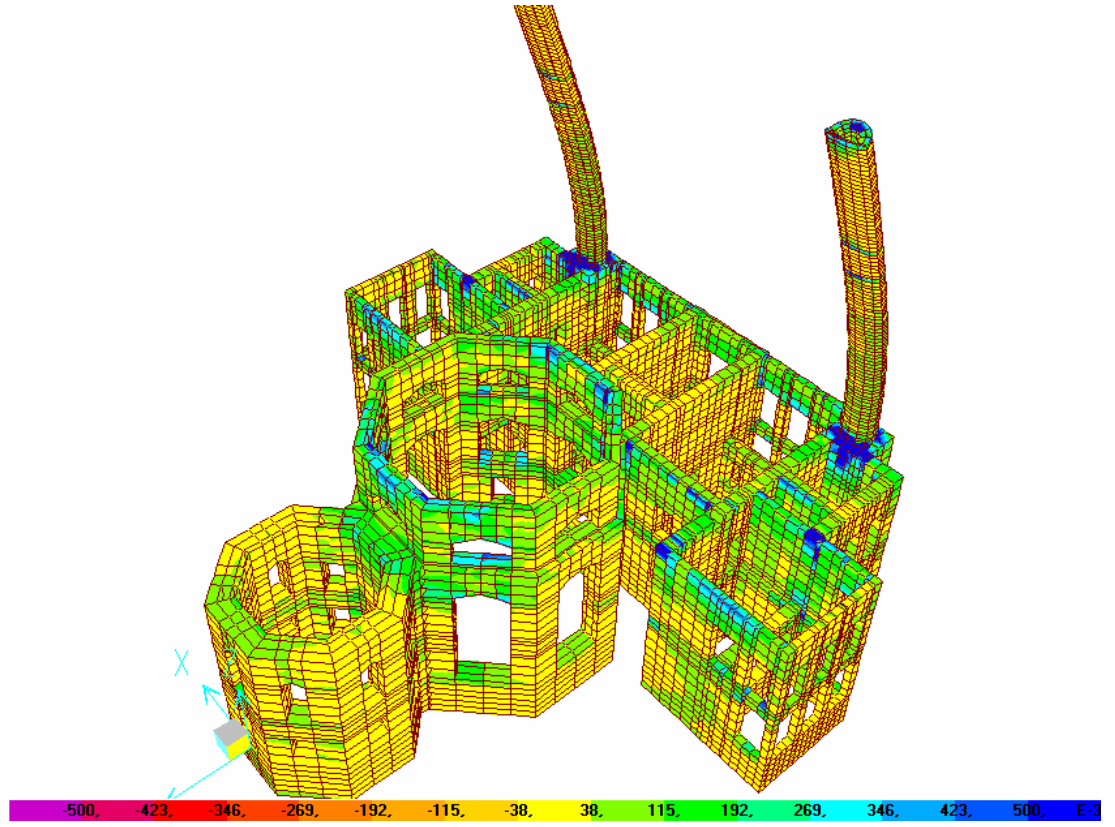
- S33 gerilmeleri yapının birinci kat seviyesindeki bütün duvarlarını 0.2-0.5 MPa aralığında zorlamaktadır. Minarelerde ise düşey gerilmeler büyük hareketlerin sonucu olarak 1.0 MPa'dan büyük değerler almıştır. Bu durumda minarelerin oldukça riskli olduğu söylenebilir.
- Kayma gerilmeleri düşey gerilmeye bağlı olduğu için çeşitli düşey gerilme seviyelerinde kayma gerilmeleri S33 diyagramından alınarak incelenecektir.

0 – 0.2 Mpa Düşey Basınç Gerilme Seviyesindeki Bölgeler: Yapının ikinci katını kapsayan bu aralıkta, düşey gerilmeye bağlı kayma emniyet gerilmesi ortalama 0.2 MPa olarak hesaplanır. X yönünde depremden kaynaklanan kayma etkisi S23 gerilmeleriyle kontrol edilmelidir. Şekil 5.67'de görüldüğü gibi ana kubbe kasnağında, büyük pencerelerin üst kemerlerinde, mahfillerin zayıf dış cephelerinde 0.20-0.25 MPa aralığında kayma gerilmeleri görülmekte olup bu bölgeledek elemanlar kayma emniyeti sınırındadır.

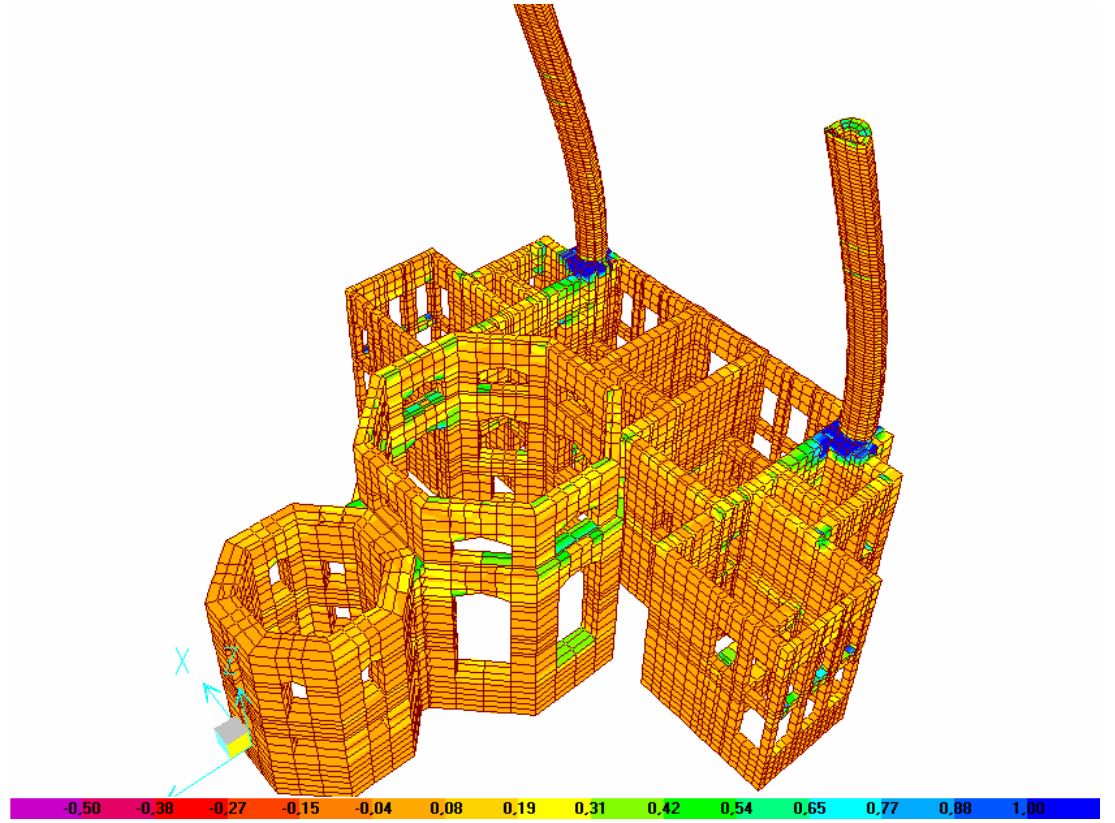
0.2 – 0.8 Mpa Düşey Basınç Gerilme Seviyesindeki Bölgeler: Bu gerilme seviyesi hemen hemen tüm alt kat duvarlarına hakimdir. Ortalama 0.3-0.4 arasında değişen kayma emniyeti bu bölgede kullanılabilir. Kayma gerilmelerini gösteren diyagramda bu emniyet aralığının aşılmadığı görülmektedir. Minarelerin kaidelerinde ise düşey basınç gerilmesi bir tarafta çok yüksek (3 MPa) değerlerde iken diğer bir yüzünde çekme gerilmelerinin de 3 MPa mertebelerine ulaştığı görülmektedir, dolayısıyla minarelerin kayma kontrolü yapmadan güvensiz olduğu anlaşılmaktadır.

S13 kayma gerilmelerini gösteren diyagramda (Şekil 5.66) ise ana kubbe kasnağındaki pencerelerde, minarelerin kaidelerinde ve birleşen duvarların üst kısımlarında, iç mekanlardaki pencere ve kapı boşluğuyla zayıflamış duvarlarda 0.3-0.4 MPa aralığında gerilmeler tespit edilmiştir. Bu gerilmelerin, bulunduğu düşey basınç gerilme seviyesine ait emniyet gerilmesini (0.2 MPa) aştığı görülmektedir.

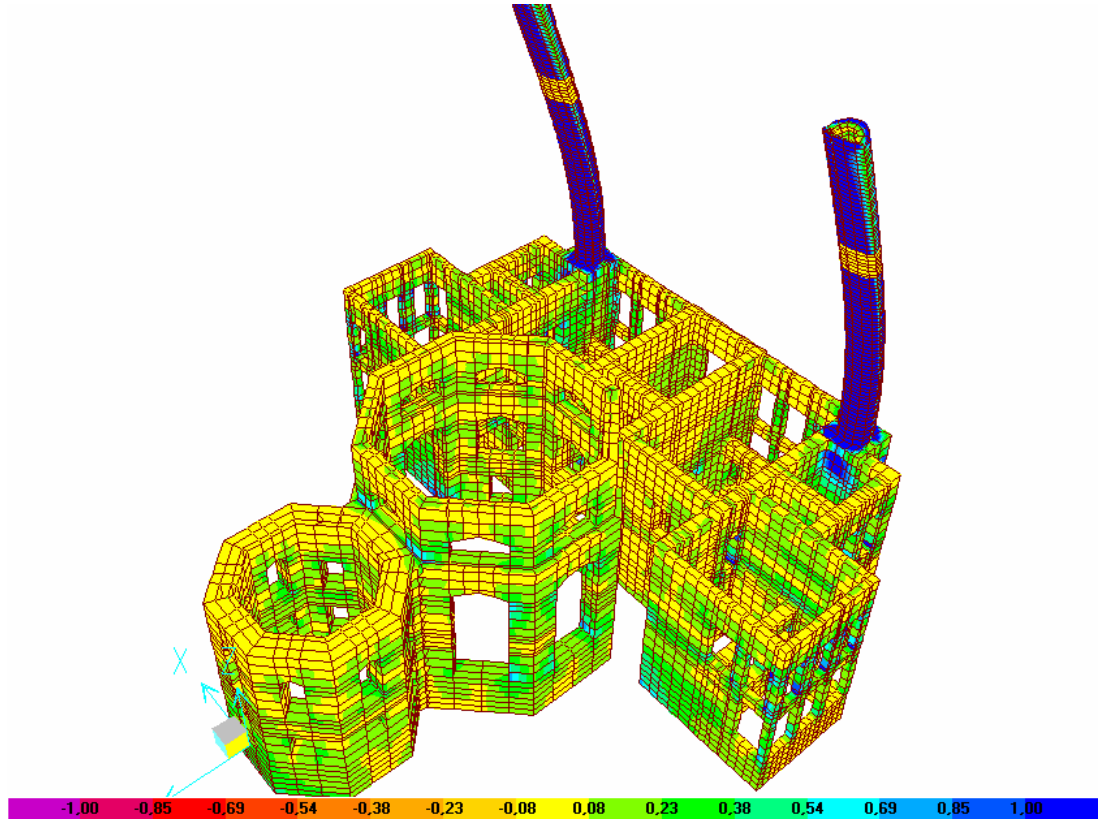
- Kabuk elemanlara bakıldığı zaman, ana kubbenin mihrap ve giriş aksına dik aksda 0.3 MPa değerlerine ulaşan çekme gerilmeleri görülür. Minarelerdeki büyük gerilmeler, kaideye birleşen tonozları da zorlamaktadır.



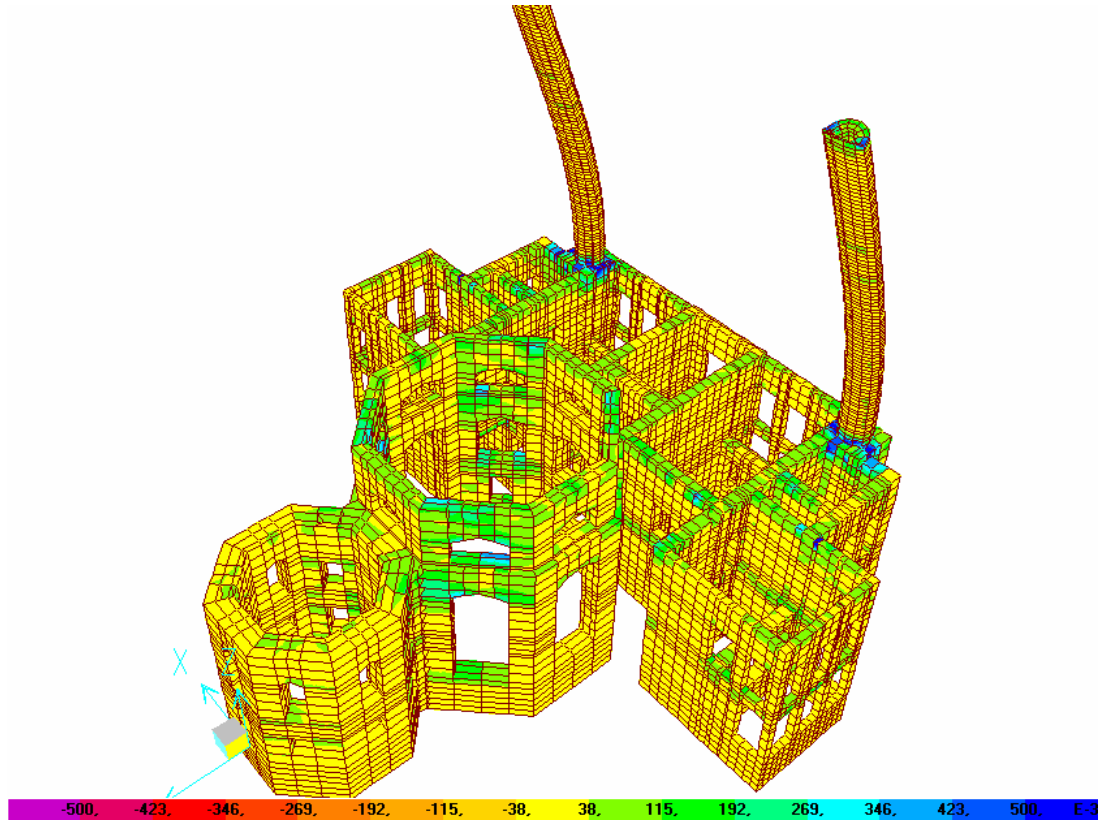
Şekil 5.71. (G + Q + EY) S11 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa



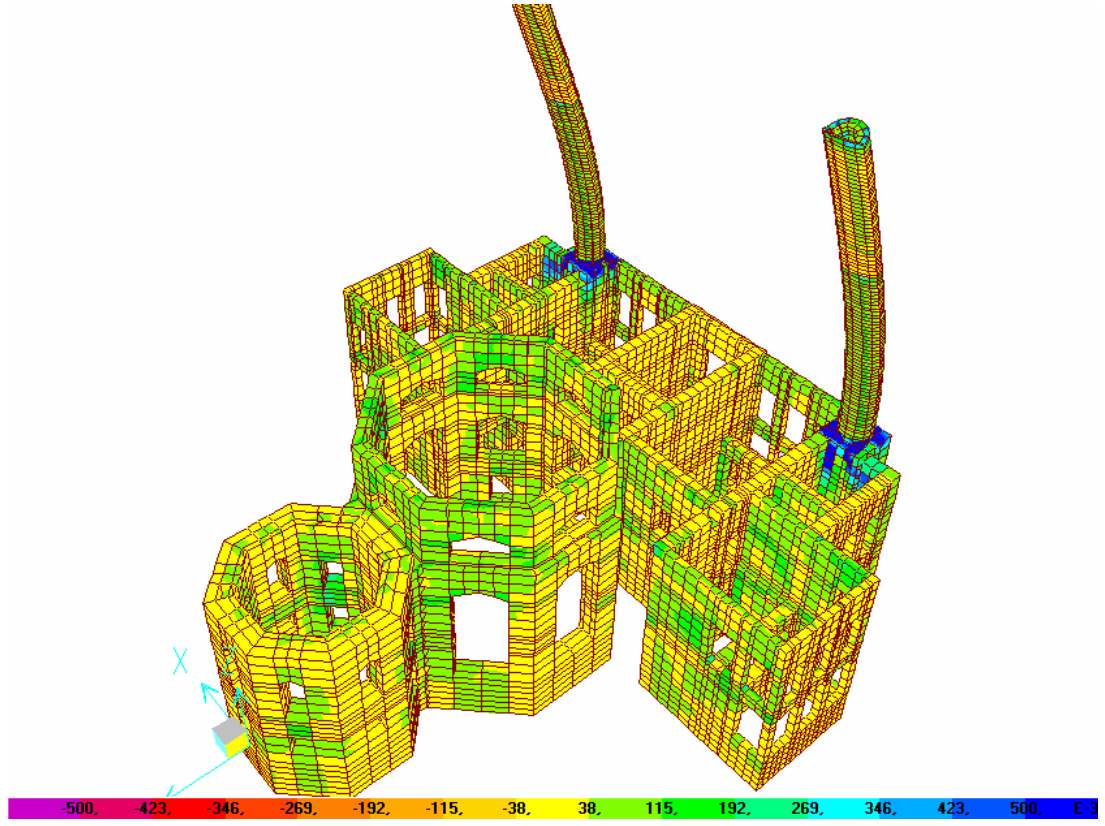
Şekil 5.72. (G + Q + EY) S22 Gerilmeleri, MPa



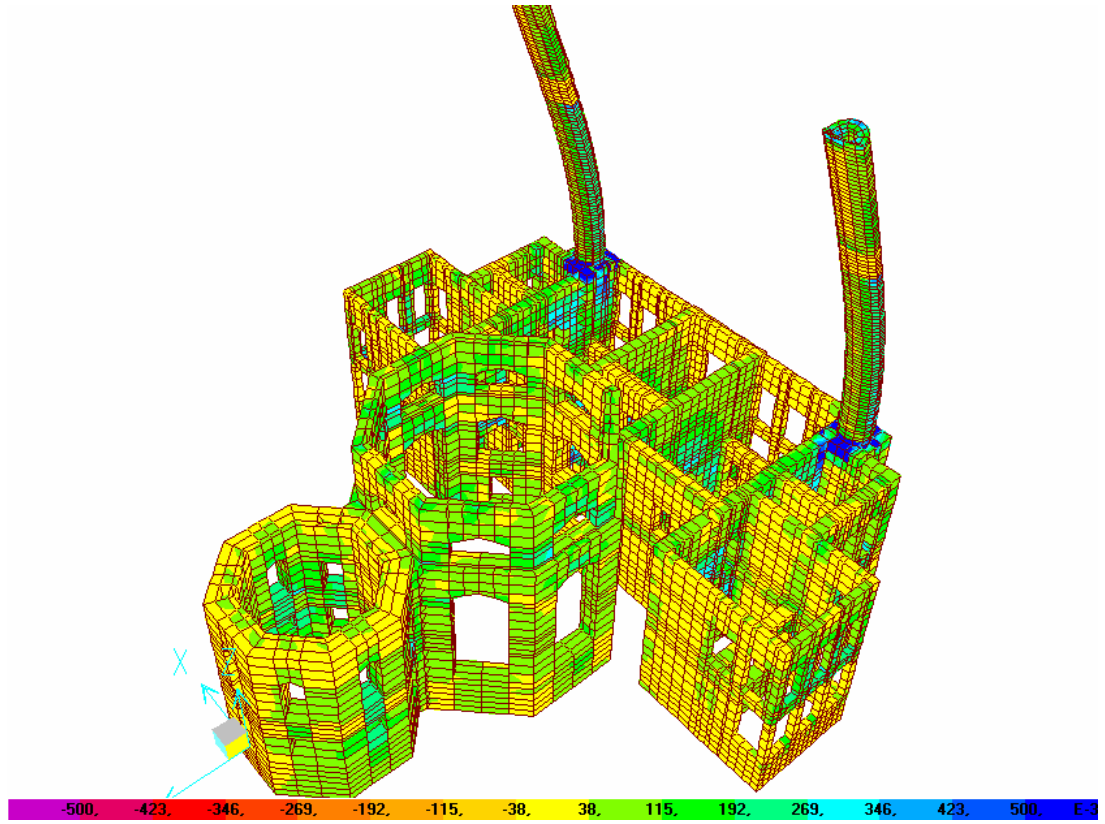
Şekil 5.73. (G + Q + EY) S33 Gerilmeleri, MPa



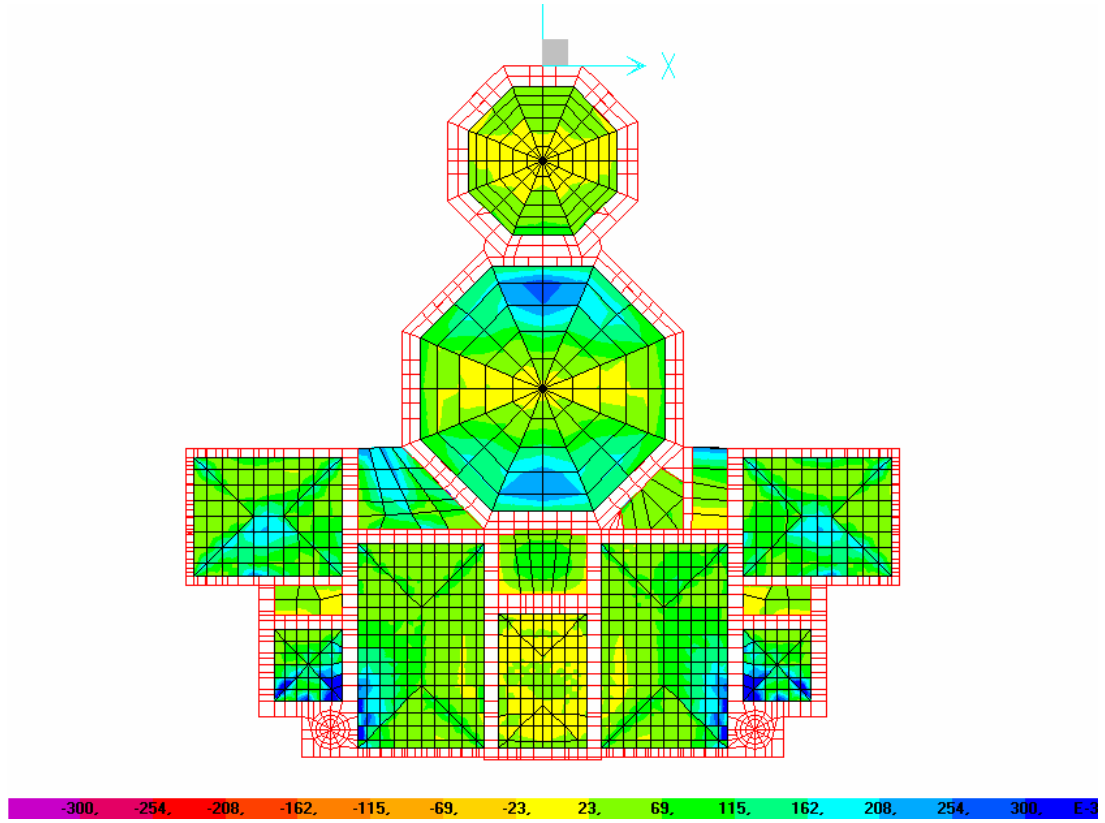
Şekil 5.74. (G + Q + EY) S12 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa



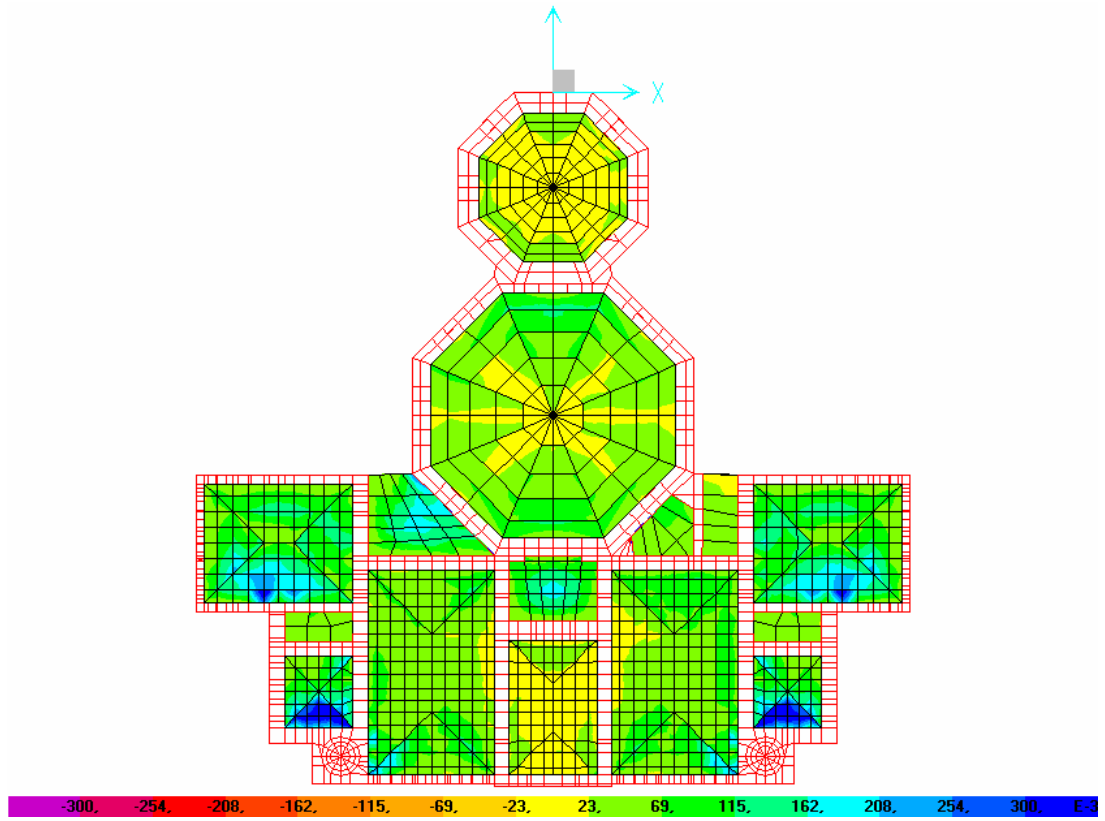
Şekil 5.75. (G + Q + EY) S13 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa



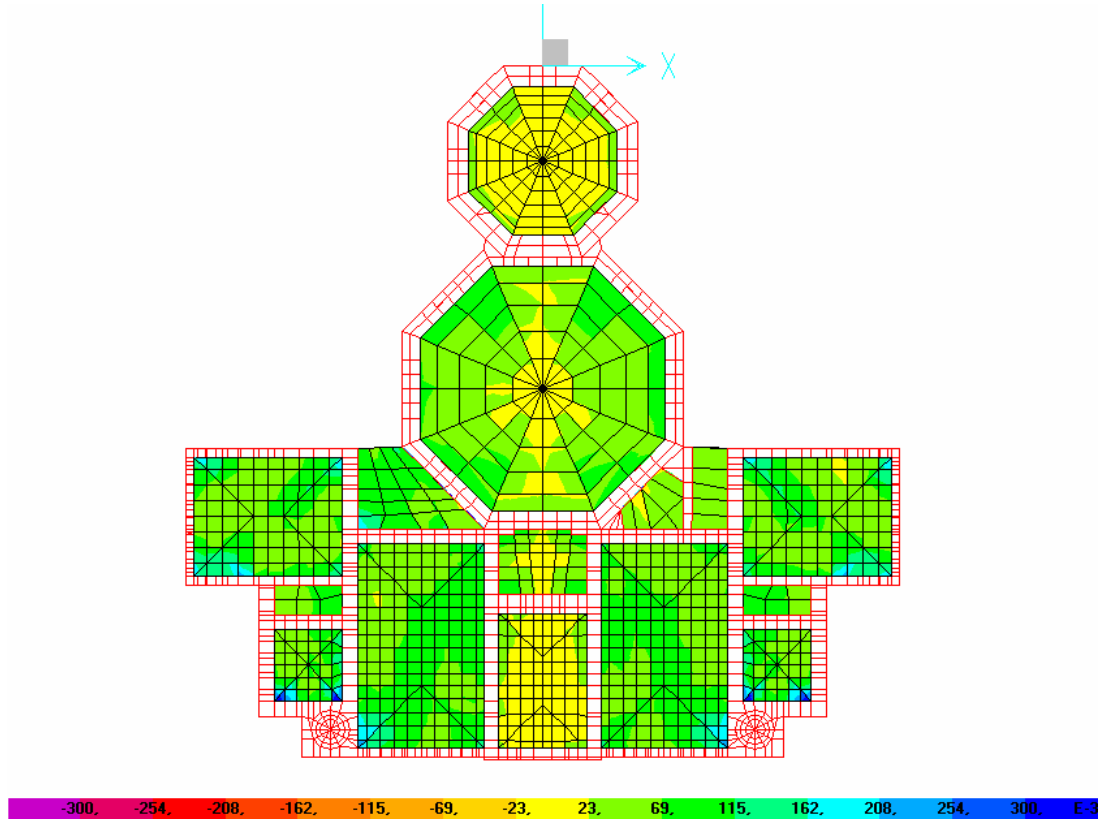
Şekil 5.76. (G + Q + EY) S23 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa



Şekil 5.77. (G + Q + EY) Kabuk Eleman S11 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa



Şekil 5.78. (G + Q + EY) Kabuk Eleman S22 Gerilmeleri, 10^{-3} MPa



Şekil 5.79. (G + Q + EY) S12 Kayma Gerilmeleri, 10^{-3} MPa

G+Q+EY yüklemesindeki gerilme seviyelerine bakıldığında yapının durumunu şöyle özetlemek mümkündür:

- S11 gerilmelerine göz atıldığında (Şekil 5.71) minarelerin kaidelerinde 0.5 MPa'dan büyük çekme gerilmeleri görülmektedir. Bunun yanında ana kubbe kasnağında ve mahfillerin Y yönünde uzanan duvarlarında, özellikle birleşim bölgelerinde 0.3-0.4 MPa aralığında gerilmelere rastlanmaktadır. Bu bölgelerde çatlaklar ve hasarlar oluşabilir. Harim pencerelerinin üstündeki kemerlerde de raporlardaki tespitlere uygun olacak şekilde 0.3-0.4 MPa aralığında çekme gerilmeleri görülmüştür. Bu gerilmeler deprem esnasında elemanlarda çatlaklara sebep olabilecektir.
- Bu yüklemde, S22 gerilmelerindeki durum S11'e göre daha iyidir. S22 gerilmelerinin yine minare kaidelerinde 1.0 MPa üstünde değerlere ulaştığı görülmektedir. 0.3-0.5 MPa gerilme aralığında kubbe kasnağı, harim pencereleri üstündeki kemerler ve Y doğrultusundaki duvarların kısmen zorlandığı görülmektedir. Bu yüklemde hünkâr mahfilinin sütun başlıkları etrafında da gerilme yığılmalarıyla karşılaşmaktadır.

- S33 gerilmeleri yapının birinci kat seviyesindeki bütün duvarlarını 0.2-0.5 MPa aralığında zorlamaktadır. Minarelerde ise düşey gerilmeler çekme yönünde, büyük hareketlerin sonucu olarak 1.0 MPa'dan büyük değerler almıştır. Bu durumda minarelerin oldukça riskli olduğu söylenebilir. Minarelerde kullanılan kenet sistemi ve düzgün geometri göz önüne alındığında, bu yapıların emniyet gerilmelerinin daha üst seviyelerde alınabileceği de düşünülebilir. Ancak Hırka-i Şerif Camii'nin minareleri, oldukça narin bir yapıya sahip olduklarından yapısal güvenlik açısından riskli bulunmuştur.
- Kayma gerilmeleri açısından en kritik bölge duvarların alt kısımları olmaktadır. Fakat alt kısımlarda düşey gerilme seviyesi yükseldiği için kayma emniyeti de buna bağlı olarak büyümektedir. Bu durumda üst kotlarda yer alan bazı yapı elemanları da riskli olabilir.
- Kayma gerilmeleri düşey gerilmeye bağlı olduğu için çeşitli düşey gerilme seviyelerinde kayma gerilmeleri S33 diyagramından alınarak incelenecektir.

0 – 0.2 Mpa Düşey Basınç Gerilme Seviyesindeki Bölgeler: Yapının ikinci katını kapsayan bu aralıkta, düşey gerilmeye bağlı kayma emniyet gerilmesi ortalama 0.2 MPa olarak hesaplanır. X yönünde depremden kaynaklanan kayma etkisi S23 gerilmeleriyle kontrol edilmelidir. Şekil 5.76'de görüldüğü gibi ana kubbe kasnağında, büyük pencerelerin üst kemerlerinde, mahfillerin zayıf dış cephelerinde 0.20-0.25 MPa aralığında kayma gerilmeleri görülmekte olup bu bölgedeki elemanların kayma emniyetini biraz aştığı görülür.

0.2 – 0.8 Mpa Düşey Basınç Gerilme Seviyesindeki Bölgeler: Bu gerilme seviyesi hemen hemen tüm alt kat duvarlarına hâkimdir. Ortalama 0.3-0.4 arasında değişen kayma emniyeti bu bölgede kullanılabilir. Kayma gerilmelerini gösteren diyagramda bu emniyet aralığının aşılmadığı görülmektedir.

X yönündeki yüklemeye benzer olarak, Y yönünde de minarelerin kaidelerinde düşey basınç gerilmesi bir tarafta çok yüksek (3 MPa) değerlerde iken diğer bir yüzünde çekme gerilmelerinin de 3 MPa

mertebelerine ulaştığı görülmektedir, dolayısıyla minarelerin kayma kontrolü yapmadan güvensiz olduğu anlaşılmaktadır.

S13 kayma gerilmelerini gösteren diyagramda (şekil 5.75) ise ana kubbe kasnağındaki pencerelerde, minarelerin kaidelerinde ve birleşen duvarların üst kısımlarında ve düzlem dışı zorlanan mahfil duvarlarında 0.3-0.4 MPa aralığında gerilmeler tespit edilmiştir. Bu gerilmelerin, bulunduğu düşey basınç gerilme seviyesine ait emniyet gerilmesi (0.2 MPa) sınırında olduğu görülmektedir.

- Kabuk elemanlara bakıldığı zaman, ana kubbenin mihrap ve kiriş aksında 0.3 MPa değerlerine ulaşan çekme gerilmeleri görülür. Ayrıca mahfil tonozlarının orta kısımlarında da 0.25 MPa seviyesinde çekme gerilmeleri tespit edilmiştir. Minarelerdeki büyük gerilmeler, kaideye birleşen tonozları da zorlamaktadır.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, tarihi yığma yapıların deprem performansının belirlenmesi ele alınmıştır. Örnek çalışmadan önce, değerlendirme çalışmaları öncesinde yapılacak hazırlıklar, tarihi araştırmalar, malzeme özelliklerinin belirlenmesi, zemin özellikleri, tarihi yığma yapıların sayısal olarak modellenmesi ve analiz metotları üzerinde durulmuştur. Daha sonra Hırka-i Şerif Camii için hazırlanan üç boyutlu sayısal analiz modeli kullanılarak Hırka-i Şerif Camii'nin çeşitli yükleme durumları için sayısal çözümü yapılmıştır. Sırasıyla düşey yükler altında statik analiz, modal analiz ve davranış spektrumu analizleriyle yapının performansı, gerilmeler ve yerdeğiştirmeler yoluyla değerlendirilmiştir. Bu sayısal çözümlerden elde edilen sonuçları şöyle sıralamak mümkündür.

1. Hırka-i Şerif Camii'nde meydana gelen hasarların büyük bir bölümü zemin hareketlerinden kaynaklanmaktadır. Caminin üzerinde bulunduğu dolgu platform, sondaj planında gösterilen kopma hattından itibaren alt cadde yönünde hareket etmektedir. Bu hareketin yapıya zarar verdiği, önlenmemesi halinde de ek zararlar vereceği söylenebilir.
2. Camii zemininde yapılan sondaj ve muayene çalışmalarından anlaşıldığı üzere, yapı dolgu bir zemin üstünde bulunmasına rağmen 4 m aşağıya uzanan temeller, Süleymaniye Formasyonu olarak bilinen dolgu altındaki tabakaya oturtulmuştur. Süleymaniye Formasyonunun oturmalarını tamamladığı süreçte, bu oturmaların yapıda bir kısım hasarlara yol açtığı kayıtlardan anlaşılmaktadır. Ayrıca dolgu zemin tabakasının yaptığı oturmaların da yapının taban döşemesinde 5–10 cm mertebelerinde oturmalara sebep olduğu tespit edilmiştir.
3. Keçeciler Caddesi ve Kadı Sokağı tarafında yer alan istinat duvarları, kopma hattından itibaren görülen zemin hareketi ile yeterince drene edilemeyen yüzey ve yer altı suyu sebebiyle zayıflamıştır. Bu duvarlar, kopma hattından itibaren meydana gelecek zemin hareketlerine karşı yeterli mukavemet gösterememektedir.

4. Yapılan incelemeler sonucunda her iki sokak kapı girişini birleştiren çizgi üzerinde kopma ve ayrılmalar meydana geldiği görülmüştür. Zeminde görülen bu yer değiştirmeler kuzeybatı-güneydoğu (NW-SE) doğrultusunda olduğu tespit edilmiştir. Bu hareketin durdurulması için kopma hattını destekleyecek bir istinat sistemi teşkil edilmesi önerilmiştir.
5. Yapı üzerinde gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlara göre yapı, genel olarak (minareler hariç) her hangi bir yapısal tehlike barındırmamaktadır. Şu halde yapının Minimum Hasar veya Hasarsızlık Beklentisi performans seviyesinde olduğu söylenebilir. Ancak minareler yerdeğştirmeler yönüyle, tepe noktasında yaklaşık 15-20 cm'i bulan yerdeğştirmeye Kültürel Değerin Korunması performans seviyesindedir. Gerilmeler açısından değerlendirildiği zaman ise minareler Göçmenin önlenmesi performans düzeyinde görülmektedir. Yapıda meydana gelen hasarların en önemli kaynağını zemin hareketi teşkil etmekle birlikte, yapının bazı bölümlerinde yerel zayıflıklar da görülmüştür. Bunlar, minareler ve Hünkâr mahfilleriyle sınırlı kalmaktadır.
6. Düşey yükler altında yapılan statik analiz sonucunda, yapının düşey (zati, hareketli ve kar yükleri) yükleri güvenli olarak taşıdığı sonucuna varılmıştır. Düşey yükler altında yapıda en çok zorlanan bölge, hünkâr mahfilinin kible tarafındaki duvardır. Bu duvarlar yanal hareketini önleyecek bir eleman olmadığı için üzerindeki tonozların itkisiyle düzlem dışı harekete zorlanmaktadır. Bu düzlem dışı hareketin düşey yükler altında 0.24 mm mertebesine ulaştığı hesaplanmıştır.
7. Düşey yükler altında ulaşılan en büyük yer değştirme hünkâr dairesinin saçak kotunda Z eksenini üzerinde 0.45 mm çökme ve 0.36 mm düzlem dışı yer değştirme olarak hesaplanmıştır. Ana kubbenin tepe noktasında ise düşey yükler altında yer değştirme 0.88 mm seviyesinde tespit edilmiştir.
8. Hırka-i Şerif Camii'nin G+Q düşey yükleri altında beklendiği gibi güvenli olduğu görülmektedir. Ancak büyük açıklıklı volta döşemelerdeki büyük yer değştirmeler düşey yükler altında ön plana çıkmaktadır. Mevcut mahfil döşemelerinin, özellikle büyük açıklıklı olanları, düşey yükler altında yeterli rijitliğe sahip olmadıklarından büyük sehim yapmaktadır. Analiz sonuçlarıyla döşemelerde tespit edilen mevcut hasarlar örtüşmektedir.

Yapının duvarlarında düşey yükler altında hünkâr mahfilinin düzlem dışı zorlanan duvarı ve büyük kubbe kasnağında S11 gerilmelerinin 0.5 MPa değerine yakın olduğu görülmektedir. Bu değer söz konusu bölgelerde çatlak ihtimalini göstermektedir. S22 gerilmelerinde ise yine ana kubbe kasnağında en büyük gerilme değeri 0.35 MPa civarındadır. Bu değerler yerel olarak görülmekte olup yaygın bir gerilme dağılımı şeklinde olmadığı için tehlikeli görülmemiştir.

Yapıda S33 düşey normal gerilmelere bakıldığı zaman, en büyük gerilmelerin (0.9 MPa) hünkâr mahfillerinin altında bulunan sütunlarda ortaya çıktığı görülmüştür. Minarelerin kaideye birleştiği bölgelerde ise düşey gerilme 0.8 MPa değerine ulaşmakta olup düşey gerilme açısından yapı güvenli kabul edilebilir. Duvar kalınlıkları oldukça iyi olan yapıda düşey gerilmeler açısından bir sorun görülmemiştir.

Kabuk elemanlar olan kubbe ve tonozlara bakıldığı zaman ise büyük kubbenin kasnağa yakın eteklerinde ve hünkâr mahfillerinin üzerini örten tonozların mesnet bölgeleri yakınlığında 0.15 MPa civarında çekme gerilmeleri görülmektedir. Ayrıca duvarların farklı hareketleri üst örtüde zorlanmalara sebep olmaktadır.

9. Deprem yüklerinde, mahfillerde özellikle sütunların üzerinde yer alan kısımda büyük yer değiştirmeler gözlenmektedir. Burulma hareketinin de etkisiyle en büyük yer değiştirme Y yönünde 1.7 mm olarak hesaplanmıştır. Bu bölgede sütunlar ve duvar boşluklarıyla zayıflamış duvar kesimlerinde gerilmeler artış göstermektedir.

G+Q+EX ve G+Q+EY yüklemelerindeki gerilme seviyelerine bakıldığında durumu şöyle özetlemek mümkündür:

- Minarelerin yapıya birleştiği kaidelerde rapor edilen hasarlarla analiz sonuçları örtüşmektedir. Çekme gerilmelerinin bu bölgede 3.0 MPa değerini aştığı görülmekte dolayısıyla bu bölgede büyük çatlakların oluşması beklenmektedir. Minarelerin büyük yanal hareketinden kaynaklanan bu gerilmeler ön cephe beden duvarına doğru da yayılmıştır. Minarelerdeki büyük gerilmeler, kendilerine yakın duvarlarda da tehlike oluşturmaktadır.
- Kayma emniyeti açısından ikinci kat seviyesindeki elemanlar emniyet gerilmesine yakın bir gerilme seviyesindedir. Birinci kat seviyesinde ise kayma emniyeti aşılmamaktadır. Minareler ise kayma emniyeti açısından da güvensiz bulunmuştur.

10. Kabuk elemanlara (Kubbe ve Tonozlar) bakıldığı zaman, ana kubbenin mihrap ve giriş aksına dik aksta 0.3 MPa değerlerine ulaşan çekme gerilmeleri görülür. Bununla birlikte kubbelere ait yerinde mevcut bir hasar görülmemiştir. Minarelerdeki büyük gerilmeler ise kaideye birleşen tonozları zorlamaktadır.

Yapının Güçlendirilmesi

1. Hünkâr mahfillerinde, örtünün diyafram rijitliğini artıracak ve düzlem dışı hareketi önleyecek, tonoz içerisine gergi sistemi yerleştirilmesi önerilmektedir. Tavandaki süsleme ve motiflerin bozulmaması için bu uygulama kurşun tabaka altından yapılabilir. Kolayca geri sökülebilecek bir çelik veya lif takviyeli polimer uygulamaları yapılabileceği, bu uygulamanın koruma kuralları açısından da uygun olacağı düşünülmektedir. Mahfillerin volta döşemelerinde gözlenen büyük sehimler göz önüne alındığında, bu döşemelerin rijitliğinin yetersiz olduğu görülmektedir. Volta döşemelerin rijitliğini artıracak ve özellikle yoğun ziyaret günlerinde artan hareketli yüklerin zararlarını önleyecek benzer nitelikte tedbirlerin alınması önerilmektedir.

2. Minareler, genel olarak yapıya bağlı bir sisteme sahip olsalar da yapıdan çok farklı davranmaktadır. Oldukça narin olan minarelerin yapı kütlelerinden sonra serbest devam etmesi sonucunda ani rijitlik değişimi görülür. Bu değişim bölgesinde beklenildiği gibi büyük gerilmeler tespit edilmiştir. Emniyet gerilmelerinin aşıldığı, taşların yer yer çatladığı ve kurşun örtü tabakası altında hasarların bulunabileceği de göz önünde tutulursa, minareler için önlem alınması gerektiği açıktır. Minarenin rijitliğini artıracak önlemler alınabileceği gibi, aşırı gerilmelerin gözlemlendiği minare kaidesinde ve minarenin belirli bir bölümünde çekme gerilmelerini karşılayabilecek şekilde lif takviyeli polimer malzemelerle veya çelik bileziklerle minarelerin güçlendirilebileceği düşünülmektedir. Muhtemel bir depremde minarelerdeki hasarlar, ana yapıya da zarar verebileceğinden, minarenin kaidesindeki duvarların da özellikle köşe noktalarında güçlendirilmesi uygun olacaktır.

3. Yapının üzerinde bulunduğu dolgu platformdaki hareket, teşkil edilecek uygun bir istinat yapısıyla (kazıklarla) önlenmelidir. Ayrıca uygun drenaj koşulları da sağlanmalıdır.

7. KAYNAKLAR

- [1] **Schueremans, L.**, 2001. Probabilistic evaluation of structural unreinforced masonry, *Doctoral Thesis*, Katholieke Universiteit Leuven, Heverlee (Belgium).
- [2] **Heyman, J.**, 2006. The science of structural engineering, Imperial College Press, London.
- [3] **Bozdoğan, M., Kısaovalı, P., Özkan, S.**, 2006. Mimar Sinan'ın koruma anlayışı ve günümüzde Sinan'ın eserlerini koruma anlayışı (Edirne örneği), *Trakya Üniversitesi J. Sci* 7(2), Edirne.
- [4] **Sesigür, H., Çılı, F., Çelik, O.C.**, 2007. Tarihi yapılarda taşıyıcı bileşenler, hasar biçimleri, onarım ve güçlendirme, *İMO İstanbul Bülten*, **89**, s.10-21, İstanbul.
- [5] **Özer, F.**, 1987, Mimar Sinan'ın korumacı yönü, *Mimar Sinan Dönemi Türk Mimarlığı ve Sanatı Sempozyumu*, İş Bankası Yayınları, İstanbul.
- [6] **Cansever, T.**, 2005, Mimar Sinan, Albaraka Türk Yayınları: 24, İstanbul.
- [7] **Koçak, A.**, 1999, Tarihi yığma yapıların statik ve dinamik yükler altında lineer ve non-lineer analizi: Küçük Ayasofya Camii Örneği, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [8] **Aköz, F.**, 2005, *Yığma kagir yapılarda hasar tespiti*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [9] **Postacıoğlu, B.**, 1981, Cisimlerin yapısı ve özellikleri – iç yapı ve mekanik özellikler, cilt 1, İTÜ Matbaası, İstanbul.
- [10] **Satongar, Ş.**, 1994, İstanbul şehir surları horasan harçları üzerine bir araştırma, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [11] **Saraç, M.M.**, 2003, Tarihi yığma kagir yapıların güçlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ, İstanbul.
- [12] **Özen, G.Ö.**, 2006, Comparison of elastic and inelastic behavior of historic masonry structures at the low load levels, *Yüksek Lisans Tezi*, ODTÜ, Ankara.

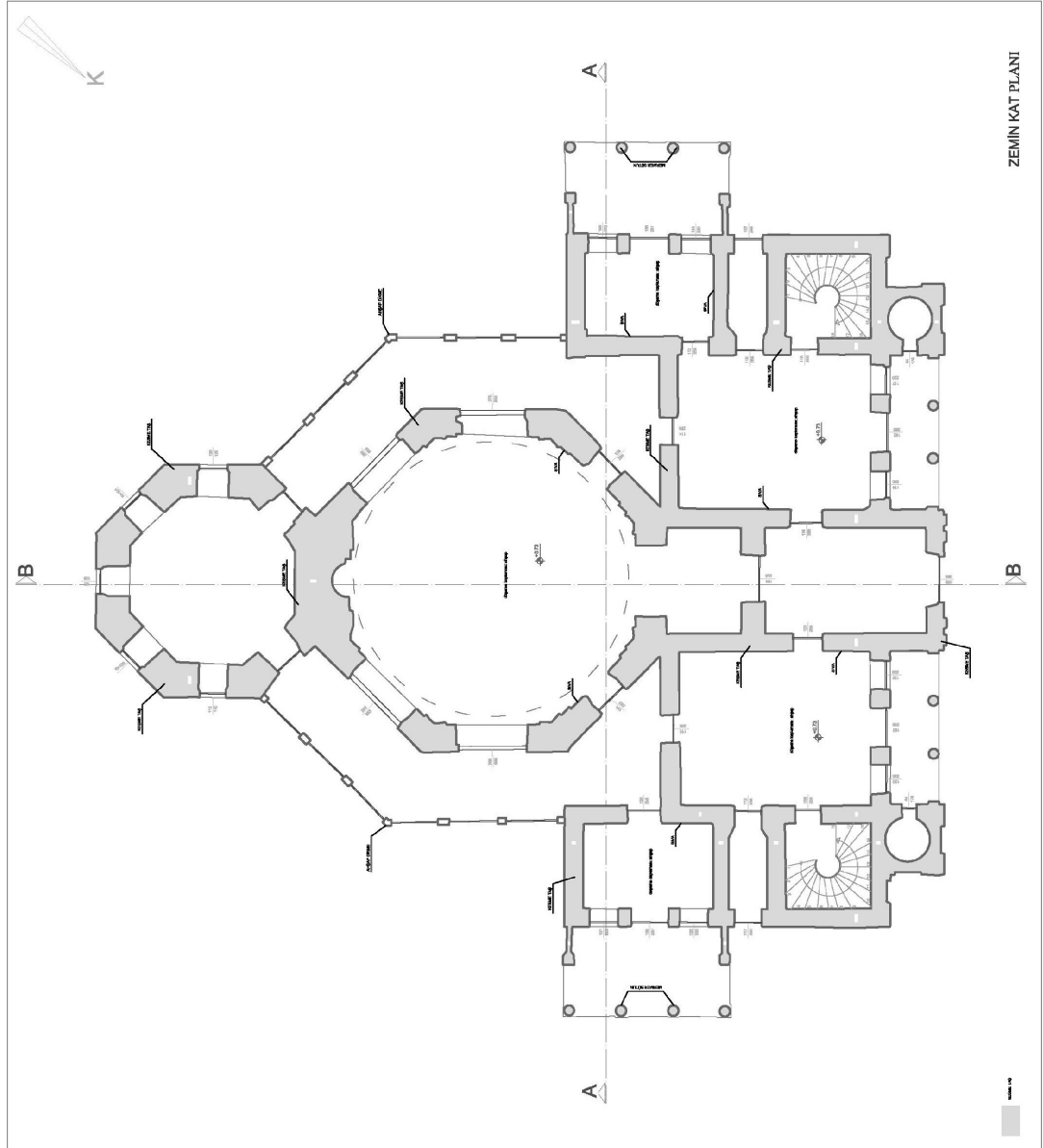
- [13] **Yılmaz, P.**, 2006, Tarihi yapıların modellenmesi ve deprem güvenliklerinin belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- [14] **Kaya, S.M.**, 1999, Determination of the earthquake performance of Suleymaniye Mosque, *Yüksek Lisans Tezi*, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- [15] **Arioğlu, N., Tuğrul, A., Zarif, İ.H., Girgin, Z.C., Arıoğlu, E.**, 1999, Küfeki taşının dayanıklılık analizi: Şehzade Camisi örneği - 1, *Yapı Dergisi*, Sayı:214, İstanbul.
- [16] *Proceedings of International Seminar on Earthquake Protection in Historic Buildings*, 2005, Kotor, Montenegro.
- [17] **Teomete, E.**, 2004, Finite element modelling of historical masonry structures, case study: Urla Kamanlı Mosque, *Yüksek Lisans Tezi*, İzmir Teknoloji Enstitüsü, İzmir.
- [18] **Lourenço, P.B., Gregorczyk, P.**, 2000, A review on flat-jack testing, Universidade do Minho, Portugal.
- [19] **Lourenço, P.B.**, 2000, Current experimental and numerical issues in masonry research, Universidade do Minho, Portugal.
- [20] **Lourenço, P.B.**, 1998, Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behaviour of masonry, *Structural Analysis of Historical Constructions II*, Barcelona.
- [21] Afet Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- [22] **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.
- [23] **Hutton, D.V.**, 2004, *Fundamentals of The Finite Element Analysis*, The McGraw Hill Companies, London.
- [24] **Celep, Z., Kumbasar N.**, 2004, Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı, Beta Yayınları, İstanbul.
- [25] **Hossain, K. M. A., Lachemi, M.**, 2006, NDE for assessment and rehabilitation of ancient masonry structures - a state of the art, *1.International Conference on Restoration of Heritage Masonry Structures*, Cairo.

- [26] **Binda, L., Saisi, A.**, 2001, Non destructive testing applied to historic buildings: the case of some Sicilian churches, Historical Constructions, P.B. Lourenço, P. Roca (Eds.), Guimaraes.
- [27] **Oğuzmert, M.**, 2002, Dynamic Behaviour of masonry minarets, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [28] **Sinha B.P., Hendry A.W., Davies S.R.**, 2004, Design of masonry structures, Third Edition, E&FN Spon, UK.
- [29] **Sert, S., Önalp, A., Arel, E.**, Koni penetrasyon deneyi ile kazık kapasitesinin belirlenmesi.
- [30] **Şen, B.**, 2003, Modeling and analysis of historical masonry structures, *Yüksek Lisans Tezi*, ODTÜ, Ankara.
- [31] **Lourenço, P.B.**, 2000, Structural behavior of civil engineering structures: Highlight in historical and masonry structures, Universidade do Minho, Portugal.
- [32] **Binda, L., Saisi A.**, 2002, State of art of research on historic structures in Italy, Italy.
- [33] **Lourenço, P.B., Vasconcelos G., Ramos L.**, 2001, Assessment of the stability conditions of acistercian cloister, Universidade do Minho, Department of Civil Engineering, Guimarães, Portugal.
- [34] **Celep, Z., Kumbasar N.**, 2001, Yapı Dinamiği, Beta Yayınları İstanbul.
- [35] **Sap2000 Manuel**, 2005. *Integrated structural analysis and design software*, Computer and Structures Inc., Berkeley, California.
- [36] Hırka-i Şerif Camii zemin etüdü geoteknik raporu, 2003. Geos Geoteknik ve Sondajcılık Ltd. Şti.
- [37] **Artar, M.**, 2002, Structural identification of the Sehzade Mehmed Mosque through static and dynamic analyses, *Yüksek Lisans Tezi*, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- [38] **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.
- [39] **Temel, O. N.**, 2003, Earthquake effects on historical masonry buildings in Uskudar, *Yüksek Lisans Tezi*, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.

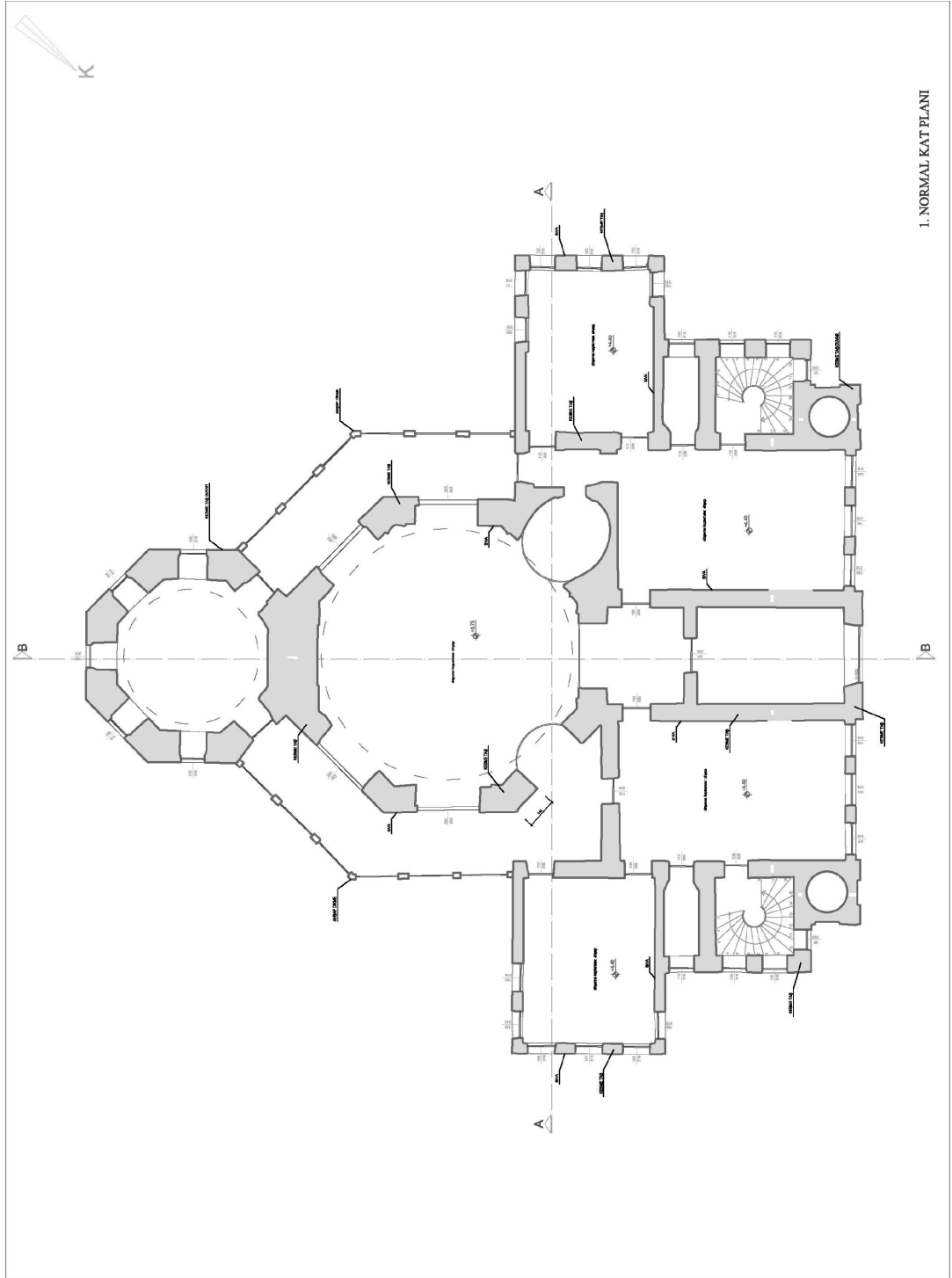
- [40] **Çelik, D.**, 2004, Kentsel peyzaj tasarımı kapsamında tarihi çevre yenileme çalışmalarının peyzaj mimarlığı açısından araştırılması: Beypazarı örneği, *Doktora Tezi*, Ankara Üniversitesi, Ankara.
- [41] **Peker, K.**, 2003, Tarihi yapıların yapısal analizinde performans tabanlı yaklaşımlar ve bir örnek çalışma: İstanbul Ortaköy Atık Ali Paşa Yalısı, *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul.
- [42] **Aköz, F., Yüzer N.**, Tarihi yapılarda malzeme özelliklerinin belirlenmesinde uygulanan yöntemler, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [43] Fatih camileri ve diğer tarihi eserler, 1991. TC Diyanet İşleri Başkanlığı Fatih Müftülüğü, İstanbul.
- [44] **Tanman M. B.**, 1994. Hırka-i Şerif Camii, Dünden Bugüne İstanbul Ansiklopedisi Cilt IV, Kültür Bakanlığı ve Tarih Vakfı Ortak Yayını, İstanbul.
- [45] **Yıldırım H., Öztürk T.**, 2003. Hırka-i Şerif Camii'nin mevcut durumu hakkında ön teknik rapor, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, 048 Sayı 2003.02. Tarih, İstanbul.

EKLER

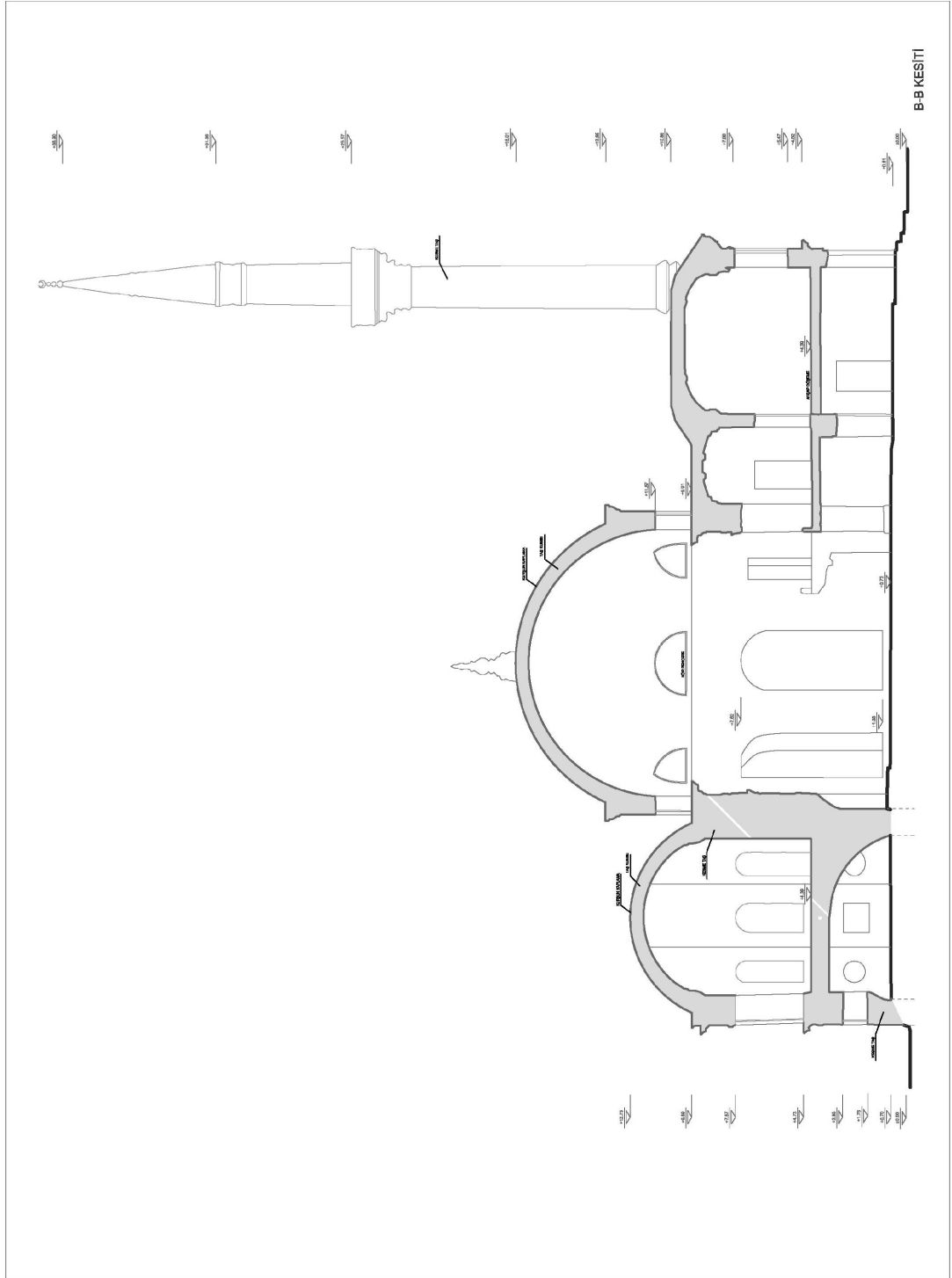
EK A: Hırka-i Şerif Camii Rölöve Çizimleri



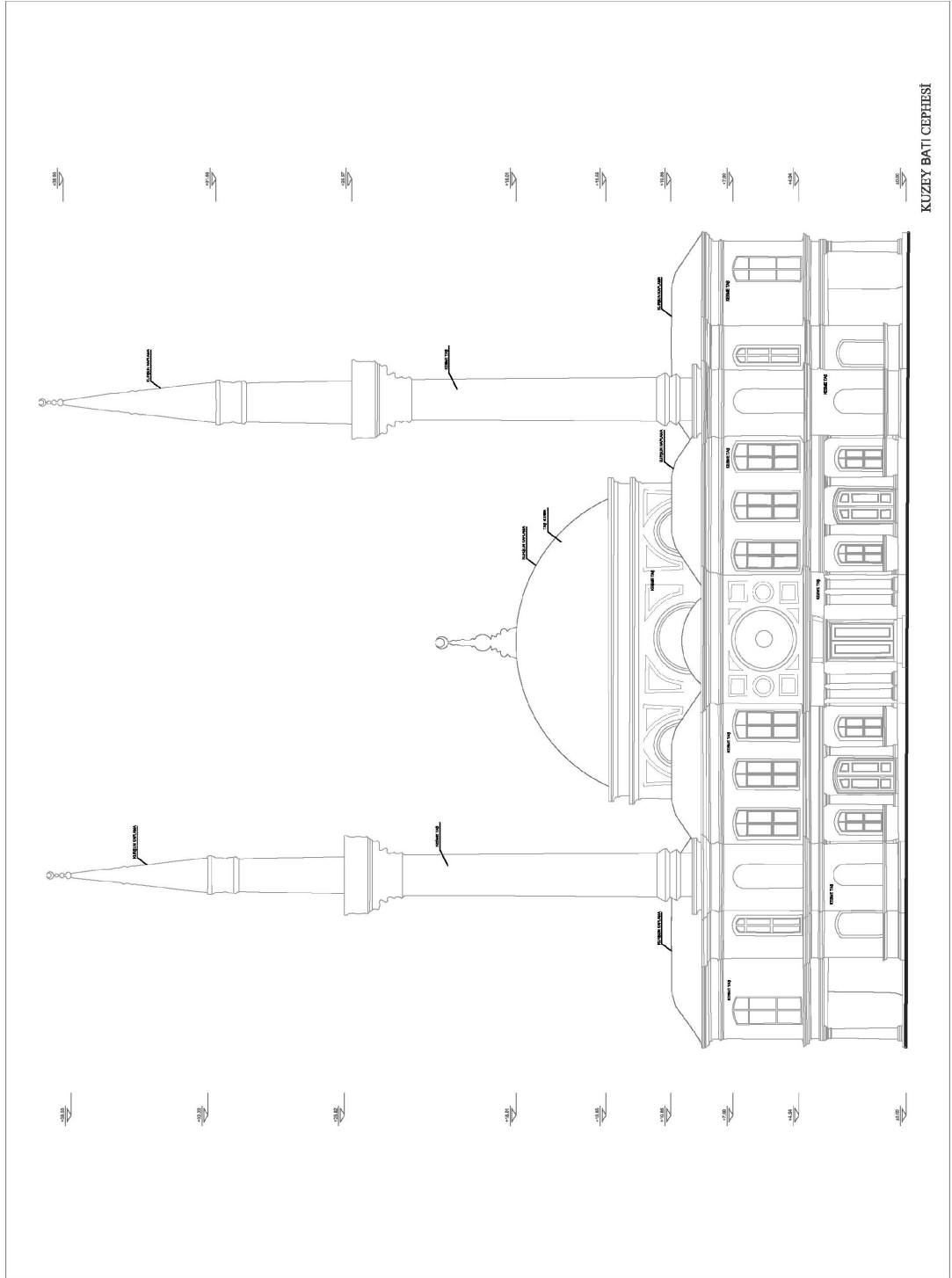
Şekil A.1: Hırka-i Şerif Camii Zemin Kat Planı



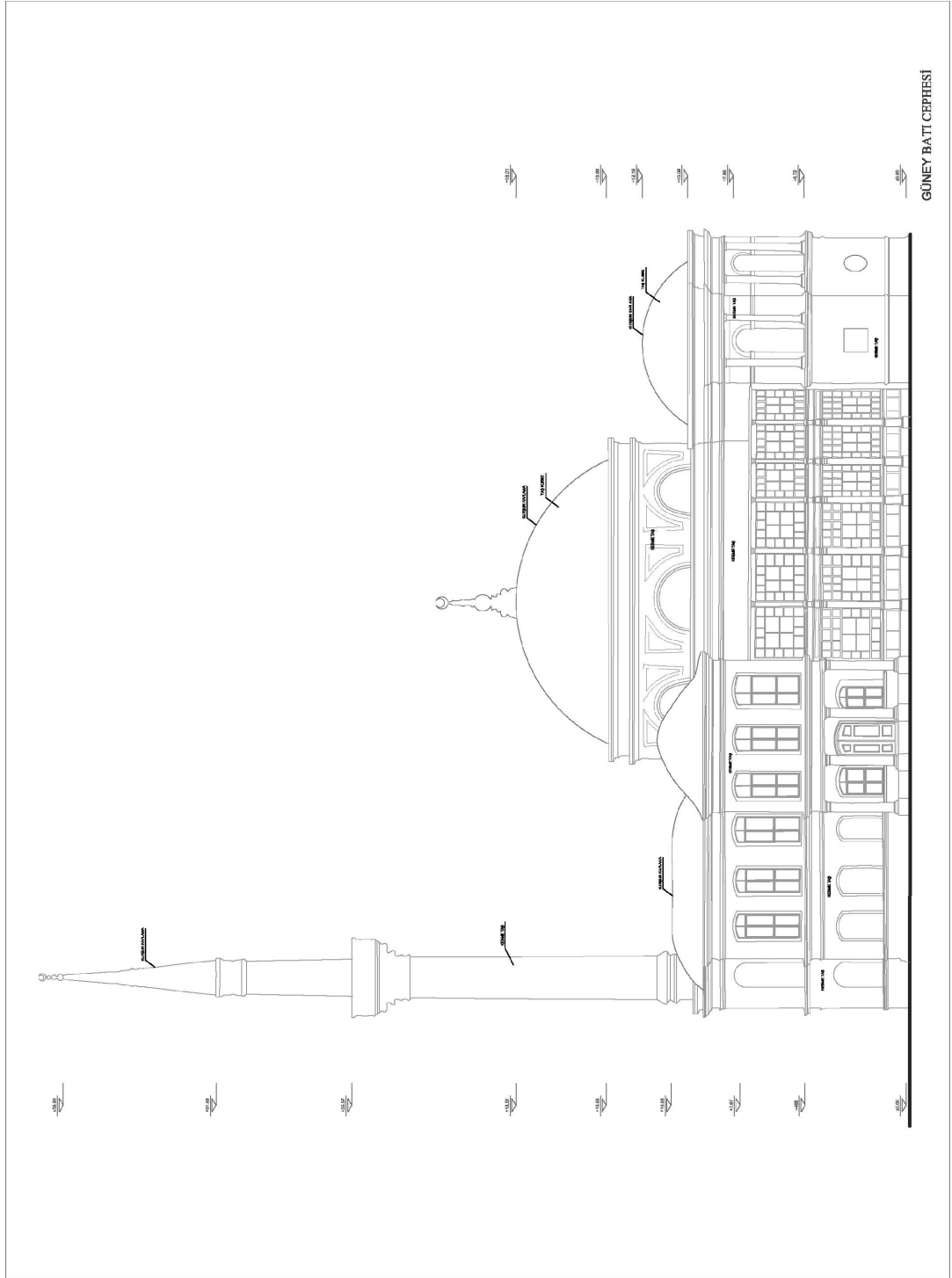
Şekil A.2: Hırka-i Şerif Camii 1. Normal Kat Planı



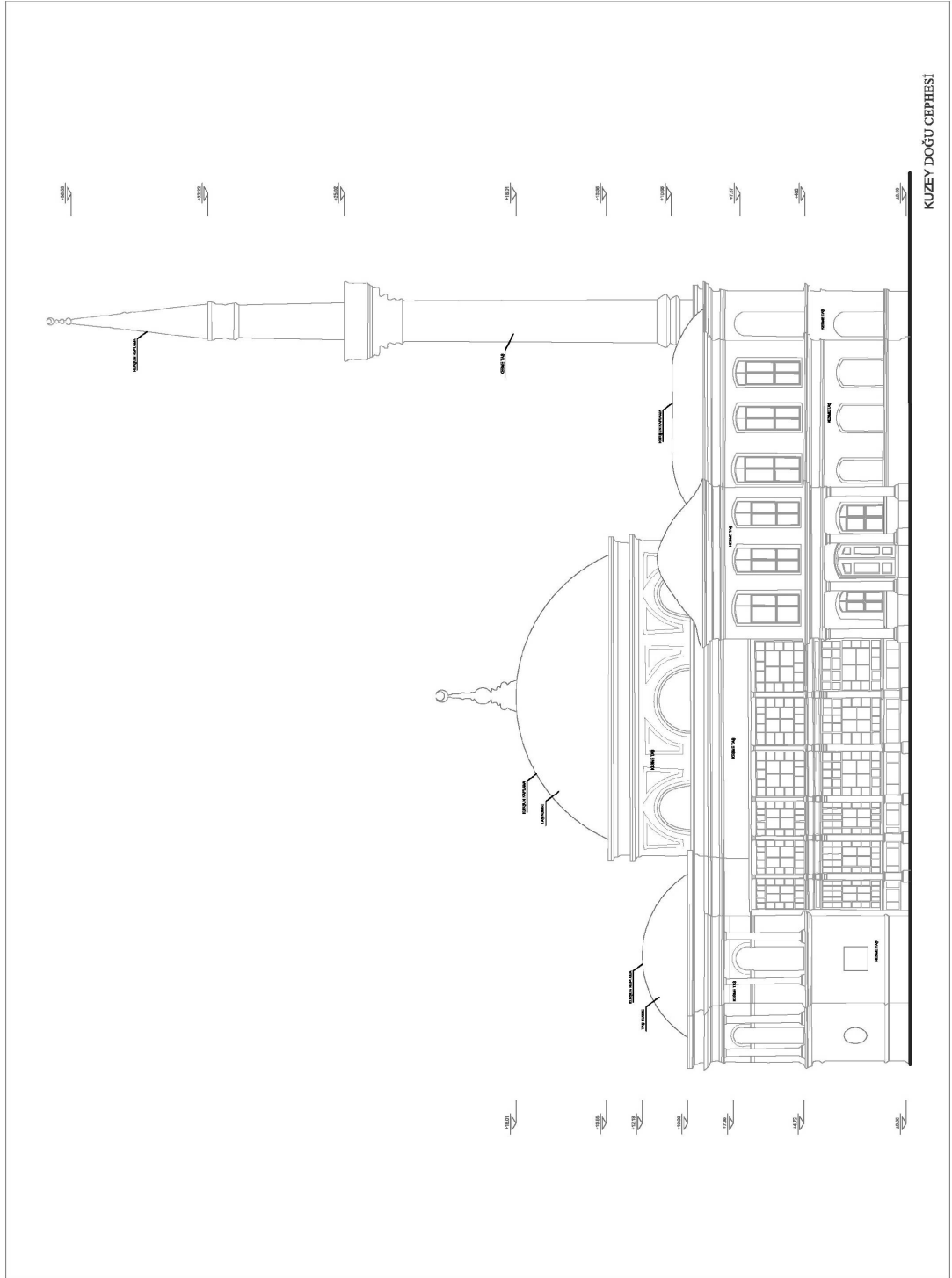
Şekil A.4: Hırka-i Şerif Camii B-B Kesiti



Şekil A.5: Hırka-i Şerif Camii Kuzey Batı Cephesi



Şekil A.7: Hırka-i Şerif Camii Güney Batı Cephesi



Şekil A.8: Hırka-i Şerif Camii Kuzey Doğu Cephesi

ÖZGEÇMİŞ

Ömer DABANLI

01.09.1983 tarihinde Afyonkarahisar'a bağlı Bolvadin ilçesinin Kurucaova Köyü'nde dünyaya geldi. İlk ve orta öğrenimini okul birincilikleriyle noktaladıktan sonra lise eğitimine başladığı Bolvadin Sıddıka Metin Adalet Meslek Lisesi'nden okul birinciliği ile mezun oldu. 2000 yılında Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği bölümünü kazandı, burada İngilizce hazırlık sınıfını dil birinciliğiyle bitirdi. Kocaeli Üniversitesinde birinci sınıfı okuduktan sonra 2002 senesinde, İTÜ İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne yatay geçiş suretiyle kaydoldu. 2003 yılında mühendislik eğitimi yanında İTÜ Mimarlık Fakültesi bünyesindeki Mimarlık bölümünü de okumaya başladı. 2005 yılında İnşaat Mühendisliği bölümünden fakülte ve bölüm 4.'sü olarak mezun oldu. İlk lisansını tamamladığı 2005 yılında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği bölümünde lisansüstü eğitime başladı. 2007 yılında Mimarlık lisans eğitimini tamamlayarak Mimar unvanını aldı. Mimar ve mühendis unvanıyla çeşitli konut, cami ve işyeri projelerine imza attı. Aynı zamanda yüksek lisans tezi olan "Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi" adı altındaki projesi İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından desteklenmiştir. İngilizce bilen yazar, serbest olarak mimarlık ve mühendislik çalışmalarını sürdürmektedir.