

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZEYREK CAMİİ (PANTOKRATOR KİLİSESİ) KUZEY BÖLÜM
STRÜKTÜR ANALİZİ VE SAĞLAMLAŞTIRMA ÖNERİLERİ**

DOKTORA TEZİ

Umut ALMAÇ

Mimarlık Anabilim Dalı

Restorasyon Programı

TEMMUZ 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZEYREK CAMİİ (PANTOKRATOR KİLİSESİ) KUZEY BÖLÜM
STRÜKTÜR ANALİZİ VE SAĞLAMLAŞTIRMA ÖNERİLERİ**

DOKTORA TEZİ

**Umut ALMAÇ
(502022150)**

Mimarlık Anabilim Dalı

Restorasyon Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zeynep AHUNBAY

TEMMUZ 2011

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 502022150 numaralı Doktora Öğrencisi **Umut ALMAÇ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“ZEYREK CAMİİ (PANTOKRATOR KİLİSESİ) KUZEY BÖLÜM STRÜKTÜR ANALİZİ VE SAĞLAMLAŞTIRMA ÖNERİLERİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Zeynep AHUNBAY**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Prof.Dr. Feridun ÇILI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Görün ARUN**
Yıldız Teknik Üniversitesi

.....
Prof. Dr. Eser DURUKAL ÇAKTI
Boğaziçi Üniversitesi

.....
Prof. Dr. Alper İLKİ
İstanbul Teknik Üniversitesi

.....
Doç. Dr. Yegân KÂHYÂ
İstanbul Teknik Üniversitesi

.....
Yrd. Doç. Dr. Gülsün TANYELİ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **14 Haziran 2010**
Savunma Tarihi : **15 Temmuz 2011**

Eşime ve aileme,

ÖNSÖZ

Çalışma sürecinde sonsuz sabrı ve özverili katkıları nedeniyle tez danışmanım Prof. Dr. Zeynep Ahunbay’a, problemlerin aşılmasında alternatif yolları işaret eden eş danışmanım Prof. Dr. Feridun Çılı’ya ve yapıcı eleştirileri nedeniyle değerli jüri üyelerine teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz 2011

Umut Almaç
(İnş. Müh.)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Çalışmanın Kapsamı ve Yöntemi.....	1
2. İSTANBUL VE YAKIN ÇEVRESİNDE ORTAÇAĞ YAPILARI.....	5
2.1 Ortaçağ Yapılarında Kullanılan Yapım Teknikleri ve Malzemeleri	5
2.1.1 Tasarım ve yapım anlayışı	6
2.1.2 Malzeme	7
2.1.2.1 Tuğla	7
2.1.2.2 Taş	7
2.1.2.3 Harç	8
2.1.2.4 Ahşap	9
2.1.3 Temeller	9
2.1.4 Duvarlar	12
2.1.5 Kemer ve tonozlar	13
2.1.6 Ahşap gergiler ve hatıllar	15
3. ZEYREK CAMİİ (PANTOKRATOR MANASTIRI KİLİSESİ).....	17
3.1 Tarihçe ve Genel Bilgiler	17
3.2 Taşıyıcı Sistem Şeması (Kuzey Kilise).....	19
3.3 Yapının Geçirdiği Afetler ve Onarımlar	21
3.3.1 Osmanlı Döneminde yapılan onarımlar	22
3.3.2 1950-1970 yılları arasında yapılan onarımlar	24
3.3.3 1997-1998 ve 2001-2005 yılları arasında yapılan onarımlar	25
3.4 Yapının Temelleri ve Zemin Koşulları	26
3.4.1 Zemin özellikleri	26
3.4.2 Yapının temelleri.....	28
3.5 Deprem Bölgesinin Özelliği.....	28
3.6 Mevcut Hasarlar ve Nedenleri.....	31
3.6.1 Taşıyıcı ayaklar	31
3.6.2 Demir gergiler	35
3.6.3 Kuzey nef örtü sistemindeki hasar	35
3.6.4 Doğu tonozundaki hasar.....	38
3.6.5 Kubbe ve batı tonozundaki hasar	39
3.6.6 Doğu Cephesinde Hasarlar.....	39
3.6.7 Galerideki hasarlar	40

3.6.8 Ahşap hatıl ve gergilerdeki hasarlar	41
4. ANALİZLER VE DEĞERLENDİRME	43
4.1 Tarihi Yapıların Taşıyıcı Sistem Analizi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi	43
4.2 Geometrik Model.....	44
4.3 Analizlerde Kullanılan Elemanlar	45
4.4 Analizlerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	46
4.5 Yapı Zemin İlişkisi	46
4.6 Analizler	46
4.6.1 Doğrusal elastik statik analiz.....	47
4.6.1.1 Model 1	48
4.6.1.2 Model 2	49
4.6.1.3 Model 3	51
4.6.1.4 Model 4	51
4.6.1.5 Model 5	53
4.6.2 Modal Analiz.....	53
4.6.3 Modal spektral analiz	55
4.6.3.1 X ekseninde modal spektral analiz	57
4.6.3.2 Y ekseninde modal spektral analiz	62
4.6.4 Diğer analizler	64
5. ONARIM VE SAĞLAMLAŞTIRMA	69
5.1 Tarihi Yapıların Onarım ve Sağlamaştırma Çalışmalarında Kullanılan Yasa ve Yönetmelikler	69
5.1.1 Uluslararası Kuruluşların Hazırladığı Tüzükler	70
5.1.1.1 ICOMOS	70
5.1.1.2 Avrupa Konseyi (COE)	71
5.1.2 Ulusal Kuruluşların Hazırladığı Metinler	72
5.1.2.1 T.C. Kültür Bakanlığı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Yüksek Kurulu İlke Kararları	72
5.1.2.2 Bayındırlık ve İskân Bakanlığı - Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik.....	73
5.1.3 Konu ile İlgili Diğer Metinler	73
5.1.3.1 Eurocode6 - TS EN 1996-1-1, Eurocode8 - TS EN 1998	73
5.1.3.2 O.P.C.M.3274/03 – O.P.C.M.3431/05 – Linee Guida	73
5.1.4 Değerlendirme	74
5.2 Onarım İlkeleri	75
5.3 Zeyrek Camii Kuzey Bölümü İçin Sağlamaştırma Önerileri	77
5.3.1 Duvarlar.....	78
5.3.1.1 Derz Onarımı	78
5.3.1.2 Dikiş	79
5.3.1.3 Enjeksiyon	80
5.3.1.4 Açıklıkların Kapatılması	83
5.3.2 Ayaklar ve Sütunlar:.....	83
5.3.2.1 Çemberleme (Kuşaklama).....	83
5.3.2.2 Donatı kullanımı.....	84
5.3.3 Kemer ve Tonozların Sağlamaştırılması	84
5.3.3.1 Kemer ve Tonoz İtkilerinin Karşılanması	85
5.3.3.2 Tonoz Üzerindeki Yükün Azaltılması.....	86
5.3.3.3 Tonoz Örgüsünün İyileştirilmesi.....	87
5.3.3.4 Tonozu Destekleyen Sistemler	88
5.3.4 Gergi Sistemi.....	89

5.3.4.1 Ana Mekân	90
5.3.4.2 Narteks ve Galeri.....	91
6. ONARIM VE SAĞLAMLAŞTIRMA ÖNERİLERİNİN	
ETKİNLİKLERİNİN İRDELENMESİ.....	93
6.1 Analizler	93
6.1.1 Doğrusal Elastik Statik Analiz:.....	96
6.1.2 Modal Analiz:	97
6.1.3 Modal Spektral Analiz	97
6.1.3.1 X ekseninde modal spektral analiz.....	98
6.1.3.2 Y ekseninde modal spektral analiz.....	99
6.2 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	100
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	101
KAYNAKLAR	105
EKLER.....	111

KISALTMALAR

[K]	: Rijitlik matrisi : Kuvvet vektörü
[M]	: Kütle matrisi : Yerdeğiştirme vektörü : İvme vektörü : i'inci doğal frekansın mod şekline karşılık gelen eigen vektörü : i'inci doğal açısal frekans
S₁	: Maksimum asal gerilme (Çekme gerilmesi)
S₃	: Minimum asal gerilme (Basınç gerilmesi)
S_x-S_y-S_z	: X-Y ve Z eksenlerinde gerilmeler
S_{xz}- S_{xz}-S_{xz}	: İlgili düzlemlerde kayma gerilmeleri
SRSS	: Karelerinin karekökünün toplamı
g	: Yerçekimi ivmesi
u	: X ekseninde yer değiştirme
v	: Y ekseninde yer değiştirme
w	: Z ekseninde yer değiştirme
DBYBHY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
OPCM	: Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri
ICOMOS	: International Council on Monuments and Sites
ISCARSAH	: International Scientific Committee on the Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage
COE	: Council of Europe

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1 : Modal analiz sonuçları	55
Çizelge 4.2 : Model 5, X eksenı doğrultusunda modal analiz sonuçları.	58
Çizelge 4.3 : Model 5, Y eksenı doğrultusunda modal analiz sonuçları.	59
Çizelge B.1 : 1982 yılında İski idaresi için Fatih Tüneli güzergâhı boyunca yapılan sondaj verileri	150
Çizelge B.2 : Kuzey Anadolu Fayı'nda 0-2000 yılları arasında meydana gelen depremler	156
Çizelge F.1 : Tonoz yükleri	193

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1: Zeyrek Camii planı.....	17
Şekil 3.2: Zeyrek Camii kuzey bölüm kubbesi ve taşıyıcı tonozlarında yük akışı....	19
Şekil 3.3: Zeyrek Camii kuzey bölüm kuzeybatı ayağı, plan ve perspektif.	31
Şekil 3.4: Zeyrek Camii kuzey bölüm kuzeydoğu ayağı, plan ve perspektif.	32
Şekil 3.5: Zeyrek Camii kuzey bölüm kuzeydoğu ayağı.	33
Şekil 3.6: Zeyrek Camii kuzey bölüm güneydoğu ayağı.....	33
Şekil 3.7: Zeyrek Camii kuzey bölüm güneydoğu ayağı, doğuya bakış.	34
Şekil 3.8: Zeyrek Camii kuzey bölüm güneydoğu ayağı, kuzeye bakış.....	34
Şekil 3.9: Zeyrek Camii kuzey bölüm kuzeydoğu ayağı, taş sıraları.	35
Şekil 3.10: Kuzey nef boyunca doğu-batı doğrultusunda uzanan çatlak.....	36
Şekil 3.11: Kuzey duvarının kuzey-güney doğrultuda yatay yükler altında düzlem dışı hareketi ile ilişkili olası hasar senaryosu.	37
Şekil 3.12: Kuzey duvarı ve narteks duvarı arasındaki çatlakla ilgili olası hasar senaryosu.....	37
Şekil 3.13: Kuzey duvarında zemin oturumları ile ilişkili hasar senaryosu.	38
Şekil 3.14: Doğu tonozundaki çatlak.....	39
Şekil 3.15: Galeri tonozları boyunca kuzey-güney doğrultusunda uzanan çatlak....	40
Şekil 4.1 : Analizlerde kullanılan dört yüzlü eleman.	45
Şekil 4.2 : Analizlerde kullanılan modeller.	47
Şekil 4.3 : y ekseninde (kuzey-güney) çekme gerilmeleri.....	48
Şekil 4.4 : x ekseninde (doğu-batı) çekme gerilmeleri.	48
Şekil 4.5 : S3 minimum asal gerilmeler, güneydoğu ayağında minimum değerler...	48
Şekil 4.6 : y ekseninde (kuzey-güney) yer değiştirme.....	48
Şekil 4.7 : Toplam yer değiştirme.....	49
Şekil 4.8 : S1 maksimum asal gerilme grafiği.	49
Şekil 4.9 : x ekseninde (doğu-batı) yer değiştirme, güney duvarı.	50
Şekil 4.10 : y ekseninde (kuzey-güney) yer değiştirme, doğuya bakış.	50
Şekil 4.11 : Model 2 - x ekseninde (doğu-batı) çekme gerilmeleri.	50
Şekil 4.12 : Model 2 - y ekseninde (kuzey-güney) çekme gerilmeleri.....	50
Şekil 4.13 : Model 2 - kuzey cephede x ekseninde (doğu-batı) gerilmeler.	51
Şekil 4.14 : Model 2 – maksimum asal gerilmeler.	51
Şekil 4.15 : Model 3 - y ekseninde (kuzey-güney doğrultusunda) yer değiştirme. ...	51
Şekil 4.16 : Model 3 – maksimum asal gerilmeler.	51
Şekil 4.17 : Model 4 – Kubbe ve kasnağında çekme gerilme dağılımı.	52
Şekil 4.18 : Model 4 – Kubbe ve kasnağında çekme gerilme dağılımı, S1.....	52
Şekil 4.19 : Model 4 - y ekseninde (kuzey-güney doğrultusunda) yer değiştirme. ...	52
Şekil 4.20 : Model 4 - y ekseninde (kuzey-güney doğrultusunda) gerilme dağılımı.	52
Şekil 4.21 : Model 1 – Titreşim modları.	54
Şekil 4.22 : Model 4 – Titreşim modları.	54
Şekil 4.23 : Elastik ivme spektrumu	56

Şekil 4.24 : X eksenini doğrultusunda modal spektral analiz sonucunda X eksenindeki gerilme dağılımı.	60
Şekil 4.25 : X eksenini doğrultusunda modal spektral analiz sonucunda X ekseninde toplam yer değiştirme dağılımı.....	60
Şekil 4.26 : X eksenini doğrultusunda modal spektral analiz, batı duvarında gerilme dağılımı, SY.....	60
Şekil 4.27 : X eksenini doğrultusunda modal spektral analiz, X ekseninde toplam yer değiştirme dağılımı,perspektif.....	60
Şekil 4.28 : Maksimum asal gerilmelerin galeri tonozlarında dağılımı.....	61
Şekil 4.29 : X eksenini doğrultusunda modal spektral analiz, galeri tonozları ile batı duvarı arasında çekme gerilmeleri, SX.	61
Şekil 4.30 : Kuzey cephede kayma gerilmelerinin dağılımı.....	61
Şekil 4.31 : Y eksenini doğrultusunda modal spektral analiz, Y ekseninde gerilme dağılımı.....	63
Şekil 4.32 : Y eksenini doğrultusunda modal spektral analiz, Y ekseninde toplam yer değiştirme dağılımı.....	63
Şekil 4.33 : Y eksenini doğrultusunda modal spektral analiz, doğu duvarında kayma gerilmesi dağılımı.....	63
Şekil 4.34 : Y eksenini doğrultusunda modal spektral analiz, doğu cephesinde kayma gerilmesi dağılımı.....	63
Şekil 4.35 : Batı cephesinde Y eksenini doğrultusunda modal spektral analiz, kayma gerilmesi dağılımı, doğuya bakış.....	64
Şekil 4.36 : Y eksenini doğrultusunda modal spektral analiz, Narteks-naos arasındaki duvarın iç yüzeyinde kayma gerilmeleri, batıya bakış.....	64
Şekil 4.37 : Kuzeydoğu ve kuzeybatı ayaklarında oturma durumunda kuzey tonozda tespit edilen y eksenindeki gerilme dağılımı.....	65
Şekil 4.38 : Kuzeydoğu ve kuzeybatı ayaklarında oturma durumunda yapıdaki yer değiştirme dağılımı.....	65
Şekil 5.1: Derz onarımı.....	79
Şekil 5.2: Zeyrek Camii, güney bölüm dış narteks tonozunda dikiş uygulaması.....	80
Şekil 5.3: Zeyrek Camii, güney bölüm dış narteks tonozunda hasarlı bölümlerin temizlenmesi.....	80
Şekil 5.4: Enjeksiyon uygulaması, San Francesco Bazilikası, Assisi.....	81
Şekil 5.5: Tonoz itkilerinin karşılanması.....	85
Şekil 5.6: Zeyrek Camii kuzey bölüm narteksi.....	85
Şekil 5.7: Tonoz üzerindeki dolgu.....	86
Şekil 5.8: Kemerin düşey yükler altında deformasyonu.....	87
Şekil 5.9: Kemerin yatay yükler altında deformasyonu.....	87
Şekil 5.10: Tonoz sırtında yeni bir tabakanın oluşturulması.....	88
Şekil 5.11: Tonoz itkisinin gergilerle karşılanması.....	89
Şekil 5.12: Kılıç tipleri.....	90
Şekil 5.13: Ana mekânda önerilen gergi sistemi.....	91
Şekil 5.14: Gergi sistemi önerisi, doğu-batı ekseninde kesitte kuzeye bakış.....	91
Şekil 5.15: Zeyrek Camii kuzey bölüm için önerilen gergi sistemi.....	92
Şekil 6.1: Link 8 elemanı.....	94
Şekil 6.2: Gergi elemanı olmayan beşik tonoz.....	95
Şekil 6.3: Gergi elemanına sahip beşik tonozda x ekseninde (gergi eksenini) gerilme dağılımı.....	95
Şekil 6.4: Gergi elemanına sahip beşik tonozda x ekseninde (gergi eksenini) gerilme dağılımı (DMX:0,341 mm SMX:0,035 MPa).....	95

Şekil 6.5: Gergi sistemine sahip yapıda Y ekseninde (kuzey-güney doğrultusunda) yer değiştirme (kuzey duvarda 0,975 mm)	96
Şekil 6.6: Mevcut yapıda X ekseninde (doğu-batı doğrultusunda) gerilme dağılımı	97
Şekil 6.7: Gergi sistemine sahip yapıda X ekseninde (doğu-batı doğrultusunda) gerilme dağılımı	97
Şekil 6.8: Gergi sistemine sahip yapının titreşim modları.....	97
Şekil 6.9: Gergi sistemine sahip taşıyıcı sistem, batı duvarında y ekseninde gerilme dağılımı	98
Şekil 6.10: Mevcut taşıyıcı sistem, batı duvarında y ekseninde gerilme dağılımı	98
Şekil 6.11: Gergi sistemine sahip taşıyıcı sistem, kuzey duvarında kayma gerilme dağılımı	99
Şekil 6.12: Kuzey duvarında narteks ve galeri parçalarına eklenen gergiler	99
Şekil 6.13: Gergi sistemine sahip taşıyıcı sistem, y ekseninde gerilme dağılımı.....	99
Şekil 6.14: Gergi sistemine sahip taşıyıcı sistem, batı duvarında kayma gerilmesi dağılımı	99
Şekil A.1 : Zeyrek Camii Güney Kilise galerisi ile Kuzey Kilise galerisinin birleşimi.	112
Şekil A.2 : Zeyrek Camii Şapel kubbesi ile güney kilise galerisinin birleşimi.	112
Şekil A.3 : İstanbul, Bodrum Camii güney cephesi	113
Şekil A.4 : Selanik, Panaghia Chalkeon Kilisesi.....	113
Şekil A.5 : Manisa, Salihli- Kilise E Planı, temel sisteminde ahşap hatıl kullanımı.	114
Şekil A.6 : Kiev, Tithe Kilisesi temelleri.	114
Şekil A.7 : Fenari İsa Camii, Kuzey ve Güney Kiliselerde üst yapı temel ilişkisi..	115
Şekil A.8 : Kiev, Bizans yapılarının temellerindeki ahşap hatılların birleşiminde demir çivi kullanımı	115
Şekil A.9 : İstanbul Kara Surları, tuğla hatıllı duvar örgüsü.	116
Şekil A.10 : Zeyrek Camii, gizli tuğla tekniği.....	116
Şekil A.11 : Zeyrek Camii güney bölüm doğu cephesi, gizli tuğla tekniği.....	117
Şekil A.12 : Bursa-Mudanya, Archangels Kilisesi(H. Taxiarchoi Kilisesi, 9. yy başı), naosu örten kaburgalı kubbe.	117
Şekil A.13 : Zeyrek Camii, güney bölüm narteksinin dilimli kubbesi.	118
Şekil A.14 : İstanbul, Mangana Sarayı örtü elemanları üzerinde amfora kullanımı	118
Şekil A.15 : Kariye, tonoz üzerinde amfora kullanımı.....	119
Şekil A.16 : Duvar içinde farklı seviyelerde ahşap hatıllar	119
Şekil A.17 : Makedonya/Ohrid, St. Bogorodica Zahumska Kilisesi.....	120
Şekil A.18 : Selanik, Aziz Havariyum Kilisesi, farklı seviyelerde ahşap gergiler..	120
Şekil A.19 : İstanbul - Aya İrini, ahşap gergilerin birleşim detayı.....	121
Şekil B.1 : İstanbul Tarihi Yarımada.....	123
Şekil B.2 : İstanbul, Fatih İlçesi.....	123
Şekil B.3 : İstanbul, Zeyrek Cami doğu Cephesi, 2005.....	124
Şekil B. 4 : Zeyrek Camii planı	125
Şekil B. 5 : Zeyrek Camii kuzey bölüm planı	126
Şekil B.6 : Zeyrek Camii kuzey bölüm kubbesi ve taşıyıcı tonozlarında yük akışı.	127
Şekil B.7 : Zeyrek Camii kuzey bölüm kubbesi.	127
Şekil B.8 : Zeyrek Camii kuzey bölüm mekân köşelerindeki çapraz tonozlar.....	128
Şekil B.9 : Zeyrek Camii kuzey bölüm, serbest ayaklar, doğuya bakış.	128
Şekil B.10 : Zeyrek Camii kuzey bölüm kubbesi ve doğu cephesi.	129
Şekil B.11 : Zeyrek Kuzey Kilisesi bema ve apsis örtüleri.	129
Şekil B.12 : Zeyrek Camii kuzey bölüm doğu cephesi.	130

Şekil B.13 : Zeyrek Camii kuzey bölüm, kuzey pastoforion.....	130
Şekil B.14 : Zeyrek Camii kuzey bölüm, kuzey cephesi.	131
Şekil B.15 : Zeyrek Camii kuzey bölüm, güney duvarı.....	131
Şekil B.16 : Kuzey bölüm güney duvarı, kuzey bölüm ile Mezar Şapeli ayaklarının birleşimi.	132
Şekil B.17 : Narteks ve galerinin naosa bakan duvarı.	132
Şekil B.18 : Galeri, doğu duvarı.	133
Şekil B.19 : Zeyrek Camii kuzey bölüm, batı cephesi.....	133
Şekil B.20 : Kuzey bölüm batı cephesi, üçlü pencere düzeni.....	134
Şekil B.21 : Kuzey Kilise Doğu Cephesi, 2001-2005 onarımları öncesi	134
Şekil B.22 : Kuzey bölüm doğu cephesi, apsis duvarı üçlü pencere düzeni.....	135
Şekil B.23 : Kuzey bölüm batı cephesi (Ebersolt, Thiers,1913).....	135
Şekil B.24 : Kuzey bölüm batı tonozu ve kubbe	136
Şekil B.25 : Kuzey bölüm merkezdeki ayaklar.	136
Şekil B.26 : Galeri örtüsünün desteklenmesi için Osmanlı Dönemi'nde inşa edilmiş kemer	137
Şekil B.27 : 1966-1967 onarımları öncesinde kuzey bölüm batı cephesi.....	137
Şekil B.28 : 1966-1967 onarımları sonrasında kuzey bölüm batı cephesi.....	138
Şekil B.29 : 1966-1967 onarımlarında kuzey bölüm batı cephesi.....	138
Şekil B.30 : Kuzey bölüm kuzey cephesi, 1913	139
Şekil B.31 : 1966-1967 onarımları sonrasında Kuzey bölüm kuzey cephesinin görünümü.....	139
Şekil B.32 : Kuzey bölüm çatı örtüsünde 1966-1967 onarımlarına ait kurşun taklidi beton kaplama.....	140
Şekil B.33 : Kuzey bölüm,1966-1967 onarımlarına ait yükseltilmiş betonarme çatı örtüsü	140
Şekil B.34 : Güney bölüm güney tonoz,1997-1998 onarımlarında beton kaplamanın kaldırılması	141
Şekil B.35 : Kuzey bölüm, kuzey tonozdaki çatlak.....	141
Şekil B.36 : Kuzey bölüm batı tonozu ve civarı,2001-2005 onarımlarında betonarme çatı örtüsünün kaldırılması	142
Şekil B.37 : Kuzey bölüm galeri tonozu, 2001-2005 onarımları öncesinde batı duvarına paralel ilerleyen çatlak.....	142
Şekil B.38 : Kuzey bölüm kurşun çatı kaplaması.....	143
Şekil B.39 : Kuzey bölüm doğu cephesi, onarım öncesi kuzey pastophorion.....	143
Şekil B.40 : Kuzey Kilise doğu cephesi, onarım öncesi güney pastophorion	144
Şekil B.41 : Kuzey Kilise doğu cephesi, onarım öncesi kuzey pastophoriondaki hasarlar	144
Şekil B.42 : Tarihi Yarımada Jeolojik yapı	145
Şekil B.43 : Tarihi Yarımada, Yenikapı-Unkapanı güzergâhı jeolojik yapı	146
Şekil B.44 : Manifaturacılar Çarşısı için yapılan sondaj noktaları	147
Şekil B.45 : Manifaturacılar Çarşısı için yapılan zemin etüdü.....	148
Şekil B.46 : 1982 yılında İski idaresi için Fatih Tüneli güzergâhı boyunca yapılan sondaj noktaları	149
Şekil B.47 : Fatih İlçesi jeoloji haritası.....	151
Şekil B.48 : Zeyrek Camii yakınında yapılan zemin etüdü verileri.....	152
Şekil B.49 : Apsis duvarı, sokak kotundan 3 metre derinliğe kadar yapılan inceleme kazısı.....	154
Şekil B.50 : Apsis duvarı, sokak kotundan 3 metre derinliğe kadar yapılan inceleme kazısında belgeleme çalışmaları.....	154

Şekil B.51 :	Avrasya, Arap ve Afrika Plakalarının hareketleri ve Anadolu Bloğu .	155
Şekil B.52 :	Kuzey Anadolu Fayı'nın batı kolları	155
Şekil B.53 :	Kuzey Anadolu Fayı'nda 1500-2000 yılları arasında meydana gelen depremlerin yerleri ve tarihleri.....	157
Şekil B.54 :	Kuzey Bölüm kuzeydoğu ayağı.....	157
Şekil B.55 :	Kuzey Bölüm güneybatı ayağı.	158
Şekil B.56 :	Kuzey bölüm güneydoğu ayağı.	158
Şekil B.57 :	Kuzey bölüm, demir gergilerde korozyon.	159
Şekil B.58 :	Zeyrek Camii kuzey bölüm galerisi, kuzey köşesi.	159
Şekil B.59 :	Zeyrek Camii kuzey bölüm galerisinde kuzey-güney doğrultusunda uzanan çatlak.	160
Şekil B.60 :	Kuzey bölüm narteks kuzey duvarındaki kemerli açıklıkta çatlak.	160
Şekil B.61 :	Zeyrek Camii kuzey bölüm doğu cephesinde, apsis pencereleri arasındaki ahşap gerilerin onarımlarda tekrar yerlerine konulması. ...	161
Şekil B.62 :	Kuzey bölüm galerisinde yok olan ahşap gergilerin boşlukları.....	161
Şekil C.1:	Modelin yapımında kullanılan plan.....	163
Şekil C.2:	Duvarların birbirlerine dik oldukları kabulü.	163
Şekil C.3:	Ayaklar ve taşıyıcı duvarların köşeleri 90 derece olan ideal dörtgenlerin birleşimiyle oluşturulması.	164
Şekil C.4:	Çapraz tonozlarda tonozun karşılıklı kollarının aynı geometrik özellikleri gösterdiği kabulü.	164
Şekil C.5:	Modelin parçalara ayrılabilir niteliği.....	165
Şekil C.6:	Taşıyıcı elemanlar ile taşıyıcı olmayan elemanların ayrımı.....	165
Şekil C.7:	Detaylı geometrik formlara sahip sütun başlıkları vb... gibi öğelerin ifade edilmesi.	166
Şekil E.1 :	Zeyrek Camii Kuzey Bölüm narteks tonozu, idealize edilmiş	177
Şekil E.2 :	Zeyrek Camii Kuzey Bölüm narteks tonoz itkisi.	178
Şekil E.3 :	Zeyrek Camii Kuzey Bölüm galeri tonozu.....	180
Şekil E.4 :	Zeyrek Camii Kuzey Bölüm narteks tonoz itkisi	181
Şekil E.5 :	Narteks tonozu, mevcut yükleme durumunda kemer kesiti içindeki basınç eğrisi ve kesitlerde gerilme dağılımı	183
Şekil E.6 :	Narteks ve galeride tonoz itkilerini karşılayan gergi sistemi.....	184
Şekil E.7 :	Narteks ve galeride gergi sistemi önerisi.....	185
Şekil E.8 :	Narteks ve galeride gergi sistemi önerisi.....	185
Şekil E.9 :	Gergi ve kılıç detayı.....	186
Şekil F.1 :	Narteks tonozu, mevcut yükleme durumunda kemer kesiti içindeki basınç eğrisi ve kesitlerde gerilme dağılımı	189
Şekil F.2 :	Zeyrek Camii Kuzey Bölüm narteks tonozu.....	190
Şekil F.3 :	Çapraz tonozu meydana getiren kemerler.....	191
Şekil F.4 :	Tonozun en kenarındaki kemer şeridi.....	192
Şekil F.5 :	Narteks çapraz tonozu, mevcut yükleme durumunda en kenardaki kemerin itkisi.....	194
Şekil F.6 :	Narteks tonozu, enine ve boyuna kemerlerin diyagonal kemere itkilerini aktarması	195
Şekil F.7 :	Narteks tonozunun sonlu elemanlar modeli.....	195

ZEYREK CAMİİ (PANTOKRATOR KİLİSESİ) KUZEY BÖLÜM STRÜKTÜR ANALİZİ VE SAĞLAMLAŞTIRMA ÖNERİLERİ

ÖZET

1985 yılında Unesco'nun Dünya Mirası Listesi'ne giren İstanbul'un Tarihi Alanları içinde bulunan Zeyrek Camii (Pantokrator Kilisesi), 1960'larda yapılan onarım çalışmaları sonrasında bakımsız kalmış bir Bizans yapısıdır. Yapı, 12. yüzyılda Pantokrator Manastırı'nın kilisesi olarak inşa edilmiştir. Ortaçağdan günümüze ulaşan bu önemli anıt, geçmişte birçok deprem ve yangın sonucu zarar görmüştür.

Yapı, farklı tarihlerde inşa edilmiş üç bölümden oluşmaktadır. Güney Kilise, kompleksin ilk inşa edilen bölümüdür. İkinci aşamada Kuzey Kilise ve son olarak bu iki kilisenin arasına mezar şapeli inşa edilmiştir. Tüm bu yapım aşamaları 1118-1136 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir. Bugün yapının sadece güney bölümü camii olarak kullanılmaktadır. 2008 yılında İstanbul Büyükşehir Belediyesi yapının onarım işini ihale yoluyla özel bir firmaya vermiştir.

Zeyrek Camii Kuzey Bölümü, Bizans mimarisinin en yaygın tiplerinden biri olan Yunan haçı planındadır. Ana mekânın batısında narteks ve galeri bulunmaktadır. Haçın kolları beşik tonozlar, merkezi kasnaklı bir kubbe ile örtülüdür. Hacmin köşelerinde kalan alanların üzerinde çapraz tonozlar bulunmaktadır. Yapının taşıyıcı sistemi, tuğla ile inşa edilmiş eğrisel örtü elemanları ve bu elemanları taşıyan duvarlar ile ayaklardan oluşmaktadır. Ana kubbenin yükü merkezdeki 4 taşıyıcı ayakla zemine aktarılmaktadır. Kubbe kasnağının oturduğu dairesel tabana geçiş pandantiflerle sağlanmıştır. Pandantiflerle tanımlanan dairesel taban üzerinde silindirik bir tambur yükselmektedir.

Bu çalışmada, Zeyrek Camii (Pantokrator Kilisesi) Kuzey Bölümünde taşıyıcı sistem analizi yapılmış ve yapının onarımı için müdahale önerileri hazırlanmıştır. Çalışmanın, kompleksin kuzey bölümüyle sınırlı tutulması, bu bölümün strüktürel açıdan yapı bütünü içinde en hasarlı kısım olması ve bu nedenle olası bir sağlamlaştırma çalışmasında, bu alanın öncelikli olarak müdahale gerektirmesidir.

Çalışma kapsamında, yapıda gözlemlenen hasarlar ölçekli çizimlere işlenmiş ve fotoğraflarla belgelenmiştir. Yapı ile ilgili daha önce hazırlanan çalışmalar, eski fotoğraf ve çizimler incelenerek yapının geçirdiği depremler ve onarımlarla ilgili veriler sağlanmıştır.

Yapının taşıyıcı sistem davranışı hakkında bilgi edinmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemine dayalı sayısal modeller hazırlanmıştır. Analizlerde malzemenin her doğrultuda aynı özelliklere sahip doğrusal elastik bir malzeme olduğu kabul edilmiş ve yapının tüm taşıyıcı sistem elemanlarının aynı malzeme özelliği gösterdiği varsayılmıştır. Analizlerde katı model, 10 nokta ile tanımlanan ve maksimum kenar uzunluğu 30 cm dörtyüzlü elemanlar kullanılarak parçalara ayrılmıştır. Sayısal modellerde yapının zemine rijit olarak bağlandığı kabul edilmiştir. Analizler, yapının kendi ağırlığı etkisinde taşıyıcı sistem elemanlarında oluşan gerilme ve şekil

değiştirme durumunun araştırılması amacıyla doğrusal elastik statik analizlerle başlamaktadır. Deprem davranışına yönelik olarak, ilk önce yapının titreşim frekansları ve modlarının belirlenmesi amacıyla modal analiz, daha sonra modal analizden elde edilen veriler ve tanımlanan spektrumlar kullanılarak modal spektral analizler yapılmıştır.

Mevcut hasarların, analiz sonuçları ile uyumları incelenmiş ve farklı hasar senaryoları değerlendirilmiştir. Yapının, mevcut hasarlarının onarımı ve yakın gelecekte beklenen İstanbul Depremi'ni mümkün olan en az hasarla atlatabilmesi amacıyla, çağdaş koruma ilke ve yaklaşımı gözetilerek müdahale önerileri geliştirilmiştir.

Tarihi yapıların karakteri mühendislerin alışageldiğı kesinlikte bir çözümü mümkün kılmamaktadır. Bunun yanında, birçok inşaat mühendisi ne mesleki eğitiminde, ne de deneyiminde tarihi yapılarla karşılaşmadığı için bu alana yabancısıdır. Mühendisin çağdaş yapıların tasarımı, güçlendirilmesi ve projelendirilmesi aşamasında çözüme giderken kullandığı kural ve yönetmelikler tarihi yapıların onarımı için uygun olmamaktadır. Zeyrek Camii ile ilgili çalışmada kullanılan yöntemin benzer özellikler sergileyen tarihi yapıların taşıyıcı sistem onarım ve sağlamlaştırma çalışmalarında kullanılabileceğı, bu açıdan çalışmanın konu ile ilgilenen mühendislere yol gösterici bir kaynak olabileceğı düşünülmektedir.

.

STRUCTURAL ANALYSIS OF NORTHERN PART OF ZEYREK MOSQUE (PANTOKRATOR CHURCH) AND PROPOSALS FOR ITS CONSOLIDATION

SUMMARY

Pantokrator Church, known as Zeyrek Camii, is originally a Byzantine monument which was constructed in the 12th century as part of the monastery of Christ Pantokrator. It is located in Zeyrek, a district that was included in the World Heritage List in 1985. The church suffered from numerous earthquakes, fires and alterations in history; furthermore, it was neglected for a long time after the restoration works in 1960's.

The building is composed of three parts, which were built in rapid succession between 1118 and 1136. The southern church is the first structure erected within the reign of John II Komnenos. The northern church was built in the second phase and finally the middle part, the imperial mausoleum was added in the third phase. Today the south church still functions as a mosque, while the mausoleum and the north church are not used. In 2008, the repair and conservation work of this Byzantine monument was given to a private company through a procurement method by Istanbul Metropolitan Municipality.

The church is an example of “cross in square” type with a dome supported by four columns. A cross-vaulted narthex with a gallery is attached to the main structure. The plan of the naos, excluding the bema and apses is laid out as a square 13.50 meters on a side. Inscribed in this is a cross with arms 6 meters in width, projecting in the four cardinal directions. The structure has barrel vaults on the cross arms and a dome with a 5.50 meters diameter surmounting the cross at its intersection. The dome is raised on a cylindrical drum and pierced by eight windows. Transition elements are pendentives and cross vaults are used to cover the four subsidiary bays, those flanking the bema and the two corner bays to the west.

Different types of analysis were performed and intervention proposals were developed for the northern part of the complex. The reason for choosing the North Church was due to its fragile condition in comparison with the other parts of the complex. This part has severe cracks and consequently, during a possible repair, it should have a priority.

Within the framework of the study, all the visible damages were recorded on survey documents and classified according to their pattern and extent. Historic documents including drawings, photographs and reports were inspected in order to understand and interpret damages due to earthquakes and to frame the extent of repair works to prevent further damages from earthquakes in the future.

To figure out the behavior of the structure, some numerical models were prepared using finite elements. Masonry was modeled as a homogeneous material, which behaved within the elastic range under compressive and tensile stresses. Finite

element discretization of the structure was made by using sufficient number of elements with max edge dimension of 30 cm. The foundation of the building was assumed to be rigidly fixed to the ground for all types of analyses.

The study started with the linear static analyses and continued with modal analyses to determine vibration characteristics (natural frequencies and mode shapes) of the structure. The stress distribution of the structure under its own weight indicated maximum compressive stresses at the southeast pier, which has vertical cracks. As expected, the values of tensile stresses that dominate the barrel vaults and the arches that connect the piers to the perimeter walls were not big enough to provoke damages that would lead the structure into a vulnerable condition. One of the important results obtained from the analyses was the displacements on the transversal direction corresponding to the eastern piers. As the structure lacks tie beams between the piers and walls, there is no effective system that could prevent the displacements and secure the monolithic behavior the structure.

According to modal analysis results, the first mode shape of the structure was influenced by transversal movement, the second by longitudinal and the third by torsion. The data obtained from these serve as a starting point for a spectrum analysis. The behavior of the structure under earthquake excitations was obtained through spectrum analysis in which a predetermined acceleration spectrum graph was used. The response spectrum was defined according to Turkish Earthquake Resistant Design Code and internal forces were obtained by using SRSS rule. The analyses were carried out in longitudinal and transversal directions. The effective mass of the considered modes were greater than 90% of the overall mass of the structure.

Earthquake loading in the longitudinal direction (EW) indicated that due to the out of plane mechanism of the west wall, the tensile stress distribution between cross vaults and west wall could possibly cause a crack pattern that runs through the vaults parallel to the west wall. This mechanism matches the crack pattern of the gallery vaults that were repaired during the conservation works between 2001 and 2005. The results of the analysis indicated also relatively high shear stresses on northern and southern walls but the damages should be expected on the secondary load bearing elements such as tympanums.

Shear stress distribution of earthquake loading computed in the transversal direction (NS) demonstrated that the eastern wall was subjected to high values of stresses in comparison with the other parts of the structure. During the earthquake excitations, pastophorion walls probably would be affected by a crack formation that begins from the ground and reaches to the upper parts of the wall running through the openings. This result also verifies the damaged condition of the eastern wall, which was repaired during the conservation works, carried out by professors Metin and Zeynep Ahunbay in 2005.

In order to preserve the authenticity of the structure in the present state and to prevent further damages from the possible earthquake excitations, preliminary proposals were prepared having in mind the minimum intervention-maximum efficiency principle. Naturally, these interventions aim primarily to prevent out of plane mechanisms and to restore the mechanical properties of the structural elements. The proposals could range from simple repairs to more complex interventions as; cleaning, repointing and replastering of walls and vaults, grouting masonry, stitching major cracks, reintegrating-rebuilding disorganized and missing parts, embracing the

eastern pier with more efficient stainless steel frame and replacing the lost timber ties with a new tie system.

The most intense intervention for the structure is the installation of a new tie system as a substitution of lost timber ties. New elements were proposed to present in the main space as well as the narthex and gallery. In the main space, the system stands on the level of capitals of the piers and continues on the longitudinal and transversal directions. While for the narthex and gallery, the system stands on the impost level of cross vaults. The efficiency of this tie system was investigated through the same analysis process, which was employed for the existing structure. The tie rods were realized with simple 2D link elements and some modifications were made to the nodes of contact surfaces between the masonry and connection plates. The results of the analysis with the installation of tie system showed a remarkable reduction of displacements, as well as the prevention of out of plane mechanisms especially on the western part of the structure.

1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

1985 yılında Unesco'nun Dünya Mirası Listesi'ne giren İstanbul'un Tarihi Alanları içerisinde bulunan Zeyrek Camii zamanın etkisiyle harap olmuş bir anıttır. Ortaçağdan bugüne ulaşan bu önemli anıtın geleceğe güvenle aktarılabilmesi için onarılmalıdır.

Çalışmanın amacı, Zeyrek Camii (Pantokrator Kilisesi) için koruma önerilerinin geliştirilmesidir. Karşılaşılan sorunların çözümü için takip edilen rasyonel sürecin aşamaları; tespit, teşhis ve çözümdür.

Yeni yapıların inşasında inşaat mühendisinin rolü, sınırları belirli bir çerçeve içerisinde; sonuçları kesin veya yüksek hassasiyette yaklaşık olarak çözülebilecek problemlerle uğraşır. Tarihi yapıların karakteri ise mühendisin alışageldiği kesinlikte bir çözümü mümkün kılmamaktadır. Bunun yanında, birçok inşaat mühendisi ne mesleki eğitiminde ne de deneyiminde tarihi yapılarla karşılaşmadığı için bu alana yabancısıdır. modern yapıların tasarımı, güçlendirilmesi ve projelendirilmesi aşamasında mühendisin çözüme giderken kullandığı kurallar ve yönetmelikler tarihi yapıların onarımı için uygun olmayabilmektedir.

Çalışmada kullanılan ilke ve yaklaşımın, çalışmaya konu olan yapıyla benzer özellikler sergileyen tarihi yapıların taşıyıcı sistem onarım ve sağlamlaştırma çalışmalarında kullanılabileceği, bu açıdan bakıldığında çalışmanın konu ile ilgilenen mühendisler için yol gösterici bir kaynak olabileceği düşünülmektedir.

1.2 Çalışmanın Kapsamı ve Yöntemi

Zeyrek Camii, yan yana inşa edilmiş üç kiliseden oluşmaktadır. Bu çalışma kapsamında, kompleksin kuzey bölümü incelenmiştir. Böyle bir sınırlandırmaya gidilmesinde, kuzeyde yer alan bölümün strüktürel açıdan yapı bütünü içerisinde en hasarlı kısım olması ve bu nedenle olası bir sağlamlaştırma çalışmasında, yapı bütünü içerisinde öncelikli müdahale gerektirmesidir.

Çalışmanın ilk aşamasında, yapının taşıyıcı sistemi ile ilgili tüm veriler farklı kaynaklar kullanılarak bir araya getirilmiştir. Örneğin; yapının geçirdiği afetlerle ilgili veriler yapının hem kendisinden, hem de tarihi ve güncel yazılı kaynaklardan, yapının geometrisi ile ilgili bilgiler tarihi çizim ile birlikte son yıllarda hazırlanan ölçekli çizimlerden, yapının üzerine oturduğu zemin özellikleri ile ilgili bilgiler ise yakın çevrede yapılan zemin etüdü çalışmalarından derlenmiştir.

İkinci aşama, yapının mevcut durumu ile ilgilidir. Bu aşamada, yapı yerinde incelenerek, hasarları saptanmış ve söz konusu hasar biçimleri ve etkili oldukları alan bilgileri belgelenmiştir. Belgeleme aşamasında, ölçekli çizimler üzerinde söz konusu hasarlar işlenmiştir.

Üçüncü aşamada, hasar nedenleri ve mekanizmaları geleneksel yöntemler kullanılarak irdelenmiştir. Geleneksel yöntemlerden anlaşılması gereken yığma yapı davranışının özellikle 19.yüzyıldan başlayarak bugüne değin bilimsel yöntemlerle incelenmesi sonucunda toplanan bilgi birikimidir. Yığma yapılarda meydana gelen hasarlar ve bunlara neden olan hasar mekanizmaları bilinmektedir. Bu yapıların deprem gibi doğal afetler sonrasında sergiledikleri hasar biçimleri yapı davranışları hakkında ipuçları vermektedir. Bu veriler, aynı özellikteki diğer yapıların benzer etkiler altında davranışlarının değerlendirilmesinde kullanılabilir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, yapının kendi ağırlığı etkisinde taşıyıcı sistem elemanlarında oluşan gerilme ve şekildeğiştirme durumunun irdelenmesine yönelik doğrusal elastik statik analiz, yapının titreşim frekansları ve modlarının belirlenmesi amacıyla modal analiz ve yapının deprem davranışının anlaşılabilmesi amacıyla spektrum analizleri yapılmıştır. Taşıyıcı sistem analizlerinde, özellikle 20. yüzyılın ikinci yarısında bilgisayar teknolojisinin hızla yaygınlaşması ve gelişmesine paralel olarak mühendislik problemlerine yaklaşık çözümler getiren sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan paket program, bu yönteme dayalı bilgisayar yazılımıdır. Kullanılan yapı malzemelerinin özellikle plastik alanda davranışlarındaki belirsizlikler, yapı bütünü içerisinde yer alan her noktanın malzeme özelliklerinin kesin bir biçimde bilinmesinin olanaksızlığı, taşıyıcı sistemin karmaşık geometrilili olması, yapıda gözlemlenen hasarların analizlerde ifade edilmesindeki zorluklar, analizlerin doğrusal elastik yapılması kararında etkili olmuştur. Analizlerde “basit” modeller kullanılması daha uygun bulunmuştur.

Beşinci bölümde, olası İstanbul depremine karşı yapının riskli bölgelerinde ne tür müdahaleler yapılabileceği ve bugün hasarlı olan bölgelerde onarım kararlarının ne olması gerektiği ile ilgili bilgiler sunulmuştur. Onarım çalışmaları kapsamında olası müdahale teknik ve yaklaşımları çağdaş koruma anlayışı çerçevesinde eksileri ve artılarıyla birlikte değerlendirilmiş ve uygun olduğu düşünülen öneriler ile ilgili daha ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

Altıncı bölümde kullanılması önerilen müdahale biçimleri ve tekniklerinin etkinlikleri, dördüncü bölümde yapı davranışının incelenmesinde kullanılan analizler vasıtasıyla değerlendirilmiştir. Son bölümde, çalışmada elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Çalışmanın başlangıcında, taşıyıcı sistem ile ilgili daha fazla verinin elde edilmesi amacıyla titreşim testlerinin yapılması öngörülmüştür. Bu testlerden elde edilecek verilerin, hem Kuzey Bölüm'ün Mezar Şapeli ile ilişkisinin anlaşılmasında, hem de geliştirilen sayısal modellerin kalibrasyonunda kullanılabileceği öngörülmüştür. Titreşim testlerine ek olarak, ana mekândaki 4 serbest ayağın jeofizik yöntemlerle incelenerek bu ayakların içyapısının anlaşılması, hem yapısal modellerin zenginleştirilmesi hem de sağlamlaştırma önerilerinin daha fazla veriye dayandırılması açısından önemli olduğu düşünülmektedir. Ancak çalışma kapsamında, söz konusu testlerin yapılması mümkün olmamıştır. 2009 yılından itibaren yapıda devam eden onarım çalışmaları nedeniyle, yapıya giriş konusunda sıkıntı yaşanmaya başlanmıştır. İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi Dekanlığı'nca, TC. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne yapıya giriş ve belgeleme çalışması talebiyle yazılı başvurular yapılmıştır. TC. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü söz konusu talebe olumlu, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Yapı İşleri Müdürlüğü ise olumsuz cevap vermiştir.

2. İSTANBUL VE YAKIN ÇEVRESİNDE ORTAÇAĞ YAPILARI

İstanbul’da çok sayıda “Orta Bizans Dönemi” yapısı bulunmaktadır. Ancak bu yapıların büyük bölümü harap durumdadır. Taşındıkları tarihi ve kültürel değerler nedeniyle korunması gereken bu yapıların onarılması ve güvenle geleceğe aktarılması gereklidir. Söz konusu dönemde kullanılan yapım teknik ve malzemeleri, yapı tasarım ve yapım anlayışı, duvar, temel ve örtü elemanlarının özellikleri, bu yapılarda karşılaşılan hasar türleri ve hasarların oluşum süreçleri, taşıyıcı sistem davranışının anlaşılması için önemlidir.

Yapım teknikleri konusunda özellikle Kiev Ortaçağ yapıları ile ilgili bilgilere yer verilmesi, bu bölgedeki Bizans yapıları ile ilgili somut verilerin elde edilmiş olması ile ilişkilidir. 10.yüzyıldan başlayarak Bizans İmparatorluğu ile Ruslar arasında sağlanan yakın ilişkiler neticesinde Bizans yapı ustaları Kiev bölgesinde birçok yapı inşa etmiştir. Söz konusu döneme kadar bu bölgede kâgir duvar yapım geleneği dahi bilinmemektedir. Başkent yapım geleneğinin etkileri aradaki mesafeye rağmen bu bölgede hissedilmektedir.

2.1 Ortaçağ Yapılarında Kullanılan Yapım Teknikleri ve Malzemeleri

“Orta Bizans Dönemi” olarak tanımlanan ve 9. yüzyıl ikinci yarısı ile 13. yüzyıl arasındaki zaman dilimini kapsayan dönemde yapım geleneği, erken dönemlerden beri süregelen yapım geleneğinin devamı niteliğindedir. Ancak bu dönemde imparatorluğun ekonomik gücü azalmıştır ve bu nedenle daha önceki dönemlerde inşa edilebilen büyük boyutlu yapılar inşaa edilmez. Örneğin İstanbul’da 6. yüzyılın ilk yarısında inşa edilen Küçük Ayasofya Camii’nin (S. Sergious and Bacchus) sekiz ayak üzerindeki kubbesi yaklaşık 16,5 metre çapındadır. Merkez planlı yapı, doğu-batı ekseninde 44 metre, kuzey-güney ekseninde 28 metre ve 21 metre yüksekliğindedir (Yüzügüllü ve Durukal, 1997, s.429). Yine aynı yüzyılda inşa edilen Aya İrini Kilisesi’nin 4 ayak ile desteklenen kubbesi 15,25 metre çapındadır. 34,7 metre yüksekliğindeki yapı doğu-batı ekseninde atriumsuz 50,4 metre, kuzey-güney ekseninde 32,9 metredir (Ebersolt ve Thiers, 1913, pl.12). Ayasofya’nın fil

ayaklarına oturan ana kemerleri yaklaşık 32 metrelik bir açıklık geçmektedir. Ana kemerler ve pandantiflerin oluşturduğu kubbe tabanı yerden 56 metre yüksektedir (Millingen, 1974, s.131). Bu anıtsal yapılarla karşılaştırıldığında Orta Bizans Döneminde inşa edilen yapıların kubbe çapı, kubbe tabanının yerden yüksekliği ve kemerlerin geçtiği açıklıklar küçülmüştür. Kalenderhane Camii'nin 7,75 metre, Gül Camii 'nin 8,60 metre, Fenari İsa Camii'nin 4,90 metre, Eski İmarek Cami'nin 4,45 metre çapında kubbeleri bulunmaktadır (Ebersolt ve Thiers, 1913, pl.22). Ancak küçük boyutlar, Orta Bizans Dönemi yapım teknik ve malzemelerinde bir eksikliği işaret etmez.

İmparatorluk sınırları içinde inşa edilen yapılarda kullanılan yapım teknik ve malzemelerinde görülen değişkenlik yapıların inşa edildiği coğrafya ile ilişkilidir. Örneğin; benzer malzemelerle inşa edilmelerine karşın duvar örgüsü bakımından Başkent ve yakın çevresinde inşa edilen yapılarla Yunanistan ve Adalar'dakiler arasında farklılıklar bulunmaktadır. İmparatorluğun doğu ve güneydoğu bölgelerinde ise yapım malzemelerinde de değişiklikler bulunmaktadır.

2.1.1 Tasarım ve yapım anlayışı

Michael Psellosé¹, Bizans yapılarının inşa sürecinde, tamamlanan bölümlere yeni parçaların eklendiğini bazı bölümlerin ise kaldırılabilirdiğini, yapım sürecinin durup sonra yeniden başlayabildiğini, daha büyük veya daha özenli bölümlerin ortaya çıkabildiğini belirtmiştir. Kariye ve Fenari İsa gibi 10. yüzyıl ile 14. yüzyıl arasında inşa edilen birçok önemli kilisede bu duruma rastlanmaktadır (Ousterhout, 2001, s.27).

Zeyrek Camisi'nin karmaşık yapısı da diğer birçok Bizans yapısı gibi dönemin yapım ve tasarım süreçlerinin birbiri içine geçen ilişkisini yansıtmaktadır (Şekil A.1). Güney Kilise'nin yapımından sonra Kuzey Kilise ve bu iki yapı arasında kalan bölüme Mezar Şapeli inşa edilmiştir. Güney Kilise narteksinde bulunan kubbe de bu dönemde eklenmiştir. Yapım sürecindeki farklılık doğal olarak yapının taşıyıcı sistemini oluşturan elemanların ilişkilerini de etkilemiştir. Yapıda bütünü oluşturan komşu parçalar bütünden düşey derzlerle ayrılmakta, yan yana duran düşey taşıyıcılar arasında bağlantı elemanları bulunmamaktadır (Şekil A.2 ve Şekil A.3).

¹ 11. yüzyılda yaşayan Bizanslı yazar, tarihçi ve politikacıdır. "Chronographia" adlı eseri, yaşadığı dönemde hüküm süren 14 Bizans imparatorunu kapsamaktadır.

2.1.2 Malzeme

Bizans yapıları taş, tuğla veya bu iki malzemenin birlikte kullanılmasıyla inşa edilmiştir. Yapıların inşa edildikleri bölgelerin sağladığı olanaklar ve ekonomik koşullar, yapı malzeme ve tekniğinde değişkenliğe neden olmuştur.

İstanbul ve yakın çevresinde taş ve tuğla birlikte kullanılmıştır. İstanbul Bodrum Camii (Şekil A.4) ve Selanik Panaghia Chalkeon Kilisesi (Şekil A.5) ise sadece tuğla kullanılarak inşa edilmiştir.

2.1.2.1 Tuğla

İstanbul ve çevresindeki Bizans yapılarında tuğla yaygın bir biçimde kullanılmıştır. Üretiminin kolay ve ucuz oluşu nedeniyle yapımda tuğla taş tercih edilmiştir (Kâhya, 1992, s.77).

Taş ile karşılaştırıldığında tuğla kullanımının diğer bir avantajı inşaat ustasına ulaştırılmasındaki kolaylıktır. Tuğlaların standart boyut ve ağırlıkta olması duvar ustasının tuğla ile daha rahat ve hızlı çalışmasını sağlamaktadır. Başkent ve çevresinde, yapıların eğrisel örtü elemanları ve kemerleri sadece tuğla, duvarları ise taş-tuğla örgü tekniğinde inşa edilmiştir.

Yapılarda kullanılan tuğlaların boyutları değişkendir. Tuğlalar genellikle 32-34 cm kenar uzunluklu ve 3,5-5 cm kalınlıklı kare prizma biçimindedir (Ousterhout, 1999, s.131). Zeyrek Camii'nde 5 cm (4,5 cm-5,5 cm arası) kalınlığındaki tuğlalar 38 cm (33,5 cm-39 cm arası) kenar uzunluğunda, 3 cm kalınlığındaki tuğlalar ise 31 cm (29 cm-32 cm arası) kenar uzunluğundadır². Tekfur Sarayı'nda 4 cm kalınlığındaki tuğlaların kenar uzunluğu 32,5 cm'dir³ (30 cm-33,3 cm arası) (Kâhya, 1992, s.44).

2.1.2.2 Taş

İstanbul ve yakın çevresinde çok eski dönemlerden itibaren taş ocakları kullanılmıştır. Yapı malzemelerinin büyük bölümü bu ocaklardan diğer bir bölümü ise eski yapılardan sağlanmıştır.

² Örnekler Kilise ile birlikte inşa edilen manastır binalarına ait olduğu söylenen duvarların güney cephesi üzerinden alınmıştır.

³ Örnekler yapının 1.kat döşemesini taşıyan kuzeybatı tonozundan alınmıştır.

Özellikle İstanbul'un batısından, Bakırköy civarındaki ocaklardan kireçtaşı çıkarılmaktadır. Fazla sert olmamaları, kolayca işlenebilmeleri ve ocakların yakın olması nedeniyle İstanbul'daki anıtların çoğunda kireçtaşı kullanılmıştır (Erguvanlı, 1983, s.145). Yapıların temel ve düşey taşıyıcı elemanlarında (duvarlar, sütunlar ve ayaklar) farklı boyut ve cinsten taşlar kullanılmıştır.

2.1.2.3 Harç

Özellikle İstanbul ve yakın çevresinde, yapımda bağlayıcı malzeme olarak kirecin tuğla kırığı ve tozuyla karıştırılmasıyla elde edilen pembe renkteki "horasan harcı" kullanılmıştır. Katkısı olmayan harçlarda sertleşme havadaki karbondioksit bağliken, tuğla katkısı kireç ile birlikte kalsiyum silikat hidrat ve kalsiyum aluminat hidratların oluşumunu sağlayarak harca hidrolik bağlayıcı niteliği kazandırmaktadır.

Agrega olarak kullanılan tuğlaların ağırlıkları; kireçtaşı, granit, bazalt vb. agregalardan daha düşüktür. Bu nedenle horasan harçları, agregalı kireç harçlarından daha hafiftir (Böke ve diğ., 2004, s.92).

Aya Sofya'nın deprem davranışı ile ilgili çalışmalar, yapının statik ve dinamik davranışının duvar örgüsündeki tuğla ve harcın mekanik, kimyasal ve mikroyapısal özellikleri ile yakından ilişkisi olduğunu göstermektedir. Veriler, deprem ivmesinin artıp sonrasında başlangıç değerlerine geri döndüğünde, kâğır malzemenin lineer olmayan tabiatına bağli olarak yapının doğal titreşim frekanslarında %5-10 arasında bir düşmenin olduğunu ortaya koymaktadır. Kalsit kristalleri ve tuğla parçacıkları arasındaki amorf kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jel yapısının, yapının enerji sönümlemesinde önemli bir rol oynadığı düşünülmektedir (Moropopoulou ve diğ., 2002, s.544).

Roma İmparatorluk Döneminde inşa edilen yapılarda derz kalınlığı tuğla kalınlığını geçmemektedir. Hâlbuki Bizans yapılarında bu durumun değiştiği görülmektedir. 4.yüzyılda iki tuğla sırası arasındaki derzin tuğla kalınlığına oranı 1:1 iken, bu oran 6. yüzyılda 2:3 olmaktadır. Mango bu durumu, tuğlanın az kullanılarak maliyetin aşağı çekilmeye çalışılması şeklinde açıklamaktadır (Mango, 1978, s.8).

Yapımda kalın derz kullanılması yapıda meydana gelen deformasyonların da büyük olmasına neden olmaktadır. Bizans yapılarında kullanılan harçların mekanik davranışları ile ilgili deneysel çalışmalar kalın derzli duvarlarda sünme ve rötreyle bağli deformasyonların ilk zamanlarda büyük olduğunu, ancak 30 gün sonra bu

değerlerin sabitleştiğini göstermiştir. Harcın dayanımı düşüktür ancak uzun süreli deformasyon ve düşük elastisite modülü bu yapılara bir tür süneklik kazandırır (Binda ve diğ., 1997, s.244).

Tuğla ve derz kalınlığı, harç içeriği ve kür koşullarının tuğla duvarların deformasyonunu nasıl etkilediğinin incelendiği çalışmalar ise basınç gerilmeleri altında tuğla-horasan harcı duvar örneklerinin birkaç gün sonra sabit hale gelen zaman-şekildeğiştirme eğrisinde, eğrinin başlangıç kısmında fazla eğimli olan bölümde deformasyonların elastik özellikte olduklarını ortaya koymuştur. Uzun dönem deformasyonlarda nem miktarının en önemli değişken olduğu ve bununla ilişkili olarak rutubet kaybı engellenen numunelerdeki deformasyonların daha az olduğu görülmüştür (Karaveziroglou ve diğ., 1997, s.254).

2.1.2.4 Ahşap

Yapıların farklı kotlarında taşıyıcı sistemin bir parçası olan ahşap gergi ve hatıllar bulunmaktadır. Birleşimler geçmelidir ya da çivi kullanılmıştır. Doğal afetler ve dış etkenler nedeniyle bugüne kadar kalabilmiş özgün ahşap hatıl ve gergiler sınırlıdır. Zarar gören veya yok olan gergiler kimi zaman ahşap ya da demir gergilerle değiştirilmiştir.

2.1.3 Temeller

Bizans yapılarının temelleri ile ilgili bilgiler sınırlıdır. Kiev ve yakın çevresindeki Orta Bizans dönemi yapılarından elde edilen somut veriler temellerin; tip, malzeme, derinlik ve genişliğinin yapıdan yapıya değiştiğini göstermektedir⁴. Bu durum her yapının üzerine inşa edildiği zemin özelliklerinin, kullanılan malzemelerin ve yapı ağırlığının farklı olmasıyla ilişkilidir.

Kiev’de bulunan yapılarda tespit edilen temel tiplerinden biri taşıyıcı duvarlar boyunca devam eden sürekli temellerdir. 10 yüzyıl sonuna tarihlenen Kiev Tithe

⁴ Pavel A. Rapport, *Building the Churches of Kievan Russia: Temellerinde ahşap elemanların kullanıldığı yapılar*: Church of St. Andrew-Pereiaslavl, Church of Tithe-Kiev, Church of Sts Boris and Gleb-Vyshgorod, Cathedral of St. Sophia-Polotsk, Church of the Transfiguration of the Saviour-Berestovo, Cathedral of the Archangel Michael-Pereiaslavl, Katholikon of the Monastery at Bel’chitsa-Polotsk, Katholikon of Sts Boris and Gleb-Smolensk, Katholikon of the Monastery of St Antony. *Sürekli temelli yapılar*: Church of Tithe-Kiev, Church of St Clement-Staraia Ladoga Novgorod, Church of Sts Boris and Gleb-Novgorod. *Izgara planlı temelli yapılar*: Old Cathedral-Vladimir in Volynia, The Cathedral of the Dormition-Staraia Riazan, The Church of Ressurrection-Pereiaslavl, Cathedral of the Dormition-Galich.

Kilisesi, Novgorod'da 12. yüzyıl yapıları St. Clement Kilisesi ve Sts. Boris ve Gleb Kilisesi temelleri sürekli'dir. Sürekli temellerin her iki doğrultuda kullanıldığı ızgara tipindeki temeller, özellikle 11. yüzyıldan başlayarak 12. yüzyıl ikinci yarısına değin Kiev ve yakın çevresindeki başlıca yapılarda kullanılmıştır (Rappoport, 1995, s.101). Manisa, Salihli'de bulunan ve 13. yüzyıla tarihlenen Bizans Kilisesi'nin temelleri de ızgara temel tipindedir (Şekil A.6) (Buchwald, 1977, s.273). Serbest taşıyıcı ayakları olan yapılarda ayaklar aksların kesişim noktalarında yer alır.

Temeller taş ve tuğla kullanılarak inşa edilmiştir (Ousterhout, 1999, s.157). Manisa, Salihli'de bulunan Bizans Kilisesi'nin temellerinde üst yapıda olduğu gibi kesme taş ve tuğla kullanılmıştır (Buchwald, 1977, s.273). İstanbul Fenari İsa Camisi'nde yapılan kazılarda temel duvarlarının taş ve tuğla ile inşa edildiği tespit edilmiştir (Megaw, 1964, s.281). Farklı tip ve boyutlardaki malzemeler temellerin değişik bölgelerinde kullanılmıştır. Örneğin Kiev, Tithe Kilisesi (10.yüzyıl yapısı) temellerinde kullanılan taşların tipleri ve boyutları derinliğe göre değişmektedir (Rappoport, 1995, s.100).

Kiev'de bulunan yapıların temel yan yüzleri genellikle düşeydir, böylece temel genişliği yukarıdan aşağı değişmeden devam eder (Rappoport, 1995, s.103). Manisa, Salihli'de bulunan Bizans Kilisesi'nin temel genişliği de sabittir ve temeller döşeme seviyesinden 1,30 m. ile 2,0 m. aşağı inmektedir (Buchwald, 1977, s.273). Vydubyskyi Manastırı St. Michael Kilisesi'nin moloz taş ve kireç harcı kullanılarak inşa edilen temellerinin genişliği 1,7 m ve yüksekliği 1.8 m'dir. Temellerin üzerine oturan duvarların kalınlığı 1,1 m'dir (Moropoulou ve diğ., 2000b, s.604).

Kiev'de Orta Bizans Dönemi'nde inşa edilen yapılardan elde edilen veriler temel derinliklerinin sağlam tabakaya göre konumlandığını ortaya koymaktadır. Pereiaslavl'da Arvhangel Michael Katedrali ve Polotsk'da Church Transfiguration of the Saviour Kilisesi, yapı ustalarının mevcut zemin katmanlarını değerlendirdiklerini ve sonrasında temel derinliklerini buna göre seçtiklerini göstermektedir (Rappoport, 1995, s.103).

Tespit edilen diğ er bir temel tipi, ahşap kazıkların kullanıldığı tiptir. Bu temel tipine İstanbul'dan bir örnek, 1945 yılında Fen ve Edebiyat Fakülteleri temel hafriyatında ortaya çıkmıştır. Bir metre uzunluğundaki dikdörtgen kesitli kısa meşe kazıklar zemine yarı yarıya çakılmış, bunların üzerine 1 m kalınlığında moloz harç tabakası

atılıp duvarlar örülmüştür (Aksoy, 1982, s.63). Tithe Kilisesi'nde de, temel duvarlarının tuğla kırıklı kireç harcı kullanılarak inşa edilen bir altyapı üzerine oturduğu tespit edilmiştir (Şekil A.7). Bazı bölgelerde temel genişliğinde, bazı bölgelerde ise temelden daha geniş olan altyapının ahşap kazıklar ve ahşap hatıllar kullanılarak sağlamlaştırıldığı görülmüştür (Rappoport, 1995, s.89). Kiev yakınlarındaki Vydubyskyi Manastırı St. Michael Kilisesi'nin temellerinde de ahşap hatıllar kullanılmıştır (Moropoulou ve diğ., 2000b, s.604). Fenari İsa Camisi'nin kâgir temelleri döşemenin yaklaşık 1,5 m. aşağısında bulunan ve tuğla kırıklı kireç harcı ile moloz taş kullanılarak inşa edilen bir platform üzerinde yükselmektedir (Şekil A.8)(Megaw, 1964, s.281,282).

Temellerde ahşap hatıl kullanımı Manisa, Salihli'de bulunan Bizans Kilisesi'nde de tespit edilmiştir. 10x10 cm. kesitindeki hatıllar kalın tuğla kırıklı kireç harcı içine gömülmüştür. Hatılların birleşim noktalarında demir çiviler kullanılmıştır (Buchwald, 1977, s.274). Orta Bizans Döneminde Kiev'de inşa edilen yapıların temellerinde de birleşimleri demir çivilerle sağlamlaştırılan ahşap hatıl kullanıldığı tespit edilmiştir (Şekil A.9) (Rappoport, 1995, s.89).

İstanbul'da Orta Bizans Dönemi'ne ait Feneri İsa Cami'sinde temellerin arasında kalan alanlar harç kullanılmadan kaba yonu taş ile doldurulmuştur. Döşemeler bu dolgunun üzerinde yer almaktadır (Şekil A.8) (Ousterhout, 1999, s.157). Manisa, Salihli'de bulunan Bizans Kilisesi'nin temel duvarları arasında kalan bölgeler ise sıkıştırılmış killi toprak ile doldurulmuştur (Buchwald, 1977, s.274).

İstanbul'da Orta Bizans Dönemi'nde inşa edilen kiliselerin birçoğu şehrin kendine özgü topografik yapısına bağlı altyapısı vardır. Örneğin Bodrum Camii'nde üst yapı ile aynı geometrik özellikli ve kaba yonu taş ve tuğla kullanılarak inşa edilen alt yapının işlevi kilise döşeme kotunu yapı inşa edildiğinde yanında bulunan sarayın kotuna getirmektedir (Striker, 1981, s.11). Altyapı üstyapının 9-10 metre kalınlığındaki bir dolgu tabakasının üzerine inşa edilmesini engelleyerek yapının daha sağlam alt tabakalar üzerine oturmasını sağlamaktadır.

Manisa Salihli'de bulunan kilisenin temelleri ile ilgili olarak Buchwald, dış temel duvarlarının köşelerde birbirlerine, taşıyıcı ayaklar altında düzgün birleştirilmiş iç temel duvarlarının da dış temel duvarlarına tam olarak bağlanmadığını belirtmektedir. Buchwald, bu durumun temellerin bağımsız birer eleman gibi hareket

etmelerine olanak verdiğini, benzer biçimde yüklenmeyen taşıyıcı duvarların neden olduğu düzgün olmayan oturma etkilerinin bu tip bir temel şeması ile azaltılmaya çalışıldığını iddia etmektedir (Buchwald, 1977, s.274).

2.1.4 Duvarlar

Başkent ve çevresinde, Bizans yapıları genellikle taş ve tuğla kullanılarak inşa edilmiştir. Ancak sadece tuğla kullanılarak inşa edilen yapılar⁵ da bulunmaktadır. Almalı duvarlarda tuğla ve taş dizilerinin sayısı yapıdan yapıya değişiklik göstermektedir.(Kariye: 4 sıra taş ve 4 sıra tuğla, Fenari İsa Camii: bir sıra taş bir sıra tuğla, Vefa Kilise Camii: 3-4 sıra tuğla ve 1 sıra taş, Panagia Krina-Chios: 3-9 sıra tuğla ve bir sıra taş, Bodrum Camii (Krautheimer, 1975, s.378) altyapısında 4 sıra tuğla ve 5 sıra taş, Manastır Mescidi: 5 sıra taş ve 4 sıra tuğla).

Roma döneminden beri süregelen duvar yapım geleneği, iki yüzü taş veya almalı örülmüş duvar arasının moloz taş ve harç ile doldurulması şeklindedir. Duvar örgüsünün belirli seviyelerinde, tuğla dizileriyle oluşturulan yatay hatlar görülmektedir (Şekil A.10). Duvara gelen yüklerin dağılımındaki düzensizlikler, yükün kesite düzgün olarak dağılmasını sağlayan bu tuğla hatlar aracılığıyla en aza indirilmektedir. Bu şekilde duvar parçasının kayma mukavemeti ve monolitik davranışı da olumlu hale getirilmektedir.

Bizans yapılarının yapım tarihlerinin belirlenmesinde önemli bir veri olan “gizli tuğla tekniği” özellikle 11. ve 12. yüzyıllarda, İstanbul⁶ ve yakın çevresinde, Balkanlar’da ve Rusya’da kullanılmıştır (Vocotopoulos, 1979, s.248 ve Krautheimer, 1975, s.375). Bu yapım tekniğinde, cephede görünen iki tuğla sırası arasındaki tuğla dizisi duvar yüzeyinden bir miktar içeri çekilmekte ve önü harçla kapatılmaktadır (Şekil A.11). Bu teknikte inşa edilen duvarlar, tuğla sıraları arasında kalın bir harç tabakası olduğu izlenimini verir (Şekil A.12).

Gizli tuğla tekniğinin ortaya çıkması ve gelişmesi ile ilgili olarak ekonomik, estetik ve yapısal nedenler öne sürülmektedir. Devşirme malzeme kullanımından mümkün

⁵ Myrelaion-Bodrum Camii, The Church of the Transfiguration of the Saviour-Berestovo Kiev (Rappoport, 1995, s.111), Panagia Kamariotissa-Heybeliada (Mathews, 1973, s.122), Panagia Chalkeon-Selanik (Vocotopoulos, 1979, s.253).

⁶ İstanbul’da gizli tuğla tekniğinin kullanıldığı yapılar: İsa Kapı Mescidi, Zeyrek Camii, Kariye, Fenari İsa Camii Güney Bölüm, Vefa Kilise Camii, The Monastery of St. Abercius, Kurşunlu-Mudanya, Mangana, Panagia Kamariotissa.

olduğunca faydalanılması bu tekniği ekonomik hale getirmektedir (Ousterhout ve Ahunbay, 2000, s.268 ve Ousterhout, 1999, s.176). Harçla gizlenen tuğla dizisinde eski ya da kusurlu tuğlaların kullanıldığı örnekler bulunmaktadır.

Yapısal olarak, iki tuğla sırası arasındaki tuğla dizisinin geriye çekilmesi çekirdek bölümünün duvar yüzlerine daha iyi bağlanmasını sağlamaktadır. Böylece duvar yüzeylerinin çekirdekten ayrılması güçleşmekte ve duvarın monolitik davranışı iyileşmektedir.

2.1.5 Kemer ve tonozlar

Erken dönemlerle karşılaştırıldığında Orta Bizans Dönemi'nde tonoz ve kubbe açıklıklarının boyutları küçüktür. 6.yüzyılda 30 metreye ulaşan açıklıklar, 10-14.yüzyılları arasında 6-7 metreye inmiştir. Büyük açıklıkları geçen basık kemer, tonoz ve kubbelerin yatay itkileri de büyüktür. Bu itkilerin karşılanması için payandalar, yarım kubbe ve benzeri öğeler gerekmektedir. Ayasofya örneğinde olduğu gibi düşey taşıyıcılar kubbe itkileri nedeniyle de deforme olabilmektedir. Orta Bizans Dönemi yapılarında itkilerin ve yapımda kullanılan horasan harcında meydana gelen plastik şekildeğiştirmelerin küçülmesi bu yapıların daha az hasar görmesini sağlamıştır.

Bizans Mimarlığı'nda farklı tonoz tipleri görülür. Beşik, çapraz, yelken ve eliptik parabol tonozlar tek tek ya da dizi halinde kullanılmıştır. Kare içinde haç plan tipinde, haçın kolları beşik tonozlarla ya da çapraz tonozlarla örtülmüştür. Merkezde, 4 ayak veya sütunla desteklenen kubbeye geçiş genellikle pandantiflerle sağlanmıştır. Köşe hacimlerde 3 farklı tonoz biçimi de görülür.

Hem altyapı hem de üstyapısı kapalı yunan haçı biçiminde olan Orta Bizans Dönemi yapılarından İstanbul-Bodrum Camii'nde haçın kollarını örten beşik tonozlar (açıklık yaklaşık 3 metre), mekânın ortasında kesişerek çapraz tonoz oluşturur. Altyapının diğer bölümlerinde beşik tonoz kullanılmıştır. Üstyapıda ise farklı tipte tonozlar kullanılmıştır. Narteksin ortada kalan bölümü ve apsisin her iki yanındaki pastoforionlarda yelken tonozlar, ana mekânda kubbe ve yapının diğer bölümlerinde çapraz tonozlar kullanılmıştır. Merkezde 4 ayakla(özgün halinde sütun) desteklenen 8 dilimli kubbeye geçiş pandantiflerle sağlanmıştır (kubbe yaklaşık 4 metre çapında) (Striker, 1981, s.23). İstanbul'da inşa edilen diğer bir Orta Bizans Dönemi yapısı Eski İmaret Camisi'nde köşede kalan hacimler çapraz tonozlarla kollar ise beşik

tonozlarla örtülmüştür. Fethiye Camisi'nde ise köşe hacimler manastır tonozlarla, kollar ise çapraz tonozlarla örtülmüştür. Ousterhout, kullanılacak tonoz tipinin belirlenmesinde strüktürel kaygılardan çok estetik seçimlerin belirleyici olduğunu savunmaktadır (Ousterhout, 1999, s.208).

Tonoz kullanımında görülen çeşitlilik, pencereli kasnak üzerinde yükselen kubbelerde de görülmektedir. Kubbe iç yüzeyi, düzgün yüzeyli olabileceği gibi kasnaktaki pencerelerin arasına kadar uzayan kaburgalarla bölünebilir (Şekil A.13) veya dışarı doğru dalgalanan yivli parçaları olan dilimli(kabak) kubbe şeklinde ele alınabilmektedir (Şekil A.14). Örneğin Zeyrek Camii güney bölümünde naos üzerinde kaburgalı, narteks galerisi üzerinde ise dilimli kubbe bulunmaktadır. Bodrum Camii'nin kubbesi dairesel kasnağa oturan 8 parçalı dilimli kubbe tipindedir. Bu yapıda köşe mekânlar çapraz tonozlarla örtülmüştür. Narteksin merkezindeki mekân ve yan neflerin apsileri pandantiflerle desteklenen kubbe ile örtülmüştür (Krautheimer, 1975, s.378). Örtü elemanlarının üzeni seviyesinde kullanılan gergi elemanları dışında, Bizans döneminde kubbelerin farklı seviyelerinde ahşap kuşaklar bulunmaktadır. Bugüne ulaşan kubbelerin birçoğunda kasnak pencerelerinde bu kuşaklar görülebilir (Ousterhout, 1997, s.308).

Başkentte tonozlar tuğla ve harç kullanılarak inşa edilmiştir (Ousterhout, 1997, s.308). Yapı ustalarının yapımı titizlikle yürüttükleri mevcut tonozlar incelendiğinde anlaşılmaktadır. Örneğin, Bodrum Camii yelken tonozlarında kullanılan tuğlaların yapının düşey elemanlarında kullanılanlardan daha küçük oldukları, yapım esnasında ustalar tarafından kesildikleri tespit edilmektedir. Tonozun üst bölümlerine yaklaşıldıkça daha küçük tuğlaların kullanıldığı görülmektedir (Striker, 1981, s.24).

Orta Bizans Dönemi'nde yapı boyutları, yapımda kullanılan iskele ve kalıp sistemlerinin boyut ve biçimlerini de etkilemiş olmalıdır. Ousterhout, bu dönemde tonozların çok sınırlı bir kalıpla veya kalıpsız olarak inşa edildiğini ve kalıpların genellikle mekânı daha küçük hacimlere bölen kemerlerin inşasında kullanıldığını ileri sürmektedir (Ousterhout, 1997, s.311). Ancak Orta Bizans Dönemi'ne ait bazı yapıların inşasında kalıp kullanıldığını gösteren izlere rastlamak mümkündür. Örneğin Bodrum Camii altyapısı tonozlarında yapımda kullanılan ahşap kalıbın izleri görülmektedir. Kalıbın üzerinde tuğlalar dizilmeden önce bir harç tabakası oluşturulmuştur (Striker, 1981, s.27).

Tonoz, kubbe gibi örtü elemanlarının üzerindeki yükü azaltmak amacıyla dolgu içerisine amfora konulması depremde yapıya etkiyen kesme kuvvetinin daha küçük olmasını sağlayarak taşıyıcı sistemin davranışını olumlu yönde etkilemektedir (Şekil A.15). Aynı zamanda yapımda kullanılan harcın daha kısa sürede sertleşmesi sağlanmaktadır. Mangana Sarayı, Zeyrek Camii, Kariye, Fenari İsa Camii ve Kalendarhane’de (Striker ve diğ., 1997 pl.50) amfora kullanıldığı bilinmektedir (Şekil A.16). Yöntem, tonoz yapım geleneğinin İstanbul’da standart bir uygulaması olarak görülmelidir.

2.1.6 Ahşap gergiler ve hatıllar

Bizans yapılarının birçoğunda ahşap gergi ve hatılların kullanıldığına dair izler mevcuttur. Büyük depremler, yangınlar ve yüksek nem oranı nedeniyle bu elemanlar yok olmuşlardır.

Kemer ve tonozların üzengi seviyesinde yer alan ahşap gergiler ve bu gergilere bağlanan duvar içindeki hatıllar sürekli bir sistem oluşturarak yapıyı kuşaklamaktadır. Ahşap kirişler temellerde, tonoz başlangıç seviyelerinde, açıklıklarda, açıklıkların üstünde, kubbe kasnağında ve kubbede bulunabilmektedir (Şekil A.17).

Harcın son dayanımına erişmesi ahşap kuşaklamanın işlevsiz hale gelmesi anlamına gelmemektedir. Var oldukları süre boyunca ahşap hatıl ve gergiler taşıyıcı sistem bütünlüğünü sağlamakta ve dinamik yüklerde yapının stabilitesini artırmaktadır (Gavrilovic ve diğ., 2004, s.15, Moropoulou ve diğ., 2000b, s.606).

İstanbul yapılarında, ahşap kuşaklar genellikle cephenin gerisinde bulunduğundan dış cepheden gözle tespiti kolay olmamaktadır. Diğer bölgelerde, ahşap hatılların yerleri cephe malzemesinde görülen değişimlerden anlaşılmaktadır. Kariye ve Fethiye Camisi’ne 14. yüzyılda yapılan eklerde, ahşap hatıllar kemer açıklığı boyunca devam eden ahşap gergilere bağlandıkları korniş hizasında yer almaktadır. Fenari İsa Camisi’nin 13. yüzyıl eklerinde ahşap hatıllar farklı kotlarda taş dizileri içindedir. İsa Kapı Mescidi’nde tuğla ve taş dizileri arasında ahşap hatıllar görülmektedir. Sinan Paşa Mescidi’nde ahşap kuşaklar cephedeki dekoratif tuğla dizisinin hemen gerisinde yer almaktadır (Ousterhout, 1999, s.193).

Makedonya’da bulunan Orta Bizans dönemi yapıları; Ayasofya Kilisesi-Ohrid (Gavrilovic ve diğ., 2004, s.15), St. Nikita Kilisesi-Banjani (Gavrilovic ve diğ., 2004,

s.31), St. Nikola Kilisesi-Psaca (Gavrilovic ve diğ., 2004, s.114) ve St. Bogorodica Zahumska Kilisesi'nde (Gavrilovic ve diğ., 2004, s.112) ahşap hatıllar vardır. Kare içinde haç planlı St. Bogorodica Zahumska Kilisesi'nde iki farklı seviyede ahşap hatıllar bulunmaktadır (Şekil A.18). Alttakiler sütunların başlık seviyesinde, üsttekiler ise kubbeyi taşıyan beşik tonozların üzengi seviyesindedir (Gavrilovic ve diğ., 2004, s.112). St. Nikita-Banjani Kilisesi'nde yığma duvarlar içinde 2 farklı seviyede ahşap kuşaklama saptanmıştır. Yan yana yerleştirilen 10x10 ve 12x12 boyutlarındaki ahşap hatıllar enine doğrultuda daha küçük boyuttaki ahşap elemanlarla 60-70 cm 'de birbirine bağlanmıştır (Gavrilovic ve diğ., 2004, s.31).

Yunanistan'da bulunan Bizans yapılarında da ahşap kuşaklar bulunmaktadır. Sakız Adası'nda bulunan Panagia Krina Kilisesi'nde radar ve boroscopy yöntemleri kullanılarak 4 farklı seviyede tespit edilen ahşap hatılların büyük ölçüde yok oldukları; taşıyıcı sisteme artık olumlu bir katkılarının olmadığı tespit edilmiştir (Miltiadou ve diğ., 2007c, s.409, Miltiadou ve diğ., 2007a, s.629). Selanik'te bulunan Aziz Havariyum Kilisesi'nin de farklı kotlarında ahşap kuşaklar bulunmaktadır (Şekil A.17 ve Şekil A.19) (Kuniholm ve Striker, 1990, s.4).

Kiev'de bulunan kiliselerde de ahşap kuşaklara rastlanmaktadır. Hatılların genellikle kare, bazı örneklerde ise yüksekliği genişliğinden büyük olan dikdörtgen kesitli oldukları tespit edilmiştir. Hatıllar genellikle meşedir ve kesitleri 22 ile 28 cm. arasında değişmektedir. Bazı yapılarda dairesel kesitli hatıllarla da karşılaşmıştır (Rappoport, 1995, s.140).

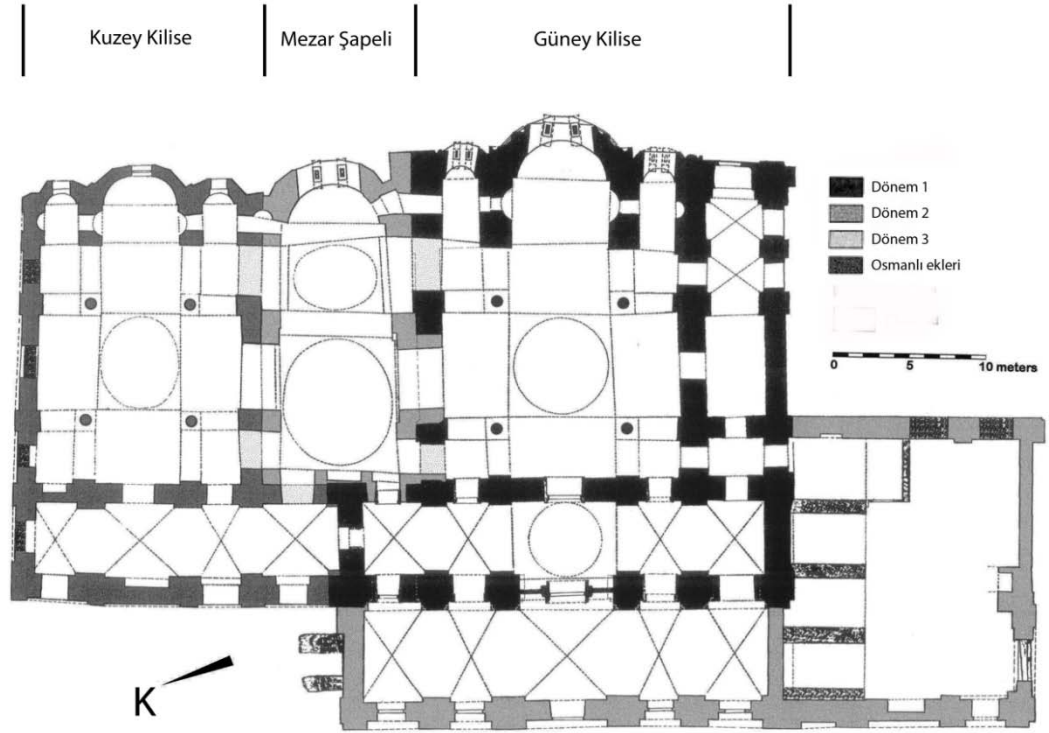
Ahşap hatıllar çivi ya da kenetlerle birbirlerine bağlanmıştır (Rappoport, 1995, s.89 ve Ousterhout, 1999, s.211). St. Petersburg/Straia Ladoga-St. Clement Kilisesi'nde ahşap hatılların birbirlerine demir çivilerle bağlandıkları tespit edilmiştir (Rappoport, 1995, s.139). Birleşimler Aya İrini(6.yy) kuzey galerisini taşıyan sütun ve kemerlerle ilişkili ahşap gergilerde olduğu gibi geçmeli de olabilmektedir (Şekil A.20) (Kuniholm,Striker,1974,s.15).

3. ZEYREK CAMİİ (PANTOKRATOR MANASTIRI KİLİSESİ)

Unesco'nun Dünya Mirası Listesi'ndeki İstanbul'un Tarihi Alanları içinde bulunan Zeyrek Camii, Tarihi Yarımada'da, Fatih İlçesi'nin Haliç'e hâkim bir noktasında bulunmaktadır (Şekil B.1, Şekil B.2 ve Şekil B.3). Zamanın etkisiyle harap olan yapı, bugüne kadar ulaşabilmiş Bizans anıtlarından biridir. Tarihinde birçok deprem ve yangın geçiren yapının, geleceğe güvenle aktarılabilmesi ve olası İstanbul Depremi'ni en az hasarla atlatabilmesi için onarılması gerekmektedir.

3.1 Tarihçe ve Genel Bilgiler

Zeyrek Camii, 12. yüzyılda Komnen Hanedanı hükümdarlarından İoannes Komnenos'un eşi İrene tarafından, Pantokrator Manastırının kilisesi olarak yaptırılmıştır. Yapı, farklı tarihlerde inşa edilmiş, üç bölümden oluşmaktadır (Eyice, 1993, s.555) (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Zeyrek Camii planı (Ousterhout, Ahunbay, 2000).

Pantokrator İsa'ya adanan Güney Kilise, kompleksin ilk inşa edilen bölümüdür. Daha sonra Meryem Ana'ya adanan Kuzey Kilise'nin yapımına başlanır. Bu iki kilisenin arasına son olarak 1134 yılında ölen İmparatoriçe'nin defnedildiği mezar şapeli inşa edilir (Ahunbay, Ahunbay, 2005b, s.74). Mezar Şapeli'nin yapımı esnasında Güney Kilise'ye dış narteks ve güney avlu da eklenir. Yukarıda sıralanan tüm bu yapım aşamaları 1118-1136 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir.

Kilise, 1204–1261 yıllarındaki Latin işgalinde, yağmalanan sanat eserlerinin toplandığı bir depo olarak kullanılmıştır (Ahunbay, Ahunbay, 2005b, s.74). 1261 tarihinde, kentin geri alınması sırasında, Cenevizliler Pantokrator Manastırı'nın bazı bölümlerine zarar vermiş (Müller-Wiener, 2001, s.212) ve kilise işgal sonrasında Paleologlar tarafından onarılmıştır (Ahunbay, Ahunbay, 2005b, s.74).

Fetihten sonra, yapı medrese olarak kullanılmıştır. 15. yüzyıl âlimlerinden Molla Zeyrek'in bu medresede müderris olması sebebiyle, yapı "Zeyrek Camii" olarak adlandırılmıştır (Ousterhout, Ahunbay, 2000, s.265).

Fatih Külliyesi medreselerinin tamamlanmasından sonra yapının medrese işlevi sona ermiş ve sonrasında Fatih Sultan Mehmet vakfına bağlı bir cami olarak kullanılmaya başlanmıştır (Ahunbay, Ahunbay, 2005b, s.74).

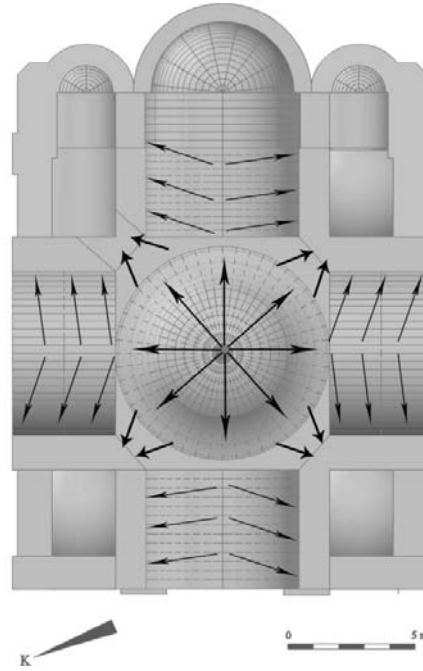
1756 yılında bölgede geniş ölçüde tahribat yapan Cibali Yangını'ndan veya 1766 İstanbul Depremi'nden sonra caminin önemli ölçüde onarım gördüğü anlaşılmaktadır (Eyice, 1993, s.555). Cami, Osmanlı döneminde son olarak 1894 depremi ertesinde elden geçirilmiştir (Ahunbay, Ahunbay, 2005b, s.74).

1950–1970 yılları arasında İstanbul Vakıflar Bölge Müdürlüğü, A. Saim Ülgen ve Fikret Çuhadaroğlu denetiminde bir onarım çalışması yürütmüştür (Çuhadaroğlu, 1974, s.99).

Anıtın korunması ve yaşatılması amacıyla 1994 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi öğretim üyelerinden Prof.Dr. Zeynep Ahunbay ve Prof.Dr. Metin Ahunbay tarafından bir proje başlatılmış, 1997-1998 ve 2001-2005 yılları arasında onarım çalışmaları yapılmıştır.

3.2 Taşıyıcı Sistem Şeması (Kuzey Kilise)

Pantokrator Manastırı'nın Kuzey Kilise'si, Bizans mimarisinin en yaygın tiplerinden biri olan Yunan haçı planındadır (Şekil B.4 ve Şekil B.5). Haçın kollarında beşik tonozlar ve merkezinde kasnaklı bir kubbe bulunmaktadır (Şekil 3.2). Hacmin köşelerinde kalan alanlar çapraz tonozlarla örtülmüştür (Şekil B.5 ve Şekil B.8). Ana mekânın batısında narteks ve galeri bulunmaktadır (Şekil B.5).



Şekil 3.2: Zeyrek Camii kuzey bölüm kubbesi ve taşıyıcı tonozlarında yük akışı.

Yapının taşıyıcı sistemi, tuğla ile inşa edilmiş eğrisel örtü elemanları ve bu elemanları taşıyan taş dizileri ile oluşturulmuş tuğla duvarlardan meydana gelmektedir. Ana kubbe yükünü merkezdeki 4 taşıyıcı ayak zemine aktarmaktadır (Şekil B.5 ve Şekil B.9). Ayakların oluşturduğu dörtgen çerçeveden kubbe kasnağının oturduğu dairesel tabana geçiş pandantiflerle sağlanmıştır. Tonoz ve pandantiflerin oluşturduğu taban üzerinde silindirik bir tambur yükselmektedir. Kubbenin 8 adet kemerli penceresi bulunmaktadır (Şekil B.10).

Doğu tonozuna, bemayı⁷ örten beşik tonoz ve apsis⁸ yarım kubbesi bitişir (Şekil B.11). Bu örtü elemanlarının açıklıkları ana tonozda 5.50, bemayı örten tonozda 5.10 ve yarım kubbede 4.70 m.dir (Şekil B.5).

⁷ Bizans kilisesinde apsisin önünde, altarn bulunduğu ve halkın giremediği kutsal bölüm. Orta nef düzeyinden yüksekte yer alır ve basamaklarla ulaşılır.

Doğu cephesi, ortada apsis ve bunun her iki yanında yer alan şapel duvarlarından oluşmaktadır (Şekil B.12). Apsisteki üçlü pencere düzeni, döşeme kotunun yaklaşık 1.5 metre üzerinden başlayıp +8,90 kotuna kadar çıkmaktadır. Yapının özgün taşıyıcı şemasında üçlü pencere düzeni üzerindeki yük, pencereler arasında bulunan 20 cm kalınlığındaki 2 adet mermer sütun aracılığıyla aktarılmaktadır. Ancak yan pencereler Osmanlı döneminde doldurulmuştur. Ortadaki bölüm ise yapılan dolgularla küçültülerek iki pencere haline getirilmiştir⁹. Açıklıkların sonradan doldurulması, özellikle deprem etkisinde yapının en zayıf alanlarından biri olan doğu cephesindeki hasarların en aza indirilmesini amaçlamıştır. Bu cephedeki açıklıkların boyut ve düzeni duvar kesitinde önemli bir süreksizliğe neden olmaktadır. Yapının özgün halinde, pencere kemerlerinin başlangıç seviyesinden geçen ahşap gergiler duvar içindeki ahşap hatıllara bağlanarak duvar davranışına olumlu bir katkı sağlamış olmalıdır. Osmanlı döneminde yapılan müdahalelerle pencere boşlukları kapatılarak duvarın sürekliliği sınırlı da olsa sağlanmıştır.

Pastophorion¹⁰ duvarlarında, döşeme kotunun yaklaşık +1,5 metre üzerinden başlayıp +5,20 kotuna kadar ulaşan ve 115 cm genişliğinde birer kemerli pencere bulunur (Şekil B.13).

Kuzey cephesi, kuzey tonozu altındaki kalkan duvarı, bu duvarın doğu ve batısında bulunan duvar bölümleri ve en batıda yer alan narteks duvarlarından oluşmaktadır. Kalkan duvarında, döşeme ile 1. korniş seviyesi (+6.00m) arasında Osmanlı döneminde kapatılan kemerli bir giriş açıklığı, birinci ve ikinci korniş seviyeleri (+9.80m) arasında 3 adet kemerli pencere ve ikinci korniş seviyesi üzerinde yine 3 adet kemerli pencere bulunmaktadır (Şekil B.14). Kuzey cephesinde kalkan duvarının doğu ve batısına simetrik olarak devam eden her iki duvar bölümü, zemin kotunda kapatılmış birer kemerli açıklık ve bunların üzerindeki bir pencereden oluşur. Cephenin en doğusunda pastophorionun kemerli bir nişi olan sağır duvarı bulunmaktadır. Cephe, batıda narteks ve galeri duvarı ile sona ermektedir. Bu duvarda, zemin ve galeri kotunda kemerli birer açıklık bulunmaktadır.

⁸ Kilisenin doğu ucunda yer alan yarım daire ya da çokgen planlı, yarım kubbe veya tonoz örtülü bölüm.

⁹ 2005 yılında doğu cephesinde yapılan onarım ve sağlamlaştırma çalışması kapsamında bu bölüme mermer bir doğrama konulmuştur.

¹⁰ Pastophoria , *Pastoforion*: Apsisin iki yanında küçük boyutlu mekanlar.

Kuzey Kilise'nin güney duvarı, Mezar Şapeli'nin yapımı aşamasında değişikliğe uğramıştır. Güney tonozunun altındaki duvarın ikinci korniş üzerinde yer alan üç penceresi kapatılmış ve bu seviyenin altında kalkan duvarı kemerli bir açıklığa dönüştürülmüştür (Şekil B.15). Güney tonozundaki iki kemerli pencere, kalkan duvarındaki pencerelerin kapatılması nedeniyle azalan ışığın arttırılması için aynı dönemde açılmış olmalıdır.

Mezar Şapeli'nin kubbelerini taşıyan duvarlar Kuzey Kilise'nin güney duvarına bitleştirilmiş ve bu nedenle büyük kesitli düşey taşıyıcılar ortaya çıkmıştır (Şekil B.16).

Narteks doğu duvarında 3 adet kemerli açıklık vardır. Orta akstaki açıklık bu mekânı naosa bağlamaktadır (Şekil B.17). Kuzeydeki açıklık kapatılmış, güneydeki ise döşeme üzerine 1.80 m dolgu yapılarak pencere haline getirilmiştir. Galeri seviyesinde ise, üçlü pencere düzeni Osmanlı döneminde putrelli lento kullanılarak iki adet dikdörtgen pencereye dönüştürülmüştür. Putrel üzerinde özgün pencere düzeninden geriye kalan tuğla örgü görülmektedir (Şekil B.18).

Yapının batı cephesinin mevcut hali, 1966-1967 yılında İstanbul Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nce yapılan çalışmalarda şekillenmiştir. Cephede, açıklıkları birbirinden farklı 4 kemer bulunmaktadır. Bu kemerler narteks ve galeriyi örten çapraz tonozlarla ilişkilidir. Kemerlerle tanımlanan duvarlarda simetrik yerleştirilmemiş farklı genişlikte pencereler bulunmaktadır (Şekil B.19). Galeri kotunda, iki adet sütunla üzerindeki yüklerin bir kısmını aktaran üçlü pencere düzeni dikkati çekmektedir. Bu iki sütundan biri betonarme, özgün olan diğeri ise metal elemanlarla kuşaklanmıştır (Şekil B.20).

Ana mekânda demir gergi elemanları sadece duvarlar ile ayaklar arasında bulunmaktadır (Şekil B.25). Bu gergilerin dışında, galeride çürüyen ahşap gergilerin geride bıraktığı boşluklar dışında yapının herhangi bir bölümünde gergi elemanları kullanıldığına dair bir iz rastlanmamıştır (Şekil B.62).

3.3 Yapının Geçirdiği Afetler ve Onarımlar

Pantokrator Kilisesi (Zeyrek Camii), Latin işgali sonrasında Paleologlar döneminde onarılmıştır. Fetihten sonra medrese olarak kullanılan yapı (Ousterhout, Ahunbay, 2000, s.265), Fatih Külliyesi medreselerinin tamamlanmasından sonra Fatih Vakfına

bağlı bir cami olarak kullanılmaya başlanmış ve bu dönemde sürekli bakım ve onarımlarla ayakta durmuştur (Ahunbay, Ahunbay, 2005b, s.74).

1997-1998 ve 2001-2005 yılları arasında Prof.Dr. Zeynep Ahunbay, Prof. Dr. Metin Ahunbay yürütücülüğündeki onarım çalışmaları kapsamında, Başbakanlık ve Vakıflar Genel Müdürlüğü Arşivi'nde yapılan araştırmalarda onarımlarla ilgili ayrıntılı belgelere ulaşamamıştır (Ahunbay, Ahunbay, 2005b, s.79). Benzer şekilde Y. Mimar Mine Esmer, “Zeyrek Camii Hünkâr Kasrı ve Mahfili Restorasyonu” başlıklı Yüksek Lisans çalışmasında, yapının Osmanlı Dönemi'nde geçirdiği onarım çalışmaları ile ilgili detaylı bilgilerin olmadığını ifade etmiştir (Esmer, 2004, s.46). Yapının 1509,1766 ve 1894 depremlerinde ne ölçüde hasar gördüğü veya bu depremler sonrasında gerçekleştirilen müdahalelerin tipleri ve kapsamaları ile ilgili somut bilgiler mevcut değildir. Müdahalelerin kapsamaları ve tarihleri ile bilgiler, yapının kendisinden sağlanan verilerden faydalanılarak dolaylı bir biçimde tahmin edilebilmektedir.

3.3.1 Osmanlı Döneminde yapılan onarımlar

Osmanlı döneminde sıklıkla kullanılan onarım ve sağlamlaştırma müdahale tiplerinden biri, duvarlarda açıklıkların kapatılarak sürekliliğin sağlanması ve duvarların güçlendirilmesidir. Doğu cephesinde apsis duvarındaki üçlü pencere düzeninde yan pencerelerin, batı cephesinde hem narteks hem de galeri kotunda açıklıkların ve yine benzer şekilde kuzey duvarındaki kemerli açıklıkların doldurulması bu müdahale tipine örnek olarak verilebilir (Şekil B.21).

Doğu cephesinde apsis duvarının özgün taşıyıcı şeması, üçlü pencere düzeni üzerindeki yükün, pencereler arasında bulunan 20 cm kalınlığındaki 2 adet mermer sütun aracılığıyla aktarılması şeklindedir (Şekil B.22). Ancak kenarlarda bulunan pencereler doldurulmuştur. Merkezdeki bölüm ise yine yapılan dolgularla küçültülerek iki pencere haline getirilmiştir¹¹ (Şekil B.22). Açıklıkların sonradan doldurulması, özellikle deprem etkisinde yapının en zayıf alanlarından biri olan doğu cephesindeki hasarların en aza indirilmesini amaçlamış olmalıdır. Bu cephedeki açıklıkların boyutları ve düzeni duvar kesitinde önemli bir süreksizliğe neden olmaktadır. Yapının özgün halinde, pencere kemerlerinin başlangıç seviyesinden

¹¹ 2005 yılında doğu cephesinde yapılan onarım ve sağlamlaştırma çalışması kapsamında bu bölüme mermer bir doğrama konulmuştur.

geçen ahşap gergiler duvar içindeki ahşap hatıllara bağlanarak duvarın düzlem davranışına olumlu bir katkı sağlamış olmalıdır. Ancak ahşap hatıllar zamanla yok olmuştur ve bu nedenle duvarın düzlem davranışına katkısı da ortadan kalkmıştır. Osmanlı döneminde yapılan müdahalelerle pencere boşlukları kapatılarak duvarın sürekliliği sağlanmıştır.

Güney Kilise Narteks kubbesinde ve Mezar Şapeli batı kubbesinde olduğu gibi Kuzey Kilise kubbe pencerelerinin de bir bölümünün kapatıldığı, yapının 1913 tarihli Ebersolt, Thiers çizimlerinde görülmektedir (Şekil B.23). Ancak kubbe pencerelerinin kapatılmasının öncesinde, kubbenin ve kasnağının diğer kubbelerden farklılık göstermesi ve bununla birlikte batı tonozunun sivri kemerli biçimi, bu bölgelerde kapsamlı onarımlar yapıldığını göstermektedir (Şekil B.24).

16 yüzyılda Gyllius (Millingen, 1974, s.233) ve 18 yüzyılda da Pococke (Müller-Wiener, 2001, s.214) tarafından merkezdeki taşıyıcılar sütun olarak betimlenmiştir. Sütunların, 1756 yılında bölgede geniş ölçüde tahribat yapan Cıbalı Yangını veya 1766 İstanbul Depremi'nden sonra yapının önemli ölçüde onarım gördüğü dönemde ayaklarla değiştirildiği anlaşılmaktadır (Eyice, 1993, s.555). Eyice, ayak ve başlıkların biçimleri göz önünde bulundurulduğunda, müdahalenin 18. yüzyılın ikinci yarısına ait olduğunu iddia etmektedir (Şekil B.25) (Gurlitt, 1999, s.33). Ancak doğudaki ve batıdaki ayaklar arasındaki farklılıklar bu ayakların aynı onarım sürecinde yapılıp yapılmadıklarını belirsiz hale getirmektedir. Batıdaki ayaklar daha büyük kesitli ve almaşık örgülü iken doğudaki ayaklar kesme taş kullanılarak inşa edilmiştir.

Diğer bir müdahale, orta aksta galerinin naosa bakan duvarında dikkati çekmektedir. Bu duvarda bulunan üçlü pencere düzeni yerini demir putrel lentolu iki adet pencereye bırakmıştır (Şekil B.18). Bu müdahale 19 yüzyıl sonu 20. yüzyıl başına ait olmalıdır. Söz konusu müdahaleye gerekçe olarak herhangi bir neden tespit edilememiştir. Yaşanan depremlerde üçlü pencere düzeni içindeki sütunlar hasar görmüş olabilir. Ancak demir lento üzerinde kalan özgün düzenin tuğla kemerlerinde ve bu kemerler üzerindeki duvar bölümünde herhangi bir hasar izine rastlanmamıştır.

Galeriyi örten çapraz tonozları desteklemek amacıyla inşa edilen kemerler de Osmanlı dönemi onarım müdahalesidir (Şekil B.26). Galeride doğu-batı doğrultusunda uzanan ahşap gergilerin yok olması nedeniyle tonozlarda oluşan

hasarlar ve tonoz eğrisinin oldukça basık bir hale gelmesi bu önlemlerin alınmasını gerektirmiş olmalıdır.

3.3.2 1950-1970 yılları arasında yapılan onarımlar

1950-1970 yılları arasında yapılan onarımlar iki dönem altında toplanabilir. Bunlardan ilki 1953 yılında İstanbul Vakıflar Bölge Müdürlüğü mimarlarından A. Saim Ülgen tarafından yürütülen, Güney Kilise dış narteks batı cephesi ve çatıda yapılan uygulamalardır (Ahunbay, Ahunbay, 2001, s.118). Çuhadaroğlu, bu çalışma kapsamında Kuzey Kilise’de de kısmi onarımlar yapıldığından bahsetmektedir (Çuhadaroğlu, 1974, s.100). Ancak bu müdahalelerle ilgili detaylı bilgilere ulaşamamıştır.

1966-1967 yılları arasında ise İstanbul Vakıflar Bölge Müdürlüğü mimarlarından Fikret Çuhadaroğlu denetiminde yapılan restorasyon çalışmaları, kuzey kilise batı cephesi (narteks ve galeri cephesi) ve kuzey cephesinde yoğunlaşmıştır. Batı cephesinde hem narteks, hem de galeri seviyesindeki açıklıklardaki dolgular temizlenerek tonozların cephedeki yüzeyleri ortaya çıkarılmış ve kemerlerdeki eksik kısımlar tamamlanmıştır (Şekil B.27 ve Şekil B.28). Galeri cephesinde, kilise ana nefinin bulunduğu aksta üçlü pencere düzeni olan bir açıklık tespit edilmiştir (Şekil B.29). Pencere düzeninin iki adet sütunla sağlandığı ve bu sütunlardan yalnızca kuzeydekinin dolgu içinde bulunduğu belirlenmiştir. Porfirden yapılmış bu sütun çemberlenmiş, yerinde olmayanı ise betonarme olarak yeniden inşa edilmiştir (Şekil B.20). Çalışma kapsamında, galeriyi örten çapraz tonozlarda da çimento esaslı malzemeler kullanılarak tamamlamalar yapılmıştır (Çuhadaroğlu, 1974, s.102).

Yapının batı ve kuzey cephelerinde yapılan müdahalelerin dışında, Kuzey Kilise tonoz örtüsünün üzerinde yükseltilmiş bir betonarme çatı inşa edilmiştir. Betonarme çatı, tonoz sırtlarına mesnetlenen ayaklar üzerinde durmaktadır (Şekil B.32 ve Şekil B.33).

Kuzey cephesi bugünkü görünümünü, bu onarımlardan sonra almıştır (Şekil B.30 ve Şekil B.31). Vakıflar kontrolünde yapılan çalışmalarda çimento esaslı tuğlalar ve yine çimento esaslı harçlar kullanılmıştır. Çatı örtüsünde ise kurşun taklidi çimento sıva tercih edilmiştir.

3.3.3 1997-1998 ve 2001-2005 yılları arasında yapılan onarımlar

1997-2005 yılları arasında yapılan onarım çalışmalarını iki aşamada ele almak mümkündür. 1997-1998 yılları arasında, Prof.Dr. Zeynep Ahunbay, Prof. Dr. Metin Ahunbay yürütücülüğünde yapılan çalışmaların ilk bölümü yapının dış koşullardan olabildiğince korunmasını sağlamak amacıyla çatıda yoğunlaşmıştır. Çalışmalarda, kurşun taklidi beton kaplama, bu kaplamanın altında yaklaşık 20 cm'e varan blokaj ve sonrasındaki dolgu toprağı temizlenmiştir (Şekil B.34) (Ahunbay, Ahunbay, 2001, s.122). Bu katmanların altında yer alan tonoz ve kubbe yüzeylerindeki çatlaklar onarılmıştır (Ousterhout, Ahunbay, 2000, s.267). Ancak onarım ve belgeleme çalışmaları işin durdurulması nedeniyle yarım kalmış ve çatı kaplaması bütünüyle tamamlanamadığından yapı üç sene boyunca dış koşullara maruz kalmıştır.

Çalışmaların bu ilk bölümünde taşıyıcı sistemle ilgili dikkati çeken konu tonozlardaki hasarların tespit edilmesi olmuştur (Şekil B.35). Kuzey nef üzerindeki çatı kaplaması ve dolgular kaldırıldığında kuzey tonozda ve Prothesis üzerinde kuzey duvarına paralel ilerleyen bir çatlak ortaya çıkmıştır. Kuzey tonozdaki çatlağın kurşun kullanılarak ve Prothesis örtüsündeki çatlağın da kireç harcı kullanılarak onarılmaya çalışıldığı görülmüştür. Çalışmalarda, geçmiş onarımlardaki harçların ayrışan bölümleri temizlenerek uygun malzemelerle hasarlı bölümler tekrar bütünleştirilmiştir (Ousterhout, Ahunbay, 2000, s.267).

Onarım çalışmalarının 2001-2005 yıllarını kapsayan ikinci bölümü, bir önceki dönemde çatının eksik kalan kısımlarında ve yapının doğu cephesinde yoğunlaşmıştır. 1966-1967 onarımlarına ait yükseltilmiş betonarme çatı örtüsünün ağır olması ve yükünün yapıya tekil noktalardan iletilmesi nedeniyle Prof. Dr. Feridun Çılı tarafından hazırlanan rapor Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kurulu'na sunulmuş ve onay alınarak bu örtü kaldırılmıştır (Şekil B.36). Galeriye örten çapraz tonozlardaki çatlaklar onarılmış (Şekil B.37) ve üzerine ahşap bir çatı inşa edilerek kurşunla kaplanmıştır (Şekil B.38).

Doğu cephesi duvar örgüsünde, daha önce yapılmış özensiz onarımlar ayıklanmış, bozulan bölgeler iyileştirilmiş ve hasarlı taşıyıcı elemanlar sağlamlaştırılmıştır. Apsis duvarı üçlü pencere düzeninde daraltılarak iki pencere haline getirilen orta bölümde dolgular temizlenmiş ve bu açıklığa mermer bir doğrama yerleştirilmiştir (Şekil B.22 ve Şekil B.12). Pencere düzeninin kenar pencereleri içindeki dolgular duvar

sürekliliğin sağlanması amacıyla kaldırılmamıştır. Pastophorion duvarlarında da niteliksiz dolgular temizlenmiş ve eksik bölümler yeniden yapılmıştır (Şekil B.39 ve Şekil B.40). Bu duvarlardaki pencere açıklıklarına da mermer doğramalar yerleştirilmiştir. Doğu cephesinde, özellikle açıklıkların olduğu bölümlerde gözlemlenen ve duvarın taşıyıcılığını tehlikeye sokan çatlaklar, tuğla ve horasan harcı kullanılarak dikilmiştir (Şekil B.41). Bu müdahale ile duvar taşıma kapasitesinin mümkün olduğunca artırılması sağlanmaya çalışılmıştır.

3.4 Yapının Temelleri ve Zemin Koşulları

Yapının temelleri ve zemin koşulları hakkında bilgiler, daha önce yapılan kazı ve zemin etüdü çalışmalarından elde edilmiştir.

3.4.1 Zemin özellikleri

İstanbul Tarihi Yarımada'nın jeolojik yapısı; Trakya Formasyonu, Bakırköy Formasyonu, Güngören Formasyonu, Çukurçeşme Formasyonu, Kuşdili Formasyonu ve dolgulardan oluşmaktadır (Tarihi Yarımada Fatih-Eminönü 1/5000 Ölçekli Koruma Amaçlı Nazım İmar Planı Raporu, 2003, s.4,154) (Şekil B.42).

Ana kaya niteliğindeki Trakya Formasyonu adı verilen grovak killi şistler, Eğrikapı civarından başlayıp Haliç sahiline paralel bir şerit halinde Topkapı Sarayı ve Ayasofya'yı içine alarak Ahırkapı Feneri'ne kadar ulaşmaktadır. Bu formasyonun ayrışan kısımları kahverengi ve sarımsı kahverengi, ayrışmamış kısımları ise gri, yeşilimsi gridir (Sayar, Sayar, 1962, s.8).

Yenikapı-Unkapanı Metro Güzergâhı'nda yapılan tespitlerde sahile yakın kısımlarda Kuşdili Formasyonu, alüvyonlar ve dolgular, ilerleyen kısımlarda ise alttan üste doğru; kaya türündeki Trakya Formasyonu, ince taneli zemin türü Güngören Formasyonu ve bunların üzerinde dolguların varlığı belirlenmiştir (Şekil B.43).

İnce taneli zemin sınıfındaki Güngören Formasyonu, kil katmanlarından oluşmaktadır. Bu killer kururken hacim kaybeder, su aldıklarında ise şişer. Formasyonun kum ve silt içerdiği durumlarda malzemenin hacim kaybetme ve şişme özellikleri görülmez.

Yenikapı-Unkapanı Metro Güzergâhı'nda yapılan tespitlerde Güngören Formasyonu Şehzadebaşı Caddesine kadar devam etmektedir. Bu formasyondan alınan örneklerin

yüksek plastisiteli oldukları ve konsolidasyona bağlı oturmalara müsait oldukları görülmüştür (Usta, 2005, s.60).

Tarihi Yarımada sınırları içerisindeki dolgular doğal ve yapay olmak üzere iki farklı sınıfa ayrılabilir. Doğal dolgular, Haliç'e dökülen derelerin taşıdığı malzemelerin çökmesi ile oluşan dolgulardır. Atatürk Bulvarı'nda Şepsefa Hatun Camisi'nin yanına inşa edilen Manifaturacılar Çarşısı için yapılan sondaj çalışmalarında bu tipteki dolgu kalınlığının Haliç'e doğru gidildikçe arttığı görülmüştür (Şekil B.44 ve Şekil B.45).

Yapay dolgular, yüzyıllar boyunca yangın, deprem veya başka nedenlerden yıkılan yapılardan arta kalan kalıntıların ve yeni yapıların temel kazılarında çıkan toprağın yığılması ile oluşan dolgulardır. Düzgün araziler elde edebilmek için vadi ve çukurların doldurulması da söz konusu dolgu tipinin içerisinde kalır. Bu tip dolgu kalınlıklarının değişken olduğu bilinmektedir.

Bizans Dönemi'nde şehrin savunmasını tehlikeye düşürmemek amacıyla molozlar şehir surlarının bulunduğu kıyılara dökülmeyle surların önündeki sahilin genişletilmemesine özen gösterilmiştir. Bundan dolayı Bizanslılar daima şehrin surlar içindeki çukur kısımlarını doldurmuşlar ve hatta düzlük olan bazı kısımları da nispeten yükseltmişlerdir (Sayar, Sayar, 1962, s.13).

Yenikapı-Unkapanı Metro Güzergâhı'nda yapılan tespitlerde dolguların önemli kalınlığa ulaştığı saptanmıştır. Arazi ve deney sonuçları dolguların heterojen nitelikte, gevşek yapıda ve düşük dirençli olduğunu koymaktadır (Usta, 2005, s.94).

1960'lı yıllarda Manifaturacılar Çarşısı için yapılan zemin etüdüleri (Sayar, Sayar, 1962), 1982 yılında İski idaresi için Fatih Tüneli güzergahı boyunca yapılan sondaj verileri (Şekil B.46 ve Çizelge 1) (Toğrol, 1986), 2000'li yıllarda Yenikapı-Unkapanı Metro İnşaat'ı için yapılan çalışmalar (Usta, 2005), "1/5000 ölçekli Koruma Amaçlı Nazım İmar Planı" içerisinde yer alan Tarihi Yarımada jeolojik haritaları ve yapının üzerinde bulunduğu alanın topografik özellikleri, çalışmaya konu olan yapının üzerinde durduğu zemin hakkında kabaca bilgiler vermektedir.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü'nün mikrobölgeleme çalışması kapsamında hazırladığı Fatih İlçesi Jeoloji Haritası'nda da Zeyrek Camii'nin Trakya Formasyonu üzerinde yer aldığı görülmektedir (Şekil B.47). Benzer biçimde Fatih Belediyesi'nin imar planlarına esas teşkil edecek

jeoloji-jeoteknik zemin etüdü çalışması kapsamında Zeyrek Cami'sinin yaklaşık 50 metre güneyindeki bir noktada yaptırmış olduğu sondaj yukarıda kabaca ortaya konulan zemin profili ile örtüşen sonuçlar ortaya koymaktadır (Şekil B.48). 2000 yılında yapılan bu sondaj çalışmasında, zemin kotunun altında kiremit ve tuğla parçalı, heterojen özellikli, molozlu ve bloklu, orta sıkı-sıkı özellikte 11 metre kalınlığında bir dolgu tabakasının bulunduğu ve bu tabakanın 7,5 ile 11 m. arasındaki bölümün oldukça sıkı olduğu tespit edilmiştir. Bu tabakanın altında ise yaklaşık 2 metre killi ve 2 metre kilsiz olmak üzere çakıllı, iri taneli ve sıkı bir kum tabakasının olduğu belirlenmiştir. Sondajda SPT 7,5 metrede 20, 9,5 metrede 35 ve 10 metrede 50 değerine ulaşmaktadır. Sondaj kuyusunun derinliği 15 metredir.

Tarihi Yarımada'da dolgu kalınlıklarının ve bu katmanların mühendislik özelliklerinin kısa mesafelerde dahi değişebildiği göz önüne alınırsa daha kesin verilerin elde edilmesi için yapı çevresinde daha fazla sondaj kuyusunun açılması gerekmektedir.

3.4.2 Yapının temelleri

2001-2005 yılları arasında yapının doğu cephesinde yürütülen onarım ve sağlamlaştırma çalışmaları kapsamında Kuzey Kilise apsis ve pastophorion duvarlarında zemin kotundan yaklaşık 2,5 metre aşağı inen muayene kuyuları açılmıştır (Şekil B.49 ve Şekil B.50). Duvarların, apsiste yapılan traşlama dışında çukur tabanına kadar düşey bir biçimde indikleri, herhangi bir ampattan yapımadıkları tespit edilmiştir. Duvar örgüsünde ve yapımda kullanılan malzemelerde de bir farklılık görülmemiştir. Temellerle ilgili daha sağlıklı verilerin elde edilmesi için daha aşağı kotlara inen çukurların açılması gerekmektedir. Çünkü söz konusu kazılarda temel derinliği ve temelin ana kaya ile ilişkisi belirlenememiştir.

3.5 Deprem Bölgesinin Özelliği

Arap Plakası, Afrika Plakası ve Avrasya Plakası'nın hareketleri nedeniyle Türkiye aktif bir deprem ülkesidir. Arap Plakası'nın kuzeye doğru hareketi Avrasya Plakası tarafından engellenmektedir ve Afrika Plakası Avrasya Plakası'nın altına girmektedir (Şekil B.51). Doğu Anadolu ve Kuzey Anadolu Faylarını oluşturan bu plaka hareketleri, Anadolu'yu her yıl belirli miktarda batıya doğru hareket ettirmektedir (Şekil B.51).

Kuzey Anadolu Fay Hattı, Doğu Anadolu Fay hattı ile kesiştiği Karlıova dolaylarından başlar ve orta kısmı kuzeye doğru bir eğri çizerek Mudurnu'ya kadar devam eder. Fay hattı, bu alanda iki kola ayrılmaktadır (Şekil B.52). Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın Marmara Denizi'nin kuzeyindeki doğu-batı doğrultusunda uzanan kuzey kolu Ganos, Işıklar, Kuzey Marmara, Adalar, Hendek-Yığılca, Gölcük-Akyazı ve Karapürçek-Sapanca fay zonlarından oluşur. Fay hattının Marmara Denizi'nin güneyi boyunca uzanan güney kolu ise Yenice-Gönen, Sarıköy-Aşağı İnova, Edincik-Denizkent ve Geyve-İznik fay zonlarından oluşur (Koçyiğit, 2006, s.1).

İstanbul, Kuzey Anadolu Fayı'nın Marmara Denizi'nin kuzeyindeki bölümüne yakınlığı nedeniyle oldukça riskli bir bölgede bulunmaktadır. Olası depremin yeri ve büyüklüğü ile ilgili farklı görüşler bulunmaktadır. Ancak uzmanların fikir birliğinde olduğu temel nokta yakın gelecekte İstanbul yakınında büyüklüğü $M \geq 7$ olan bir depremin yaşanma olasılığının yüksek olduğudur. İstanbul Büyük Şehir Belediyesi'nin üniversitelerle işbirliği yaparak hazırladığı "Deprem Master Planı", İstanbul'da büyük bir depremin önümüzdeki 30 yıl içinde yaşanma olasılığını Parsons'ın çalışmalarını temel alarak yaklaşık % 65 civarında olduğunu belirtmektedir (Stein ve diğ., 2000, s.661). Deprem Master Planı, İstanbul için $M \geq 7,5$ büyüklüğünde bir deprem senaryosuna göre şekillendirilmiştir (İstanbul için Deprem Master Planı, 2003, s.9).

İstanbul ve çevresinde tarih boyunca birçok yıkıcı deprem yaşanmıştır (Çizelge B.2) (Şekil B.53). Marmara bölgesinde son 2000 yılda yüzey dalgası büyüklüğüne (M_s) göre büyüklüğü 7.0 ve daha fazla olan depremlerin sayısı 30 civarındadır (Eyidoğan, 2007, s.16). Ambraseys ve Jackson'ın, son 500 yılda Kuzey Anadolu Fay'ında meydana gelen depremlerin tarihlerini, yerlerini ve olası büyüklüklerini bir araya getiren çalışması, büyüklüğü $M \geq 7$ olan 5 depremin yaşandığı 20. Yüzyılın oldukça aktif olduğunu göstermektedir (Ambraseys, Jackson, 2000, s.F4) . Ambraseys, İstanbul'a en çok zarar veren depremlerin 1509, 1754 ve 1766 yıllarında meydana geldiğini belirtmektedir (Şekil 3.5.4) (Ambraseys, Jackson, 2000, s.F5).

Türkiye'de özellikle son 40 yılda aletsel ölçüm ağının gelişimi güncel depremler ile ilgili verilerin kayıt edilebilmesini sağlamıştır. Tarihsel depremlerle ilgili bilgiler ise sınırlı kaynaklardan elde edilebilmektedir. Genellikle gezginlerin ve tarihçilerin kayıtları, tarihi depremlerin yer ve zaman bilgilerinin elde edilmesinde yararlı olmaktadır. Ancak bu kayıtlar, yapılarda oluşan hasarlarla ilgili detaylı bilgiler

sunmamaktadır. Yapılardaki deprem hasarları ile ilgili daha ayrıntılı bilgilerin elde edilmesi için onarımlarla ilgili arşiv belgelerine başvurulmaktadır. Topkapı Sarayı arşivinde bulunan tarihi bir hesap defteri, 1509 Depremi sonrasındaki onarım çalışmalarının kapsamı hakkında bilgiler sunmaktadır. Onarımlarda çalıştırılan usta ve işçiler ile kullanılan malzeme giderleri bu belgede yer almaktadır (Ahunbay, 2009, s.201).

1509 Depremi, Marmara Denizi'nin kuzeyinde sahil şeridinin Silivri ile Gebze arasındaki yaklaşık 100 km.lik bölümünde büyük hasarlara yol açmıştır. Tahmini deprem büyüklüğü, hasar dağılımıyla da uyumlu olarak Silivri'den Adalar'a kadar devam eden 60-70 km uzunluğundaki fayın kırılmış olabileceğini göstermektedir (Ambraseys, Jackson, 2000, s.F5). İstanbul'da Kara ve Deniz Surları, Bayezit Camii, Fatih Camii, Yedi Kule ve Topkapı Sarayı gibi birçok anıtsal yapı ağır hasarlar görmüştür (Ahunbay, 2009, s.202).

İstanbul'da büyük can ve mal kaybına yol açan 1766 Depremi'nin merkez üssü Marmara Denizi'nin doğusudur. 1766 Depremi ve bu depremin İstanbul'daki etkileri konusu üzerinde, özellikle tamir defterleri olmak üzere arşiv belgelerinde faydalanılarak yapılan çalışmalar, depremin etkili olduğu alan ve hasarlı yapıların onarımları konusunda önemli bilgiler sunmaktadır. Fatih Camii ve Eyüp Camii en ağır hasar gören yapılar arasındadır (Mazlum, 2009, s.208). Mazlum, 1766 Depremi ile ilgili çalışmalarında, daha önceki depremlerde hasar gören yapıların sonraki depremlerde de benzer biçimde hasar gördüğünü ortaya koymaktadır.

1894 Depremi, doğuda Adapazarı'ndan başlayarak batıya doğru İzmit Körfezi ve Marmara Denizi kıyılarında ağır hasarlar yaratmıştır. Deprem merkez üssünün İstanbul'dan uzakta olması Başkent'te hasarların daha az yaşanmasını sağlamıştır. İstanbul Tarihi Yarımada'da depremden en çok etkilenen bölgeler; Fatih, Edirnekapı, Topkapı, Balat, Gedikpaşa, Kadırga Limanı ve Kumkapı'dır. Kapalı Çarşı, bazı bölümleri tamamen yıkılarak ağır biçimde hasar görmüştür (Ambraseys, 2001, s.121,122). Fatih'te Zeyrek Camii yakınında bulunan Çinili Hamamı'nın deprem sonrası işlevine devam etmesi, yapıda ciddi hasarlar olmadığını göstermektedir. 1766 depreminde yıkılan ve sonrasında yeniden inşa edilen Fatih Camii'nde ise minarelerde hasarlar oluşmuştur (Öztin, 1994, s.119). Zeyrek Camii'nin kuzeyinde ve Haliç'in kıyısında bulunan Gül Camii de depremde zarar gören yapılar arasındadır (Ürekli, 1999, s.40).

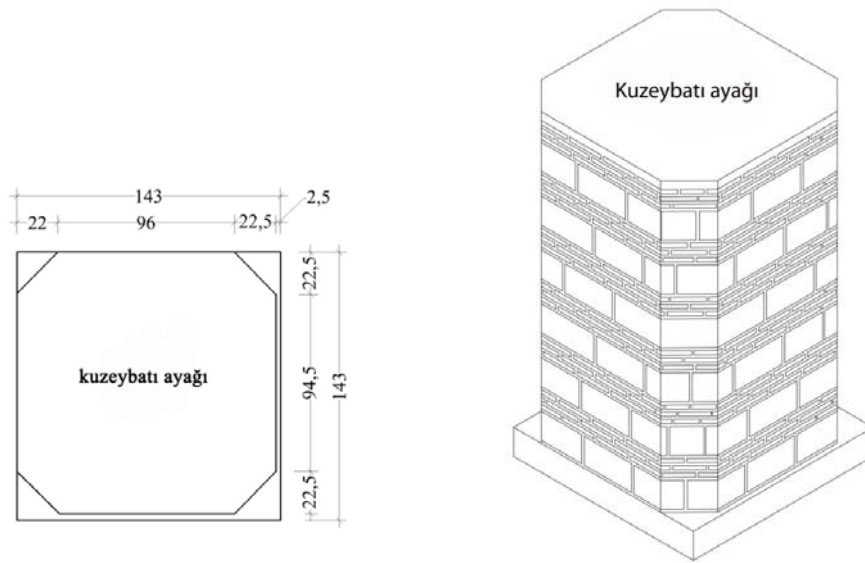
Öztin'in 1894 Depremi Raporu, yerel zemin koşullarının yapısal hasarlardaki rolünün önemli olduğunu vurgulamaktadır. Sağlam zemin üzerindeki Beyoğlu, Galata, Haliç'in kuzey kesimleri ve Boğaziçi'nde hasarlar az, suni dolgu ve yumuşak zemin üzerindeki Eminönü, Fatih, Balat, Adalar ve Anadolu yakasının kıyı kesimlerinde ise hasarlar daha ağır olmuştur (Öztin, 1994, s.24). 1894 depremi ile 1999 İzmit depremini karşılaştıran Ambraseys, büyüklükleri çok yakın olan bu iki depremin merkez üslerinin çakıştığını ve her iki depremin de özellikle sağlam olmayan zemin yapısı olan Yeşilköy, Çekmece, Yalova gibi yerleşim birimlerinde ağır hasarlara neden olduğunu ortaya koymaktadır (Ambraseys, 2001, s.125).

3.6 Mevcut Hasarlar ve Nedenleri

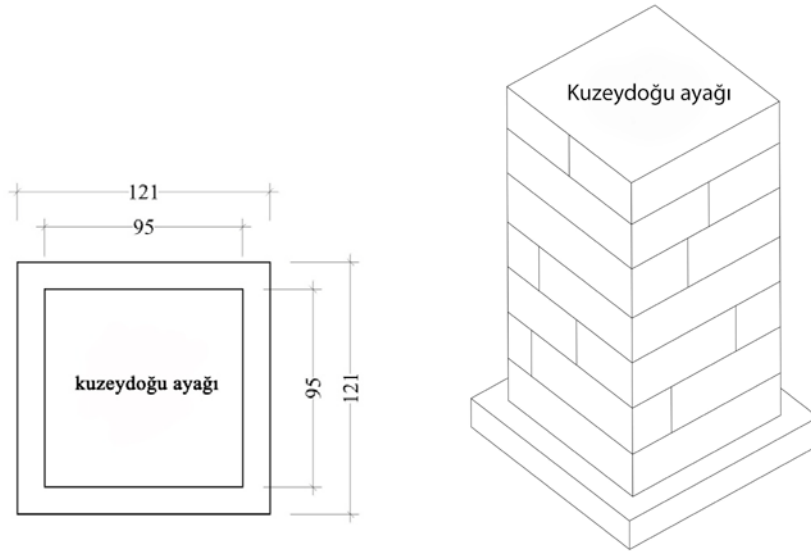
Yapıda tespit edilen hasarlar, yapı elemanlarına göre alt başlıklarda tanımlanmış ve değerlendirilmiştir.

3.6.1 Taşıyıcı ayaklar

18. veya 19. yüzyıl onarımlarına ait ayaklardan doğuda bulunan iki ayak düzgün kesme taşlarla, batıdaki ayaklar ise 2–3 sıra tuğla dizisi ve bir taş sırasından oluşan almaşık örgüyle inşa edilmiştir. Her iki tipteki ayakta da kireç taşı kullanılmıştır (Şekil B.54 ve Şekil B.55) Doğudaki ayaklar 95x95 cm, batıdakiler ise 143x143 cm boyutundadır. Batıdaki ayakların köşeleri pahlanmış (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4).



Şekil 3.3: Zeyrek Camii kuzey bölüm kuzeybatı ayağı, plan ve perspektif.

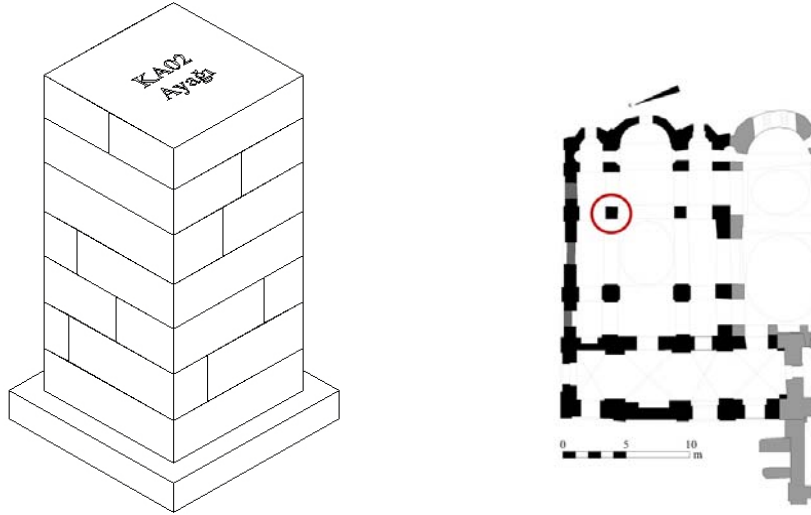


Şekil 3.4: Zeyrek Camii kuzey bölüm kuzeydoğu ayağı, plan ve perspektif.

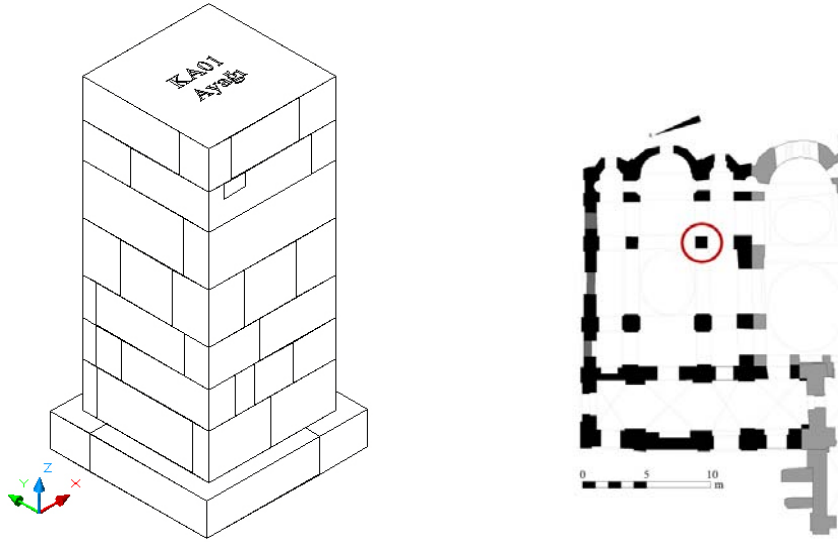
En hasarlı ayak güneydoğu ayağıdır. 1998 yılında metal elemanlarla kuşaklanan bu ayakta, aşırı yüklemekten kaynaklanan ezilme hasarları görülmektedir (Şekil B.56). Ani göçmeler yaşanabileceğinden bu tipteki oluşumlar en tehlikeli hasar tiplerinden biridir. Daha yapım aşamasında ayak kesitinin yetersiz olması ya da inşa edildiği dönemde mevcut basınç gerilmelerini emniyetli bir biçimde karşılayan ayağın, yapının sonraki yıllardaki değişimlere bağlı olarak artan yükleri karşılayamaması söz konusu olabilir.

Farklı malzemeyle inşa edilen iki veya daha fazla katmanlı taşıyıcı elemanlarda, katmanların rijitlikleri farklılık gösterir. Bu durum, yükün kesitte düzgün dağılmamasına yol açabilir. Kesitin bir bölümü daha fazla yüklenirken, diğer bölümü daha az zorlanır. Daha fazla zorlanan bölümlerde hasar meydana gelebilir. Güneydoğu ayağında zorlanan kısım, belki de homojen olmayan çekirdek kısmı etrafındaki kesme taşlardır.

Ayaklarla ilgili dikkati çeken diğer bir nokta, güneydoğu ayağı önemli ölçüde hasarlıyken, kuzeydoğu ayağında çatlakların az olmasıdır. Bu iki ayak karşılaştırıldığında, kuzeydoğu ayağında daha iri kesme blokların kullanıldığı ve derzlerin mümkün olduğunca şaşırtılmaya çalışıldığı görülmüştür (Şekil 3.5). Güneydoğu ayağının yapımında ise daha ufak bloklar kullanılmış ve üst üste gelen kesme taş sıralarında düşey derzlerin şaşırtılmasına yeterince dikkat edilmemiştir (Şekil 3.6).

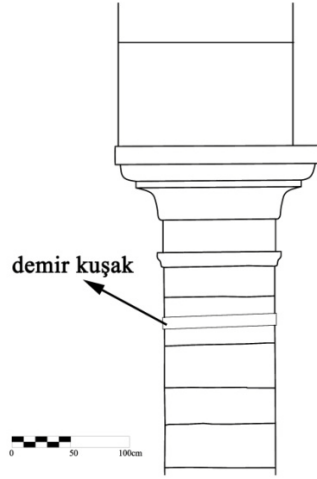


Şekil 3.5: Zeyrek Camii kuzey bölüm kuzeydoğu ayağı.



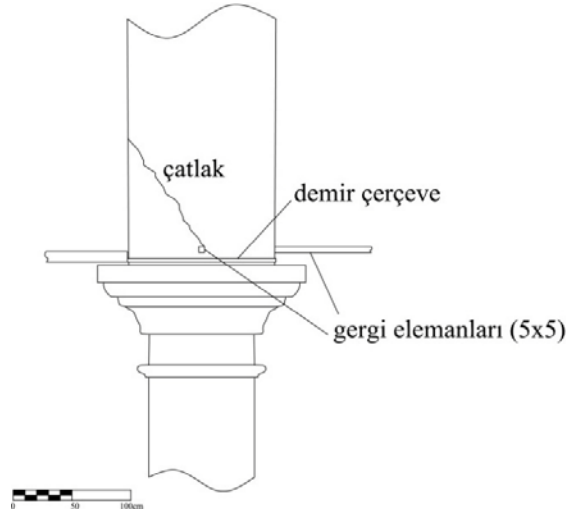
Şekil 3.6: Zeyrek Camii kuzey bölüm güneydoğu ayağı.

Taşıyıcı ayaklarla ilgili tespit edilebilen bir diğer zayıflık, özellikle doğudaki ayaklarda yüklerin ayak kesitlerine dışmerkezlilikle etkimesidir (Şekil 3.7). Mevcut durumun belgelenmesi aşamasında, güneydoğudaki ayağın olması gereken konumdan yaklaşık 13 cm. güney ve 9 cm. doğuda bulunduğu tespit edilmiştir. Kuzeydoğu ayağında ise söz konusu dış merkezliğin daha az olduğu tespit edilmiştir. Ayaklardaki eğilme momenti nedeniyle, kesitteki uniform gerilme şeması bozulmakta ve ayağın bir tarafında ilave basınç, diğer tarafında ise daha düşük düzeyde basınç veya çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Basınç gerilmelerinin büyüklüğü ise ezilme hasarlarına yol açabilmektedir.



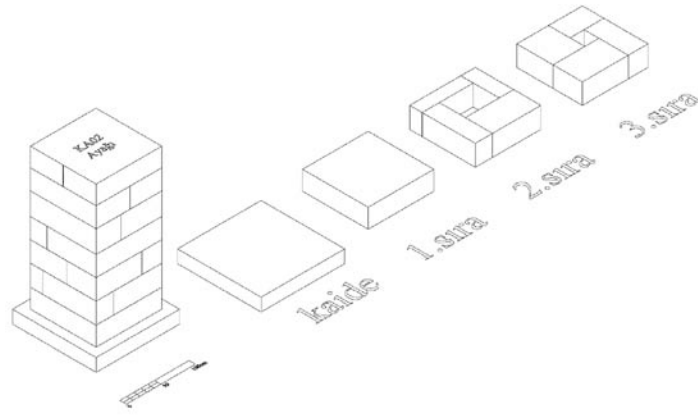
Şekil 3.7: Zeyrek Camii kuzey bölüm güneydoğu ayağı, doğuya bakış.

KA01 ayağında, basınç kuvvetleri nedeniyle oluşan düşey çatlaklardan farklı olarak ayağın güney yüzünde ve başlık seviyesinin üzerinde gergi elemanından başlayıp çapraz bir biçimde yukarı çıkan bir çatlak bulunmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8: Zeyrek Camii kuzey bölüm güneydoğu ayağı, kuzeye bakış.

Kuzeydoğu ayağında kullanılan kesme taşların düzgün dikdörtgen biçimli olmaları varsayımında, mevcut derz dağılımına göre, ayak kesitinin içinde kalan dolgu alanları, farklı sıralarda farklı büyüklüktedir ve üst üste gelmemektedir (Şekil 3.9). Bu durumda ayağın içinde Bizans dönemi sütununun çevresine yapılmış olması mümkün gözükmemektedir. Ancak ayak bünyesinin durumu hakkında kesin bir yargıya varmak için incelenen yapı elemanlarına zarar vermeyen testlerden; GPR (ground penetrating radar), endoskopi veya mekanik dalgalara dayalı bazı incelemelerin yapılması gerekmektedir.



Şekil 3.9: Zeyrek Camii kuzey bölüm kuzeydoğu ayağı, taş sıraları.

3.6.2 Demir gergiler

Kuzey Kilise’de taşıyıcı ayaklara başlık seviyesinde bağlanan iki farklı özellikte gergi bulunmaktadır. Bu gergiler; yapım dönemi, kesit boyutları ve ayaklara bağlanma biçimiyle birbirlerinden ayrılmaktadır. 90’lı yılların sonunda Kuzey Kilise içinde çekilen bir reklam filmi için ayaklar arasına konulan metal elemanlar kutu kesitlidir; başlık seviyesindeki çerçeveye kaynaklanmışlardır. Bu elemanların taşıyıcı sistemi sağlamlaştırma görevi yoktur. Ayakları duvarlara bağlayan 5x5 cm kesitindeki dolu gövdeli demir gergiler ise ayakların ve duvarların içine girmektedir (Şekil B.54 ve Şekil B.55).

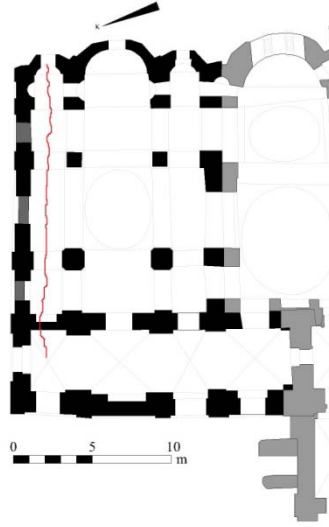
Taşıyıcı sütunları birbirlerine ve duvarlara bağlayan ve bu sayede sistemin bir bütün halinde davranmasını sağlayarak olası deformasyonları en aza indiren metal gergiler aşırı derecede korozyona uğramış ve bunun sonucunda kesitlerinde ciddi kayıplar oluşmuştur. Metal elemanlarda görülen kesit kayıpları, duvara bağlandığı noktalarda daha ileri düzeydedir (Şekil B.57). Bu elemanların mevcut durumlarıyla işlevlerini yerine getirmeleri mümkün değildir.

3.6.3 Kuzey nef örtü sistemindeki hasar

Yapının kuzey nefinde bulunan çatlak doğu batı doğrultusundadır ve nefi örten tüm örtü elemanlarını yırtmıştır. Çatlak, doğuda uzun düşey bir pencere ile zayıflayan kuzey pastophorionu yırtarak yapının temellerine doğru inmektedir (Şekil 3.10).

Kuzey nefte çatlağın zemine doğru indiği diğer bir nokta, iç mekânı narteksten ayıran duvardadır. Duvarın bu kısmı nartekse açılan ve sonradan doldurulan kemerli kapı ve galeriye geçişi sağlayan açıklık ile zayıflatılmıştır. Yapının batısına bitişik nartekste

devam eden çatlak, bu mekânın kuzey kenarında bulunan çapraz tonozu da aynı doğrultuyu koruyarak yırtmaktadır (Şekil B.58).

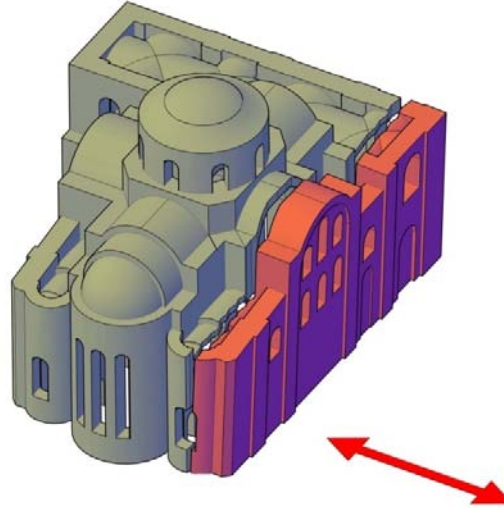


Şekil 3.10: Kuzey nef boyunca doğu-batı doğrultusunda uzanan çatlak.

Tonozdaki çatlağı, mekân içerisinden algılamak güçtür. Bunun nedeni yapının geçirdiği onarım çalışmalarında tonoz yüzeylerinin düzgün bir biçimde sıvanmış olmasıdır. Bununla birlikte, deformasyonlar özellikle tonoz sırtlarında oluşmuş ve tonoz iç yüzeyinde herhangi bir açılma yaşanmamış olabilir.

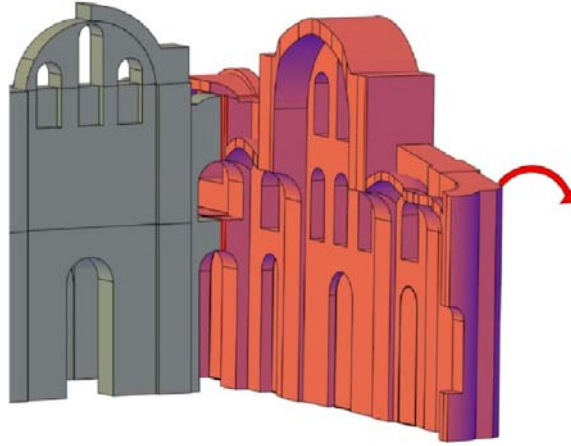
Bu hasarın varlığı, 1997-1998 yılında Zeyrek Camii'nde Prof. Dr. Zeynep Ahunbay ve Prof. Dr. Metin Ahunbay tarafından çatıda yürütülen onarım çalışmalarında tespit edilmiştir. Kuzey duvarına paralel ilerleyen çatlak, önce beşik tonoz üzerinde saptanmış, daha sonra kuzey pastoforion çatı temizliği sırasında bu bölümde de devam ettiği görülmüştür (Şekil B.35). Çatlağın, kuzey duvarının özellikle üst kotlarda, kendi düzlemine dik doğrultuda hareket etmesi nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. Söz konusu hareket ile ilgili olarak olası iki neden ortaya konulabilir. Bunlardan ilki deprem, bir diğeri ise zemin oturmalarıdır.

Yatay deprem yükleri etkisinde kuzey duvarının taşıyıcı sistem bütününden farklı bir davranış sergilemesi olasıdır. Etkili bir gergi sisteminin olmayışı yapının deprem yükleri etkisinde bütün davranışını olumsuz etkilemektedir. Kuzey duvarı yapının diğer kısımları ile beraber hareket edememekte ve düzlem dışı kuvvetler karşısında etkilenebilir duruma gelmektedir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11: Kuzey duvarının kuzey-güney doğrultuda yatay yükler altında düzlem dışı hareketi ile ilişkili olası hasar senaryosu.

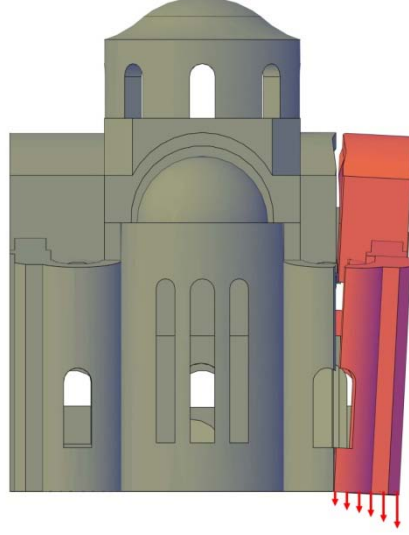
Böyle bir mekanizmanın, kuzey duvarına paralel bir çatlağın doğmasına neden olması olasıdır. Özellikle kuzey-güney doğrultusunda etkili bir deprem durumunda, söz konusu doğrultuya paralel konumlanan narteks duvarlarının oldukça rijit bir davranış sergileyeceği, kuzey duvarı kuzey-güney doğrultusunda salınırken, bu duvardaki hareketin oldukça sınırlı olacağı düşünülmektedir. Bu durumda, kuzey duvarı ile ana mekânı narteksten ayıran duvarın kesiştiği bölgede de çatlakların oluşması doğaldır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12: Kuzey duvarı ve narteks duvarı arasındaki çatlakla ilgili olası hasar senaryosu.

Zeyrek Camii Kuzey Kilise kuzey nefinde görülen çatlağın oluşmasında ikinci bir olasılık olarak kilisenin özellikle kuzey tarafında zemin oturması gösterilebilir. Böyle bir senaryoda, kuzey duvarı uniform olmayan oturmalar nedeni ile yalnızca düşey doğrultuda yer değiştirmeyecek aynı zamanda dönme hareketi de yapacaktır.

Bu tip bir süreç mevcut hasarla örtüşen bir durum ortaya çıkarabilir. Ancak daha tutarlı yargılara varılabilmesi için yapının çevresinde zemin etütlerinin yapılması gereklidir.

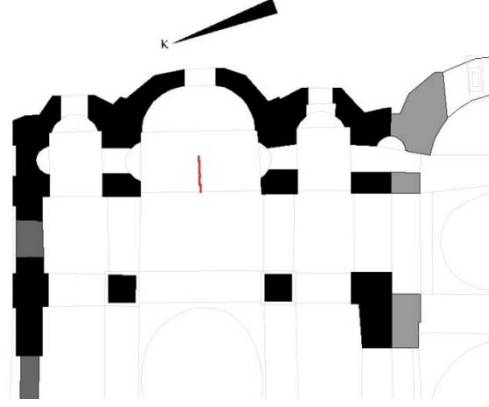


Şekil 3.13: Kuzey duvarında zemin oturmaları ile ilişkili hasar senaryosu.

Antik yapı kalıntı ve molozlarının meydana getirdiği yapay bir dolgu üzerine 12. yüzyılda inşa edilen bir yapıda zemine bağlı sorunların inşa tarihine yakın dönemlerde ortaya çıkma olasılığı daha yüksektir. İnşa tarihi üzerinden yüzyıllar geçtiği düşünüldüğünde, yapının yakınında derin kazı yapılmadığı veya yer altı su seviyesinde önemli değişiklikler yaşanmadığı takdirde zemin kaynaklı sorunların yaşanma riski çok düşüktür.

3.6.4 Doğu tonozundaki hasar

Kuzey Kilise ana hacminde dikkati çeken diğer bir çatlak, doğu tonozunda bulunmaktadır (Şekil 3.14). Çatlak, tonozun iç yüzeyinde oldukça belirgin bir biçimde batıdan doğuya doğru düzgün şekilde ilerlemekte ve tonozun yarı genişliğine gelindiğinde gözden kaybolmaktadır. Çatlağın güneydoğu ve kuzeydoğu ayakları arasındaki mesafenin tonoz üzengi seviyelerinde açılması neticesinde oluştuğu düşünülmektedir. Apsis tarafında benzer tipteki bir zorlamanın olmaması nedeniyle çatlak daralarak yok olmaktadır. Tonoz üzengi seviyesinde gergilerin konulması ve söz konusu ayaklar arasında etkin bir gergi sisteminin düzenlenmesi, bu alandaki yer değiştirmeleri azaltacağı düşünülmektedir.



Şekil 3.14: Doğu tonozundaki çatlak.

3.6.5 Kubbe ve batı tonozundaki hasar

Prof. Dr. Zeynep Ahunbay, Kuzey Kilise kubbe ve kasnağının yapının diğer kubbe ve kasnaklarından farklılık göstermesi ve batı tonozunun sivri kemerli biçimli olması nedeniyle söz konusu bölgelerde kapsamlı onarımlar yapıldığını ileri sürmektedir (Şekil B.24). Onarımı gerektiren hasarların, yapının özgün kubbe ve batı tonozunun yeniden yapımına varacak büyüklükte olduğu anlaşılmaktadır.

3.6.6 Doğu Cephesinde Hasarlar

2001-2005 yılları arasında Prof. Dr. Zeynep Ahunbay ve Prof. Dr. Metin Ahunbay'ın doğu cephesinde yürüttüğü onarım çalışması öncesinde, Kuzey Kilise apsis ve pastophorion duvarları oldukça bakımsız ve hasarlıdır (Şekil B.39 ve Şekil B.40). Duvar örgüsünde özensiz onarımlar, niteliksiz dolgular, hasarlı ve bozulmuş bölgeler bulunmaktadır. Onarımlar esnasında niteliksiz dolgular kaldırıldığında duvar dokusunda çatlakların varlığı tespit edilmiştir. Özellikle açıklıkların olduğu bölümlerdeki çatlaklar duvarın taşıyıcılığını tehlikeye sokmaktadır (Şekil B.41). Apsis duvarında üçlü pencere düzenindeki sütunların düşeyden saptıkları ve başlıklarla birlikte çatladıkları görülmüştür.

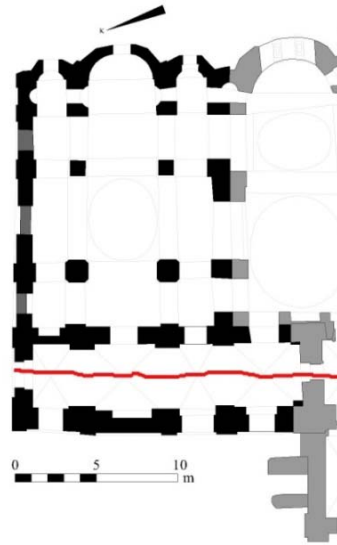
Pastophorion pencerelerinin üst kısımları çatlaklar nedeniyle Osmanlı döneminde ince tuğlalarla kaplanmıştır. Kuzey pastophorion çok hasarlı olması bu bölümde duvarların zemine kadar yeniden örülmesini gerektirmiştir (Ahunbay, Ahunbay, 2005, s.82).

3.6.7 Galerideki hasarlar

Kuzey Kilise galerisinde birbirinden farklı bölgelerde ve doğrultularda çatlaklar bulunmaktadır. Bu çatlaklardan ilki galerinin kuzey köşesinde, Kuzey Kilise iç hacminden galeriye geçişi de sağlayan kemerli açıklığın üstünden başlamakta ve kuzey duvarına paralel devam etmektedir (Şekil B.58). Çatlağın kuzey nef örtü sistemindeki çatlağın devamı olduğu düşünülmektedir.

Galeride bulunan en dikkat çekici hasar, galeri tonozları boyunca kuzey-güney doğrultusunda uzanan iki ayrı çatlak sistemidir. Birbirine paralel ilerleyen bu çatlaklardan biri orta aksta (Şekil 3.15) diğeri ise tonozun batı duvarına mesnetlendiği kesit boyunca devam etmektedir (Şekil B.37, Şekil B. 59, Şekil B.60).

Bu, deprem kuvvetleri altında yapının batı duvarının doğu-batı doğrultusunda salınması sebebiyle ortaya çıkan bir çatlaktır. Duvarın, yatay kuvvetler söz konusu olduğunda taşıyıcı sistem bütünüyle birlikte ortak sağlayabilecek gergi sisteminin olmaması büyük bir eksiklikler. Bu görevi üstlenen ahşap gergilerin yok olması bu bölümdeki direnci düşürmüştür.



Şekil 3.15: Galerinin tonozları boyunca kuzey-güney doğrultusunda uzanan çatlak.

1966-1967 yılları arasında ise İstanbul Vakıflar Bölge Müdürlüğü mimarlarından Fikret Çuhadaroglu denetiminde yapılan restorasyon çalışmaları öncesine ait fotoğraflar, batı duvarının oldukça harap olduğunu, duvar kesitinde önemli eksilmeler yaşandığını ve duvarın ayakta kalabilmesi için niteliksiz dolgular yapıldığını göstermektedir (Şekil B.27 ve Şekil B.29). Cephedeki pencere düzeninin

duvar sürekliliğini önemli ölçüde etkilediği ve düzlem davranışta duvarın zayıf olmasından dolayı hasarların ortaya çıkmış olabileceği düşünülmektedir.

3.6.8 Ahşap hatıl ve gergilerdeki hasarlar

Yapının birçok noktasında ahşap kuşakların yok olması nedeniyle hatıl boşlukları görülmektedir. Bu kuşakların duvar içerisinde de devam ettikleri düşünüldüğünde, kuşakların geçtiği kotlarda duvar kesitinin zayıfladığı ileri sürülebilir.

2001 yılında başlayan, Prof.Dr. Zeynep Ahunbay ve Prof.Dr. Metin Ahunbay denetiminde çatıda yapılan onarım çalışmalarında, mümkün olan yerlerde hatıl boşluklarına ahşap elemanlar konulmuştur. Benzer şekilde doğu cephesinde yapılan onarım çalışmalarında da pencerelerin içerisinde görülen hatıl boşluklarına ahşap elemanlar yerleştirilmiştir (Şekil B.61).

Galeri tonoz başlangıç seviyesinde, ahşap gergilerin duvara girdiği noktalarda dikdörtgen boşluklar tespit edilmiştir (Şekil B.62). Duvar içinden geçen ahşap hatıl sistemi ile bağlantılı olduğu düşünülen gergiler yok olmuştur. Batı duvarının düzlem dışı hareketini engellemeleri ve yapının monolitik davranışına katkıda bulunmaları nedeniyle yok olan bu elemanların işlevlerini gören yeni elemanların yerlerine konulması gereklidir.

Galeri kuzeybatı köşesindeki duvarlarda bulunan hatıl boşlukları içerisindeki hatıllar da yok olmuştur. Ancak hatıl boşluğunun derinliklerinde, yapının geçirdiği yangınların bir sonucu olarak yanmış ahşap parçaları görülmektedir.

4. ANALİZLER VE DEĞERLENDİRME

Çalışmanın bu bölümü, yapının kendi ağırlığı etkisinde taşıyıcı sistem elemanlarında oluşan gerilme ve şekildeğiştirme durumunun araştırılmasına doğrusal elastik statik analizlerle başlamaktadır. Deprem davranışına yönelik olarak, ilk adımda yapının titreşim frekansları ve modlarının belirlenmesi amacıyla modal analiz yapılmıştır. Sonraki adımda, modal analizden elde edilen veriler ve tanımlanan spektrumlar kullanılarak modal spektral analizler yapılmıştır. Bu analiz ile deprem etkisinde yapıdaki maksimum iç kuvvetler ve yerdeğiştirmeler tespit edilmiştir. Yukarıda sıralanan analizler ile yapıda bugün gözlemlenen bazı hasarların oluşum nedenleri ve süreçleri ile yeterli cevapların alınamadığı durumlarda lokal modeller kullanılarak zemin oturması gibi etkilerin değerlendirilmesi yapılmıştır.

4.1 Tarihi Yapıların Taşıyıcı Sistem Analizi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi

Fiziksel olayları konu alan birçok mühendislik probleminin çözümüne analitik yöntemlerle ulaşmak mümkün değildir. Bunun sebebi, gerçek dünyada karşılaşılan problemlerin, örneğin taşıyıcı sistemlerle ilgili bir analizin basit kiriş çözümlemesinden çok daha karışık olmasıdır. Karmaşık diferansiyel denklemlerle çalışmak, başlangıç - sınır koşulları ile ilgili ortaya çıkan belirsizlikler veya malzeme davranışındaki özellikler bu denklemlerin çözümünü güçleştirir. Analitik yöntemlerle çözümü mümkün olmayan bu tip problemlerle karşılaşıldığında yaklaşık çözümler sunan sayısal yöntemler kullanılır. Sonlu elemanlar metodu, farklı dallarda birçok mühendislik probleminin çözümü için kullanılabilen sayısal yöntemlerden biridir.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan taşıyıcı sistem analizlerinde hesaplanan temel bilinmeyen yerdeğiştirmelerdir. İç kuvvetler ve şekildeğiştirmeler, düğüm noktalarındaki yerdeğişmeler kullanılarak hesaplanır.

4.2 Geometrik Model

Yapıyı meydana getiren kemer, tonoz, ayak, kubbe gibi taşıyıcı elemanların birçoğunda deformasyonlar vardır. Ancak bu deformasyonlar hazırlanan modelde ifade edilmemiştir. Bunun nedeni amorf geometrilerin Cad programları kullanılarak ifade edilmelerinde ve sonlu elemanlar analiz programına söz konusu formların tanıtılmasında karşılaşılan güçlüklerdir. Yapının dijital ortamda katı modelinin hazırlanmasında AutoCAD ve Rhinoceros programları kullanılmıştır.

Modelin inşa edilmesinde Prof. Dr. Zeynep Ahunbay- Prof. Dr. Metin Ahunbay tarafından hazırlanan rölövelerden yararlanılmıştır. Yapının mevcut boyut ve biçimlerine sadık kalınmasına özen gösterilmiştir. Üç boyutlu modelin hazırlanmasında altlık olarak kullanılan plan, mevcut planın ideal geometrik formlarla ifade edilmiş halidir (Şekil C.1).

Geometrik formların idealleştirilmesi aşamasında güvenli tarafta kalabilmek için boyutların yapı davranışını olumsuz yönde etkileyecek şekilde seçilmesi yönünde bir yaklaşım tercih edilmiştir. Örneğin kubbeyi taşıyan ayakların oluşturduğu dörtgen soyutlanırken çerçevenin büyük açıklık değerleri kullanılarak bir dikdörtgen oluşturulmuştur. Analizler için hazırlanan modelde aşağıdaki kabuller yapılmıştır;

-Mevcut durumda birbirine 90 dereceye yakın açıyla sapan duvarlar modelde birbirlerine diktir (Şekil C.2).

-Kare ve dikdörtgene yakın olan ayaklar ve taşıyıcı duvarlar köşeleri 90 derece olan ideal dörtgenlerin birleşimiyle oluşturulmuştur (Şekil C.3).

-Çapraz tonozlarda, tonozun karşılıklı kolları aynı geometrik özelliktedir (Şekil C.4).

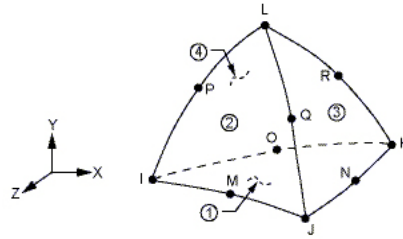
Modelin istenilen kısımları çıkarılabilir veya eklenebilir niteliktedir (Şekil C.5). Kubbe, tonozlar ve taşıyıcı ayaklar, narteks ve galerinin oluşturduğu bütünden ayrılabilir ve analiz edilebilir. Hem yan neflerdeki tonozlar, hem de narteks tonozları üzerinde dolgu kısmı modelde ifade edilmiştir (Şekil C.6). Bu özellik, çalışmanın ileri aşamalarında yapı parçalarının birbirleri ile olan etkileşimleri incelenmek istendiğinde kullanılabilir.

Hazırlanan geometrik modelde detaylı geometrik formları olan sütun başlıkları vb... gibi öğeler kabaca ifade edilmişlerdir (Şekil C.7). İstendiği takdirde, söz konusu

elemanlar hazırlanabilecek lokal modellerde daha ayrıntılı bir biçimde ifade edilebilir.

4.3 Analizlerde Kullanılan Elemanlar

Analizlerde katı model, dörtyüzlü Solid 187 elemanları kullanılarak parçalara ayrılmıştır. Bu eleman, özellikle CAD sistemleriyle geliştirilen üç boyutlu hacimlerin karmaşık sonlu eleman ağlarında önerilmektedir (ANSYS Elements Reference and ANSYS Structural Guide, 2003). 10 nokta ile tanımlanan Solid 187 elemanı her noktasında 3 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Analiz aşamasına geçmeden önce farklı eleman boyutları kullanılarak modeller hazırlanmış ve elde edilen iç kuvvet ve yerdeğiştirme değerlerindeki değişimler izlenmiştir. Bu veriler ve çalışmada kullanılan bilgisayarın kapasitesi göz önünde bulundurularak, dörtyüzlünün maksimum kenar uzunluğu 30 cm olarak seçilmiştir (Şekil 4.1)



Şekil 4.1: Analizlerde kullanılan dört yüzlü eleman.

10 noktalı 4 yüzlü eleman için şekil fonksiyonu (ANSYS Elements Reference and ANSYS Structural Guide, 2003) aşağıda ifade edilmiştir:

$$(4.1)$$

$$(4.2)$$

$$(4.3)$$

$$(4.4)$$

$$(4.5)$$

$$(4.6)$$

$$(4.7)$$

Analizlerde elde edilecek bilinmeyen, düğüm noktalarındaki serbestliklerdir. Çalışmadaki analizlerde serbestlikler, kullanılan elemanın her bir noktası için 3 farklı eksenlerdeki yerdeğiştirmelerdir.

4.4 Analizlerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Analizlerde malzemenin her doğrultuda aynı özellikli doğrusal elastik bir malzeme olduğu kabul edilmiş ve yapının tüm taşıyıcı sistem elemanlarının aynı malzeme özelliği gösterdiği varsayılmıştır. Malzemenin elastisite modülü 1500 MPa, poisson oranı 0,15 ve birim hacim ağırlığı 1800 kg/m³ olarak kabul edilmiştir.

4.5 Yapı Zemin İlişkisi

Tüm modellerde tabandaki düğüm noktalarında x,y ve z eksenlerinde yerdeğiştirmeler engellenerek yapının zemine rijit olarak bağlanması sağlanmıştır. Lokal modellerde istenilen eksenlerde bu noktaların yerdeğiştirmeleri değiştirilerek, zemin oturmaları ifade edilmiştir.

4.6 Analizler

Çalışmada, yapının kendi ağırlığı etkisinde taşıyıcı sistem elemanlarında oluşan gerilme ve şekildeğiştirme durumunun irdelenmesine yönelik doğrusal elastik statik analiz, yapının titreşim frekansları ve modlarının belirlenmesi amacıyla modal analiz ve yapının deprem davranışının anlaşılabilmesi amacıyla spektrum analizleri yapılmıştır.

Hazırlanan modeller ile yapılan analizlerinden elde edilen gerilme, yerdeğiştirme gibi sayısal büyüklüklerin modelde girdi olarak tanımlanan parametrelerin değiştirilmesi ile önemli ölçüde değiştiği görülmüştür. Bu noktadan hareketle, tarihinde birçok deprem ve yangın geçirmiş ve bu afetler sonrasında farklı dönemlerde onarımlar görmüş bir Ortaçağ yapısı olan Zeyrek Camii için, sonlu elemanlar yöntemine dayalı analizlerden elde edilen sonuçların sayısal büyüklüklerinden çok, bu verilerin genel olarak yapı davranışı içinde anlamı üzerinde durulmaya çalışılmıştır. Analiz sürecinde lineer ve izotropik bir malzeme davranışının kabulü de, yine aynı çerçevede alınmış bir yaklaşım kararıdır. Çalışmada, sonlu elemanlar modelleri, yerinde yapılan tespitlere dayandırılmış bir

yapı davranış öngörüsünü güçlendirebilecek bir araç olarak kabul edilmiş ve mümkün olduğunca basit modeller yardımı ile yapı davranışı ile ilgili ek bilgiler edinilmeye çalışılmıştır. Tüm modellerde, analiz verilerinin merteye olarak tutarlı olup olmadıkları kontrol edilmiştir.

4.6.1 Doğrusal elastik statik analiz

Analiz çalışmasının ilk bölümünde, yapının kendi ağırlığı etkisinde davranışının belirlenmesi amacıyla hazırlanmış statik analiz modelleri bulunmaktadır. Bu modeller, basit sistemlerden daha karmaşık sistemlere doğru geliştirilen, taşıyıcı sistem bütününe meydana getiren parçaların her bir aşamada eklemlenerek mevcut geometriyi ifade edene dek sürdürülen modellerden oluşmaktadır. Burada amaçlanan, kubbe, kubbe kasnağı ve tonoz parçalarının sonraki adımlarda eklemlenen her bir parça ile tüm yapı davranışındaki değişimlerin takip edilebilmesidir. Aşağıda, hazırlanan modellerin yapının hangi parçalarından oluşturulduğu ile ilgili bilgiler sunulmuştur (Şekil 4.2).

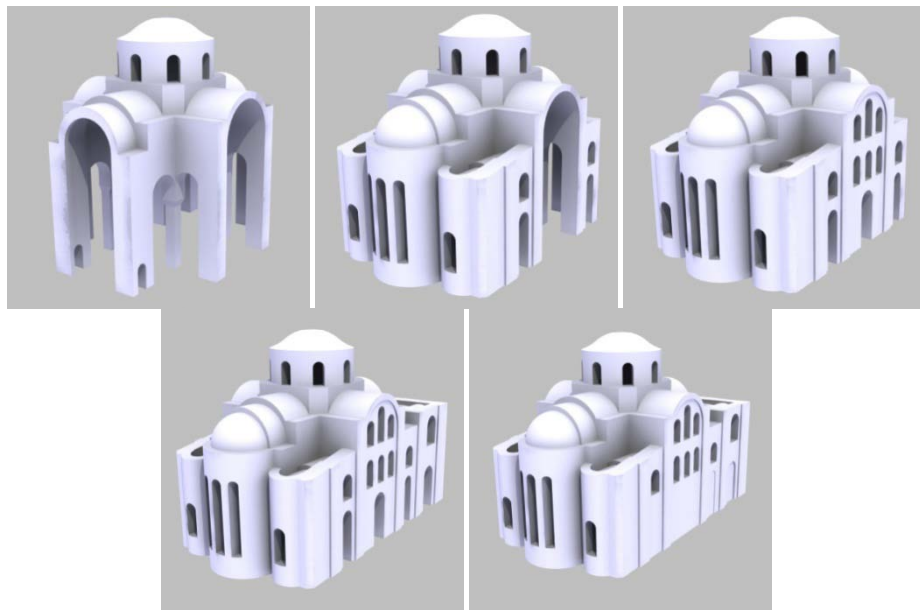
-Model1:Kubbe, kasnak ve tonozlar

-Model2:Model1+naosun köşelerindeki tonozlu mekânlar+pastoforionlar+apsis

-Model3:Model2+kalkan duvarları

-Model4:Model3+narteks+galeri

-Model5:Model+açıklıklarda yapılan dolgular



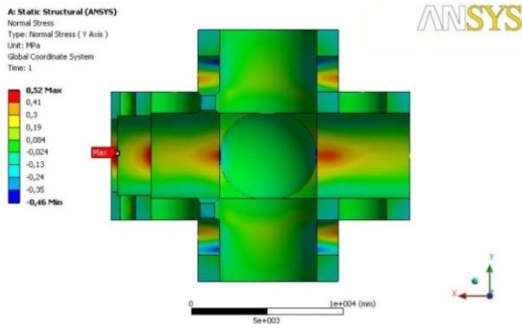
Şekil 4.2: Analizlerde kullanılan modeller.

Doğrusal elastik statik analizde, sistemin denge denkleminin çözümü düğüm noktalarındaki yerdeğiştirmeleri belirler (4.8). Şekildeğiştirme ve gerilme gibi veriler düğüm noktalarındaki yerdeğiştirmeler kullanılarak elde edilir. Lineer statik analizde taşıyıcı sistem şemasında herhangi bir değişikliğin olmadığı kabul edilir. Başlangıç durumunda sistemde gerilme ve yerdeğiştirmeler sıfırdır.

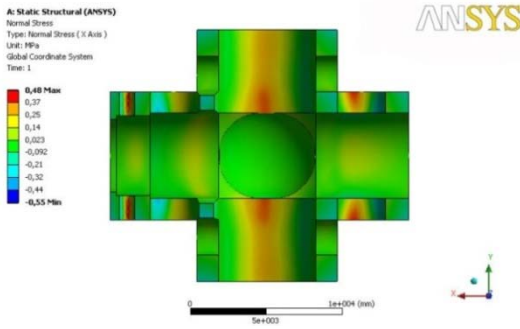
(4.8)

4.6.1.1 Model 1

Kendi ağırlığı etkisinde, kubbe, kubbe kasağı, tonozlar ve bemanın üzerini örten beşik tonozdan oluşan bölümde, merkezdeki ayakları çevre duvarlara bağlayan kemerlerde ve beşik tonozların kubbeye yakın bölgelerinde çekme gerilmeleri maksimum değerlerdedir (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4).

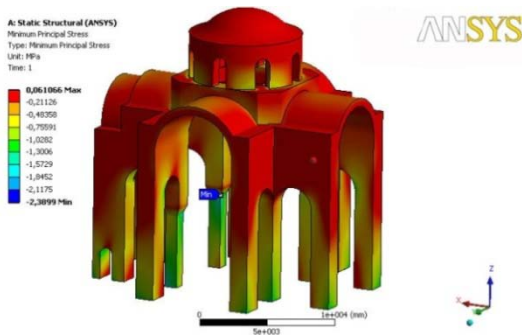


Şekil 4.3: y ekseninde (kuzey-güney) çekme gerilmeleri.

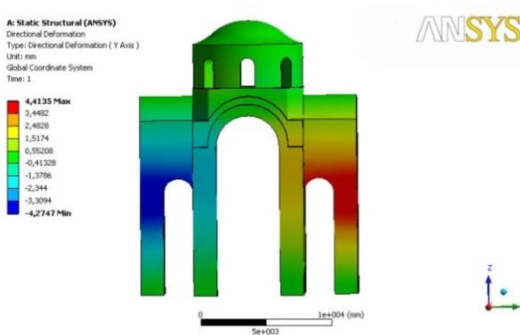


Şekil 4.4: x ekseninde (doğu-batı) çekme gerilmeleri.

Basınç gerilmelerinin en büyük değerleri güneydoğu ayakta tespit edilmiştir (Şekil 4.5). Modelde, ayağın ve üzerindeki duvar parçasının geometrik özellikleri gerçeğe yakın bir biçimde ifade edilerek, ayağa gelen yükün dışmerkezlikle etkimesi sağlanmıştır.



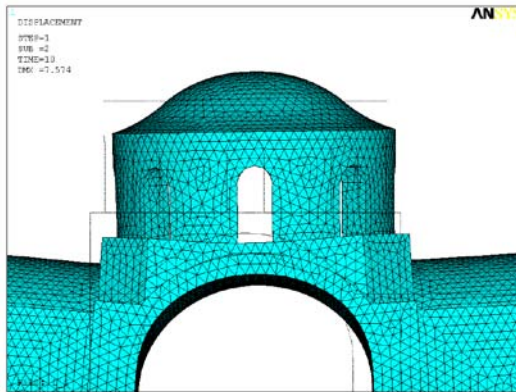
Şekil 4.5: S3 minimum asal gerilmeler, güneydoğu ayağında minimum değerler.



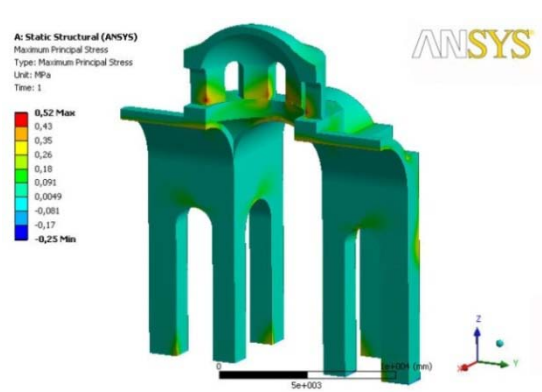
Şekil 4.6: y ekseninde (kuzey-güney) yerdeğiştirme.

Yerdeğiştirmeler özellikle merkezdeki ayakları çevre duvarlara bağlayan kemerlerin seviyelerinde büyük değerler almaktadır (şekil 4.6). Yapıda yerdeğiştirmeleri sınırlayabilecek etkin bir gergi sisteminin bulunmaması bu sonucun ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Analizlerde dikkati çeken noktalardan bir diğeri kubbenin kasnağa oturduğu seviyede tespit edilen gerilmelerdir (şekil 4.7 ve şekil 4.8). Kubbe, silindirik kasnakla birleştiği seviyede kasnağı dışa doğru açılmaya zorlamaktadır. Bu hareket beşik tonozların hemen üst kotlarında kasnağın iç kısımlarında çekme gerilmelerinin dış kısmında ise basınç gerilmelerinin varlığını açıklamaktadır. Yerinde yapılan tespitlerde, ilgili bölgelerde herhangi bir hasar izine rastlanmaması, mevcut gerilmelerin analizde elde edilen gerilmeler kadar büyük olmadığını veya kubbe pencerelerinin üstünde bulunabilecek bir kuşaklamanın yukarıda açıklanan mekanizmayı engellediğini düşündürmektedir. Yapıda sıva raspası yapılması durumunda ilgili bölgelerin ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir.



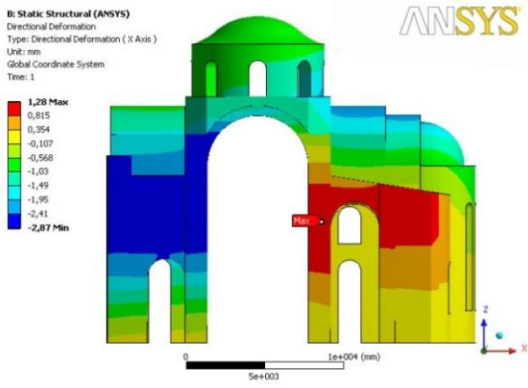
şekil 4.7: Toplam yerdeğiştirme.



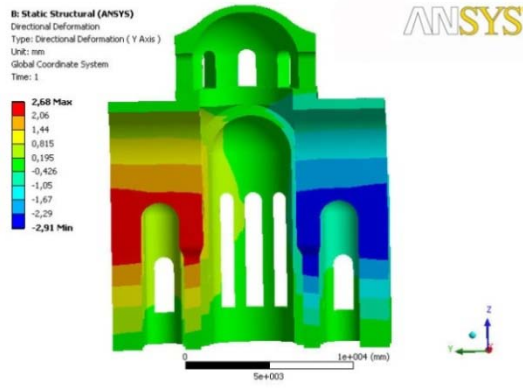
şekil 4.8: S1 maksimum asal gerilme grafiği.

4.6.1.2 Model 2

Kubbe, kubbe kasnağı, tonozlar ve bemanın üzerini örten beşik tonozdan oluşan bölüme mekânın köşelerinde bulunan tonozlu hacimler, apsis, pastoforion ve çevre duvarların eklenmesiyle, kendi ağırlığı etkisinde yapıda meydana gelen yerdeğiştirmelerin önemli ölçüde azaldığı görölmüştür. En büyük yerdeğiştirmeler, merkezdeki ayakları çevre duvarlara bağlayan kemerlerin başlık seviyesinin üzerinde meydana gelmekte (şekil 4.9 ve şekil 4.10).

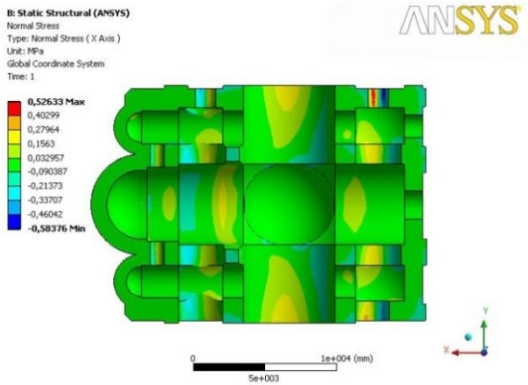


Şekil 4.9: x ekseninde (doğu-batı) yerdeğiştirme, güney duvarı.

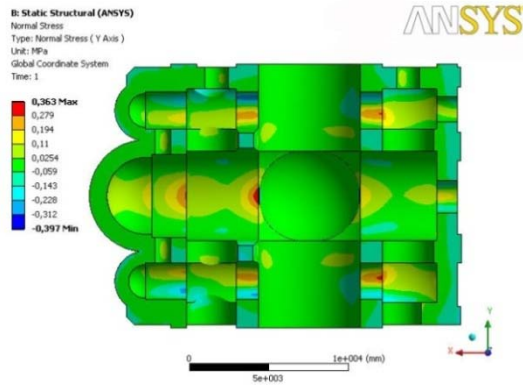


Şekil 4.10: y ekseninde (kuzey-güney) yerdeğiştirme, doğuya bakış.

Kuzey ve güney beşik tonozlarında çekme gerilmelerinin azaldığı ve maksimum çekme gerilmelerinin bulunduğu bölgelerin tonozların dış kenarlarına doğru kaydığı tespit edilmiştir (Şekil 4.11). Doğu ve batı beşik tonozlarında ise, maksimum çekme gerilmelerinin yayıldığı alanlar aynı kalmakla birlikte, gerilme değerleri küçülmüştür (Şekil 4.12).

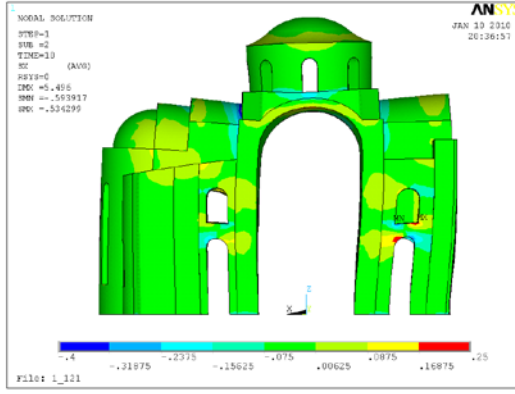


Şekil 4.11: Model 2 - x ekseninde (doğu-batı) çekme gerilmeleri.

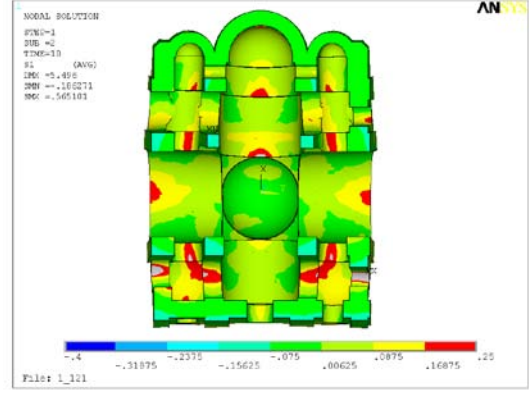


Şekil 4.12: Model 2 - y ekseninde (kuzey-güney) çekme gerilmeleri.

Kendi ağırlığı etkisinde, model 2’de minimum ve maksimum asal gerilmelerin değerleri de küçülmüştür. Minimum asal gerilmeler güneydoğu ayağının başlık seviyesine yakın bölgelerinde tespit edilmiştir. Maksimum asal gerilmeler ise, yapının kuzey cephesinde kalkan duvarın batısında bulunan kemerli açıklık ile bu açıklığın hemen üzerindeki pencere arasındadır (Şekil 4.13). Bu alanın x eksenine göre simetriği olan güney tarafta da benzer şekilde yüksek çekme gerilmeleri bulunmaktadır. Narteks ve galerinin modele eklenmesi ile bu bölgelerdeki gerilmelerin azalacağı düşünülmektedir (Şekil 4.14).



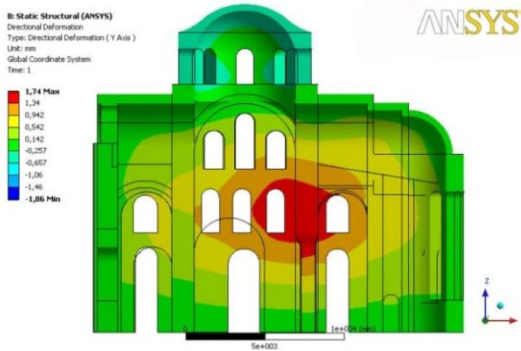
Şekil 4.13: Model 2 - yapının kuzey cephesinde x ekseninde (doğu-batı) gerilmeler.



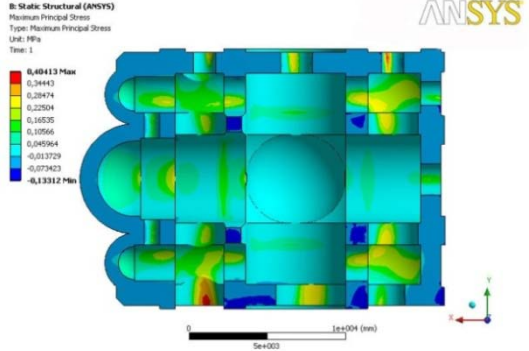
Şekil 4.14: Model 2 – maksimum asal gerilmeler.

4.6.1.3 Model 3

Modele kalkan duvarlarının eklenmesi ile hem X (doğu-batı doğrultusu) hem de Y eksenindeki (kuzey-güney doğrultusu) yerdeğiştirmeler azalmıştır. Yapının Y eksenindeki yerdeğiştirmeleri, özellikle doğudaki iki kesme taş ayak ile bu ayakları kuzey ve güney duvarlara bağlayan kemerlerin bulunduğu bölgelerde meydana gelmektedir (Şekil 4.15). Batıdaki ayaklar ve bu ayakları çevre duvarlara bağlayan kemerlerin bulunduğu alanlardaki yerdeğiştirme değerleri doğu taraftakilerden daha küçüktür.



Şekil 4.15: Model 3 - y ekseninde (kuzey-güney doğrultusunda) yerdeğiştirme.

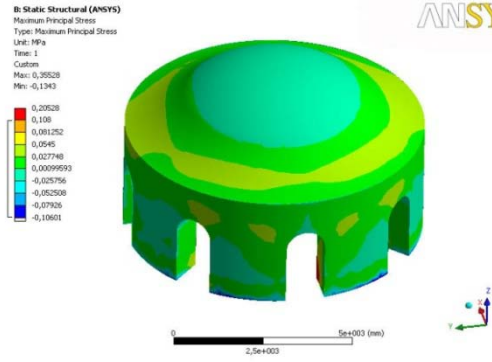


Şekil 4.16: Model 3 –maksimum asal gerilmeler.

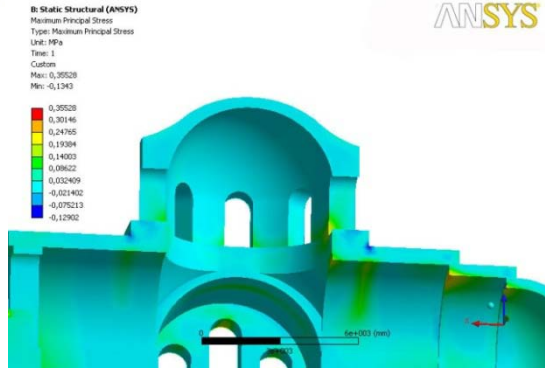
4.6.1.4 Model 4

Narteks ve galerisi ile yapı, kendi ağırlığı etkisinde çekme ve basınç gerilmelerinin büyük değerlere ulaşmadığı bir durumdadır. Çekme gerilmeleri, güney nefin mezar şapeline bakan duvarlarındaki kemerlerde 0,25 MPa ve merkezdeki taşıyıcı ayakları çevre duvarlara bağlayan kemerlerde 0,20 MPa değerini almaktadır (Şekil 4.16).

Kubbe çekme bölgesinde gerilmelerin büyük değerlere ulaşmadığı (0,05 MPa), tamburdaki pencerelerin arasındaki duvar parçalarının iç yüzeylerinde ise çekme gerilmelerinin 0,15 MPa'a kadar yükseldiği görülmüştür (Şekil 4.17). Pandantiflerdeki gerilmelerin düşük olduğu, kubbe yükünü ayaklara aktaran beşik tonozlarda da benzer biçimde çekme gerilmelerinin küçük olduğu saptanmıştır (Şekil 4.18).

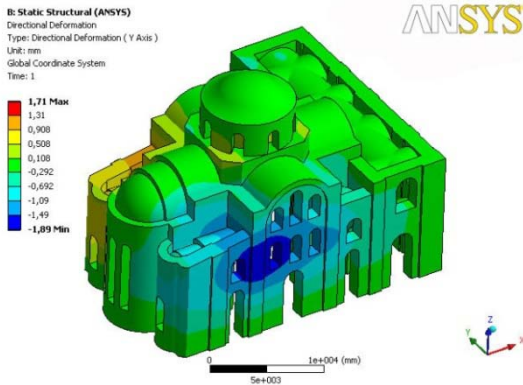


Şekil 4.17: Model 4 – Kubbe ve kasnağında çekme gerilme dağılımı.

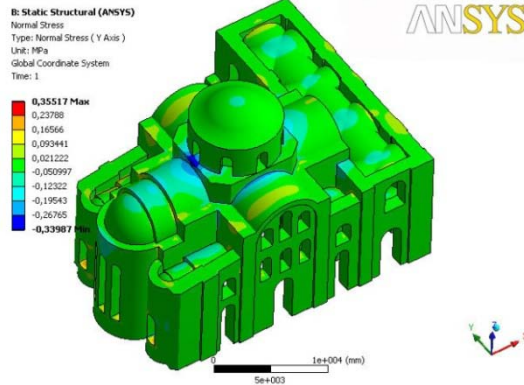


Şekil 4.18: Model 4 – Kubbe ve kasnağında çekme gerilme dağılımı, S1.

Narteks ve galerinin modele eklenmesi, yapının özellikle X eksenindeki (doğu-batı doğrultusu) yerdeğiştirmelerinin küçülmesini sağlamıştır. Y eksenindeki (kuzey-güney doğrultusu) yerdeğiştirmelerde önemli bir değişiklik meydana gelmemiştir. Daha önce incelenen modellerde de görüldüğü üzere, Y eksenindeki yerdeğiştirmelerin büyük olduğu bölgeler doğudaki ayakların hizasındadır. Bu alanlarda kuzey ve güney duvarları dışa doğru ötelenmektedir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19: Model 4 - y ekseninde (kuzey-güney doğrultusunda) yerdeğiştirme.



Şekil 4.20: Model 4 - y ekseninde (kuzey-güney doğrultusunda) gerilme dağılımı.

Yapının Y eksenindeki (kuzey-güney doğrultusu) gerilme dağılımı incelendiğinde, kuzey tonozun sırtında, kalkan duvarına bitişik alanda yaklaşık 0,12 MPa değerine ulaşan çekme gerilmelerinin varlığı dikkati çekmektedir (Şekil 4.20).

Bu alandaki yerdeğiştirmeler, kuzey tonozunun kuzey duvarı kadar dışarı doğru ötelenmediğini göstermektedir. 1998 yılında ortaya çıkarılan ve kuzey duvarına paralel ilerleyen çatlağın lineer statik analizde elde edilen gerilme bölgesiyle uyumlu olduğu ancak gerilme değerlerinin hasara neden olabilecek büyüklükte olmadığı gözlenmektedir.

4.6.1.5 Model 5

Yapının sonradan doldurulan açıklıklarının doldurulması gerilme ve yerdeğiştirme dağılımında önemli bir değişime neden olmamıştır. Sadece ilgili açıklıklarda çekme gerilmeleri ortadan kalkmıştır. Ana sistemde çekme gerilmelerinin değerlerinde ve gerilmelerin bulunduğu bölgelerde herhangi değişiklik olmamıştır.

4.6.2 Modal Analiz

Modal analiz, serbest titreşimdeki bir sistemin titreşim frekansları ve bu frekanslara karşılık gelen mod şekillerinin tespit edildiği analizdir. Bir sonraki aşamada, yapının deprem davranışının anlaşılmasına yönelik hazırlanan modellerde bu analizden elde edilecek titreşim frekansları ve mod şekilleri dikkate alınacaktır.

Titreşim frekansları ve mod şekilleri, serbest titreşimdeki sistemin hareket denkleminin çözümünden elde edilmektedir.

Sönüm yapmayan çok serbest dereceli sistemin hareket denklemi:

$$(4.9)$$

$$(4.10)$$

$$(4.11)$$

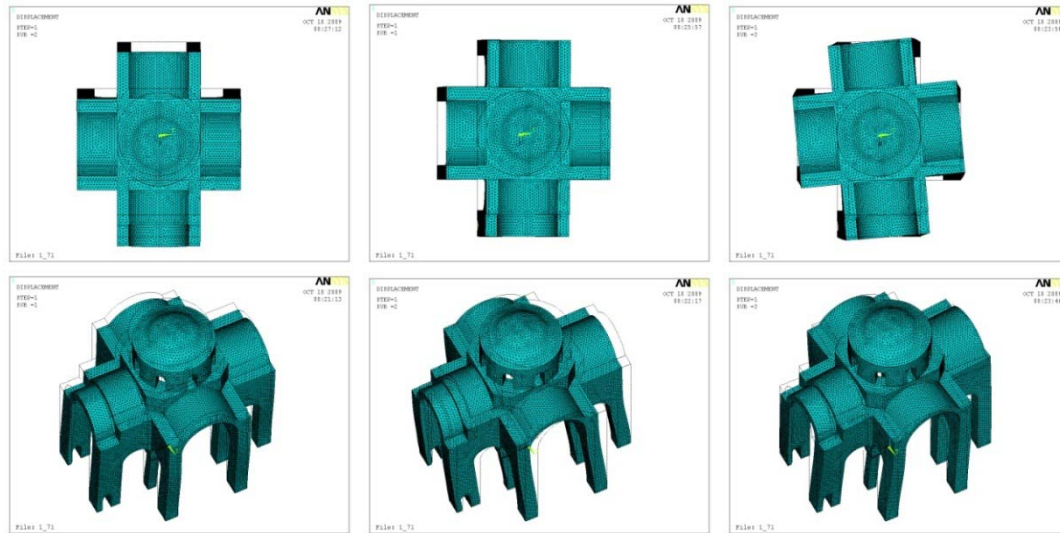
$$\text{veya} \quad \text{olmalıdır.} \quad (4.12)$$

Bu problem, hareket denklemini sağlayan n adet ve n adet eigen vektörü için çözülebilir. Burada n sistemin serbestlik derecesini ifade etmektedir.

Statik analizlerde olduğu gibi, modal analizlerde de, yapının tonoz ve kubbeden oluşan çekirdek bölümüne taşıyıcı sistemin diğer parçalarının eklenmesiyle yapı

davranışında meydana gelen değişimlerin gözlemlenmesi ve yapı davranışının basitten karmaşık bütününe doğru gidildikçe daha iyi kavranabilmesi amacıyla farklı modeller hazırlanmıştır. Her ne kadar modal analizlerde sonlu elemanlar yazılımının kullanıcıya sunduğu gerilme değerleri gerçek değerleri ifade etmeseler de, bu değerlerin göreceli değerler olduklarından yola çıkılarak gerilme dağılımında meydana gelen değişimler gözlemlenmeye çalışılmıştır.

Yapının birinci modunda sistemin kuzey-güney ekseninde yaptığı hareket etkindir. Özellikle apsis, pastoforion duvarları ile narteks ve galerinin yapıya eklenmesi bu doğrultuda rijitliği artırmıştır. Yapının ikinci modunda sistemin doğu-batı ekseninde yaptığı hareket, üçüncü modunda burulma hareketi baskındır (Şekil 4.21 ve Şekil 4.22).



Şekil 4.21: Model 1 – Titreşim modları.



Şekil 4.22: Model 4 – Titreşim modları.

Beklendiği üzere ana tonozlar ve bunların üzerinde yükselen silindirik kasnaklı kubbeden oluşan ana yapıya, naos köşelerinde yer alan tonozlu mekânlar, apsis, kuzey ve güney pastoforion, narteks ve galeri eklemlendikçe yapının rijitliği artmış ve titreşim periyodu düşmüştür (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 : Modal analiz sonuçları

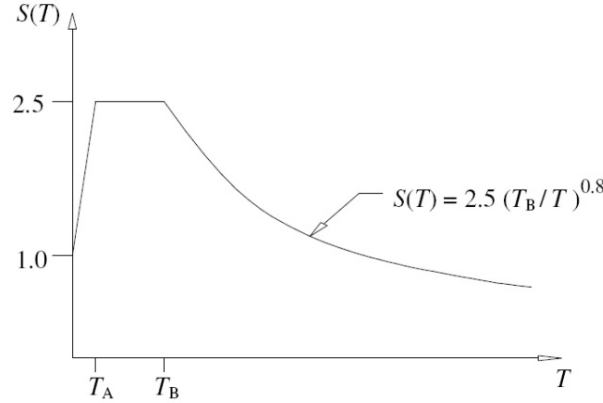


	Model 1		Model 2		Model 3		Model 4		Model 5	
	frekans	periyot	frekans	periyot	frekans	periyot	frekans	periyot	frekans	periyot
Mod1	1,54	0,65	3,01	0,33	3,16	0,32	3,53	0,28	3,62	0,28
Mod2	1,74	0,58	3,27	0,31	3,85	0,26	4,16	0,24	4,44	0,23
Mod3	1,98	0,51	5,13	0,19	5,47	0,18	5,86	0,17	6,26	0,16
Mod4	4,99	0,20	5,69	0,18	6,12	0,16	6,23	0,16	6,42	0,16
Mod5	5,30	0,19	6,34	0,16	7,51	0,13	7,28	0,14	7,48	0,13
Mod6	5,40	0,19	6,59	0,15	7,56	0,13	7,62	0,13	8,03	0,12
Mod7	5,98	0,17	7,14	0,14	9,20	0,11	8,69	0,12	8,99	0,11
Mod8	6,62	0,15	7,65	0,13	9,34	0,11	8,97	0,11	9,24	0,11
Mod9	7,60	0,13	9,09	0,11	9,42	0,11	9,40	0,11	9,71	0,10
Mod10	8,05	0,12	9,68	0,10	10,39	0,10	9,79	0,10	9,92	0,10

4.6.3 Modal spektral analiz

Çalışmada, statik ve modal analizlerden sonra deprem davranışının daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla yapının her iki ekseninde modal spektral analiz yapılmıştır. Spektral çözümleme yöntemi, modal analizlerde elde edilen verilerin bilinen bir spektrum kullanılarak yapıdaki yerdeğiştirme ve gerilmelerin bulunması için kullanılan bir yöntemdir. Deprem ve rüzgâr gibi zamana bağlı değişen yükler etkisinde yapı davranışının belirlenmesinde genellikle zaman alanında analiz yerine kullanılır. Bunun nedeni, deprem hareketi spektrumu kullanılarak yapılan analizlerin zaman alanında yapılan analizlerle karşılaştırıldığında oldukça kısa sürelerde tamamlanabilmesidir. Bu yöntemle elde edilen yerdeğiştirme ve gerilmeler gibi değişkenler, en büyük değerleri ifade etmektedir.

Spektrum, tek serbestlik dereceli bir sistemin dinamik yükler etkisindeki davranışını ifade eder. Çalışmada kullanılan spektrum, bir ekseni periyot, diğer ekseni ise ivme olan davranış grafiğidir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23: Elastik ivme spektrumu (DBYBHY s:12).

Çalışmada %5 sönüm oranı için üç farklı ivme spektrumu kullanılmış ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu spektrumlardan ilki, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik¹²,te tanımlanan bina önem katsayısı $I=1$ olan binalar için 50 yıllık bir süre içinde aşılma olasılığı %10 ve yaklaşık dönüş periyodu 475 yıl olan depremi içindir. İkinci spektrum, 50 yıllık bir süre içinde aşılma olasılığı %50 ve yaklaşık dönüş periyodu 72 yıl olan depremi ifade etmektedir. İvme spektrumunun ordinatı, yönetmelikte tanımlanan spektrum ordinatının yarısıdır. Üçüncü spektrum ise 50 yıllık bir süre içinde aşılma olasılığı %2 ve yaklaşık dönüş periyodu 2500 yıl olan depremi göz önünde bulundurmaktadır. İvme spektrumunun ordinatı tanımlanan spektrum ordinatının 1,5 katıdır (Deprem BölgelerindeYapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007 s:129).

Elastik ivme spektrumunda zemin spektrum karakteristik periyotları T_A ve T_B , yapının Z1 sınıfı bir zemin üzerinde bulunduğu kabulü ile 0,10 sn ve 0,30 sn olarak kullanılmıştır. Elastik spektral ivme S_{ae} , zemin spektrum karakteristik periyotları arasında 1g olarak kabul edilmiştir. ($S_{ae}=A(T)g$ -- $A(T)=A_0IS(T)$ -- Birinci Deprem Bölgesi $A_0=0,40$ -- Bina önem katsayısı $I=1$ -- Spektrum katsayısı $S(T)=2,5$) Modların yapı davranışına katkıları, karelerinin toplamının karekökü kuralınca (SRSS) hesaplanmıştır.

¹² Bayındırlık ve İskan Bakanlığı tarafından hazırlanan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007 yılında Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir.

$$r(t)_{\max} \approx \left[\sum_{j=1}^N [r_j(t)]_{\max}^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \left[[r_{1o}]^2 + \dots + [r_{no}]^2 + \dots + [r_{No}]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.13)$$

$r(t)$ =incelenen parametre

DBYBHY 2007 ve Eurocode 8, mod birleştirme yönteminde kullanılacak yeterli titreşim mod sayısını, deprem doğrultularının her birinde, etkin kütlelerin toplam kütleyle oranının minimum %90 olması gerektiğini belirtmektedir. Her iki yönetmelikte de etkin kütle oranı %5'ten büyük olan modların hesaplarda kullanılabileceği ifade edilmektedir (DBYBHY, 2007, s.22 ve Eurocode8, s.59).

Modal analizde ilk 30 mod tespit edilmiş ve X doğrultusunda (doğu-batı eksen) etkin kütle oranının %81'e ve Y doğrultusunda (kuzey-güney eksen) ise etkin kütle oranının %81,3'e ulaştığı görülmüştür (Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3). %90 etkin kütle oranına ulaşabilmek için 100'ün üzerinde modun tespit edilmesi gerektiği ancak analiz süresi ve bilgisayar kapasitesi göz önünde bulundurulduğunda mod sayısının 10 ile sınırlı tutulmasına karar verilmiştir. İlk 10 modda etkin kütle oranı x ekseninde %73.2, y ekseninde ise %79.2 olmaktadır. Analizlerde irdelenen doğrultulara bağlı olarak yapı davranışında ilk iki modun etkili olduğu, sonraki modların sisteme katkılarının çok küçük olduğu gözlenmiştir.

4.6.3.1 X ekseninde modal spektral analiz

X ekseninde modal spektral analiz, doğu-batı doğrultusunda etkin bir depremde yapının davranışına ilişkin veriler sağlamaktadır. Yapının ikinci modunun etkili olduğu bu analizde, 50 yıllık bir süre içinde aşılma olasılığı %50 olan deprem etkisinde yapıdaki gerilme ve yerdeğiştirme dağılımı sunulmuştur. Çalışmanın ilerleyen bölümlerindeki analiz sonuçları da tanımlanan bu deprem için sunulacaktır. Bölüm içinde bulunan gerilme ve yerdeğiştirme dağılımları model 4'e aittir.

Analiz sonuçları, x ekseninde görülen en büyük çekme gerilmelerinin, doğudaki serbest taşıyıcı ayakları doğu duvarına bağlayan kemerler ile düzlem davranış gösteren kuzey ve güney duvarındaki kemerlerde tespit edilmiştir (Şekil 4.24).

X eksen doğrultusunda toplam yerdeğiştirme grafiği, bu eksen de anıtın kuzey duvarının narteks ve galeri duvarı ile sürekliliği neticesinde güney duvarından bu eksen de daha rijit davrandığını göstermektedir. Kilisenin güney duvarı narteks ve

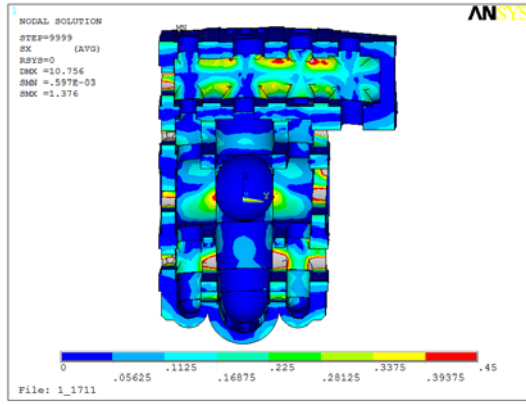
galeride devam etmemektedir. Bunun sonucunda x ekseninde yerdeğiştirme, yapının güney tarafında daha büyük değerler almaktadır (şekil 4.25).

Çizelge 4.2 : Model 5, X eksenini doğrultusunda modal analiz sonuçları.

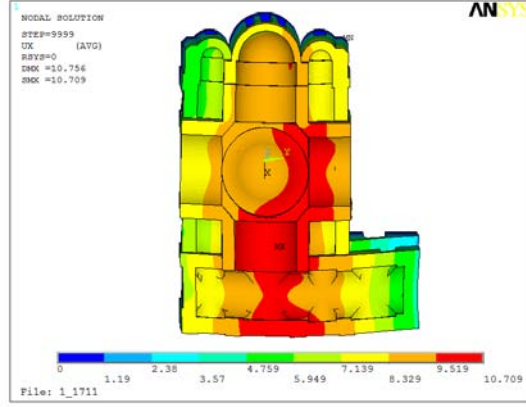
X eksenini doğrultusunda(doğu-batı eksenini) etkin kütle oranları				
mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	etkin kütle (ton)	etkin kütle oranı
1	3,62	0,28	11,27	0,003
2	4,44	0,23	2752,16	0,693
3	6,26	0,16	10,63	0,696
4	6,42	0,16	37,02	0,705
5	7,48	0,13	1,33	0,706
6	8,03	0,12	0,39	0,706
7	8,99	0,11	17,74	0,71
8	9,24	0,11	39,01	0,72
9	9,71	0,1	33,5	0,728
10	9,92	0,1	15,31	0,732
11	10,39	0,1	2,65	0,733
12	10,82	0,09	0,16	0,733
13	11,16	0,09	56,74	0,747
14	11,78	0,08	11,11	0,75
15	11,98	0,08	5,3	0,751
16	12,35	0,08	58,29	0,766
17	12,84	0,08	67,32	0,783
18	13,58	0,07	3,8	0,784
19	13,67	0,07	16,77	0,788
20	14,15	0,07	1,17	0,788
21	14,33	0,07	15,66	0,792
22	14,53	0,07	2,38	0,793
23	14,65	0,07	11,63	0,796
24	14,85	0,07	44,45	0,807
25	15,03	0,07	2,38	0,808
26	15,27	0,07	0,35	0,808
27	15,38	0,07	0	0,808
28	15,51	0,06	4,89	0,809
29	15,88	0,06	4,1	0,81
30	15,94	0,06	1,77	0,81
etkin kütle toplamı			3229,27	
toplam kütle			3985	

Çizelge 4.3 : Model 5, Y eksenı doğrultusunda modal analiz sonuçları.

Y doğrultusunda (kuzey-güney) etkin kütle oranları				
mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	etkin kütle(ton)	etkin kütle oranı
1	3,62	0,28	2237,2	0,561
2	4,44	0,23	25,69	0,568
3	6,26	0,16	0,66	0,568
4	6,42	0,16	384,16	0,664
5	7,48	0,13	6,9	0,666
6	8,03	0,12	31,28	0,674
7	8,99	0,11	311,93	0,752
8	9,24	0,11	154,12	0,791
9	9,71	0,1	0,04	0,791
10	9,92	0,1	4,85	0,792
11	10,39	0,1	5,52	0,794
12	10,82	0,09	38,74	0,803
13	11,16	0,09	0,05	0,803
14	11,78	0,08	12,07	0,806
15	11,98	0,08	0,66	0,806
16	12,35	0,08	1,11	0,807
17	12,84	0,08	3,23	0,808
18	13,58	0,07	7,42	0,809
19	13,67	0,07	0,59	0,81
20	14,15	0,07	0	0,81
21	14,33	0,07	0,01	0,81
22	14,53	0,07	1,07	0,81
23	14,65	0,07	1,37	0,81
24	14,85	0,07	0,01	0,81
25	15,03	0,07	4,68	0,811
26	15,27	0,07	1,44	0,812
27	15,38	0,07	2,72	0,812
28	15,51	0,06	0,6	0,813
29	15,88	0,06	0	0,813
30	15,94	0,06	0,28	0,813
etkin kütle toplamı			3238,4	
toplam kütle			3985	

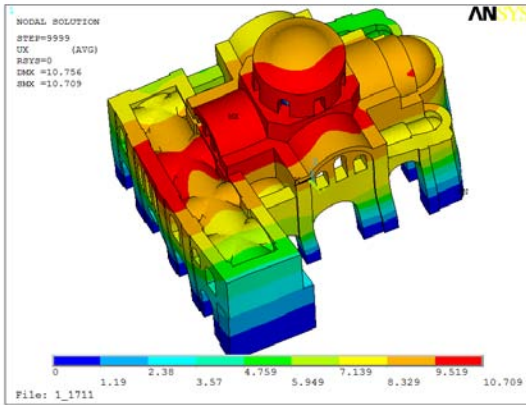


Şekil 4.24: X eksenı doğrultusunda modal spektral analiz sonucunda X eksenindeki gerilme dağılımı.

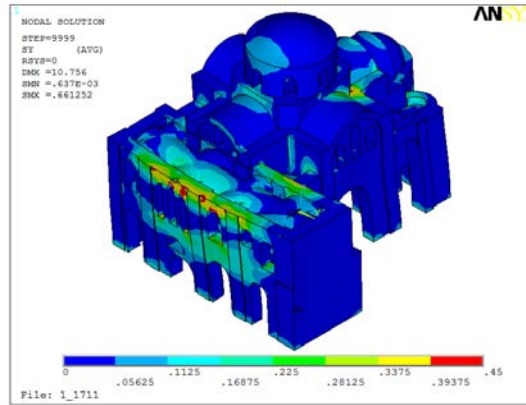


Şekil 4.25: X ekseninde toplam yer değıştirme dağılımı.

Elde edilen diğeri bir bilgi, özellikle galeri batı duvarının dışı doğru açıldığı ve duvarın merkezde bulunan bölümünde yerdeğıştirmelerin yanlara oranla daha büyük olmasıdır (Şekil 4.26). Bu bilgi, beraberinde iki farklı sonucu doğurmaktadır. Birincisi, batı duvarında yerdeğışmelerin büyük olduğu merkezdeki bölümde, duvarın batı yüzünde daha büyük olmak üzere y ekseninde (kuzey- güney eksenı) çekme gerilmelerinin bulunduğudır (Şekil 4.27).



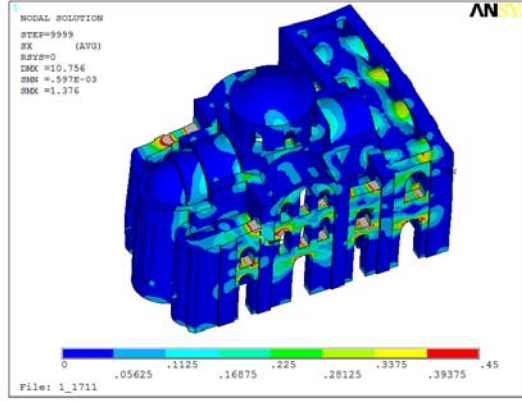
Şekil 4.26: X eksenı doğrultusunda modal spektral analiz, X ekseninde toplam yerdeğıştirme dağılımı.



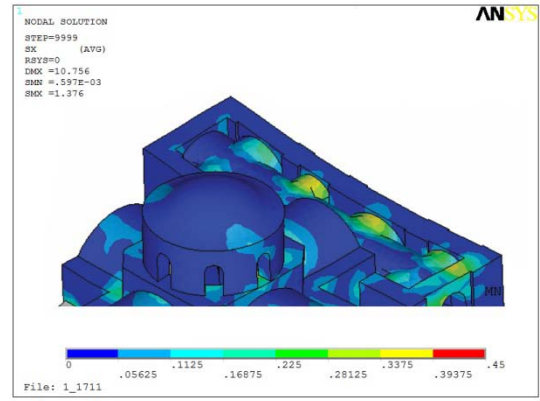
Şekil 4.27: X eksenı doğrultusunda modal spektral analiz, batı duvarında gerilme dağılımı, SY.

İkinci sonuç ise batı duvarının dışı doğru açılması nedeniyle batı duvarı ile mekânları örten tonozlar arasında x ekseninde çekme gerilmelerinin oluşmasıdır (Şekil 4.28). Bu gerilme dağılımının, galeri ve narteks tonozlarında kuzey-güney doğrultusunda çatlaklara neden olabileceğı düşünölmektedir.

Galeriye ilişkin diğer bir tespit, özellikle mekânın kuzeybatı ucundaki tonozda yaygın bir çekme gerilme dağılımının bulunmasıdır (Şekil 4.29). Mevcut hasarlarla daha da zayıf hale gelen tonozun, olası depremde daha ciddi hasar alması beklenmektedir.

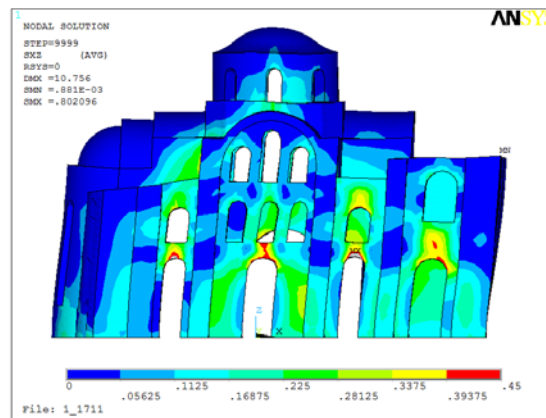


Şekil 4.28: Maksimum asal gerilmelerin galeri tonozlarında dağılımı.



Şekil 4.29: X eksenli doğrultusunda modal spektral analiz, galeri tonozları ile batı duvarı arasında çekme gerilmeleri.

Depremi etkin olduğu doğrultuya paralel konumlanan güney ve kuzey duvarlarında ise, kayma gerilmeleri büyük değerlere ulaşmaktadır (Şekil 4.30). Bu doğrultudaki bir depremde söz konusu duvarların hasar görmesi olasıdır. Ancak hasara yol açabilecek gerilmelerin kalkan duvarları gibi ikincil derece taşıyıcı elemanlarda bulunması nedeniyle yapının kuzey veya güney tarafında ana taşıyıcıları etkileyecek bir göçmenin yaşanması beklenmemektedir. Özellikle Mezar Şapeli'nin yapımı ile güney duvarındaki kemerlerin altındaki dolguların kaldırılması bu duvarı daha etkilenebilir bir hale getirmiştir. Hem kayma gerilmeleri, hem de maksimum asal gerilmeler bu duvarda daha büyüktür.



Şekil 4.30: Kuzey cephede kayma gerilmelerinin dağılımı.

Kuzey cephede, Vakıflar Genel Müdürlüğü'nün 1950-1970 yılları arasında yürüttüğü çalışmalar çerçevesinde yapılan kapsamlı müdahaleler, müdahale öncesi duvarda eğer deprem hasarları var ise bunların okunabilirliğini ortadan kaldırmış olmalıdır (Şekil B.31). Müdahale öncesine ait çizim ve fotoğraf bulunmadığından bu cephenin hasarları konusunda fikir yürütmek güçtür. Ancak Ebersolt'un 20. yüzyıl başında hazırladığı çizimlerde (Şekil B.30) sıvalı cephenin şimdiki düzenden bir ölçüde farklılaştığı gözlenmektedir. Gerilme ve yerdeğiştirme dağılımını gösteren şekillerin, zemin katında bulunan kemerli açıklıkların dolgusuz olduğu bir modele ait oldukları ve değerlerin doldurulmuş açıklıklı modellerde daha küçük olduklarını eklemek gerekir. Belki de bu durum, Ebersolt'un çizimlerinde bazı açıklıkların neden kapalı olduklarını veya boyut olarak daha küçük olduklarını açıklamaya yardımcı olmaktadır. Kuzey duvarında narteksin kemerli açıklığında ve üzerinde çıplak gözle tespit edilebilen çatlaklar (Şekil B.60), analizde elde edilen gerilme dağılımı ile uyum sergilemektedir (Şekil 4.30).

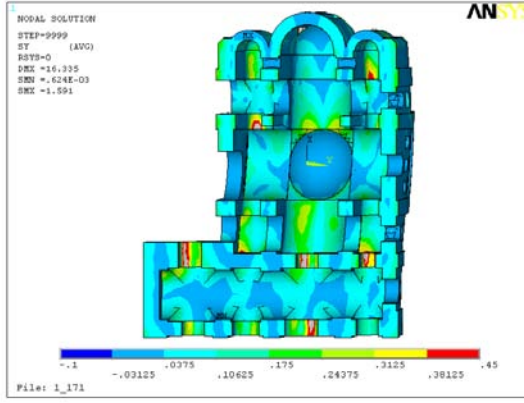
Analizler, yapının doğu cephesindeki gerilme ve yerdeğiştirme dağılımının bu bölgede hasar oluşumuna yol açabilecek bir yapıda olmadığını, cephenin taşıyıcı sistem bütünüyle beraber hareket ettiğini ve düzlem dışı bir hareket yapmadığını göstermektedir.

X doğrultusunda etkin bir deprem durumunda, yapıdaki basınç gerilmelerinin küçük olduğunu ve taşıyıcı sistem elemanlarında ezilme hasarlarına neden olabilecek seviyelere çıkmadığını göstermektedir.

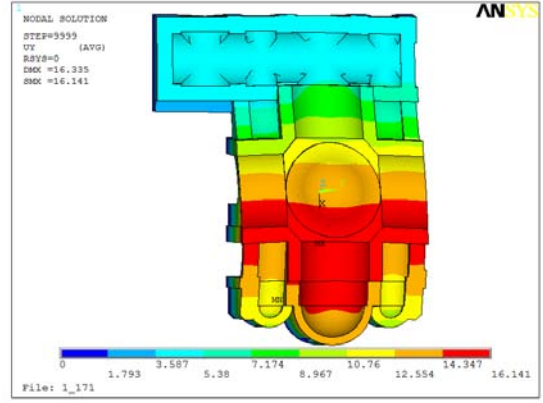
4.6.3.2 Y ekseninde modal spektral analiz

Y ekseninde modal spektral analiz, kuzey-güney doğrultusunda etkin bir depremde yapının davranışına ilişkin veriler sağlamaktadır. Yapının birinci modunun etkili olduğu bu analizde, 50 yıllık bir süre içinde aşılma olasılığı %50 olan deprem etkisinde yapıdaki gerilme ve yerdeğiştirme dağılımı sunulmuştur.

Analiz sonuçları, kuzey-güney doğrultusunda bulunan tüm kemer ve tonozlarda y ekseninde çekme gerilmelerinin varlığını göstermektedir (Şekil 4.31). Kubbeyi taşıyan beşik tonozlar dışındaki elemanlar için bu gerilmelerin etkili oldukları alanlarda hasarlar yaratabileceği, hasarların lokal özellik taşıyacağı öngörülmektedir.



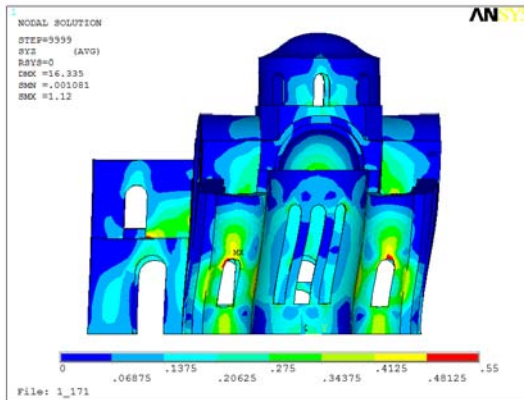
Şekil 4.31: Y eksenini doğrultusunda modal spektral analiz, Y ekseninde gerilme dağılımı.



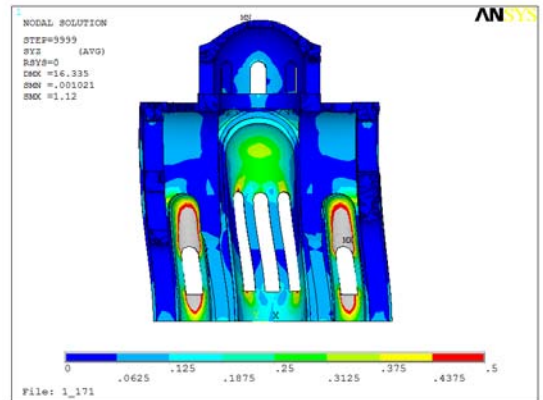
Şekil 4.32: Y eksenini doğrultusunda modal spektral analiz, Y ekseninde toplam yer değiştirme dağılımı.

Ancak ana tonozlarda durum daha farklıdır. Bu tonozlarda yaşanabilecek çökmeler ilgili bölgede kubbenin bir bölümünü veya tümünü etkileyebilir. Güney tonozda, Y eksenindeki çekme gerilmelerinin tonozun daha büyük alanında etkili olması bu tonozun doğu tonozuna göre daha hasar görebilir yapıda olduğunu göstermektedir (Şekil 4.32). Güney tonozunun sivri profilli oluşu bu tonozun Osmanlı onarımlarında elden geçirildiğinin göstergesidir (Şekil B.24). Kuzey-güney doğrultusunda etkili olan yatay yüklerin zorlamasıyla güney tonozun büyük hasar görmesi, onarım nedeni olmalıdır.

Analiz sonuçları, yapının y eksenini doğrultusunda yaptığı yerdeğiştirmelerin doğudaki serbest taşıyıcı ayakların bulunduğu aksta daha büyük olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 4.32).



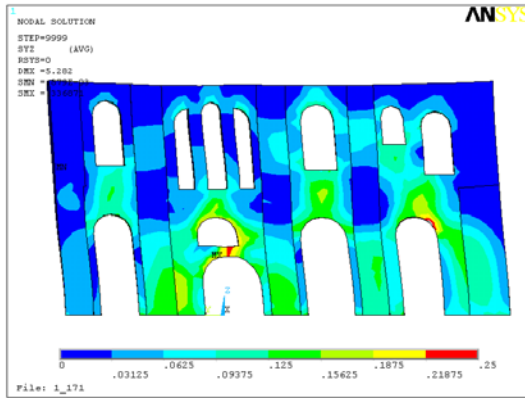
Şekil 4.33: Y eksenini doğrultusunda modal spektral analiz, doğu duvarında kayma gerilmesi dağılımı.



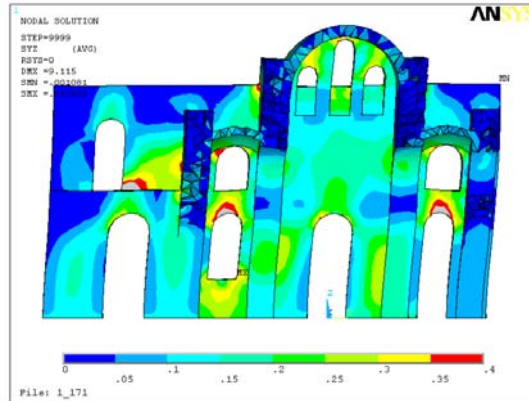
Şekil 4.34: Y eksenini doğrultusunda modal spektral analiz, doğu cephesinde kayma gerilmesi dağılımı.

Riskli sayılabilecek alanlardan bir diğeri yapının doğu cephesidir. Y ekseninde modal spektral analiz sonuçları, bu duvardaki kayma gerilmelerinin diğer duvarlarla karşılaştırıldığında daha büyük değerler aldığını göstermektedir (Şekil 4.33 ve Şekil 4.34). Depremde özellikle güney ve kuzey pastoforionlarda, zeminden başlayarak kemerli pencereyi geçen ve yukarı doğru devam eden çatlakların görülmesi olasıdır. Güney pastoforionun avantajı Mezar Şapeline bitişmesi dolayısıyla gerilmelerin daha küçük değerlerde kalarak hasarların sınırlı olmasıdır. Bu durumda doğu cephesinde en çok hasar görmesi beklenen bölge kuzey pastoforiondur. Prof. Dr. Zeynep Ahunbay ve Prof. Dr. Metin Ahunbay'ın doğu cephesinde yürüttükleri onarım çalışması öncesinde doğu cephesinde en ağır hasar gören bölgenin, örgü tekniği ve malzemesindeki değişimlerle daha önceki dönemlerde onarılmaya çalışıldığı anlaşılan ve örgüsünde çatlaklar bulunan kuzey pastoforiondur (Şekil B.39).

Doğu cephesi dışında, deprem etkisinde kendi düzleminde yüklenen duvarlardan biri batı cephesi, diğeri ise naos ile narteks arasındaki duvardır. Her iki duvarda da kayma gerilmelerinin doğu cephesindeki değerlerden küçük olduğu görülmektedir (Şekil 4.35 ve Şekil 4.36). Bununla birlikte naos ile narteks arasındaki duvarda kayma gerilmeleri batı cephesine oranla daha büyüktür.



Şekil 4.35: Batı cephesinde Y eksen doğrultusunda modal spektral analiz, kayma gerilmesi dağılımı, doğuya bakış.

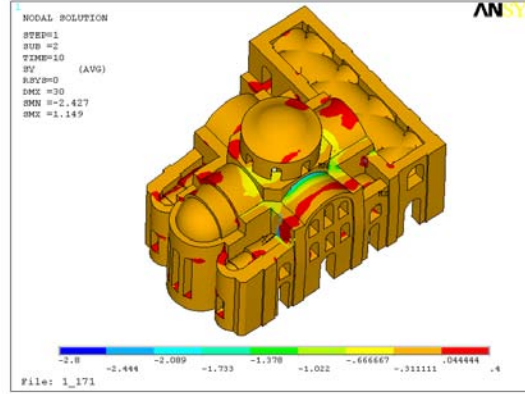


Şekil 4.36: Y eksen doğrultusunda modal spektral analiz, Narteks-naos arasındaki duvarın iç yüzeyinde kayma gerilmeleri, batıya bakış.

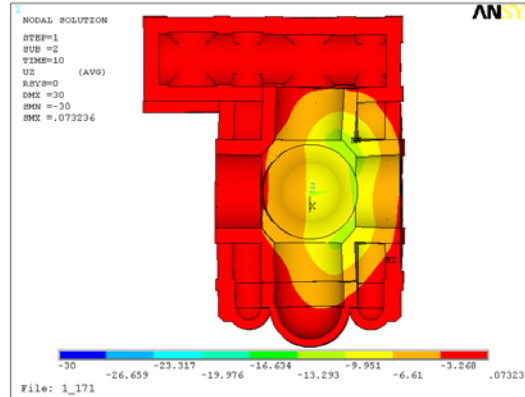
4.6.4 Diğer analizler

Kuzey beşik tonozunda kuzey duvarına paralel devam eden çatlağın, ilgili bölgede olası zemin oturmalarından kaynaklanabileceği düşüncesiyle farklı alanlarda farklı büyüklükte zemin oturmalarının tanımlandığı modeller hazırlanmıştır. Bu modeller

içinde kuzeydoğu ve kuzeybatı ayaklarında oturmaların ifade edildiği modelde, kuzey tonoz sırtında kuzey duvarına paralel bir doğrultuda çekme gerilmelerinin oluşmaktadır (Şekil 4.37 ve Şekil 4.38). Bu senaryo, 1997-1998 onarım çalışmalarında kuzey tonozda ortaya çıkarılan çatlağın konumuna, doğrultusuna ve biçimine oldukça uyumludur. Ayakların üzerine bastığı zeminde oturmalar yaşanması veya bu ayakların çökmesi söz konusu mekanizma için olası nedenlerdir.



Şekil 4.37: Kuzeydoğu ve kuzeybatı ayaklarında oturma durumunda kuzey tonozda tespit edilen y eksenindeki gerilme dağılımı.



Şekil 4.38: Kuzeydoğu ve kuzeybatı ayaklarında oturma durumunda yapıdaki yerdeğiştirme dağılımı.

4.6.5. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Yapının kendi ağırlığı etkisinde taşıyıcı sistem elemanlarında oluşan çekme gerilmeleri çekme dayanımının altındadır. Çekme gerilmeleri, naostaki serbest ayakları çevre duvarlara bağlayan kemerlerde ve kubbe yükünü ayaklara aktaran beşik tonozlarda bulunmaktadır. Özellikle güneydoğu ayağındaki dışmerkezliğin, ayağın kuzeybatı tarafında basınç gerilmelerinin büyümesine neden olduğu ve bu bölgedeki basınç gerilmelerinin yapının diğer bölgelerindeki düşey taşıyıcılarda oluşan gerilmelerden daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu ayaktaki basınç

gerilmelerinin tek başına ezilme hasarlarına neden olabilecek büyüklükte olmadığı ancak depremin düşey bileşeninin etkisinde ayaktaki basınç gerilmelerinin artabileceği ve ayağın yapımındaki kusurların etkisiyle birlikte mevcut hasarların ortaya çıkabileceği düşünülmektedir. Statik analizlerde dikkati çeken noktalardan biri kuzey-güney ekseninde yapıda meydana gelen yerdeğiştirmelerin özellikle doğudaki iki ayak ekseninde maksimum değerlere ulaştığıdır.

Yapının ilk 30 modu göz önünde bulundurulduğunda, X doğrultusunda (doğu-batı eksen) etkin kütle oranının %81'e ve Y doğrultusunda (kuzey-güney eksen) ise %81,3 ulaştığı görülmüştür. Yapının birinci modunda sistemin kuzey-güney ekseninde, ikinci modunda doğu-batı ekseninde yaptığı hareket etkindir. Üçüncü modda yapı burulma hareketi yapmaktadır.

X eksen doğrultusunda modal spektral analiz sonuçları, yapının batı cephe duvar düzlemine dik doğrultuda etkiyen deprem yüklerinin, bu duvarı dışa doğru ittiğini göstermektedir. Bu süreç, narteks ve galeri çapraz tonozları ile batı duvarı arasında x ekseninde çekme gerilmelerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Gerilme değerlerinin, tonozun mesnetlendiği batı duvarına yakın bir mesafede kuzey-güney doğrultusunda çatlaklara neden olabileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte, batı duvarının üst kotlarında, özellikle merkezdeki bölümde y ekseninde gerilme değerleri büyüktür ve bu bölgelerde de hasar görülmesi olasıdır.

X eksen doğrultusunda modal spektral analizde, güney ve kuzey duvarlarında kayma gerilmeleri büyük değerlere ulaşmaktadır. Hasarların kalkan duvarları gibi ikincil derece taşıyıcı elemanlarda etkili olacağı öngörülmekte, bu nedenle yapının kuzey veya güney tarafında ciddi bir hasarın oluşması beklenmemektedir.

Y eksen doğrultusunda modal spektral analiz sonuçları, batı tonozunun Y eksenindeki çekme gerilmelerinin tonozun büyük kısmında etkili olması nedeniyle doğu tonozuna göre daha riskli olduğunu göstermektedir. Batı tonozdaki Osmanlı Dönemi onarımları, analizde elde edilen gerilme dağılımına göre kuzey-güney doğrultusunda etkili bir depremde oluşan ciddi hasarlar sonrasında yapılmış olmalıdır.

Y eksen doğrultusunda modal spektral analiz sonuçları, yapının doğu cephesinde kayma gerilmesi dağılımının hasarlara yol açabilecek düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır. Deprem etkisinde özellikle pastoforionlarda, zeminden başlayarak çatı

saçağına kadar çatlakların ortaya çıkması beklenmektedir. Prof. Dr. Zeynep Ahunbay ve Prof. Dr. Metin Ahunbay'ın 2001-2005 yılları arasında doğu cephesinde yürüttükleri onarım çalışmasında kuzey pastoforionda bu tip bir çatlak tespit edilmiş ve onarılmıştır.

Her iki doğrultuda da modal spektral analizler, basınç gerilmelerinin hasarlara neden olabilecek seviyelere çıkmadığını göstermektedir.

1999 Depremi ivme verileri kullanılarak zaman tanım alanında yapılan analizler ile 50 yıllık bir süre içinde aşılma olasılığı %50 olan deprem için her iki yöndeki modal spektral analizler karşılaştırıldığında, yapıdaki gerilme ve yerdeğiştirme dağılımlarının uyum içinde oldukları tespit edilmiştir. Gerilmelerin etkili oldukları bölgeler ve değerleri her iki analizde de yakın sonuçlar sunmaktadır.

5. ONARIM VE SAĞLAMLAŞTIRMA

Bu bölümde, tarihi yapıların onarım çalışmalarına ilişkin ulusal ve uluslar arası yazılı metinler ele alınarak, bu metinlerin ortaya koyduğu yaklaşım ve kurallar çerçevesinde Zeyrek Camii Kuzey Bölümü için uygun olabilecek onarım ve sağlamlaştırma önerileri geliştirilecektir.

5.1 Tarihi Yapıların Onarım ve Sağlamlaştırma Çalışmalarında Kullanılan Yasa ve Yönetmelikler

Yürürlükteki yasa ve yönetmelikler, bugünün bilgi birikimi ve deneyimlerinin bir ürünüdür. Bugün kabul gören çözümlerin aslında kesin doğrular olmadıkları, bunların bazı durumlarda yeterli doğrulukta sonuçlara götüremeyebilecekleri unutulmamalıdır. Özellikle deprem gibi doğal afetler sonrasında yapı inşası ve onarımı ile ilgili yönetmeliklerin elde edilen yeni veriler ışığında gözden geçirilmesi bu durumun bir sonucudur. Yarının ihtiyaçları, deneyimleri ve bilgi birikimi mevcut yönetmeliklerde yeni düzenlemeler yapılmasını gerektirecektir.

Tarihi yapıların her birinin kendine özgü karakterinin olması, bu yapıların yapımda standartlaşmayı sağlayarak güvenli ve sağlıklı binalar üretilmesini hedefleyen yönetmeliklere göre değerlendirilmesini mümkün kılmamaktadır. Tarihi yapılar kendi koşulları ve özellikleri içinde değerlendirilmeli ve hazırlanacak onarım önerileri bu çerçevede geliştirilmelidir. Aksi takdirde yönetmeliklerin sunduğu analiz ve değerlendirmelerin yapılması için gösterilen çaba ve zaman, her bir yapının kendine özgü durumunun anlaşılması için sarf edilmeyecektir.

İncelenen her yapının kendine özgü hasar biçiminin olduğu ve onarımlarda etkili müdahale kararlarının alınabilmesi için söz konusu hasar nedenlerinin doğru biçimde tespit edilmesi gerektiği unutulmamalıdır. Yönetmeliklerde yer alan hesap yöntemleri, kabuller ve kriterler kimi durumlarda hasar mekanizmalarının tespitinde yanılgılara yol açabilir. Bununla birlikte, tarihi yapıların taşıyıcı sistem onarımı ve

sağlamlaştırma çalışmaları ile herhangi bir yönetmelik veya yol gösterici bir rehberin olmaması da belirsizliğe yol açabilmekte, benzer hasar durumları için yapı onarımlarında çok farklı yaklaşımlar ortaya konulabilmektedir. Bu nedenle, mühendislik yaklaşımı ile biçimlendirilmiş ve çağdaş koruma ölçütleri ile uyumlu taşıyıcı sistem onarım ve sağlamlaştırma ilkelerinin Türkiye’de bulunan tarihi yapı karakteri gözetilerek hazırlanması gerekmektedir.

Çalışmada, tarihi çevre ve anıtların korunması alanında çalışan ulusal ve uluslararası kuruluşların hazırladığı yönetmelik, tüzük ve rehberlerin bazıları onarım ve sağlamlaştırma çalışmalarında kullanılan teknik şartları, diğerleri ise bugünün koruma anlayışı çerçevesinde onarım ve sağlamlaştırmada izlenecek ölçütleri konu edinmiştir. İncelenen anıtın yığma yapı olması nedeniyle burada yalnız yığma yapılarla ilgili kısımlar üzerinde durulacaktır.

5.1.1 Uluslararası Kuruluşların Hazırladığı Tüzükler

Çalışmada, uluslararası kuruluşlar başlığı altında ICOMOS ve Avrupa Konseyi’nin mimari mirasın korunmasına ilişkin hazırladığı metinler değerlendirilmiştir.

5.1.1.1 ICOMOS

ICOMOS (The International Council on Monuments and Sites) kültür varlıklarının korunması alanında çalışan ve dünyanın birçok ülkesinden üyeleri olan uluslararası bir kuruluştur. Hükümetlerden bağımsız bir yapısı olan ICOMOS’un amacı, tarihi anıtlar ve sitlerin korunması ve değerlendirilmesine yönelik kuramlar, yöntemler, teknikler ile ilgili her türlü araştırmayı desteklemek ve yönlendirmektir. Organizasyonun üye ülkelerde ulusal ve çeşitli alanlarda faaliyet gösteren bilimsel komiteleri bulunmaktadır (Url-2).

ICOMOS’un tarihi yapıların ve alanların korunmasına yönelik olarak benimsediği metinler koruma ile ilgili temel ilkeleri sunmaktadır.

1964 yılında yapılan “II. Uluslararası Tarihi Anıtlar Mimar ve Teknisyenleri” toplantısında alınan kararlar “Venedik Tüzüğü” olarak tanınmaktadır. ICOMOS, 1965 yılında bu tüzüğü kabul etmiştir. Tanımlar, amaç, koruma, onarım, tarihi yerler, kazılar ve yayın başlıklarında toplam 16 maddeden meydana gelen tüzüğün özellikle amaç ve onarım başlıkları, tarihi yapıların taşıyıcı sistemlerinin onarım ve

sağlamlaştırılması konusu ile ilişkilidir (International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites, Venice Charter).

ICOMOS'un kültürel mirasın çeşitli alanlarında ve konularında çalışan uluslararası bilimsel komiteleri bulunmaktadır. 1996 yılında kurulan ISCARSAH (International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage) ICOMOS'un tarihi yapıların taşıyıcı sistemlerinin analiz ve onarımı konusunda faaliyet gösteren bir bilimsel komitesidir.

Komitenin, tarihi yapıların korunması ile ilgili görüşlerinin yer aldığı metin, 2001 yılında Paris'de görüşülmüş, 2003 yılında Zimbabwe'de yapılan ICOMOS Olağan Genel Kurulu'nda benimsenmiş ve hemen sonrasında "Tarihi Yapıların Strüktürlerinin Onarımı, Korunması ve Analizleri Hakkında Öneriler" başlığı altında bir ICOMOS tüzüğü olarak kabul edilmiştir (ICOMOS Charter, Principles for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage).

İki bölümden oluşan tüzüğün, ICOMOS tarafından onaylanan ilk bölümü koruma ile ilgili ilkelere; ikinci bölümü ise bu alanda çalışan meslek insanlarının izlemesi gereken yöntem ve kurallara ayrılmıştır.

5.1.1.2 Avrupa Konseyi (COE)

Avrupa Konseyi, hukuk ve insan haklarının korunması, eğitim, kültür alanlarında anlaşmalar düzenleyen, 47 üyesi bulunan hükümetler arası bir kuruluştur. Türkiye imzalamış olduğu 1954 tarihli "Avrupa Kültür Antlaşması"¹³ ve 1985 tarihli "Avrupa Mimari Mirasının Korunması Sözleşmesi"¹⁴ ile kültür varlıklarının korunması ve korumanın yaygınlaştırılması konusundaki politikalara ortak olmuştur.

¹³ Avrupa Kültür Antlaşması (European Cultural Convention), 19 Aralık 1954 tarihinde Paris'te yapılan görüşmelerde kabul edilmiş ve 5 Mayıs 1955 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Toplam 11 maddeden oluşan antlaşmanın amacı Avrupa kültürünün gelişmesi ve korunması için ortak bir politika geliştirerek üye ülkeler arasındaki işbirliğinin artırılmasıdır (European Cultural Convention, CETS No: 018).

¹⁴ Avrupa Mimari Mirasının Korunması Sözleşmesi (Convention for the Protection of the Architectural Heritage of Europe CETS No:121), 3 Ekim 1985 tarihinde Granada'da yapılan görüşmelerde kabul edilmiş ve 1 Ekim 1987 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Toplam 27 maddeden oluşan sözleşme, korunması gerekli mimari miras kavramının tanımlanması ile başlamaktadır. Sözleşmenin amacı mimari mirasın korunması ve geliştirilmesi konusunda üye ülkeler arasında ortak bir politika oluşturulmasıdır.

Konsey, mimari mirasın korunmasına ilişkin tavsiye kararları, ilke kararları ve tüzükler hazırlamaktadır.

Doğal Afetlere Karşı Mimari Mirasın Korunmasına İlişkin Tavsiye Kararı No. R (93) 9 (COE,1993)

Mimari mirasın korunmasında afetleri önlemeyi ve bunlardan korunmayı kapsayan metin; kapsam ve tanımlar, afetlerden korunmaya ilişkin yasal ve idari çerçeve, mali ve sigorta tedbirleri, eğitim, risk değerlendirmesi, afetlerden korunma başlıkları altında 6 ana bölümden oluşmaktadır. Tavsiye kararları, afetlerin engellenmesi ve hasarların azaltılmasına ilişkin idari önlemlerin konu alındığı 3 ek ile sona ermektedir (Recommendation No. R (93)9, The Protection of the Architectural Heritage Against Natural Disasters, 1993).

5.1.2 Ulusal Kuruluşların Hazırladığı Metinler

Çalışmada, ulusal kuruluşlar başlığı altında T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı ile T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlıkları'nın alt birimlerinin hazırladıkları metinler değerlendirilmiştir.

5.1.2.1 T.C. Kültür Bakanlığı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Yüksek Kurulu İlke Kararları

Yurtiçindeki taşınmaz kültür ve tabiat varlıklarının korunması ile ilgili çalışmaların bilimsel esaslara göre yürütülmesini sağlayan “Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Yüksek Kurulu”, koruma konusunda yol gösterici ilke kararları almaktadır.

660 sayılı ilke kararı (05.11.1999), taşınmaz kültür varlıklarının gruplandırılması, bakımı ve onarımları ile ilgilidir. Koruma Yüksek Kurulu, her yapının kendine özgü sorunları olması nedeniyle, tüm yapıları bağlayıcı nitelikteki genellemelerden kaçınılması gerektiğini ifade etmiş ve kurul kararlarına temel olacak ilkeleri ve müdahale biçimlerini bu ilke kararında tanımlamıştır. Müdahale biçimleri, esaslı onarım ilkeleri, uygulamaların denetlenmesi, yok olan yapılara ve hazırlanması gerekli projelere ilişkin konular 660 sayılı ilke kararı içinde yer almaktadır.

5.1.2.2 Bayındırlık ve İskân Bakanlığı - Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik

Çalışma kapsamında, 1940 - Zelzele Mıntıkalarında Yapılacak İnşaata Ait İtalyan Yapı Talimatnamesi'nden başlayarak bugüne dek Türkiye'de yürürlükte kalan yönetmelikler, yığma yapılar ve kültür varlığı niteliği taşıyan yapılar ile ilgili bölümler göz önünde bulundurularak incelenmiştir.

06.03.2007 tarihinde Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik”, deprem bölgelerinde yeniden yapılacak, değiştirilecek, onarılacak veya güçlendirilecek olan yapıların teknik şartlarını belirlemektedir. Yönetmelik, mevcut yapıların performanslarının değerlendirilmesi ve güçlendirilmesinde de kullanılmaktadır.

5.1.3 Konu ile İlgili Diğer Metinler

Bu başlık altında, Avrupa Birliği'ne üye olan ülkelerde yürürlükte olan Eurocode'lar ile zengin bir mimari mirasa sahip olan ve aktif deprem kuşağında bulunan İtalya'da kültür varlıklarının korunması ile ilgili yasa ve kılavuzlar değerlendirilmiştir.

5.1.3.1 Eurocode6 - TS EN 1996-1-1, Eurocode8 - TS EN 1998

“Avrupa Standartlar Komitesi”nin hazırladığı Eurocode'lar mühendislik yapılarının tasarımları için hazırlanmış teknik bir yönetmelik bütünüdür. Yönetmeliğin birbirinden farklı yapı tipleri için farklı bölümleri bulunmaktadır. Eurocode 6 donatılı veya donatısız yığma yapıların tasarımı, Eurocode 8 ise depreme dayanıklı yapı tasarımı ile ilgili kuralları içermektedir.

5.1.3.2 O.P.C.M.3274/03 – O.P.C.M.3431/05 – Linee Guida

İtalya'da 2003 yılında, Meclis Danışma Kurulu Başkanlığı ve Sivil Savunma Bakanlığı tarafından hazırlanan “Yapıların Tasarımı, Değerlendirilmesi ve Sismik Güçlendirmesi Hakkında Teknik Yönetmelik” OPCM 3274 ve bu yönetmeliğin 2005 yılında gözden geçirilmiş ve değiştirilmiş hali OPCM 3431 hem yeni yapıların tasarımı, hem de mevcut yapıların değerlendirilmesi için kullanılmaktadır (O.P.C.M. 3274/2003-3431/2005 Norme Tecniche per il Progetto, la Valutazione e l'adeguamento Sismico degli Edifici). Söz konusu yönetmeliklerin, kültürel mirasın korunması amacıyla nasıl kullanılmalrı gerektiği konusunda yol gösterici bir resmi

metin de hazırlanmıştır (Linee Guida per l'applicazione al patrimonio culturale della normativa tecnica di cui all'Ordinanza P.C.M. 3274/2003). Metin yalnızca yığma yapılar bölümünü içermektedir.

5.1.4 Değerlendirme

Kültür varlıklarının korunması çerçevesinde çalışma kapsamında incelenen metinler değerlendirildiğinde konuya iki farklı anlayışla yaklaşıldığı belirlenmiştir. Mimarlık, sanat tarihi, arkeoloji ve restorasyon dallarındaki uzmanların hazırladığı metinler kültür varlıklarının korunmasına ilişkin genel ilkeleri ortaya koymakla beraber, mühendislerin yapıların taşıyıcı sistemleri ile ilgili konularda yapacakları analiz, değerlendirme, öneri ve uygulama süreçlerine ilişkin bir bilgi sunmamaktadır.

Mühendislerin hazırladığı metinlerin ise bugünün yapılarının tasarımı ve uygulama detayları ile ilgili oldukları, yapıların değerlendirilmesine ilişkin bölümlerin yine bugünün sistemlerine yönelik olduğu görülmektedir. Bu metinlerde kültür varlıklarının korunması konusunda genel yaklaşımın ortaya konulmaması, bu kapsamdaki yapıların analiz, değerlendirme, öneri ve uygulama süreçlerine ilişkin bilgiler sunulmaması nedeniyle, koruma konusunda bilgi sahibi olmayan mühendisler farkında olmadan kültür varlıklarına zarar vermektedir.

1997 yılında yürürlüğe giren ve 1998 yılında yapılan yeni düzenlemelerle yürürlükte kalan Afet Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'te kültür varlıklarının değerlendirilmesine ilişkin bir madde bulunmamaktadır. 2007 yılında yürürlüğe giren Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'in 7.1.5 numaralı maddesiyle ilgili yönetmeliğin tarihi ve kültürel değeri olan tescilli yapıların ve anıtların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesinde kullanılamayacağı belirtilmektedir. Bu maddenin yeni yönetmeliğe eklenmiş olması yönetmeliği hazırlayan inşaat mühendislerinin kültür varlıklarının korunması konusunda daha bilinçli olduklarını göstermektedir. İlerleyen yıllarda, mimari mirasın korunması konusunda uzmanları yönlendirebilecek ve yürürlükte bulunan yönetmeliklerle uyumlu metinlerin disiplinlerarası çalışmalarla hazırlanabileceği ve geliştirilebileceği düşünülmektedir.

İtalya'da yürürlükte olan yönetmelikler, inşaat mühendislerinin kültür varlıkları konusunda hassas olduğunu ve diğer alanlardaki uzmanlarla birlikte yol gösterici kılavuzlar hazırlayarak yapıların değerlendirilmesi ve sağlamlaştırılması konusunda

alışan meslek insanlarına yardımcı olmaya çalıştığını göstermektedir. Hazırlanan metinlerin eksik olduğu noktalar bulunsa da disiplinlerarası çalışma kültürü ve koruma bilincinin gelişmiş olması dikkati çekmektedir.

5.2 Onarım İlkeleri

Korunması gerekli taşınmaz kültür varlıkları, farklı nitelikli ve büyüklükte değerlerden oluşmaktadır. Aşağıdaki başlıklarda ele alınan konular, tüm taşınmaz kültür varlıklarını ilgilendirmektedir.

Restorasyon alışmaları ve Taşıyıcı Sistem Onarımı: Sismik etkilenebilirliğin azaltılması için taşıyıcı sistem için gerekli müdahaleler, yapının genel restorasyon çalışması içinde değerlendirilmelidir. Müdahale teknik ve yaklaşımlarının seçimi ve ne zaman gerçekleştirileceği yapılacak değerlendirmelerin sonucuna bağlıdır. Her müdahale, güvenlik, kalıcılık ve dayanıklılık için yeterli düzeyde ve tarihi miras değerlerine en az zarar getirecek şekilde olmalıdır (O.P.C.M.3274/03 Linee Guida punto 6.1., ICOMOS ISCARSAH 3.3.).

Bakım: Müdahale her zaman bir miktar özgünlük kaybına neden olur. Basit bakım-onarım, hem yapının deprem hasarlarından korunmasını sağlar, hem de yapının tarihi değerine zarar verebilecek müdahaleleri önler. Bu bakımdan koruyucu bakım en etkili tedavi yöntemidir (O.P.C.M.3274/03 Linee Guida punto 6.1, ICOMOS ISCARSAH 3.2., COE No. R (93) 9 teknik nlemler 2).

Değerlendirme: Güvenliğin değerlendirilmesi ve taşıyıcı sistem davranışının tam olarak anlaşılması müdahale kararlarının alınmasında temel olmalıdır. Her yapının kendine özgü koşulları nedeniyle, yapıya en az düzeyde zarar veren ve koruma ltleri ile uyumlu müdahalelerin seçimi, duruma göre değerlendirilir (ICOMOS ISCARSAH 3.3. ,O.P.C.M.3274/03 Linee Guida punto 6.1, 660 sayılı İlke Kararı I)

Geleneksel Yöntemler: Müdahalelerde geleneksel ya da modern yöntemlerin kullanımı hakkındaki karar her yapının özel durumuna göre verilir. Geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda modern yöntemler kullanılabilir (Venedik Tüzüğü, madde 10). Kullanılacak yöntem güvenlik ve dayanıklılık ölçütlerini karşılamalı ve tarihi yapının değerlerleri ile uyumlu olmalıdır (COE No. R (93) 9 teknik önlemler 3 iii.).

Bütünleşik koruma: Müdahaleler, taşıyıcı sisteme yararları ve etkili olacakları konusunda emin olunduktan sonra gerçekleştirilebilir. Gerekliliği ortaya konulmadığı sürece, yapıya müdahale edilmemelidir. Hasarlı taşıyıcı sistem elemanlarının kaldırılıp yerlerine yeni elemanların konulması, ya da inşa edilmesinden kaçınılmalıdır. Müdahaleler, mevcut şemayı değiştirmemeli ve onunla bütünleşen bir yapısı olmalıdır (O.P.C.M.3274/03 Linee Guida punto 6.1, ICOMOS ISCARSAH 3.4-3.14-3.15).

Saygı: Müdahalelerin mümkün olduğunca taşıyıcı sistemin özgün malzeme ve tekniğine, yapının zaman içerisinde geçirdiği değişimlere saygılı olması gerekir. Bu açıdan bakıldığında, hasara uğramış elemanları değiştirmek yerine onarmalıdır. Deformasyon ve değişiklikler geçmişin izleri olmaları bakımından, eğer güvenlik şartları tehlikeye atılmıyor ise, korunmalıdır (O.P.C.M.3274/03 Linee Guida punto 6.1, ICOMOS ISCARSAH 1.3.-3.12-3.14-3.15-3.16, COE No. R (93) 9 teknik önlemler 3 ii., Venedik Tüzüğü, Madde 11).

Özgün şema: Müdahalelerin, elemanların özgün rijitlik dağılımını değiştirmekten kaçınarak, mümkün olduğunca fazla alan ve eleman miktarını kapsayacak şekilde, yapının tekil elemanlarına dönük olması gerekir (O.P.C.M.3274/03 Linee Guida punto 6.1). Yapıların ilk inşa edildikleri durumdaki yük akış şeması sonradan değişikliklere uğramış olabilir. Öyle bile olsa yapıların yük akış şemalarına müdahale etmek uygun olmaz. Ana hedef, yapının sadece biçim olarak değil, taşıyıcı sisteminin çalışma düzeninin de korunmasıdır (O.P.C.M.3274/03 Linee Guida punto 6.1, COE No. R (93) 9 teknik önlemler 3 i.).

Uyum: Teknolojik buluşlar sonunda ortaya çıkan yeni malzemeler, tarihi yapı ve malzemelerine uyumlulukları ve dayanıklılıkları göz önünde bulundurularak değerlendirilir. Kullanılacak yeni malzemelerin tarihi yapı malzemeleri ile uyumları ve dayanıklılıkları uzun süreli testlerle belirlenmiş olmalıdır (O.P.C.M.3274/03 Linee Guida punto 6.1, ICOMOS ISCARSAH 3.10, COE No. R (93) 9 teknik önlemler 2, COE No. R (93) 9 teknik önlemler 3 iv., Venedik Tüzüğü, Madde 12).

Geriye döndürülebilirlik: Müdahaleler mümkün olduğunca geriye döndürülebilir olmalıdır. Daha uygun müdahale olanakları doğduğunda, yapılan müdahale kaldırılabilirdir (ICOMOS ISCARSAH 3.9). Geriye döndürülebilirlik, yapılan onarımın her yeni teknolojik çözümün bulunması ile değiştirilebilirliği değildir. Bu

kavram, onarım amacıyla konulan elemanların herhangi bir hasar veya bozulma durumunda yerlerine yenilerinin konulabilmesi olduğu kadar, bu elemanların kolaylıkla onarılabilişlikleri ile de ilgilidir.

Gelecek: Gelecekte daha uygun müdahale teknikleri bulunabileceği düşünüldüğünde, bugün yalnızca zorunlu müdahalelerin yapılması uygundur. Döneminin koşulları ve sunduğu imkânlar çerçevesinde yapılan müdahaleler sonucu anıtsal değerlerin kayıp edildiği birçok örneğin daha sonraki yıllarda ele alınmış olmaları durumunda daha az zarar görecekları açıktır.

Acil Durumlar: Acil durumlarda kalıcı hasarları en az seviyede tutacak geçici müdahaleler yapılabilir (O.P.C.M.3274/03 Linee Guida punto 6.1, ICOMOS ISCARSAH 3.6.-3.14-3.15-1.7).

Uygulama ve Kontrol: Etkinliklerinin güvence altına alınması ve yığma yapının davranışında veya elemanların işleyişlerinde olumsuzluklara sebep olabilecek hasarların engellenmesi bakımından müdahalelerin uygulama sürecine de önem verilmelidir. Önerilen müdahale uygulamalarının izlenmesi ve denetlenmesi gereklidir. Yapılacak her müdahaleyi açıklayıcı belgeler hazırlanmalı ve eklenmelidir. Her türlü izleme ve kontrol işi belgelenmeli ve yapı tarihinin bir parçası olarak korunmalıdır (O.P.C.M.3274/03 Linee Guida punto 6.1, ICOMOS ISCARSAH 3.20.-3.21-3.22, 660 sayılı İlke Kararı III). Proje ve uygulama sürecinde, yapıya dair yeni bilgiler ortaya çıkarsa, müdahale kararlarının ve yöntemlerinin yeniden değerlendirilmesi gerekir (660 sayılı İlke Kararı II-e, COE No. R (93) 9 teknik önlemler 3 vi.).

Müdahale sonrası izleme: Yapılan müdahalelerin etkinliğinin sağlanması ve kontrol edilmesi amacı ile yapı izlenmelidir. Bu süreçte yapılan tüm tespitler belgelenmelidir (ICOMOS ISCARSAH 3.21-3.22).

5.3 Zeyrek Camii Kuzey Bölümü İçin Sağlamaştırma Önerileri

Zeyrek Camii Kuzey Bölümü için hazırlanan müdahale önerileri; duvarlar, ayaklar ve eğrisel elemanlar başlıkları altında ele alınmıştır. Tarihi yapılarda görülen hasarların ortadan kaldırılması ve yeniden tekrar etmemesi için farklı uygulamalar kullanılmaktadır. Söz konusu uygulamaların bazıları bir önceki bölümde ele alınan “onarım ilkeleri” çerçevesinde değerlendirilmiş ve bu çalışmaya dâhil edilmemiştir.

Müdahale teknikleri, yapının taşıyıcı sistem özellikleri ve yapıda tespit edilen hasarlara bağlı olarak seçilmiştir. Sağlamaştırma önerilerinin hedefleri ve bu hedeflere ulaşılması için kullanılması olası müdahale teknikleri, beklenen faydaları ve olası olumsuz etkileri tartışılarak ortaya konulmuştur.

5.3.1 Duvarlar

Zeyrek Camii Kuzey Bölümü'nde yapılan gözlemlerle belirlenen ve yapının geçirdiği onarım çalışmaları sırasında tespit edilebilen hasarlar bu çalışmanın 3.6. bölümünde irdelenmiştir. Söz konusu bölümde özellikle yapının doğu ve batı cephelerindeki hasarların biçimleri ve etkili olduğu bölgeler ortaya konulmuştur.

Bu bölümde önerilen müdahaleler, bozulmuş ve hasarlı duvarların onarımı ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yöneliktir. Bu kapsamdaki uygulamalar duvarlarda düzgün gerilme dağılımının ve rijitlikte sürekliliğin tekrar kazandırılması için yapılmaktadır.

Müdahaleler, hasarlara ve duvar özelliklerine bağlı olarak aşağıdaki gruplara ayrılabilir:

- bozulmuş ve hasarlı bölümlerdeki onarımlar;
- duvar bütünlüğünün sağlanması için boşlukların doldurulması;
- özellikle düşük nitelikli duvarların özelliklerinin iyileştirilmesi;

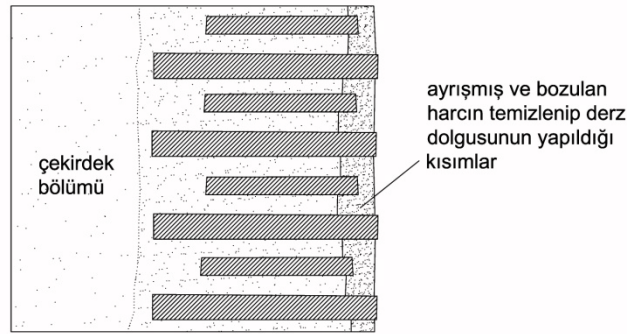
5.3.1.1 Derz Onarımı

Derz onarımı genellikle duvar yüzeyinde karşılaşılan sorunlarla ilişkilendirilir. Ancak bu tip müdahaleler hem duvarın uzun yıllar dış etkenlere karşı dayanıklı olmasını, hem de taşıma gücünün artmasını sağlamaktadır. Derz onarımları, uygulama sonrası ortaya çıkan duvar görünümü, kullanılan malzemelerin mevcut yapı malzemeleri ile fiziksel–kimyasal uyumluluğu ve uygulamanın mevcut duvarla aderansı göz önünde bulundurularak değerlendirilir.

Özellikle çok kalın olmayan duvarlarda derz onarımı, tuğla veya taşların tüm kenarlarında derinlemesine yapıldığı takdirde duvarın mekanik özelliklerini iyileştirmektedir (Linee Guida, 2005, s.41). Ancak bu tekniğin duvar üzerindeki eski derz yapısı ve tarihi izleri yok edebileceği göz önünde bulundurulduğunda,

uygulamanın yapının geçirdiği onarımlar ve aşamalar çok iyi anlaşıldıktan sonra, dikkatli bir biçimde yapılması gereklidir.

2004-2005 yıllarında Zeyrek Camii'nde yürütülen onarım çalışmaları kapsamında duvar örgüsünde tuğlalar arasında bağlayıcı harcın ayrışan, zayıf kısımları temizlenmiş ve bu alanlardaki derzler uygun malzemelerle doldurulmuştur (Şekil 5.1). Bozulan derzlerin yeniden harçla doldurulması aşamasında çürütmelerin mümkün olduğunca derin yapılarak uygulamanın duvar örgüsü ile birleşiminin kuvvetli olmasına dikkat edilmiş, ilerleyen yıllarda uygulamanın duvardan ayrılması engellenmiştir. Malzeme kayıplarının ciddi boyutlarda olduğu alanlarda kırık ve aşınmış tuğlalar yeni tuğlalarla değiştirilmiş, böylece duvar kesitinde meydana gelen zayıflıklar ortadan kaldırılmıştır (Ahunbay, Ahunbay, 2005b, s.81).



Şekil 5.1: Derz onarımı.

İlerleyen yıllarda Zeyrek Camii'nde yapılacak onarım çalışmalarında boşalan derzlerin onarımlarına devam edilmelidir. Yapıda bu uygulamanın gerekmediği sağlam kısımlarda derz onarımı yapılmamalıdır.

1950-1970 yılları arasında çimento esaslı malzemeler kullanılarak yapılan derz onarımlarının temizlenmesi ve uygun malzemelerle yeniden yapılması gerekmektedir. Bunun nedeni çimento esaslı malzemelerin hem mekanik, hem de kimyasal özelliklerinin ilk yapımda kullanılan malzemelerden çok farklı olmasıdır. Çimento esaslı malzemelerin içerdikleri suda çözünebilen tuzların uzun vadede duvarlara zarar vermesi kaçınılmazdır.

5.3.1.2 Dikiş

Çatlak hattı boyunca taşıyıcı sistem elemanlarının sürekliliğinin sağlanması ve ciddi şekilde bozulmuş bölümlerin iyileştirilmesi amacıyla dikiş yapılması uygun bir müdahale yöntemidir. Bu yöntemde, hasarlı bölümler kaldırılır ve kaldırılan

bölümler yeniden örülür. Biçim, boyut, rijitlik, dayanım özellikleri bakımından mevcut malzemelerle uyumlu malzemelerin kullanılması iyi bir birleşimin olabilmesi, homojenlik ve bütünlüğün sağlanabilmesi için gereklidir.



Şekil 5.2: Zeyrek Camii, güney bölüm dış narteks tonozunda hasarlı bölümlerin temizlenmesi (Ahunbay, 2004).



Şekil 5.3: Zeyrek Camii, güney bölüm dış narteks tonozunda dikiş uygulaması (Ahunbay, 2004).

Uygulamada karşılaşılan sorunlardan biri duvarın kaldırılacak kısmının derinliği ve genişliği ile ilgilidir. Yöntemin, duvarda meydana gelen süreksizlikleri yok etmek için kullanıldığı düşünüldüğünde, uygulamada kaldırılması gereken bölümün hasarın genişliğine ve derinliğine bağlı olduğu kadar, söz konusu duvarın özelliklerine de bağlı olduğu açıktır. Düşük nitelikli ve düzensiz örgülü bir duvarda yapılacak dikiş uygulamasında kaldırılması gereken kısım yüksek dayanımlı ve düzenli bir örgüsü olan duvar ile karşılaştırıldığında daha geniş ve derin olmalıdır.

Zeyrek Camii'nde 2001-2005 yılları arasında yürütülen onarım çalışmalarında da hem Doğu Cephe duvarında hem de galeri tonozlarında dikiş uygulamaları yapılmıştır (Şekil 5.2 ve Şekil 5.3). İlerleyen yıllarda yapılacak onarım çalışmalarında da gerekmesi durumunda duvar, tonoz ve kemer gibi hasarlı taşıyıcı sistem elemanları için dikiş uygulamalarının devam ettirilmesi önerilmektedir.

5.3.1.3 Enjeksiyon

Enjeksiyon, kagir yapı elemanları içerisindeki boşlukların doldurulmasını, çatlakların kapatılmasını ve süreksizliklerin giderilmesini sağlayarak bu elemanların mekanik özelliklerini iyileştiren sağlamlaştırma müdahalelerinden biridir (Şekil 5.4). Enjeksiyon uygulamaları tonoz, kemer, kubbe gibi diğer taşıyıcı elemanlarda da yapılmaktadır.



Şekil 5.4: Enjeksiyon uygulaması, San Francesco Bazilikası, Assisi (Rocchi, 2006).

Zeyrek Camii Kuzey Bölümü'nde hasarlı duvar ve tonozlarda enjeksiyon yapılması önerilmektedir. Ancak enjeksiyon uygulamasının geriye döndürülebilir bir niteliğinin olmaması ve uygulamanın mümkün olduğunca etkin olabilmesi amacıyla uygulama öncesinde kapsamlı bir ön çalışmanın yapılması gerekmektedir. Uygulama süresinin ve maliyetinin düşürülmesi amacıyla piyasadaki mevcut hazır malzemelerle yapılacak çabuk ve bilinçsiz bir müdahalenin yapıya yarardan çok zarar vereceği unutulmamalıdır.

Uygulama için seçilen harç karışımının kimyasal-fiziksel ve mekanik özellikleriyle müdahale edilecek duvarın malzemelerine uyumuna dikkat edilmelidir. Uygulamanın etkinliği için, enjeksiyon yapılacak deliklerin boyutları ve konumları, kullanılan malzemenin akışkanlığı, uygulama adımlarının seçimi ve kullanılan basınç değerleri önemlidir. Tarihi yapıların onarımında kullanılan malzemeler konusunda bilincin artması sonucunda çimento esaslı malzemeler yerlerini kireç esaslı malzemelere bırakmıştır. Özellikle tarihi sıva ve freskleri olan duvarlarda çimento esaslı harcın içerisindeki suda çözülebilir tuzlar duvar yüzeyinde çiçeklenmelere yol açarak zarar vermektedir (Linee Guida, 2005, s.41). Enjekte edilen malzemelerin kimyasal reaksiyon sürecinde duvar içinde yüksek sıcaklıklara neden olması ve buna bağlı olarak duvarda hasarların meydana gelmesinden kaçınılmalıdır. Bu nedenle kireç harcı gibi reaksiyonlarda düşük hidrasyon enerjisi üreten malzemeler tercih edilmelidir (Grillo, 2002, s.82). Özellikle son yıllarda malzeme bilimindeki gelişmelere paralel olarak tarihi yapıların onarımında da nano malzemelerin kullanımına ilişkin çalışmalar hız kazanmıştır. Çok küçük tane boyutundaki

malzemeler ile hazırlanan bu karışımların hasarlı yüzey içine penetrasyon derinliği geleneksel malzemelerden daha fazla olmaktadır (Ziegenbalg ve diğerleri, 2010, s.1305). Ancak uygulamanın etkinliğinde, tane boyutu, karışım oranları, solvent özellikleri gibi birçok değişken rol oynamaktadır (Papayianni ve diğerleri, 2010, s.1132). Bu nedenle, deneysel çalışmalarla davranışları kesin verilerle ortaya konulmayan malzemelerin kullanımından kaçınılmalıdır.

11. yüzyıl Bizans yapısı olan Atina-Daphni Manastır Kilisesi'nin taşıyıcı duvarlarının sağlamlaştırılması için önerilen enjeksiyon uygulamaları öncesinde detaylı bir ön çalışma yapılmıştır (Kalagri ve diğerleri, 2010, s.1135). Bu çalışma kapsamında, ilgili yapıda kullanılan duvar yapım tekniği ile yaklaşık aynı boşluk özellikleri olan duvar parçaları inşa edilmiş ve bu örnekler üzerinde farklı bağlayıcı tipleri ve katkı malzemeleri bulunan karışımlar uygulanarak laboratuvar ortamında deneysel verilerin elde edilmesi sağlanmıştır. Söz konusu yapı için sergilenen hassasiyetin tüm anıtsal yapılara gösterilmesi gereklidir. Zeyrek Camii taşıyıcı duvarları için uygun ve etkin bir enjeksiyon uygulaması ancak bu özellikteki çalışmalar sonrasında yapılmalıdır.

Enjeksiyon her tip duvarda kullanılabilen bir uygulama değildir. Eğer duvar enjeksiyon yapmaya uygun olmayan karakterde ise, uygulama etkisiz olur. Bağlayıcı harcı ayrıışmamış, içinde boşluk bulundurmeyen çatlaksız bir duvara enjeksiyon yapmanın faydası olmayacaktır. Zeyrek Camii Kuzey Bölümü'nde de hasarsız ve bütünlüğünü koruyan taşıyıcı elemanlara enjeksiyon yapılmamalıdır.

Enjeksiyon uygulaması yapılan duvarların mekanik özelliklerine ilişkin İtalya'da yürürlükte bulunan 3431 sayılı “Yapıların Tasarımı, Değerlendirilmesi ve Sismik Güçlendirmesi Hakkında Teknik Yönetmelik” bilgileri sunmaktadır. Bu yönetmelik, enjeksiyon sonrasında yığma duvarın mekanik özelliklerindeki artışı, duvarların karakterlerine bağlı olarak tanımlanmıştır (O.P.C.M. 3274/2003-3431/2005, tablo 11.4). Ancak bu verilerin Zeyrek Camii Kuzey Bölümü için hazırlanan sayısal analizlerde değerlendirilebilmesi mümkün olmamıştır. Çünkü geliştirilen modellerde yapının daha fazla yıpranmış veya hasar görmüş bölümleri için farklı malzeme parametreleri tanımlanmamıştır. Zaten söz konusu işlemin yapılabilmesi için yapının sıva raspa yapıldıktan sonra çok detaylı biçimde incelenmesi ve zarar vermeyen test yöntemleri kullanılarak, yapıyla ilgili ek verilerin elde edilmesi gerekmektedir. İlerde yapıdaki tüm malzeme farklılıklarını göz önünde bulunduran bir modelin

geliştirilmesi önerilmektedir. Böylece onarım sonrası mekanik özellikleri iyileşen bölümlerin parametreleri değiştirilerek analizlerle yapı davranışındaki değişimler tespit edilebilir.

5.3.1.4 Açıklıkların Kapatılması

Tarihi yapılarda duvarları pekiştirmek amacıyla pencere ve kapı gibi açıklıkların kapatılması sık karşılaşılan bir uygulamadır. Bu tip müdahaleler özellikle boşluklarla duvar sürekliliğini yitiren ve bu nedenle depremlerde hasar gören duvarlarda yapılmaktadır. Zeyrek Camii doğu cephesindeki pencerelerin, Güney Bölüm narteksindeki kubbe pencerelerinin kapatılmış olmaları depremlerde hasar gören bölümlerin pekiştirilmesi amacıyla yapılmış olmalıdır. Kuzey Bölüm kuzey cephesinde bulunan kemerli açıklıkların içindeki dolguların mevcut hali ile korunması gerektiği önerilmektedir (Şekil B14). 2001-2005 yılları arasında yapılan onarımlar çerçevesinde doğu cephesi üçlü pencere düzeninin kenarlar açıklıklarındaki dolgular, Prof. Müfit Yorulmaz'ın görüşleri doğrultusunda kaldırılmamıştır (Şekil B12).

Söz konusu yıllarda yapılan onarımlar çerçevesinde, apsis ve pastoforion pencerelerine takılan 8cm kalınlığındaki mermer gövdeli şebekelerin, çok sayıdaki açıklıkla sürekliliğini yitiren duvarın davranışını olumlu yönde etkilemesi beklenmektedir (Ahunbay, Ahunbay, 2005b) (Şekil B12).

5.3.2 Ayaklar ve Sütunlar:

Ayak ve sütun gibi düşey taşıyıcılarda sağlamlaştırma, enjeksiyon uygulamaları ile mekanik özelliklerin iyileştirilmesi veya düşey taşıyıcı elemanlarda yük dağılımına müdahale edilmesiyle yapılmaktadır. Zeyrek Camii Kuzey Bölümü'nde özellikle güney doğu ayağında karma bir uygulama yapılması önerilmektedir. Önceki bölümlerde enjeksiyon uygulamalarından bahsedildiği için aşağıda sadece yük dağılımında değişiklik meydana getiren çözümlerden bahsedilmiştir.

5.3.2.1 Çemberleme (Kuşaklama)

Hasarlı düşey taşıyıcı elemanların metal kullanılarak çemberlenmesi çok eski bir onarım yöntemidir (Şekil). Düşey yükler etkisindeki ayak ve duvarlarda yatay şekildeğiştirmelerin sınırlandırılması veya yatay doğrultuda basınç uygulanması bu elemanların düşey doğrultuda daha yüksek basınç gerilmelerine dayanmasını sağlar.

Çekirdek bölümünün yüzeydeki cidardan ayrıldığı birkaç katmandan oluşan düşey taşıyıcılarda kuşaklama, elemanın bütünlüğünü sağlaması bakımından daha da önem kazanmaktadır.

Kuşaklamanın etkinliği öngermeli sistemler kullanılarak arttırılabilmektedir. Bu tip uygulamaların etkinliği düşey taşıyıcının geometrik özellikleri ve kuşaklar arasındaki mesafe ile ilişkilidir. Ayaklarda kuşaklar arasındaki mesafenin ayağın kısa kenar uzunluğunun yarsından fazla olmaması tavsiye edilmektedir (Crocì, 1998, s.98, Crocì, 2005, s.197).

Zeyrek Camii Kuzey Bölüm güneydoğu ayağı 1990'lı yıllarda metal çemberlerle sarılmıştır. Mevcut sistemin kaldırılarak, güneydoğu ayağını daha etkin bir biçimde saran yeni bir sistemin konulmasının daha uygun olacağı düşünülmektedir.

5.3.2.2 Donatı kullanımı

Zeyrek Camii kuzey bölüm apsisinde bulunan mermer sütunlarda bulunan düşey çatlaklar hidrolik kireç, mermer tozu, kum ve beyaz çimentodan oluşan bir karışımla doldurulmuştur. Çatlayarak ayrılan parçalar, eğik olarak açılan deliklere konulan ve epoksi reçinesi kullanılarak tespit edilen paslanmaz çelik donatılarla gerideki sağlam kısımlara bağlanmıştır (Ahunbay, Ahunbay, 2005b, s.81). Bu tip müdahaleler gerektiren yapı elemanlarının onarım çalışmalarında sağlamlaştırılmaları önerilmektedir.

5.3.3 Kemer ve Tonozların Sağlamlaştırılması

Yatay itkiler, deprem kuvvetleri ve zemin oturması gibi etkenler, kemer ve tonozları taşıyan duvarların birbirlerinden uzaklaşmasına ve bu elemanların hasar görmesine neden olur. İlk yapıldıkları dönemlerde düşey yükleri sağlıklı bir şekilde taşıyan tonoz ve kemerler ilerleyen yıllarda artan düşey yükler nedeniyle de hasara uğrayabilir. Düşey yüklerin artmasına, tonozların üzerinde biriken malzemeler, özgün döşemelerin üzerine eklenen yeni döşeme kaplamaları veya hacimleri bölmek için sonradan inşa edilen duvarlar neden olmaktadır.

Kemer ve tonoz itkileri etkili bir biçimde karşılanabiliyorsa bu elemanlarda genellikle hasar oluşmaz. Ancak tonoz örgüsünün hasar görmesi, geometrisinin ciddi bir biçimde deforme olması gibi nedenler tonoz itkileri karşılanıyor olsa da güvenliği tehlikeye sokar.

Bu bölümde, kemer ve tonozların sağlamlaştırılması amacıyla kullanılan farklı teknikler irdelenmiştir. Zeyrek Camii'nde kemer ve tonozların tuğla ile inşa edilmiş olması nedeniyle bu bölümde yapının karakterine uygun onarım teknikleri derlenmiş, kesme taş ile inşa edilen kemer ve tonozlarla ilgili bilgilere yer verilmemiştir.

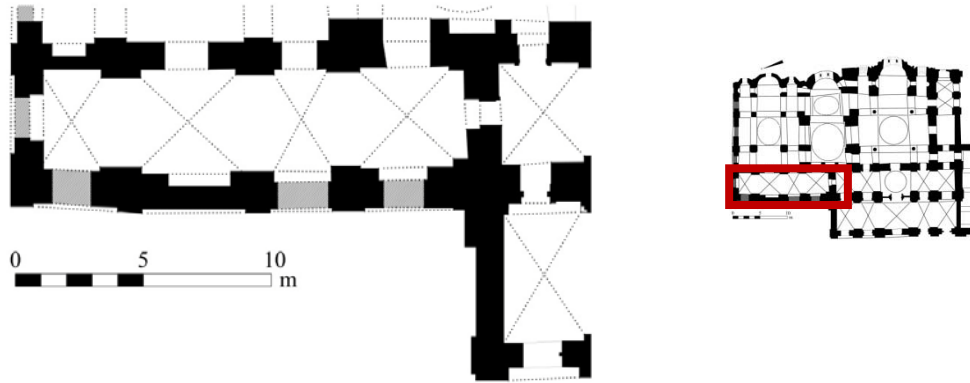
5.3.3.1 Kemer ve Tonoz İtkilerinin Karşılanması

Kemer ve tonoz itkileri; bu elemanlara bitişen diğer kemer ve tonozlar, payanda veya gergilerle karşılanır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5: Tonoz itkilerinin karşılanması.

Birbirine bitişik tonozlu hacimlerin oluşturduğu sistemler, deprem durumunda oldukça kararlı davranmaktadır. Bu sistemlerin kenar birimlerinde tonoz itkilerinin karşılanması için önlem alınması uygun olacaktır; örneğin duvarlarla birlikte örülen plastırlar hasarların meydana gelme olasılığını düşürecektir. Yan yana bitleştirilen tonozlardan oluşan sistemlerin geometrisi ve depremin etkili olduğu doğrultu, yapının zarar görebilirliğini etkiler. Zeyrek Camii Kuzey Kilise galeri ve narteks bölümleri kuzey-güney doğrultusunda yan yana dizilen tonozlu hacimlerden oluşmaktadır (Şekil 5.6).



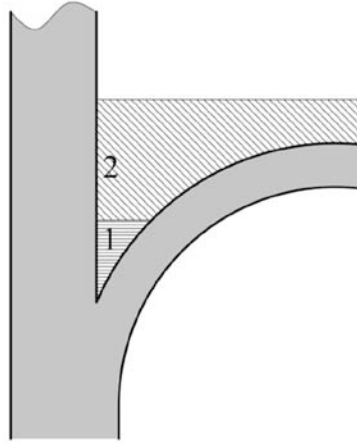
Şekil 5.6: Zeyrek Camii kuzey bölüm narteksi.

Boyuna doğrultuda etkili bir depremde, kuzey kenarında bulunan birimde hasar görme olasılığı kuzey-güney ekseninde itkilerin karşılanması ile azaltılabilir. Doğu-batı doğrultusunda etkili olan bir depremde, özellikle batı duvarına etkiyen itkileri karşılayacak bir sistemin bulunmaması nedeniyle batı duvarı açılmak istemektedir. Bu hasar mekanizmasına karşı önlem alınması gereklidir.

Kemer ve tonoz itkilerinin karşılanmasında, payanda yapımı veya duvarların kalınlaştırılması gibi teknikler de kullanılabilir. Bu tip müdahalelerin görsel olarak yapı üzerinde olumsuz bir etkisi vardır. Ancak bu müdahaleler koruma ölçütleri içerisinde ve geriye döndürülebilirlik açısından uygundur. Söz konusu müdahalenin etkinliği mevcut duvarla yaptığı birleşimin iyi olmasına bağlıdır (Linee Guida, 2005, s.38).

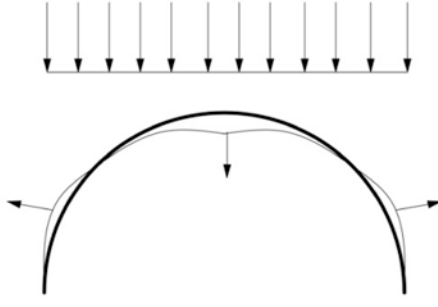
5.3.3.2 Tonoz Üzerindeki Yükün Azaltılması

Tonoz ve kemer sırtı üzerindeki dolgular eleman davranışına etkileri bakımından ikiye ayrılabilir (Şekil. 5.7).

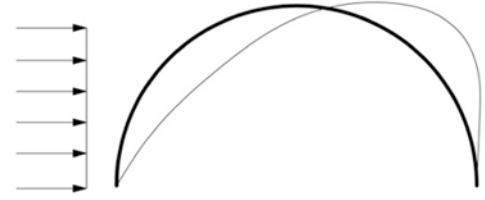


Şekil 5.7: Tonoz üzerindeki dolgu.

Bunlardan ilki üzengi seviyesinden başlayarak kemer ile duvar arasındaki üçgen alanı kaplar. Bu dolgunun özellikle yarım daire kemer ve beşik tonozlarda hem düşey yükler, hem de deprem yükleri altında davranışa olumlu katkısı vardır. Düşey yük etkisinde tonoz üzengi seviyesinin üstündeki bölüm dışarı doğru deforme olmaya çalışırken, bu bölgede bulunan dolgu ağırlığı, kemer ya da tonoz etkisinden oluşan kuvvetler bileşkesini duvar içine çekerek söz konusu deformasyonu engellemektedir (Şekil 5.8 ve Şekil 5.9).



Şekil 5.8: Kemerin düşey yükler altında deformasyonu.



Şekil 5.9: Kemerin yatay yükler altında deformasyonu.

Taşıyıcı duvar ile tonoz sırtı arasındaki üçgen alanın üzerinde kalan dolgu ikinci tip dolgudur. Ara katlarda döşeme altında kalan bu alan genellikle nitelsiz malzemelerle doldurulur. Taşıyıcı sisteme katkısı olmayan bu dolgu yapıya etkiyen deprem kuvvetinin büyümesine neden olmaktadır.

Tonoz itkilerinin azaltılması ve yapıya etkiyen taban kesme kuvvetinin azaltılması amacıyla, tonoz üzerindeki nitelsiz dolgu kaldırılarak yerine daha hafif malzemeler konulabilir.

Tonoz üzerindeki dolgularla ilgili müdahalelerde dikkat edilmesi gereken nokta, kesit içerisinde özgün basınç eğrisinin değişime uğrayabileceği ve tonoz üzerindeki yükün az olmasının tonozu hareketli yüklere karşı daha etkilenebilir bir hale sokabileceğidir (Linee Guida, 2005, S.39). Bu nedenle müdahale yapılmadan önce, dolgu ve tonoz özelliklerini dikkate alan bir değerlendirme yapılması gerekmektedir.

1997 yılında Prof. Dr. Zeynep Ahunbay ve Prof. Dr. Metin Ahunbay yürütücülüğünde Zeyrek Camii çatısında yapılan onarım çalışmalarında 10 cm'ye varan kurşun taklidi sıvalar ve altındaki blokaj kaldırılmış, dolgu toprağı temizlenmiştir (Ahunbay, Ahunbay, 2005b, s.75). Kaldırılan kütlenin özellikle dinamik etkilerde taşıyıcı sisteme yüklediği ek tesirler bu sayede ortadan kaldırılmıştır. Üzengi seviyesinin üzerinde taşıyıcı duvarlar ile tonoz sırtı arasında kalan bölümler horasan harcı ve tuğla kullanılarak doldurulmuştur.

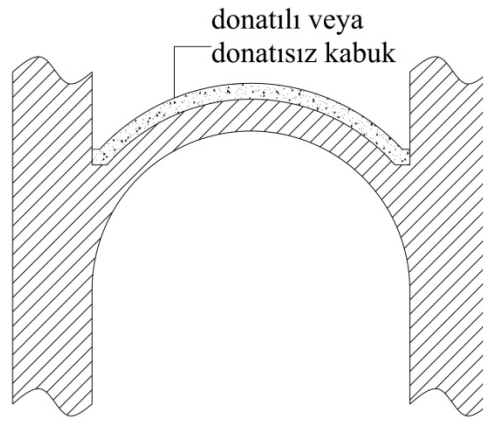
5.3.3.3 Tonoz Örgüsünün İyileştirilmesi

Tonoz ve kemerlerde hasarların olması durumunda basit bir harç enjeksiyonu ile kemer ve tonozları oluşturan parçalar arasındaki bağlantı yeniden sağlanır (Linee Guida, 2005, s.39). Kullanılacak malzemelerin suda çözünabilir tuzlar içermemesine ve mevcut malzemelerle uyumuna dikkat edilmelidir.

Çatlaklar geniş ve sürekli ise dikiş yapılmalıdır. Çatlak boyunca hasarlı ve parçalanmış tuğlalar çıkarılır, ayrışan harç temizlenir, mevcut malzemelerle uyumlu yeni malzemeler kullanılarak çatlaklar onarılır.

5.3.3.4 Tonozu Destekleyen Sistemler

Hasarlı ve formlarını yitirmiş tonozların sırt kısmında donatısız bir tabakanın eklenmesi tonoz davranışını iyileştirmektedir (Şekil 5.10). Uygulama aşamasında yeni kabuk ile tonoz arasındaki bağlantının iyi olmasına dikkat edilmelidir. Bu iki eleman arasında yeterli aderans sağlanamazsa birlikte çalışma durumu ortadan kalkar ve uygulama etkinliğini kaybeder. Hasarlı tonozların sağlamlaştırılmasında kullanılan diğer bir yöntem tonozun kemerlerle desteklenmesidir.



Şekil 5.10: Tonoz sırtında yeni bir tabakanın oluşturulması.

Mevcut tonozla bağlantılı kemer özellikle tonoz karnı tarafında yapıldığında etkili olmaktadır. Ancak yapının kültürel ve tarihi değerine zarar vermesi nedeniyle uygulama tonoz karnından çok tonoz sırtında yapılmaktadır (Crocì, 2005, s.213). Uygulamalar ahşap, çelik ve kompozit malzemeler kullanılarak yapılabilmektedir. Zeyrek Camii galeri bölümünde Osmanlı onarımlarında eklenen tuğla kemer bu uygulamaya bir örnektir.

Özelikle son yıllarda tarihi yapıların onarım ve sağlamlaştırılmasında kompozit malzemelerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Yüksek çekme dayanımlı lifli polimer malzemelerin hafif olması ve onarımlarda yapı kütlelerinin büyümemesi, bu malzeme ile yapılan uygulamaları tercih sebebi yapmaktadır.

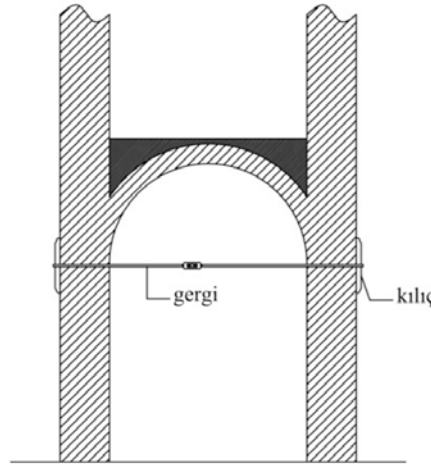
Lifli polimer malzemeler, kubbelerin sağlamlaştırılmasında yüzyıllardan beri kullanılan kuşaklama yöntemi ile aynı anlayışla uygulanmaktadır. Burada malzeme, kubbeyi kasnak ile taban arasında dıştan sararak dışa doğru açılmasını

engellemektedir. Uygulamanın etkinliğinde, üst üste gelen karbon bantların bindirme boyuna dikkat edildiği takdirde lifli polimer malzeme ile kubbe örgüsü arasındaki aderans birincil önemde rol oynamaz. Ancak tonozlarda yapılan uygulamalarda, kompozit malzeme ile tonoz örgüsü arasındaki bağlantı önemlidir. Kompozit malzeme tonoz örgüsünden ayrıldığı anda uygulamanın etkinliği sona erer.

Türer, polimer katkılı karbon liflerin malzemelerin uzun dönemde nasıl bir davranış sergileyeceğinin tam olarak bilinmediğini ve bu malzemelerin olumsuz bir performans gösterebileceklerine dair birçok işaret bulunduğunu ifade etmektedir. Polimer katkılı karbon liflerin kullanıldığı uygulamaların, genellikle hem geriye döndürülebilirlik hem de özgün malzemelere uyum kriterlerine uymadığını belirtmektedir (Türer, 2010, s.40).

5.3.4 Gergi Sistemi

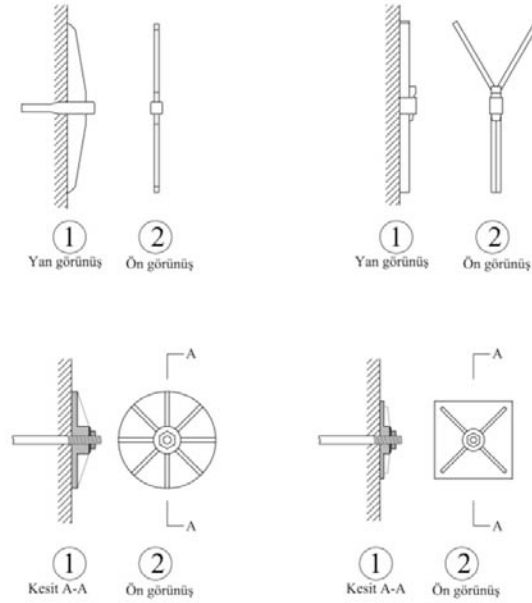
Gergi sistemleri, kemerli ve tonozlu strüktürlerde itkilerin karşılanması, yığma yapıların monolitik davranışının iyileştirilmesi ve düzlem dışı hasarların engellenmesi amacıyla kullanılan geleneksel yöntemlerden biridir. Bu müdahale ile tonoz veya kemerleri taşıyan duvarların birbirlerinden uzaklaşması engellenmektedir. Müdahalenin geriye döndürülebilirliği, kullanılan malzemelerin ilerleyen yıllarda değiştirilebilirliği ve bakımlarının kolay yapılabilmesi, uygulama esnasında yapıya az zarar verilmesi nedeniyle bu teknik oldukça uygundur (Şekil 5.11).



Şekil 5.11: Tonoz itkisinin gergilerle karşılanması.

Gergiler genellikle yuvarlak veya dikdörtgen kesitli çelik çubuklardan imal edilir. Kullanılan malzemenin yapı içinde uzun yıllar bozulmadan kalabilmesi için dayanıklılığı önemlidir. Gerginin duvara bağlantısı kılıç kullanılarak yapılır (Şekil

5.12). Kılıcın biçimi, boyutları ve dışarıdan görünüş görünmeyeceği hem yapı hem de kılıcın kullanılacağı yerin özelliklerine göre değerlendirilir.



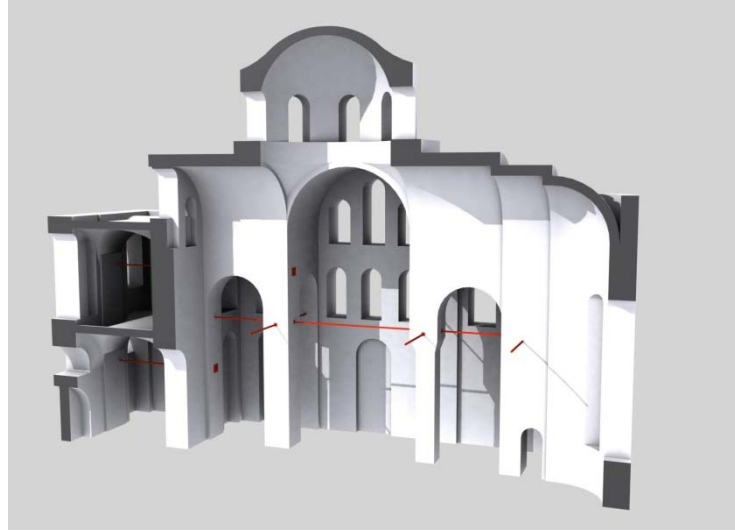
Şekil 5.12: Kılıç tipleri (Giuffre, 2006).

Özellikle mekanik dayanımları iyi olmayan duvarlarda kılıç etrafındaki alanının enjeksiyon yapılarak sağlamlaştırılması etkiyen zorlar karşısında duvarın sağlam bir şekilde kalması için gereklidir. Bu tip duvarlarda sağlamlaştırmanın yapılacağı alanın çapı duvar kalınlığının en az 1,5 katı kadar olmalıdır (Giuffre, 2006, s.169). Gerginin, uygun öngerilme ile kullanılması deprem esnasında sistemin aktif olarak devreye girmesini de sağlamaktadır. Gereğinden fazla öngerme değerlerine ulaşılması durumunun duvarlarda lokal hasarlara neden olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Zeyrek Camii (Pantokrator Kilisesi) Kuzey Bölümü'nde sağlamlaştırma çalışmaları kapsamında yapıya entegre edilmesi düşünülen gergi sistemi iki ana başlık altında toplanmıştır. Bunlardan ilki ana mekânı, diğeri narteks ve galeriyi ilgilendirmektedir.

5.3.4.1 Ana Mekân

Ana mekânda gergi sisteminin taşıyıcı ayakların başlık seviyesinin üzerinden geçirilmesi önerilmektedir (Şekil 5.13). Gergi sistemi, serbest ayakları her iki ekseninde yapının dış duvarlarına bağlayacaktır.



Şekil 5.13 : Ana mekânda önerilen gergi sistemi.

Ana mekânda taşıyıcı ayakların başlık seviyeleri birbirinden farklıdır. Doğudaki ayakların başlıkları +7.90m ve batıdaki ayakların ise +8.25 m seviyesindedir. Bu nedenle, gergi kotunun batıdaki ayakları temel olarak düzenlenmesi önerilmektedir. Ana mekândaki gergilerin, narteks ve galeri gergileri ile ilişkilendirilerek sürekliliği olan bir sistemin oluşturulması ise mümkün olmamaktadır. Galeri ve narteks tonoz itkilerinin karşılanması için kullanılacak gergilerin seviyeleri ana mekân gergilerinden farklı olacaktır (Şekil 5.14).

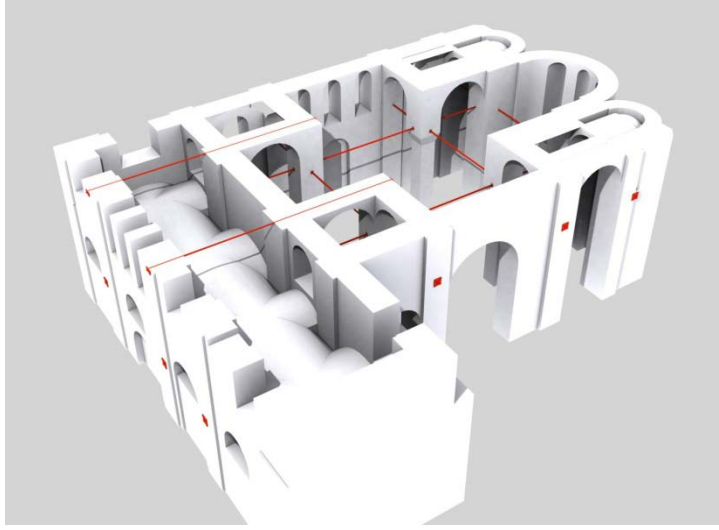


Şekil 5.14 : Gergi sistemi önerisi, doğu-batı ekseninde kesitte kuzeye bakış.

5.3.4.2 Narteks ve Galeri

Zeyrek Camii narteks ve galeri tonoz itkilerinin karşılanması için önerilen gergi sisteminin çapraz tonozların üzengi seviyesinden geçirilmesi önerilmektedir. Narteks gergilerinin bir ucu batı cephesine diğer ucu ise narteks ile ana mekânı birbirinden

ayıran duvara mesnetlenecektir (Şekil 5.14). Daha üst seviyeden geçen galeri gergilerinin doğu uçları ise ana mekâna doğru uzatılmalıdır (Şekil 5.13 ve Şekil 5.15). Bu gergilerin doğudaki uçları duvar içinde epoksi benzeri malzemelerle mesnetlenmemeli, gergi duvar içinden devam ettirilerek yüzeyde bir levha ile son bulmalıdır (Şekil 5.13).



Şekil 5.15: Zeyrek Camii kuzey bölüm için önerilen gergi sistemi.

Galeri ve nartekste doğu-batı eksenindeki gergilere ek olarak yapının batı cephesinde kuzey-güney ekseninde uzanan ve üçlü pencere düzenindeki sütun başlıklarının üzerinden geçen bir gerginin konulması da önerilmektedir.

Kuzey Kilise narteks ve galerisinde kullanılması düşünülen gergi sistemi için yapılacak kontroller, mekânları örten tonozların neden olduğu itkiler ve bu itkileri karşılayan duvar parçaları ile ilgilidir (Ek E, Ek F). Elde edilen sonuçlar gergi ve kılıçların boyutlandırılmasında kullanılmıştır. Hem ana mekân hem de narteks ve galeri için önerilen gergi sistemi, yapının mevcut durumu için hazırlanan modellere eklenecek ve yapı tekrar analiz edilerek değerlendirilecektir.

6. ONARIM VE SAĞLAMLAŞTIRMA ÖNERİLERİNİN ETKİNLİKLERİNİN İRDELENMESİ

Bu bölümde, geliştirilen sağlamlaştırma önerilerinin uygulanması sonrasında elde edilecek yapı için daha önceki bölümlerde takip edilen analiz süreci tekrarlanmıştır. Böylece onarım öncesi ve sonrası için elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, önerilerin ne ölçüde etkili olduğu belirlenmeye çalışılmıştır.

Mevcut taşıyıcı sistemin iyileştirilmesi amacıyla, yapının farklı bölgelerindeki sorunlara bağlı olarak çözümler önerilmiştir. Bu öneriler, hasarlı duvar ve tonozlarda derz onarımları, enjeksiyon, dikiş, bütünleme, kısmi yeniden yapım, ayaklarda metal elemanlarla çemberleme, eğrisel örtü itkilerinin karşılanması ve yapının monolitik davranışının iyileştirilmesi için gergi elemanlarının kullanımını içermektedir. Ancak “sağlamlaştırma önerilerinin etkinliklerinin irdelenmesi” başlığı altında sadece yeni gergi sistemi incelenmiştir. Diğer önerilerin analizlerde değerlendirilmemesinin iki temel nedeni bulunmaktadır. İlk neden, analizlerde kullanılan modelde mevcut hasarların ifade edilememesidir. Örneğin; yapıda tespit edilen çatlaklar modelde yer almamaktadır. Dolayısıyla söz konusu çatlakların dikiş yapılarak onarılmasının modelde karşılığı da bulunmamaktadır. İlerleyen yıllarda yapıdaki hasarların veya onarımlar esnasında tamamlanan tonoz bölümlerinin yeni hazırlanacak modellere dâhil edilmesi mümkündür. Diğer bir neden, çalışmada analizlerin lineer alanda yapılmasıdır. Hasarlı bölgelerin, çatlakların tanımlanması analizlerin lineer olmayan tarafta yapılmasını gerektirmektedir.

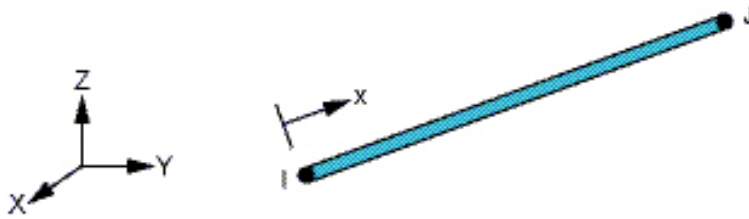
6.1 Analizler

Çalışmada, yapının kendi ağırlığı etkisinde taşıyıcı sistem elemanlarında oluşan gerilme ve şekildeğiştirme durumunun irdelenmesine yönelik doğrusal elastik statik analiz, yapının titreşim frekansları ve modlarının belirlenmesi amacıyla modal analiz ve yapının deprem davranışının anlaşılabilmesi amacıyla spektrum analizleri yapılmıştır.

Onarım öncesi ve onarım sonrasının doğru biçimde karşılaştırılabilmesi için, mevcut durumun incelenmesinde hazırlanan tüm modeller kullanılan geometrik, malzeme, yükleme ve sınır koşulları değiştirilmeksizin onarım sonrası durumu için de kullanılmıştır. Analizlerde malzemenin her doğrultuda aynı özellikli doğrusal elastik bir malzeme olduğu kabul edilmiş ve yapının tüm taşıyıcı sistem elemanlarının aynı malzeme özelliği gösterdiği varsayılmıştır. Malzemenin elastisite modülü 1500 MPa, Poisson oranı 0,15 ve birim hacim ağırlığı 1800 kg/m^3 olarak kabul edilmiştir.

Tüm modellerde tabandaki düğüm noktalarında x, y ve z eksenlerinde yerdeğiştirmeler engellenerek yapının zemine rijit olarak bağlanması sağlanmıştır.

Analizlerde gergilerin ifade edilmesi için Link 8 elemanları kullanılmıştır (Şekil 6.1). Bu eleman düğüm noktalarında tek serbestlik derecelidir ve sadece eksenel yüklere çalışmaktadır. Link 8 elemanı için elastisite modülünün 210000 Mpa ve Poisson katsayısının 0,3 olduğu kabul edilmiştir.

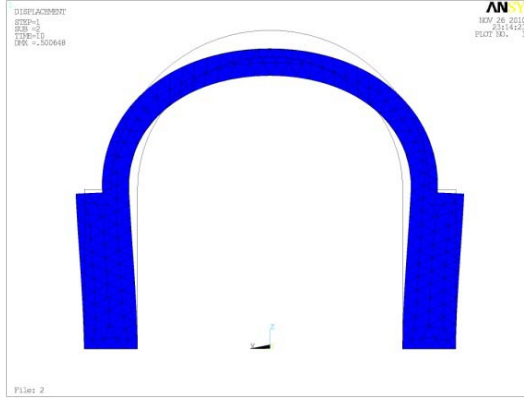


Şekil 6.1: Link 8 elemanı.

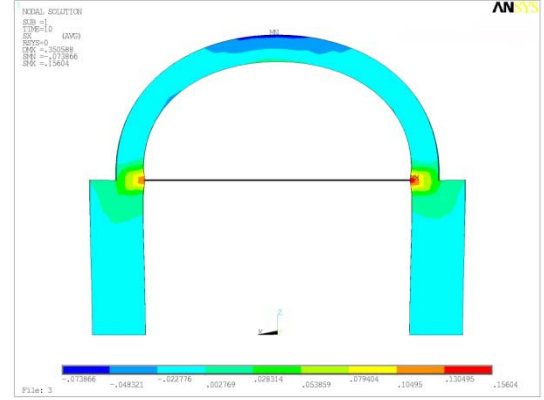
Zeyrek Camii Kuzey Bölümü'nde taşıyıcı sistemin gergilerle sağlamlaştırılması ve bu yeni sistemin analizlerle değerlendirilmesinden önce gergilerin analiz modeline nasıl adapte edileceği konusu üzerinde durulmuştur. Kâgir yapı ile gergilerin ne şekilde ilişkilendirilmesi gerektiğine ilişkin basit bir beşik tonoz modeli kullanılmıştır.

Sayısal modellerde gergi elemanları uçlarından doğrudan doğruya yığma yapıyı ifade eden solid elemanlarının bir köşesine bağlanabilmektedir. Analizlerde gergilerin duvar ile bağlantısı tonoz iç yüzeyinden veya dış yüzeyinden yapılabilir. Bağlantının tonoz başlangıç seviyesinde duvar iç yüzeyinde yapılması durumunda tonozun kendi ağırlığı etkisinde, gergiler duvarların dışa doğru açılmasını engelleyerek çekme kuvvetine maruz kalmaktadır. Ancak bu bağlantı biçiminde, gergilerin tutturulduğu bölgelerde gerilme yığılmalarının varlığı ve birleşim bölgesindeki gerilme dağılımında çekme gerilmelerinin hâkimiyeti dikkati çekmektedir (Şekil 6.2 ve Şekil

6.3). Genel bir değerlendirme yapıldığında, gergilerin tonoz davranışını iyileştirdiği, analiz verilerinde gerilme dağılımı incelenirken gergilerin duvara bağlandığı bölgelerdeki lokal anomalilere dikkat edilmesi gerektiği belirlenmiştir.

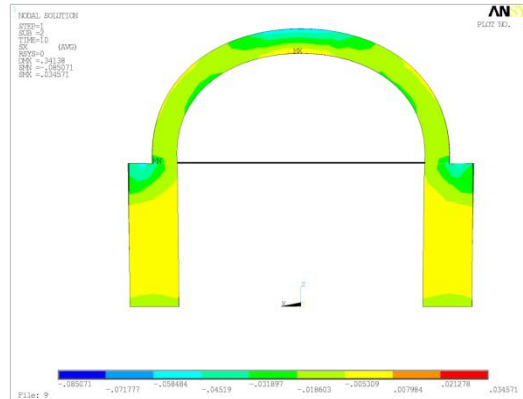


Şekil 6.2: Gergi elemanı olmayan beşik tonoz.



Şekil 6.3: Gergi elemanına sahip beşik tonozda x ekseninde (gergi eksen) gerilme dağılımı.

Analizlerde, gergi bağlantılarının duvar dış yüzeyinden yapılması ve bağlantılarda kılıç veya plaka kullanımını ifade eden sınır koşullarının tanımlanması ile gerçek davranışa yakınsanmaya çalışılmıştır. Yukarıda sözü edilen düzenlemeler, noktasal gerilme yığılmalarının bir ölçüde önüne geçerek birleşim noktasını merkezine alan bir bölgenin zorlanmasını sağlanmıştır. Bu bölgedeki gerilme dağılımı incelendiğinde değerler, gergi ekseninde duvarda basınç gerilmelerinin hâkim olduğunu göstermektedir (Şekil 6.4).



Şekil 6.4: Gergi elemanına sahip beşik tonozda x ekseninde (gergi eksen) gerilme dağılımı (DMX:0,341 mm, SMX:0,035 MPa çekme gerilmesi).

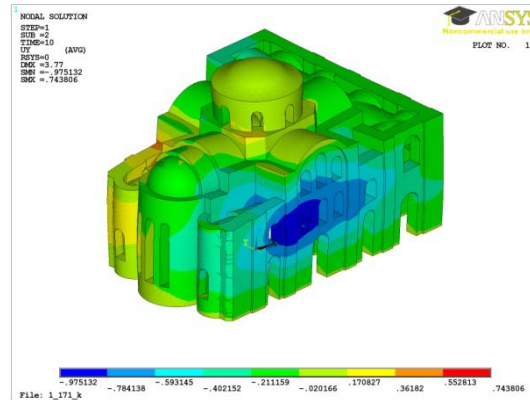
Elde edilen bilgiler ışığında Zeyrek Camii Kuzey Bölümü'nde yapılan analizlerde, gergiler uygun kotlarda düzenlenmiş ve gergilerin kılıç veya plaka kullanılarak

duvarlara bağlanacağı düşünülerek bağlantı noktasının etrafında sınır koşulları tanımlanmış ve bu bölgelerde rijit alanlar oluşturulmuştur.

6.1.1 Doğrusal Elastik Statik Analiz:

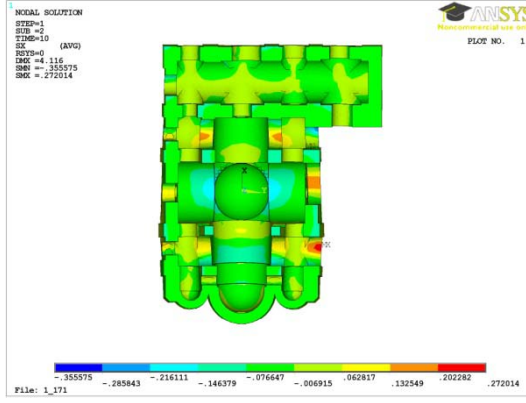
Yapıda gergi sisteminin bulunmadığı mevcut durum için, taşıyıcı sistemin sadece kendi ağırlığı etkisinde elde edilen basınç ve çekme gerilme değerlerinin yapının bütününde hasarlara neden olmayacağı, hasarların sadece bazı elemanlarla sınırlı kalacağı 4. bölümde ifade edilmiştir.

Yapıya gergilerin eklenmesi ile oluşan yeni sistemde toplam yerdeğiştirmenin azaldığı tespit edilmiştir. Gergisiz modellerde, Y eksenindeki yerdeğiştirmelerin doğudaki ayakların hizasında daha büyük oldukları ve bu alanlarda kuzey ve güney duvarlarının dışa doğru ötelendiği belirlenmişti. Gergi sistemi bulunan yapıda da söz konusu bölgelerde benzer dağılımın olduğu, buna karşın yerdeğiştirmelerin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir (Şekil 4.19 ve Şekil 6.5).

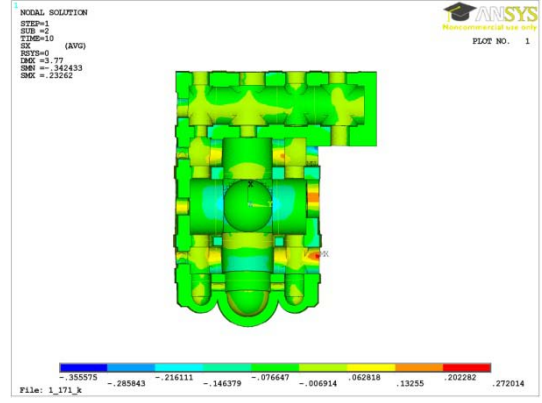


Şekil 6.5: Gergi sistemine sahip yapıda Y ekseninde (kuzey-güney doğrultusunda) yerdeğiştirme (kuzey duvarda 0,975 mm).

Gergi sisteminin bulunduğu yapıda gerilme dağılımının fazla değişmediği, maksimum ve minimum değerlerin bulunduğu alanların aynı kaldığı, ancak gerilme değerlerinin bir miktar azaldığı belirlenmiştir (Şekil 6.6 ve Şekil 6.7). Sonuçlar yapıya eklenen gergi sisteminin, yapının kendi ağırlığı etkisinde taşıyıcı sistem davranışında radikal bir değişikliğe neden olmadığını, gerilme ve şekildeğiştirme değerlerinin azalması ile davranışın olumlu yönde geliştiğini göstermektedir.



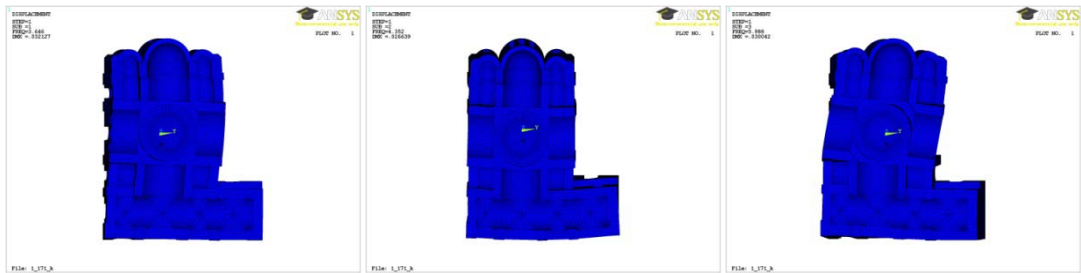
Şekil 6.6: Mevcut yapıda X ekseninde (doğu-batı doğrultusunda) gerilme dağılımı.



Şekil 6.7: Gergi sistemine sahip yapıda X ekseninde (doğu-batı doğrultusunda) gerilme dağılımı.

6.1.2 Modal Analiz:

Sistemin titreşim frekansları ve bu frekanslara karşılık gelen mod şekillerinin tespit edilmesi amacıyla gergi sistemi bulunan yapı için modal analiz yapılmıştır. Yapının birinci modunda sistemin kuzey-güney ekseninde, ikinci modunda doğu-batı ekseninde yaptığı hareket etkindir. Üçüncü modda yapı burulma hareketi yapmaktadır. Sonuçlar mod şekillerinde değişikliğin meydana gelmediğini, titreşim frekanslarındaki değişimin çok sınırlı olduğunu göstermektedir (Çizelge 4.1). Mevcut taşıyıcı sistemin birinci mod frekansı 3.645 Hz, ikinci mod frekansı 4.35 Hz, üçüncü mod frekansı 5,99 Hz değerlerine yükselmiştir (Şekil 6.8). Bu durum, ana mekânda sadece tek bir seviyede kullanılan gergilerin yeterince rijit davranış sergileyen sistemi daha fazla rijitleştirmede olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.8: Gergi sistemine sahip yapının titreşim modları.

6.1.3 Modal Spektral Analiz

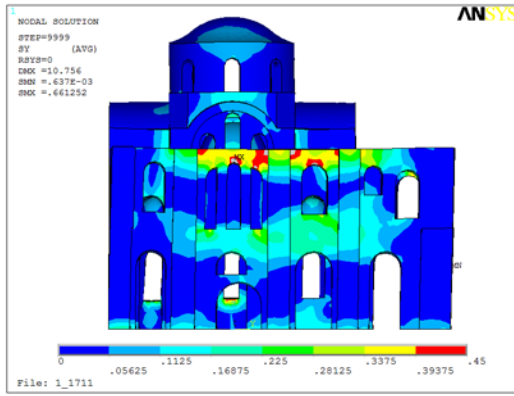
Çalışmada, statik ve modal analizlerden sonra gergilerle sağlamlaştırılan yapının deprem davranışının daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla her iki ekseninde modal spektral analiz yapılmıştır. Sağlamlaştırma öncesi ve sonrasında yapı davranışlarının aynı

koşullarda karşılaştırılabilmesi için analiz parametrelerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

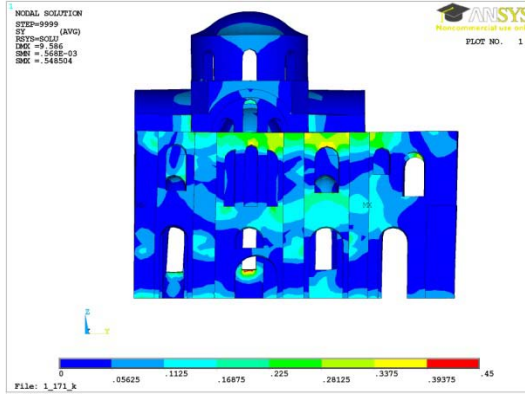
6.1.3.1 X ekseninde modal spektral analiz

Doğu-batı doğrultusundaki etkin bir depremde, taşıyıcı sistemin davranışı X ekseninde modal spektral analizlerle incelenmiştir. İkinci modun etkili olduğu analizlerde X eksenı doğrultusunda toplam yerdeğışmelerin küçüldüğü belirlenmiştir.

Mevcut taşıyıcı sistemde özellikle galeri batı duvarının düzlem dışı davranış sergilediğı, duvarın merkezde bulunan bölümünde yerdeğıştirmelerin ve Y ekseninde gerilmelerin daha büyük olduğı 4. bölümde yapılan analizlerde belirlenmiştir (Şekil 4.26 ve Şekil 4.27).



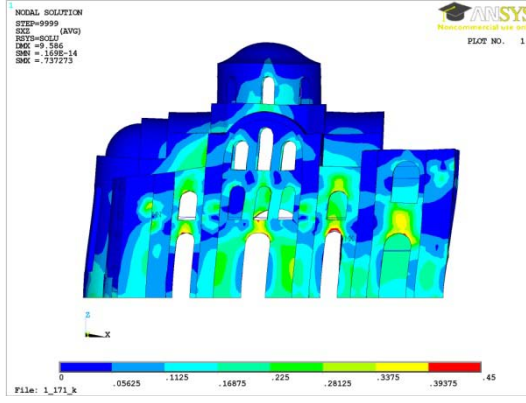
Şekil 6.9: Mevcut taşıyıcı sistem, batı duvarında y ekseninde gerilme dağılımı.



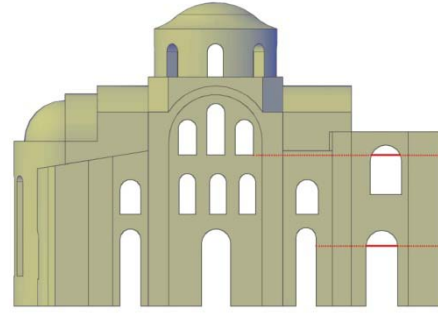
Şekil 6.10: Gergi sistemine sahip taşıyıcı sistem, batı duvarında y ekseninde gerilme dağılımı.

Gergi sistemi bulunan taşıyıcı sistemde doğu-batı doğrultusunda etkin deprem durumunda batı duvarında düzlem dışı davranışının engellendiğı ve bu nedenle bu duvardaki gerilme ve yerdeğıştirme değerlerinin küçüldüğü tespit edilmiştir (Şekil 6.9 ve Şekil 6.10). Batı duvarı ile galeriyi örten tonozlar arasındaki çekme gerilmelerinin de küçüldüğü görülmektedir.

Depremin etkin olduğı doğrultuya paralel konumlanan güney ve kuzey duvarlarındaki kayma gerilme değerlerinin bir miktar azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 6.11). sistemin kuzey ve güney duvarlarında duvar düzleminde sadece iki adet gergi eklenmiştir. Kuzey duvarındaki bu gergilerin her ikisi de yapının kuzeybatı köşesinde son bulmaktadır. Narteksi ilgilendiren gergi, duvarın batı tarafındaki ikinci açıklığında son bulmaktadır (Şekil 6.12).



Şekil 6.11: Gergi sistemine sahip taşıyıcı sistem, kuzey duvarında kayma gerilme dağılımı.

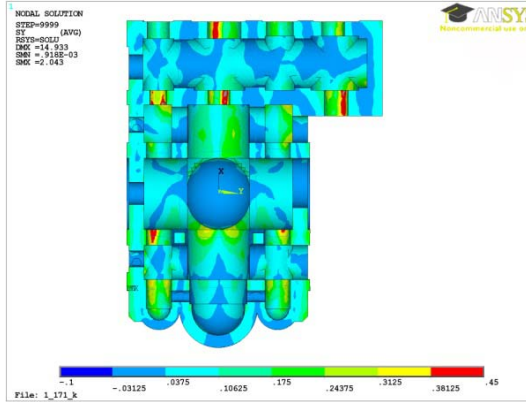


Şekil 6.12: Kuzey duvarında narteks ve galeri parçalarına eklenen gergiler.

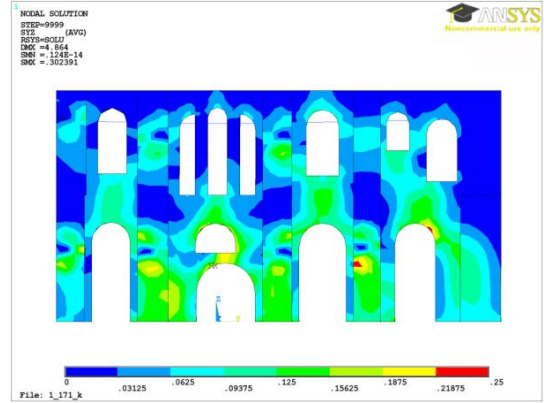
6.1.3.2 Y ekseninde modal spektral analiz

Kuzey-güney doğrultusundaki etkin bir depremde, taşıyıcı sistemin davranışı Y ekseninde modal spektral analizlerle incelenmiştir. Yapının birinci modunun etkili olduğu analizde yerdeğiştirme ve gerilme dağılımları karşılaştırılmıştır.

Gergi sistemi olmayan yapının Y ekseninde modal spektral analizleri, deprem doğrultusundaki toplam yerdeğiştirme ve çekme gerilme değerlerinin küçüldüğünü göstermektedir (Şekil 6.13 ve Şekil 4.31).



Şekil 6.13: Gergi sistemine sahip taşıyıcı sistem, y ekseninde gerilme dağılımı.



Şekil 6.14: Gergi sistemine sahip sistem, batı duvarında kayma gerilmesi dağılımı.

Hem narteks, hem de galeri katlarında kuzey-güney doğrultusunda yerleştirilen gergiler, batı duvarında maksimum kayma gerilme değerinin küçülmesine neden olmuştur (Şekil 6.14 ve Şekil 4.35). Özellikle narteksteki gergilerin duvarın kendi düzleminde davranışını olumlu yönde etkilediği söylenebilir. Doğu duvarında ise

kayma gerilmelerindeki azalma sınırlı olmuştur. Bunun nedeni batı duvarının aksine doğu duvarında herhangi bir gergi elemanının kullanılmamasıdır.

6.2 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan analizler sonrasında önerilen gergi sisteminin, yapı davranışına genel olarak olumlu katkılar sağladığı görülmüştür. Ancak toplam yerdeğiştirme ve bazı bölgelerde gerilme değerlerinde azalma olmasına karşın, taşıyıcı sisteme eklenen gergilerin yapının davranışına katkısının sınırlı olduğu düşünülmektedir. Zeyrek Camii'nin oldukça rijit bir yapı davranışı sergilediği ve gergi sistemi olmayan taşıyıcı sisteme ana mekânda sadece bir seviyede gergi eklenmesinin taşıyıcı sistem davranışını fazlaca etkilemediği düşünülmektedir. Önerinin, birden fazla seviyede sürekliliği olan ve tüm yapıyı kuşaklayan bir yapıda olmaması nedeniyle katkısı da sınırlı olmaktadır.

Bu noktada, yapı davranışını daha açık biçimde iyileştirebilecek bir gergi sisteminin neden kurgulanmadığı sorulabilir. Zeyrek Camii özelinde söz konusu soru, “Deprem ve yangınlara rağmen ayakta kalabilmiş bir Ortaçağ anıtının sağlamlaştırılması için alınması gereken önlemlerin kapsam ve biçimleri konusunda sınır ne olmalıdır?” şeklindedir. Ancak bu soru sadece inşaat mühendislerinin vereceği kararla cevaplandırılmamalıdır. Cevap, mühendis ile birlikte yapının korunmasında görev alan diğer meslek gruplarına mensup uzmanlar ile birlikte aranmalıdır. Bu çalışmada, yapının sağlamlaştırılması konusunda 5. bölümde üzerinde durulan ilkeler temel alınmıştır. Önerilerin uygulanabilir ve minimum müdahale şartlarını sağlamasına dikkat edilmiştir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İstanbul ve çevresinde tarih boyunca birçok yıkıcı deprem yaşanmıştır. Ambraseys ve Jackson'ın, son 500 yılda Kuzey Anadolu Fay'ında meydana gelen depremlerin tarihlerini, yerlerini ve olası büyüklüklerini bir araya getiren çalışması, büyüklüğü $M \geq 7$ olan 5 depremin yaşandığı 20. yüzyılın oldukça aktif olduğunu göstermektedir (Ambraseys, Jackson, 2000, s.F4). İstanbul, Kuzey Anadolu Fayı'nın Marmara Denizi'nin kuzeyindeki bölümüne yakınlığı nedeniyle oldukça riskli bir bölgede bulunmaktadır. Olası depremin yeri ve büyüklüğü ile ilgili farklı görüşler bulunmaktadır. Ancak uzmanların fikir birliğinde olduğu temel nokta yakın gelecekte İstanbul yakınında büyüklüğü $M \geq 7$ olan bir depremin yaşanma olasılığının yüksek olduğudur. Zeyrek Camii (Pantokrator Kilisesi) için geliştirilen koruma önerileri, beklenen İstanbul Depremi'nde yapının daha az zarar görmesini hedeflemektedir.

Çalışma kapsamında, tarihinde birçok deprem ve yangın geçiren Zeyrek Camii'nin (Pantokrator Kilisesi) kuzey bölümü incelenmiş ve koruma önerileri geliştirilmiştir. Kuzey bölümün strüktürel açıdan yapı bütünü içerisinde en hasarlı kısım olması ve bu nedenle olası bir sağlamlaştırma çalışmasında, öncelikli konumda olması bu bölümün incelenmesine neden olmuştur. Koruma önerileri, Dünya Mirası statüsündeki eserin beklenen İstanbul Depremi'nde daha az zarar görmesini hedeflemektedir.

Çalışmada, taşıyıcı sistem davranışı hakkında daha fazla bilgi sağlamak amacıyla sonlu elemanlar yöntemine dayalı analizler yapılmıştır. Sayısal analizlerde kullanılan eleman tipi, eleman boyutu, elemanların serbestlik dereceleri, katı modelin sonlu elemanlara ayrılma biçimi, malzeme özellikleri ve sınır koşulları gibi birçok parametrenin elde edilen sonuçları önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Sadece bu tip analiz verilerinden yola çıkılarak, tarihi yapıların taşıyıcı sistem onarımı için öneriler geliştirilmesinin yanlış bir yaklaşım olacağı düşünülmektedir.

Doğrusal elastik statik analizlerde, basit sistemlerden daha karmaşık sistemlere doğru geliştirilen farklı geometrik modeller kullanılarak kubbe, kubbe kasnağı ve tonoz parçalarının sonraki adımlarda eklemlenen her bir parça ile tüm yapı davranışındaki değişimlerin takip edilebilmesi sağlanmıştır. Kubbe, kubbe kasnağı, tonozlardan oluşan çekirdek bölüme, bema, mekânın köşelerinde bulunan tonozlu hacimler, apsis, pastoforion, çevre duvarları, narteks ve galerinin eklenmesiyle, yapı rijitliğinin arttığı ve kendi ağırlığı etkisinde yapıda meydana gelen yerdeğiştirmelerin önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Analizler, yapıdaki çekme ve basınç gerilmelerinin yapı elemanlarında hasarlara neden olabilecek düzeye çıkmadığını göstermektedir. Güneydoğu ayağındaki dışmerkezliğin, ayağın kuzeybatı tarafında basınç gerilmelerinin büyümesine neden olduğu ve bu bölgedeki basınç gerilmelerinin yapının diğer bölgelerindeki düşey taşıyıcılarda oluşan gerilmelerden daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu ayaktaki basınç gerilmelerinin tek başına ezilme hasarlarına neden olabilecek büyüklükte olmadığı, ancak depremin düşey bileşeninin etkisinde ayaktaki basınç gerilmelerinin artabileceği ve ayağın yapımındaki kusurların etkisiyle birlikte mevcut hasarların ortaya çıkabileceği düşünülmektedir.

Yapının titreşim frekansları ve modlarının belirlenmesi amacıyla yapılan modal analizler, ana tonozlar ve bunların üzerinde yükselen silindirik kasnaklı kubbeden oluşan ana yapıya, naos köşelerinde yer alan tonozlu mekânlar, apsis, kuzey ve güney pastoforion, narteks ve galeri eklemlendikçe yapının rijitliğinin arttığını ve titreşim periyotunun düştüğünü göstermektedir. Yapı, birinci moda kuzey-güney, ikinci modda doğu-batı doğrultusunda hareket etmektedir. Üçüncü modda burulma hareketinin etkin olduğu tespit edilmiştir.

Yapının deprem davranışı hakkında ipuçları sunan modal spektral analizler, batı cephesine dik etkiyen yatay yüklerin, bu duvarı dışa doğru ittiğini göstermektedir. Bu süreç, narteks ve galeri çapraz tonozları ile batı duvarı arasında çekme gerilmelerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Gergilere sahip olmayan narteks ve galeride, gerilme değerlerinin, tonozlarda hasarlara neden olabileceği düşünülmektedir.

Doğu-batı doğrultusunda etkili olabilecek bir depremde, kuzey ve güney duvarlarında kayma gerilmelerinin taşıyıcı sistemin diğer elemanlarına göre daha

büyük değerlere ulaştığı görülmüştür. Gerilme dağılımındaki yüksek değerlerin beşik tonozlar altındaki duvarları ilgilendirdiği ve bu nedenle hasarların söz konusu bölgelerde oluşabileceği, taşıyıcı sistemin birincil elemanlarının bu durumdan etkilenmeyeceği düşünülmektedir.

Kuzey-güney doğrultusunda etkiyen yatay yükler etkisinde, yapının doğu cephesinde kayma gerilmesi dağılımının hasarlara yol açabilecek düzeyde olduğunu göstermektedir. Deprem etkisinde özellikle pastoforionlarda, zeminden başlayarak çatı saçağına kadar çatlakların ortaya çıkması beklenmektedir. Prof. Dr. Zeynep Ahunbay ve Prof. Dr. Metin Ahunbay'ın 2001-2005 yılları arasında doğu cephesinde yürüttükleri onarım çalışmasında kuzey pastoforionda bu tip bir çatlaklar tespit edilmiş ve onarılmıştır.

Çalışmada geliştirilen sağlamlaştırma önerileri, tarihi yapıların onarım çalışmalarına ilişkin ulusal ve uluslar arası yazılı metinler ele alınarak, bu metinlerin ortaya koyduğu yaklaşım ve kurallar çerçevesinde hazırlanmıştır. Bu öneriler; derz onarımları, enjeksiyon, dikiş, çemberleme ve gergi kullanımı gibi müdahalelerden oluşmaktadır. Önerilerin “*minimum müdahale maksimum etkinlik*” çerçevesinde yapılmasına ve yapının özgün taşıyıcı sistem şemasında değişime neden olmamasına dikkat edilmiştir.

Kuzey Bölüm için geliştirilen öneriler arasında en kapsamlısı gergi sisteminin tekrar oluşturulmasıdır. Bu müdahaleyle yapının geçmişte yitirdiği yapısal elemanları tekrar kazanması sağlanacaktır. Gergi sisteminin, kuzey bölüm ile ilişkili olduğu diğer bölümler arasında önemli bir rijitlik farkına neden olmayacağı görülmüştür. Böylece yapı kompleksinin diğer bölümlerinde olası bir deprem sırasında ortaya çıkabilecek beklenmedik etkilerin önüne geçilmiştir.

Çalışmanın taşıyıcı sistem analizleri ve sağlamlaştırma önerilerinin geliştirilmesi aşamalarında, ülkemizde kültür varlıklarının korunması ve deprem risklerine karşı hassasiyetin azaltılması konusunda herhangi bir yönetmelik veya yol gösterici bir rehberin olmaması dikkati çekmiştir. Bu durum tarihi yapıların onarımı konusunda çalışan mühendisleri sıkıntıya sokmakta ve hasarlı bir yapı için birbirinden çok farklı müdahale biçimlerinin ortaya konulmasına neden olmaktadır. Konuyla ilgili bir yol gösterici kılavuzun hazırlanmasının faydalı olacağı düşünülmektedir. Söz konusu

Çalışmanın, Türkiye’de bulunan tarihi yapıların karakteri gözetilerek farklı meslek gruplarından uzmanların işbirliği ile hazırlanması gerekmektedir.

Bu çalışmada bir Bizans Dönemi yapısı incelenmiştir. İstanbul ve yakın çevresinde benzer taşıyıcı sistem şemasına sahip çok sayıda yapı bulunmaktadır. Bu yapılardan bazıları oldukça harap durumdadır; bazıları ise ufak hasarlarla günümüze ulaşabilmiştir. Benzer taşıyıcı sisteme sahip yapıların hasarlarını sistematik bir biçimde ele alan bir çalışmanın, koruma esaslarının geliştirilmesinde ve kimi hasar biçimleri için bir onarım müdahale altlığı oluşturulmasında temel olabileceği düşünülmektedir. Bu tip alışmalar İtalya’da kilise yapıları için yürütülmektedir. Sıklıkla karşılaşılan hasar tipleri şekillerle ifade edilerek söz konusu hasarlara neden olan olası süreçler hakkında bilgiler verilmiş ve hasarların onarımları için olası müdahale nerileri sıralanmıştır. Bu tip çalışmaların, aynı mekanizmalarla oluşan hasarlar için birbirinden çok farklı onarım biçimlerini ortadan kaldırdığı ve tarihi yapılardan sorumlu mimar ve mühendislere yol gösterici nitelikte olduğu düşünülmektedir.

Yeni yapıların inşasında inşaat mühendisinin rolü, sınırları tanımlı bir ereve içerisindedir; mühendis sonuçları yüksek hassasiyette çözülebilecek problemlerle uğraşır. Tarihi yapıların karakteri ise mühendisin alışageldiği kesinlikte bir çözümü mümkün kılmamaktadır. Bunun yanında, birçok inşaat mühendisi ne mesleki eğitiminde, ne de deneyiminde tarihi yapılarla ilgili çalışmadığından bu alana yabancıdır. Modern yapıların tasarımı ve değerlendirilmesi aşamasında mühendisin çözüme giderken kullandığı kurallar ve yönetmelikler tarihi yapıların onarımı için uygun olmamaktadır. Çalışmada kullanılan yöntemin, benzer özellikler sergileyen tarihi yapıların taşıyıcı sistemlerinin onarım ve sağlamlaştırma çalışmalarında kullanılabileceği, bu açıdan çalışmanın konu ile ilgilenen mühendislere yol gösterici bir kaynak olabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Ahunbay, Z.**, (2009). 1509 Earthquake and the Preservation of Cultural Heritage in Turkey, *International Symposium on Historical Earthquakes and Conservation of Monuments and Sites in the Eastern Mediterranean Region, 500th Anniversary Year of the 1509 September 10, Marmara Earthquake*, Istanbul, Turkey, 10-12 September 2009.
- Ahunbay, Z., Ahunbay, M.**, (2001). Restoration Work at the Zeyrek Camii 1997-1998, in *Byzantine Constantinople: Monuments, Topography, and Everyday Life*, p.117-132, Ed. Necipoglu, N., Brill, London.
- Ahunbay, Z., Ahunbay, M.**, (2005). Unesco Destekli Bir Proje, *Tasarım Dergisi*, **154**, s.72-85.
- Aksoy, İ. H.**, (1982). *İstanbul'da Tarihi Yapılarda Uygulanan Temel Sistemleri*, (doktora tezi), İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Ambraseys, N.N.**, (2001). The earthquake of 10 July 1894 in the Gulf of Izmit (Turkey) and its relation to the earthquake of 17 August 1999, *Journal of Seismology*, **5**, 117–128.
- Ambraseys, N.N.**, (2006). Comparison of frequency of occurrence of earthquakes with slip rates from long-term seismicity data: the cases of Gulf of Corinth, Sea of Marmara and Dead Sea Fault Zone, *Geophysical Journal International*, **165**, 516–526.
- Ambraseys, N.N., Jackson J.A.**, (2000). Seismicity of the Sea of Marmara Region (Turkey) since 1500, *Geophysical Journal International*, **141-3**, F1 - F6.
- ANSYS Elements Reference and ANSYS Structural Guide**, 2003 ANSYS Inc.
- Binda, L., Baronio, G., Tedeschi, C.**, (1997). Thick Mortar Joints in Byzantine Buildings: Study of Their Composition and Mechanical Behaviour, *International Conference Studies in Ancient Structures*, Istanbul, Turkey, 14-18 July 1997.
- Böke, H., Akkurt, S., İpekoğlu, B.**, (2004). Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harcı ve Sıvalarının Özellikleri, *Yapı Dergisi*, **264**, 90-95.
- Buchwald, H.**, (1977). Sardis Church E-A Preliminary Report, JÖB (Jahrbuch der Österreichischen Byzantinistik), 26.
- Croci, G.**, (1998). *The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage*, Computational Mechanics Publications, Southampton.
- Croci, G.**, (2005). *Conservazione e Restauro Strutturale dei Beni Architettonici*, UTET Libreria, Italia.

- Çuhadaroğlu, F.**, (1974). Zeyrek Kilise Camii Restitüsyonu, *Rölöve Restorasyon Dergisi*, **1**, 99-107.
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik**, 2007. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- Ebersolt, J., Thiers, A.**, (1913). *Les églises Constantinople - Album des Planches*, Ernest Leroux, Paris.
- Erguvanlı, K.**, (1983). *Mühendislere Jeoloji*, İTÜ Maden Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul.
- Esmer, M.**, (2004). *Zeyrek Camii Hünkâr Kasrı ve Mahfili Restorasyonu*, (yüksek lisans tezi), İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Eyice, S.**, (1993). Zeyrek Kilise Camii, *Dünden Bugüne İstanbul Ansiklopedisi*, (Cilt 8, Sf. 555-557). Türkiye Ekonomik ve Toplumsal Tarih Vakfı, İstanbul.
- Eyidoğan, H.**, (2007) Marmara Bölgesinin ve İstanbul Kentinin Deprem Tehlikesi Üzerine bir Derleme, *TMMOB Afet Sempozyumu*, Ankara, 5-7 Aralık 2007.
- Gavrilovic, P., Ginell, W. S., Sendova, V., Sumanov, L.**, (2004). *Conservation and Strengthening of Byzantine Churches in Macedonia*, Getty Publications, Los Angeles.
- Giuffre, A.**, (2006). *Sicurezza e Conservazione dei Centri Storici, Il Caso Ortigia*, Editori Laterza, Siracusa, İtalia.
- Grillo, F.**, (2002). *Edifici in Muratura, Analisi, Diagnosi ed Interventi di Recupero*, Edizioni Kappa, Roma.
- Gurlitt, C.**, (1999). *İstanbul'un Mimari Sanatı*, Enformasyon ve Dokümantasyon Hizmetleri Vakfı, Ankara.
- ICOMOS Charter, Principles for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage**, (2003). *The International Council on Monuments and Sites*, Zimbabwe.
- International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites (Venice Charter)**, (1964). *The International Council on Monuments and Sites*.
- İstanbul için Deprem Master Planı**, (2003), *İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Planlama ve İmar Dairesi Zemin ve Deprem İnceleme Müdürlüğü*, İstanbul
- Kahya, Y.**, (1992). *İstanbul Bizans Mimarisinde Kullanılan Tuğlanın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri*, (doktora tezi), İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kalagri, A., Miltiadou-Fezans, E., Vintzileou E.**, (2010). Design and Evaluation of the Hydraulic Grouts for the Strengthening of Stone Masonry Historic Structures, *Materials and Structures*, **43**, 1135-1146.

- Karaveziroglou, M., Papayianni, J., Penelis G.,** (1989). The Dependent Deformation of Brick Masonry, *International Technical Conference on Structural Conservation of Stone Masonry*, Athens, Greece, 31.10.1989-03.11.1989.
- Koçyiğit, A.,** (2006). Marmara Bölgesinin Depremselliği ve Deprem Kaynakları (Faylar), *Türkiye Jeoloji Kurultayı*, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, Ankara.20-24.03.2006.
- Krautheimer, R.,** (1975). *Early Christian and Byzantine Architecture*, Penguin Books, Middlesex.
- Kuniholm, P. I., Striker, C. L.,** (1974). The Tie-Beam System in the Nave Arcade of St. Eirene: Structure and Dendrochronology, *Istanbuler Mitteilungen Beiheft*, **18**, 229-240.
- Kuniholm, P. I., Striker, C. L.,** (1990). Dendrochronology and the Architectural History of the Church of the Holy Apostles in Thessaloniki, *Architectura: Zeitschrift für Geschichte der Baukunst*, **20**,1-26.
- Linee Guida per l'applicazione al patrimonio culturale della normativa tecnica di cui all'Ordinanza P.C.M. 3274/2003,** Presidenza del Consiglio dei Ministri Dipartimento della Protezione Civile, Italia.
- Mamboury, E., Demangel, R.,** (1939). *Le quartier des Manganes et la première région de Constantinople*, Paris.
- Mango, C.,** (1978). *Architettura Bizantina*, Electa Editrice, Milano.
- Mathews, T. F.,** (1973). Observations on the Church of Panagia Kamariotissa on Heybeliada (Chalke), *Dumbarton Oaks Papers*, **27**.
- Mazlum, D.,** (2009). 1766 Earthquake and its Impact on the Monument of Istanbul, *International Symposium on Historical Earthquakes and Conservation of Monuments and Sites in the Eastern Mediterranean Region, 500th Anniversary Year of the 1509 September 10, Marmara Earthquake*, Istanbul, Turkey, 10-12 September 2009.
- Megaw, A.** (1964). The Original Form of the Theotokos Church of Constantine Lips, *Dumbarton Oaks Papers*, **18**.
- Millingen, A.,** 1974. Byzantine Churches in Constantinople, *Architectural Forum*, **1963/5**, 131, Reprint of 1912 ed. published by Macmillan, London.
- Miltiadou, A., Delinikola, E., Koumantos A.,** (2007a). Design of Structural Interventions to the Byzantine Church of Panaghia Krina in Chios Island, *International Symposium Studies on Historical Heritage*, Antalya, Turkey.
- Miltidou, A., Delinikola, E., Koumantos A.,** (2007b). The Use of Radar Technique and Boroscopy in Investigating Historic Masonry: Application of the Techniques in Byzantine Monuments in Greece, *International Symposium Studies on Historical Heritage*, Antalya, Turkey.
- Moropoulou, A., Cakmak, A.S., Lohvyn N.,** (2000). Earthquake resistant construction techniques and materials on Byzantine monuments in Kiev, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **19**, 603-615.

- Moropoulou, A., Cakmak, A.S., Biscontin, G., Bakolas, A., Zendri, E.,** (2002). Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed brick/lime mortars of Justinian's Hagia Sophia, *Soil Construction and Building Materials*, December 2002, 543-552.
- Müller-Wiener, W.,** (2001). *İstanbul'un Tarihsel Topografyası*, Yapı Kredi Yayınları, İstanbul.
- Okay, A.I., Kaşlılar, A., Imren, C., Boztepe-Güney, A., Demirbağ, E., Kuşçu, I.,** (2000). Active faults and evolving strike-slip basins in the Marmara Sea, northwest Turkey: a multichannel seismic reflection study, *Tectonophysics* **321**, 189–218.
- O.P.C.M. 3274/2003-3431/2005 Norme Tecniche per il Progetto, la Valutazione e l'adeguamento Sismico degli Edifici,** Presidenza del Consiglio dei Ministri Dipartimento della Protezione Civile, Italia.
- Ousterhout, R.,** (1997). The Construction of Vaulting in Later Byzantine Architecture, *International Conference on Studies in Ancient Structures*, İstanbul, Turkey.
- Ousterhout, R.,** (1999). *Master Builders of Byzantium*, Princeton University Press, Philadelphia.
- Ousterhout, R.,** (2000). Contextualizing the Later Churches of Constantinople: Suggested Methodologies and a Few Examples, *Dumbarton Oaks Papers*, **54**, 241-250.
- Ousterhout, R.,** (2001). Interpreting the Construction History of Zeyrek Camii in İstanbul (Monastery of Christ Pantokrator), *2nd International Congress Studies in Ancient Structures*, İstanbul, Turkey.
- Ousterhout, R., Ahunbay, Z., Ahunbay M.,** (2000). Study and restoration of the Zeyrek Camii in İstanbul: First report 1997-1998, *Dumbarton Oaks Papers*, **54**, 265-270.
- Öztin, F.,** (1994). *10 Temmuz 1894 İstanbul Depremi*, T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi, Özyurt Matbaacılık, Ankara.
- Papayianni, I., Stefanidou, M., Pachta V.,** (2010). Grouts for Injection of Historical Masonries: Influence of the Binding System and other Additions on the Properties of the Matrix, *2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop*, Prague, Czech Republic, 22-24 September 2010.
- Rappoport, P.,** (1995). *Building the Churches of Kievan Russia*, Variorum.
- Recommendation No. R (93)9,** 1993. The Protection of the Architectural Heritage Against Natural Disasters, Council of Europe.
- Sayar, M., Sayar, C.,** (1962). *İstanbul'un Surlar İçindeki Kısımının Jeolojisi*. Kâğıt ve Basım İşleri A.Ş. İstanbul.
- Stein, R. S., Parsons, T., Toda, S., Barka, A., Dieterich, J.,** (2000). Looking beyond Izmit's fate to İstanbul's future; assessing the odds of large, damaging, earthquakes in the Marmara Sea, *Science*, **288-5466**, 661.

- Striker, C.** (1981). *The Myrelaion (Bodrum Camii) in Istanbul*, Princeton University Press, New Jersey.
- Striker, C., Kuban D., Berger, A.,** (1997). *Kalenderhane in Istanbul: The Buildings, Their History, Architecture, and Decoration Final Reports on the Archaeological Exploration and Restoration at Kalenderhane Camii 1966-1978*, Verlag Philip Von Zabern GmbH, Mainz.
- Şengör, A.M.C. , Tüysüz, O. Imren, C., Sakıncı, M., Eyidoğan, H., Görür, N., Le Pichon, X., Rangin C.** (2005). The North Anatolian Fault: A New Look, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37-112.
- Tarihi Yarımada Fatih-Eminönü 1/5000 Ölçekli Koruma Amaçlı Nazım İmar Planı Raporu**, 2003. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Planlama ve İmar Müdürlüğü, Rapor, İstanbul.
- Toğrol, E.,** (1986). *Haliç'in Geoteknik Sorunları ve Çözüm Yolları*, Boğaziçi Üniversitesi Matbaası, İstanbul.
- Türer, A.,** (2010). Conservation of Heritage Structures in Turkey: Practice and Difficulties, *7th International Conference on Structural Analysis of Historic Constructions*, Shanghai, China, 6-8 October 2010.
- Usta, E.,** (2005). *İstanbul Metrosu Yenikapı-Unkapanı arasının Mühendislik Jeolojisi* (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Ürekli, F.,** (1999). *İstanbul'da 1894 Depremi*, İletişim Yayınları.
- Vocotopoulos, P. L.,** (1979). The concealed course technique: further examples and a few remarks, *JÖB(Jahrbuch der Österreichischen Byzantinistik)*, **28**.
- Yüzügüllü, O., Durukal, E.,** (1997). The Effects of the Train on the Küçük Ayasofya Mosque in Istanbul, *International Conference Studies in Ancient Structures*, Istanbul, Turkey, 14-18 July 1997.
- Ziegenbalg, G., Brümmer K., Pianski J.,** (2010). Nano-Lime- a New Material for the Consolidation and Conservation of Historic Mortars, *2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop*, Prague, Czech Republic, 22-24 September 2010,
- Url-1** <<http://www.earth.google.com>> , alındığı tarih 12.03.2005.
- Url-2** <<http://www.international.icomos.org/about.htm>> , alındığı tarih: 17.01.2010.

EKLER

EK A : İstanbul ve yakın çevresinde Ortaçağ yapım geleneğine ilişkin şekiller

EK B : Zeyrek Camii'ne ilişkin şekiller

EK C : Analizlerde kullanılan geometrik modele ilişkin şekiller

EK D : Çizimler

EK E : Tonoz itkileri ve gergi sistemine ilişkin kontroller

EK F : Galeri ve narteks tonoz itkilerine yönelik hesap sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması

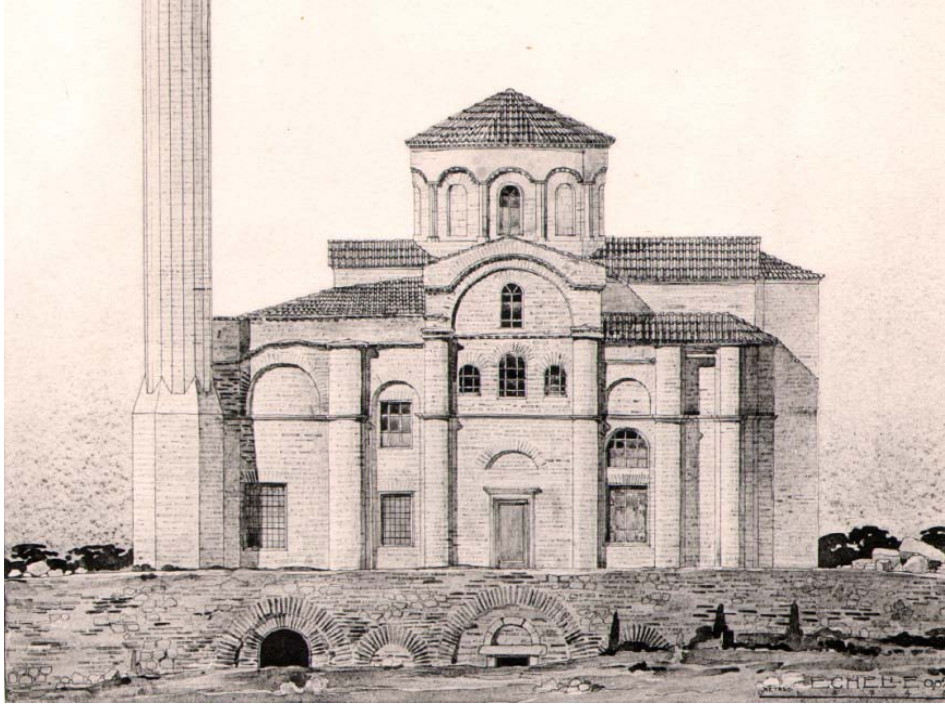
EK A: İstanbul ve yakın çevresinde Ortaçağ yapım geleneğine ilişkin şekiller



Şekil A.1 : Zeyrek Camii Güney Kilise galerisi ile Kuzey Kilise galerisinin birleşimi (Ousterhout, 2000 f12 s12).



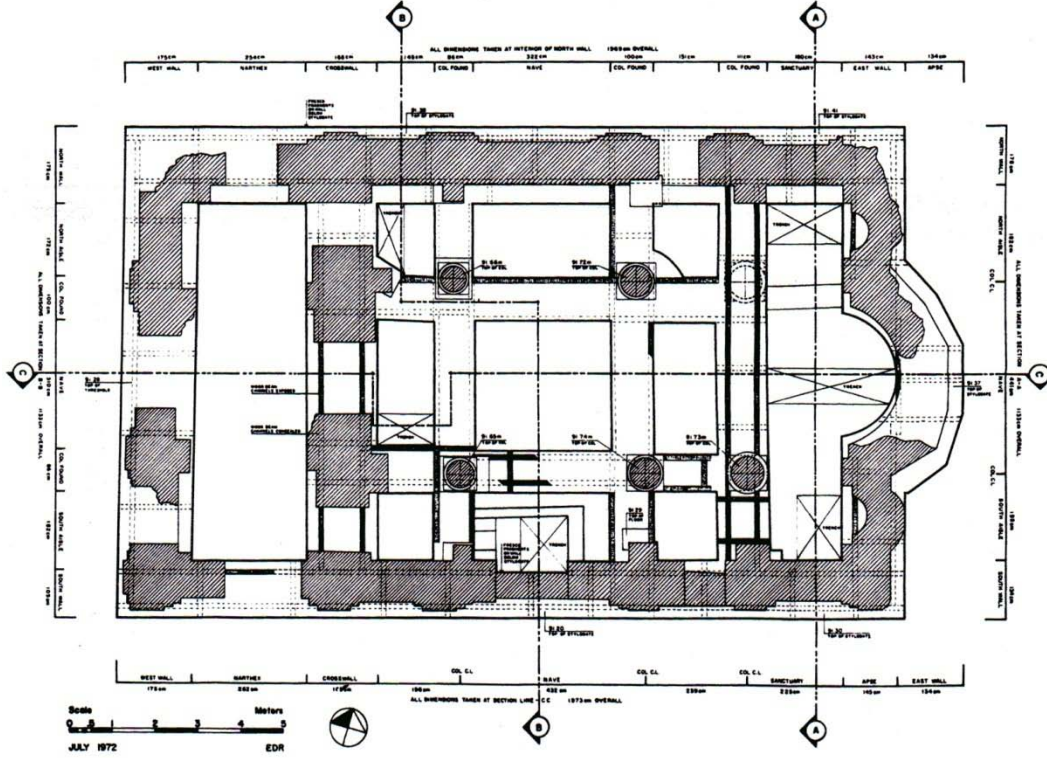
Şekil A.2 : Zeyrek Camii Şapel kubbesi ile güney kilise galerisinin birleşimi (Ahunbay, Z.).



Şekil A.3 : İstanbul, Bodrum Camii güney cephesi (Ebersolt, Thiers, 1913 p:32).



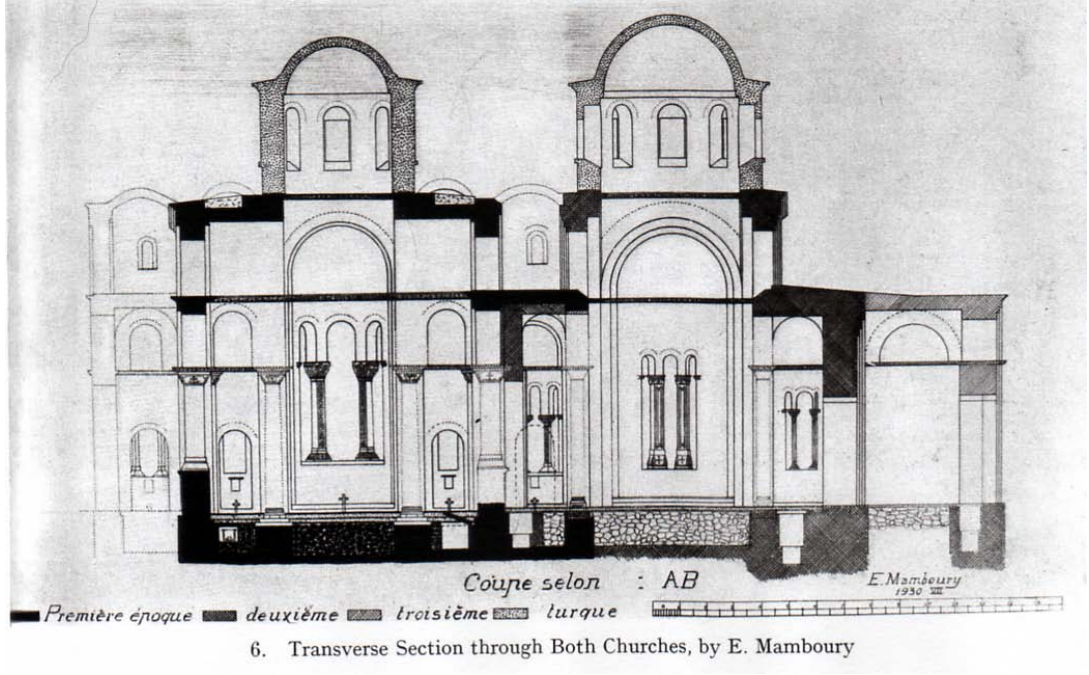
Şekil A.4 : Selanik, Panaghia Chalkeon Kilisesi.



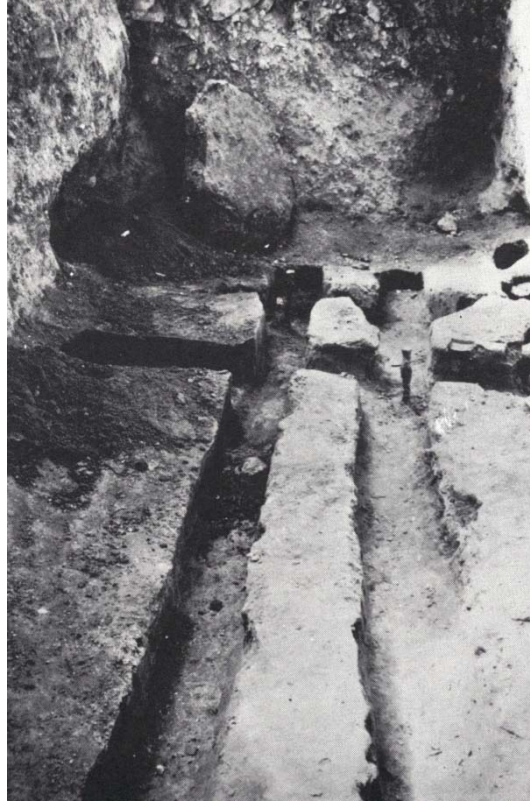
Şekil A.5 : Manisa, Salihli- Kilise E Planı, temel sisteminde ahşap hatıl kullanımı (Buchwald, 1977 f.4).



Şekil A.6 : Kiev, Tithe Kilisesi temelleri (Rappoport, 1995 s91 f.46).



Şekil A.7 : Fenari İsa Camii, Kuzey ve Güney Kiliselerde üst yapı temel ilişkisi (Megaw, 1964 f.6).



Şekil A.8 : Kiev, Bizans yapılarının temellerindeki ahşap hatılların birleşiminde demir çivi kullanımı (Rappoport, 1995 s.95 f.48).



Şekil A.9 : İstanbul Kara Surları, tuğla hatıllı duvar örgüsü.



Şekil A.10 : Zeyrek Camii, gizli tuğla tekniği.



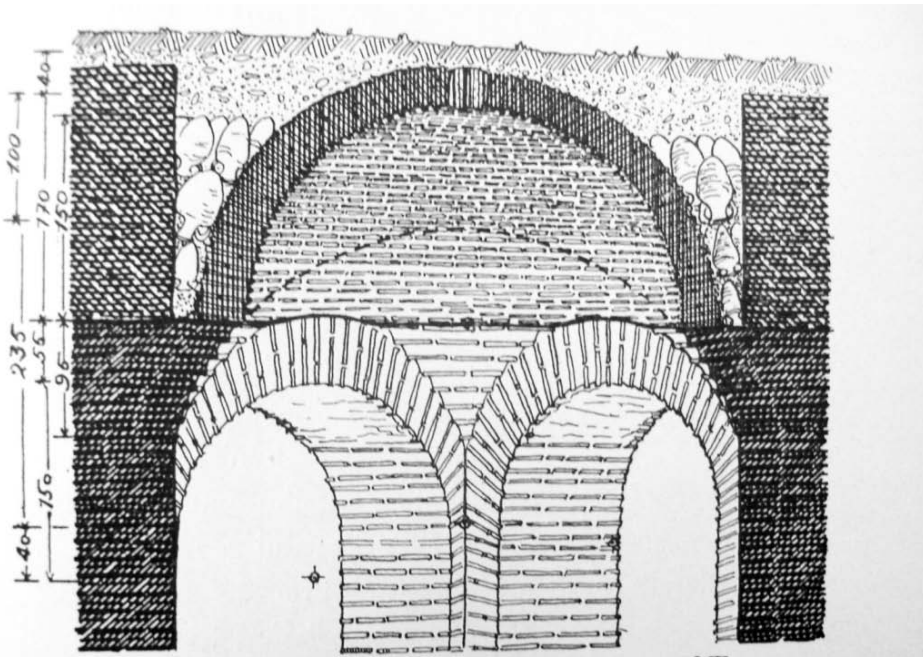
Şekil A.11 : Zeyrek Camii güney bölüm doğu cephesi, gizli tuğla tekniği.



Şekil A.12 : Bursa-Mudanya, Archangels Kilisesi(H. Taxiarchoi Kilisesi, 9. yy başı), naosu örten kaburgalı kubbe.



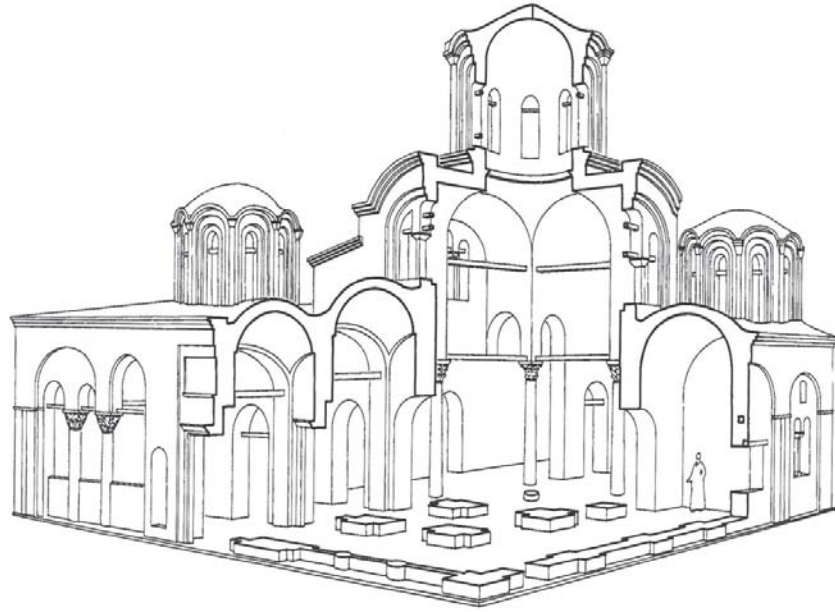
Şekil A.13 : Zeyrek Camii, güney bölüm narteksinin dilimli kubbesi.



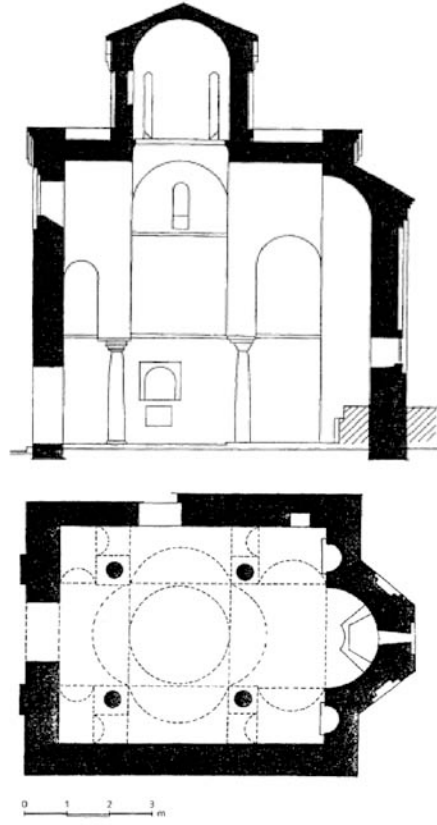
Şekil A.14 : İstanbul, Mangana Sarayı örtü elemanları üzerinde amfora kullanımı (Mamboury, 1936).



Şekil A.15 : Kariye, tonoz üzerinde amfora kullanımı (Kuban, Striker, 1997).



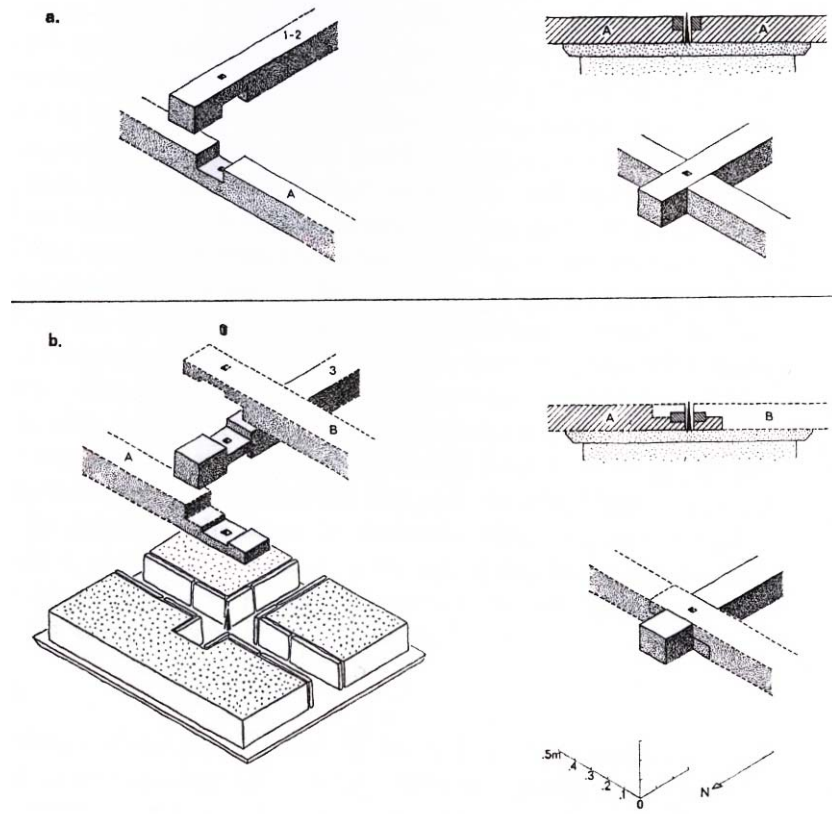
Şekil A.16 : Duvar içinde farklı seviyelerde ahşap hatıllar (Kuniholm, Striker, 1990 s:3).



Şekil A.17 : Makedonya/Ohrid, St. Bogorodica Zahumska Kilisesi (Gavrilovic ve diğ., 2004 s:113).

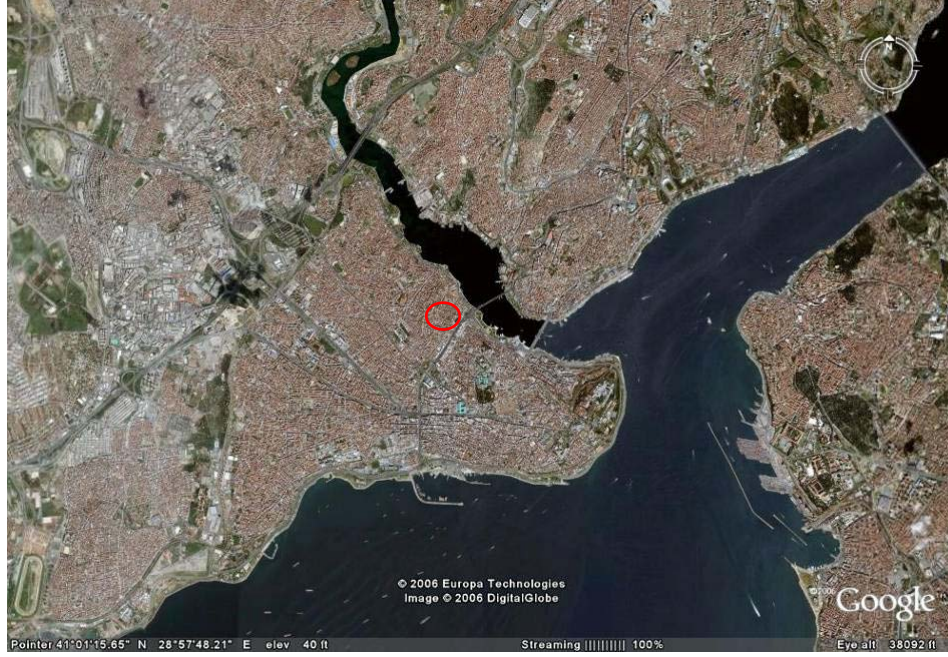


Şekil A.18 : Selanik, Aziz Havariyum Kilisesi, farklı seviyelerde ahşap gergiler.



Şekil A.19 : İstanbul - Aya İrini, ahşap gergilerin birleşim detayı (Kuniholm, Striker, 1974 s:230).

EK B: Zeyrek Camii'ne ilişkin şekiller



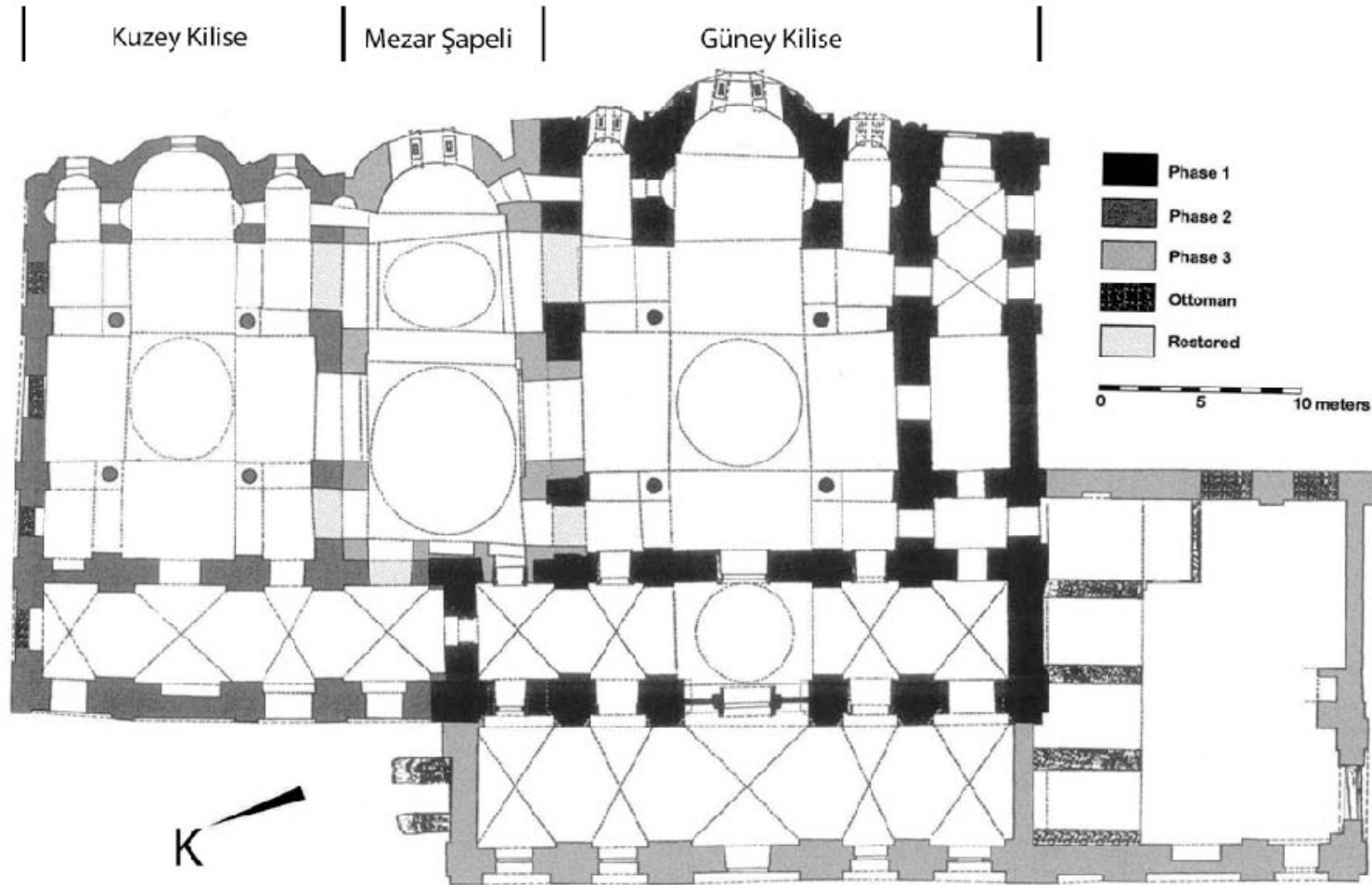
Şekil B.1 : İstanbul Tarihi Yarımada (Url-1 <[http:// www.earth.google.com](http://www.earth.google.com) >).



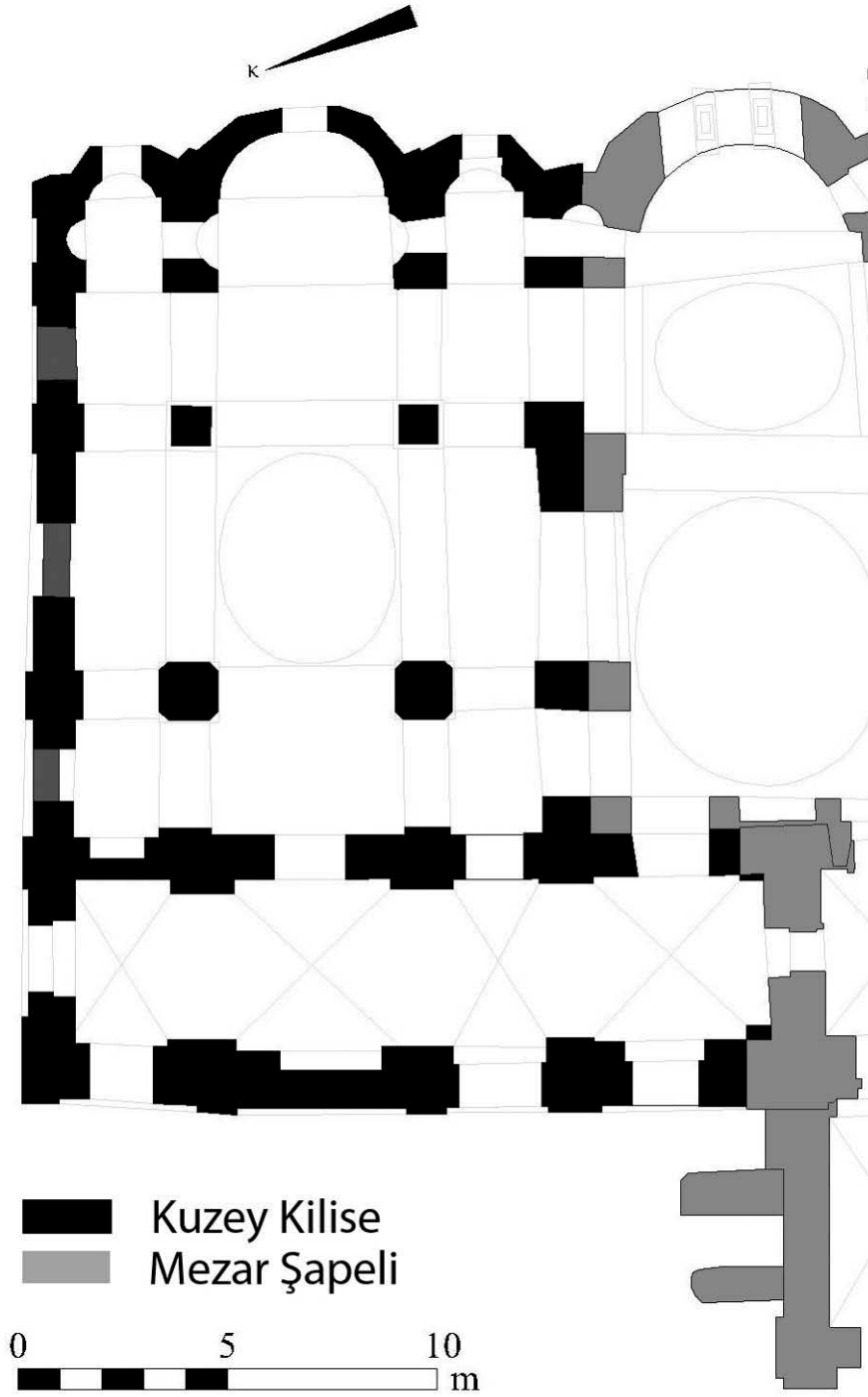
Şekil B.2 : İstanbul, Fatih İlçesi (Url-1 <[http:// www.earth.google.com](http://www.earth.google.com) >).



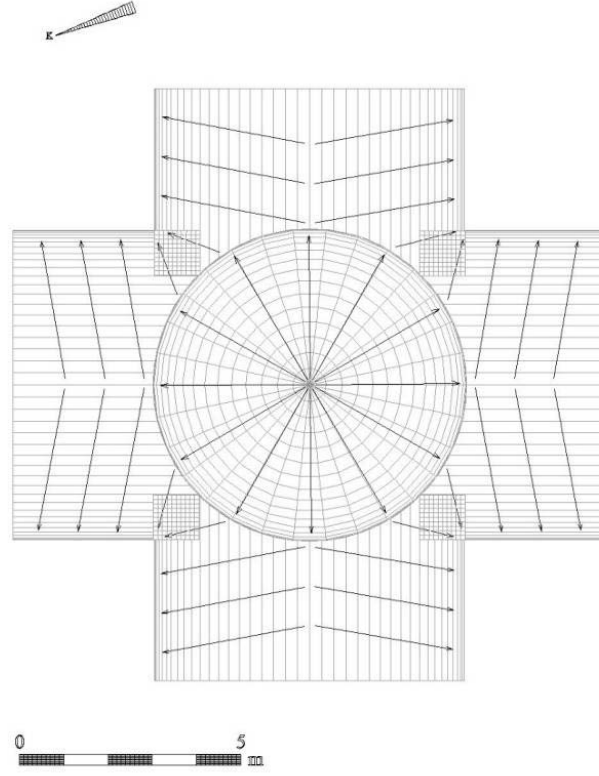
Şekil B.3 : İstanbul, Zeyrek Cami doğu Cephesi, 2005.



Şekil B. 4 : Zeyrek Camii planı (Ousterhout, Ahunbay, 2000).



Şekil B. 5 : Zeyrek Camii kuzey bölüm planı (Ahunbay, Z.).



Şekil B.6 : Zeyrek Camii kuzey bölüm kubbesi ve taşıyıcı tonozlarında yük akışı.



Şekil B.7 : Zeyrek Camii kuzey bölüm kubbesi.



Şekil B.8 : Zeyrek Camii kuzey bölüm mekân köşelerindeki çapraz tonozlar.



Şekil B.9 : Zeyrek Camii kuzey bölüm, serbest ayaklar, doğuya bakış.



Şekil B.10 : Zeyrek Camii kuzey bölüm kubbesi ve doğu cephesi.



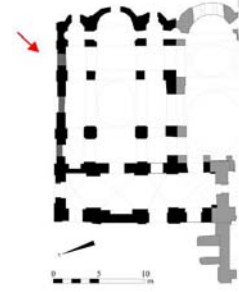
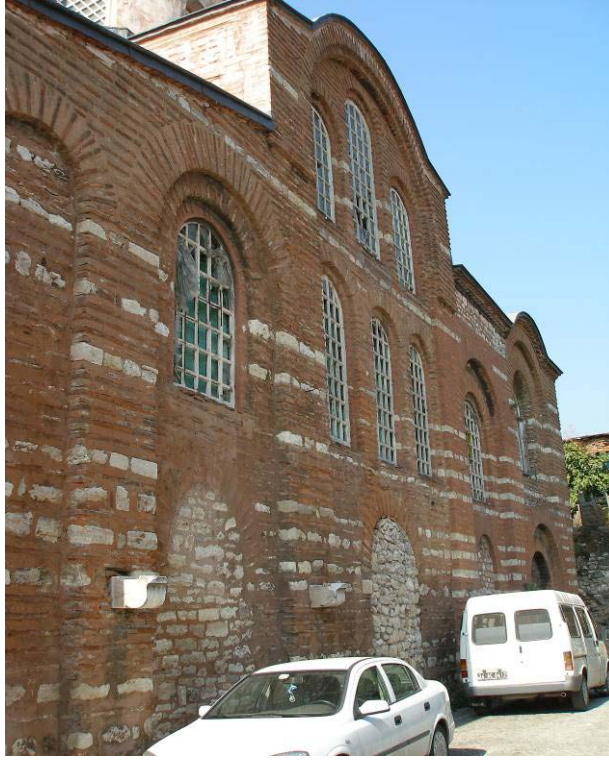
Şekil B.11 : Zeyrek Kuzey Kilisesi bema ve apsis örtüleri.



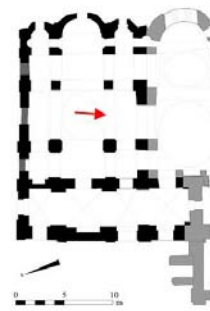
Şekil B.12 : Zeyrek Camii kuzey bölüm doğu cephesi.



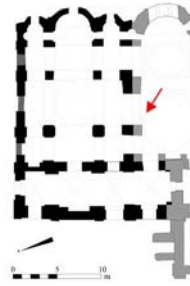
Şekil B.13 : Zeyrek Camii kuzey bölüm, kuzey pastoforion.



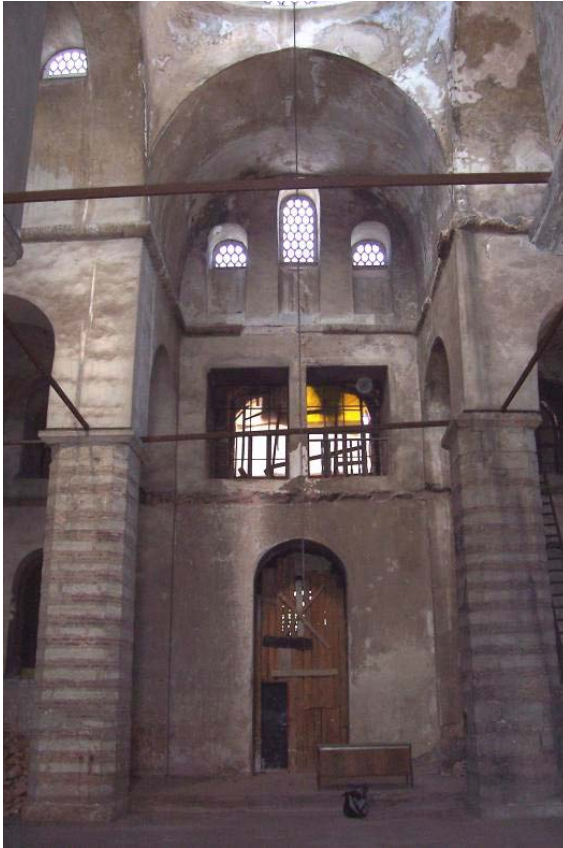
Şekil B.14 : Zeyrek Camii kuzey bölüm, kuzey cephesi.



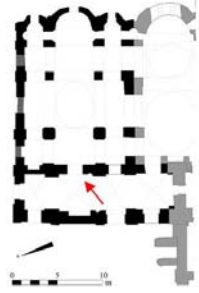
Şekil B.15 : Zeyrek Camii kuzey bölüm, güney duvarı.



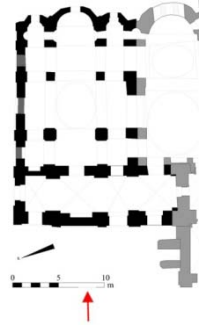
Şekil B.16 : Kuzey bölüm güney duvarı, kuzey bölüm ile Mezar Şapeli ayaklarının birleşimi.



Şekil B.17 : Narteks ve galerinin naosa bakan duvarı.



Şekil B.18 : Galeri, doğu duvarı.



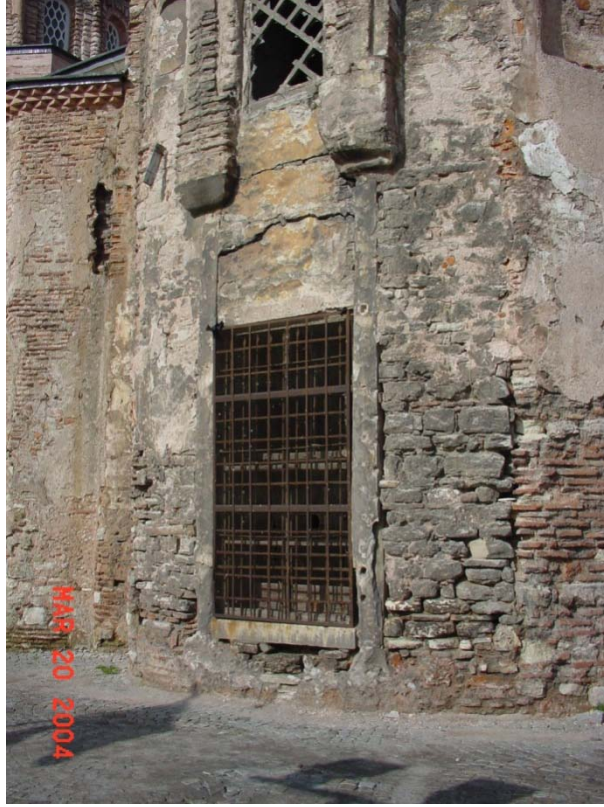
Şekil B.19 : Zeyrek Camii kuzey bölüm, batı cephesi.



Şekil B.20 : Kuzey bölüm batı cephesi, üçlü pencere düzeni.



Şekil B.21 : Kuzey Kilise Doğu Cephesi, 2001-2005 onarımları öncesi (Zeynep Ahunbay).



Şekil B. 22 : Kuzey bölüm doğu cephesi, apsis duvarı üçlü pencere düzeni, 2004 (Zeynep Ahunbay).



Şekil B. 23 : Kuzey bölüm batı cephesi (Ebersolt, Thiers,1913).



Şekil B. 24 : Kuzey bölüm batı tonozu ve kubbe (Zeynep Ahunbay).



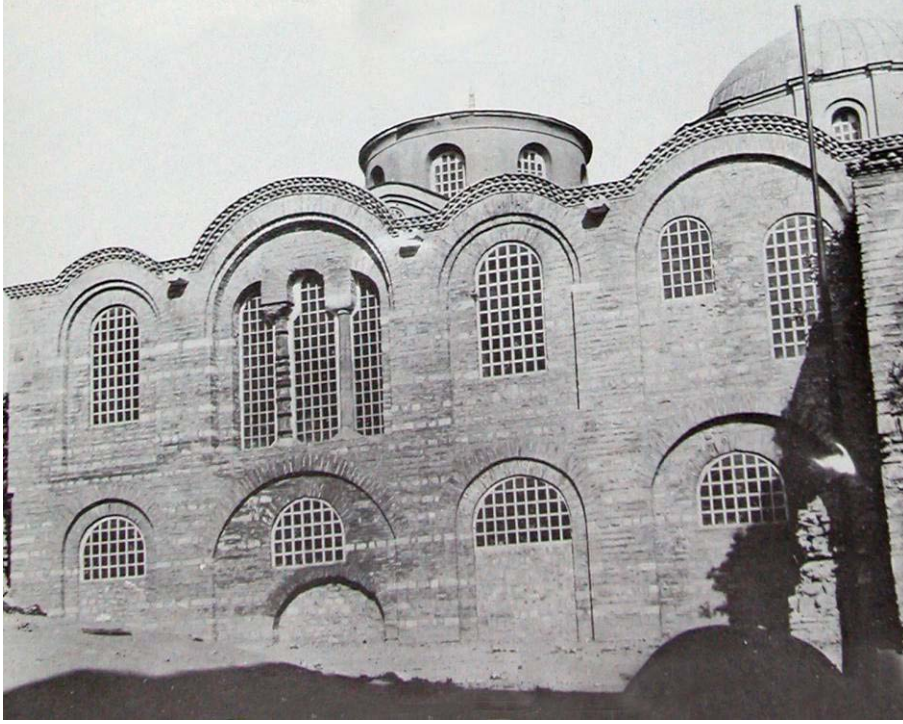
Şekil B. 25 : Kuzey bölüm merkezdeki ayaklar.



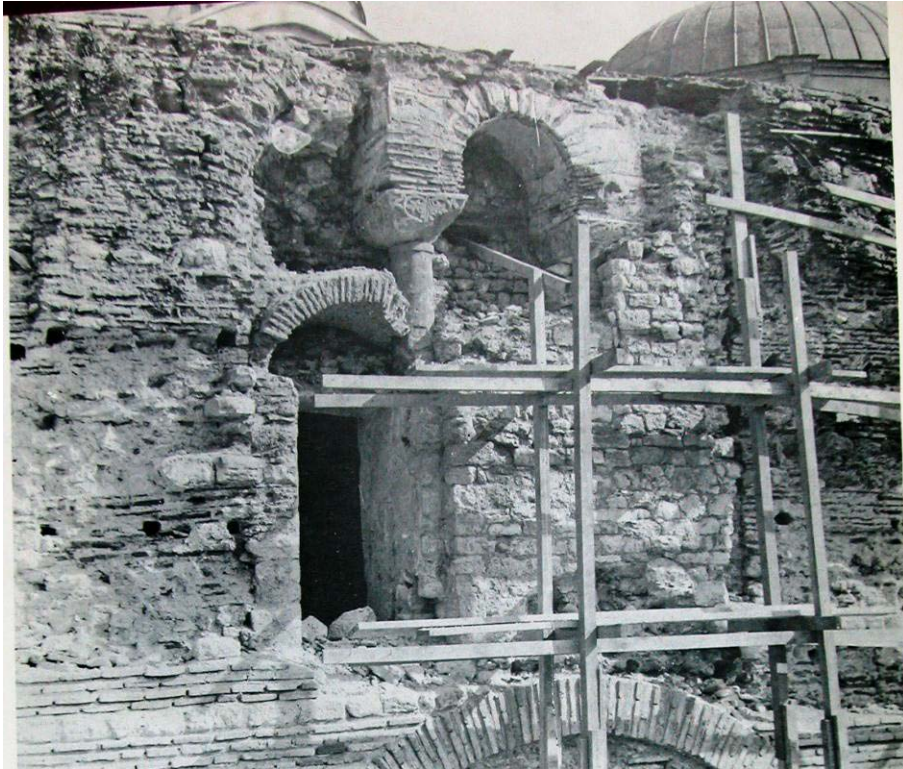
Şekil B. 26 : Galeri örtüsünün desteklenmesi için Osmanlı Dönemi'nde inşa edilmiş kemer .



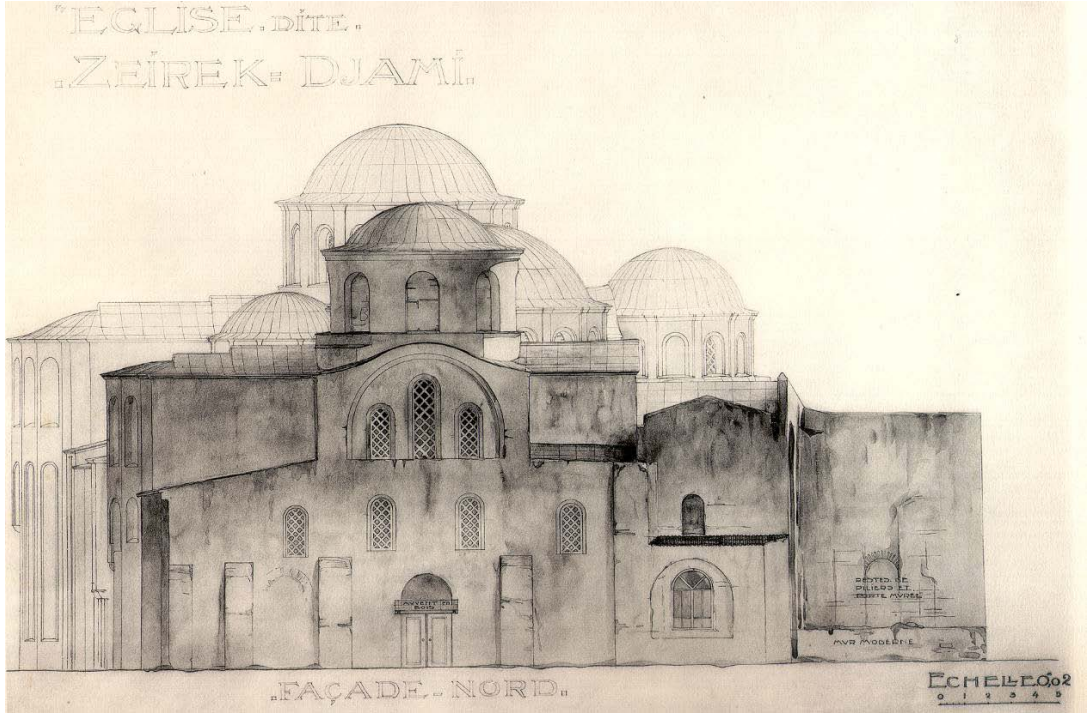
Şekil B. 27 : 1966-1967 onarımları öncesinde kuzey bölüm batı cephesi (Çuhadaroğlu, 1974).



Şekil B. 28 : 1966-1967 onarımları sonrasında kuzey bölüm batı cephesi (Çuhadaroğlu, 1974).



Şekil B. 29 : 1966-1967 onarımlarında kuzey bölüm batı cephesi (Çuhadaroğlu, 1974).



Şekil B. 30 : Kuzey bölüm kuzey cephesi, 1913 (Ebersolt, Thiers,1913).



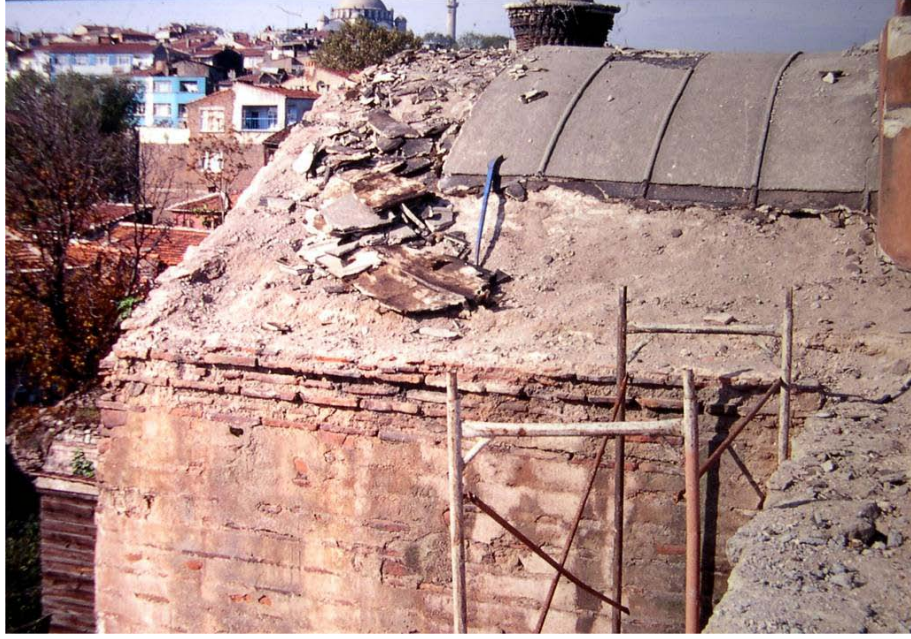
Şekil B. 31 : 1966-1967 onarımları sonrasında Kuzey bölüm kuzey cephesinin görünümü.



Şekil B. 32 : Kuzey bölüm çatı örtüsünde 1966-1967 onarımlarına ait kurşun taklidi beton kaplama (Zeynep Ahunbay).



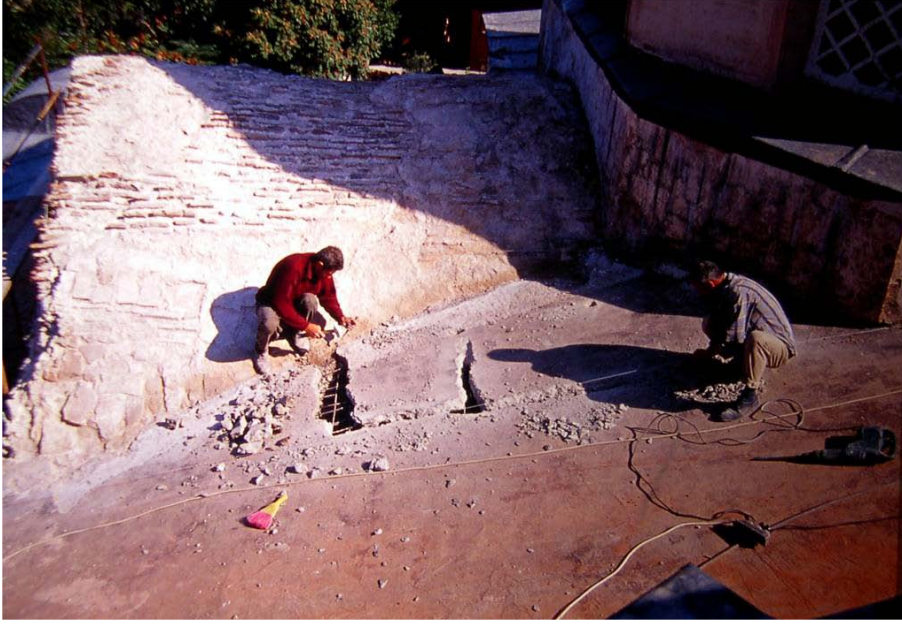
Şekil B. 33 : Kuzey bölüm, 1966-1967 onarımlarına ait yükseltilmiş betonarme çatı örtüsü (Zeynep Ahunbay).



Şekil B. 34 : Güney bölüm güney tonoz,1997-1998 onarımlarında beton kaplamanın kaldırılması (Zeynep Ahunbay).



Şekil B. 35 : Kuzey bölüm, kuzey tonozdaki çatlak (Ousterhout, Ahunbay, 2000).



Şekil B. 36 : Kuzey bölüm batı tonozu ve civarı,2001-2005 onarımlarında betonarme çatı örtüsünün kaldırılması (Zeynep Ahunbay)



Şekil B. 37 : Kuzey bölüm galeri tonozu, 2001-2005 onarımları öncesinde batı duvarına paralel ilerleyen çatlak (Zeynep Ahunbay).



Şekil B. 38 : Kuzey bölüm kurşun çatı kaplaması, 2004 (Zeynep Ahunbay).



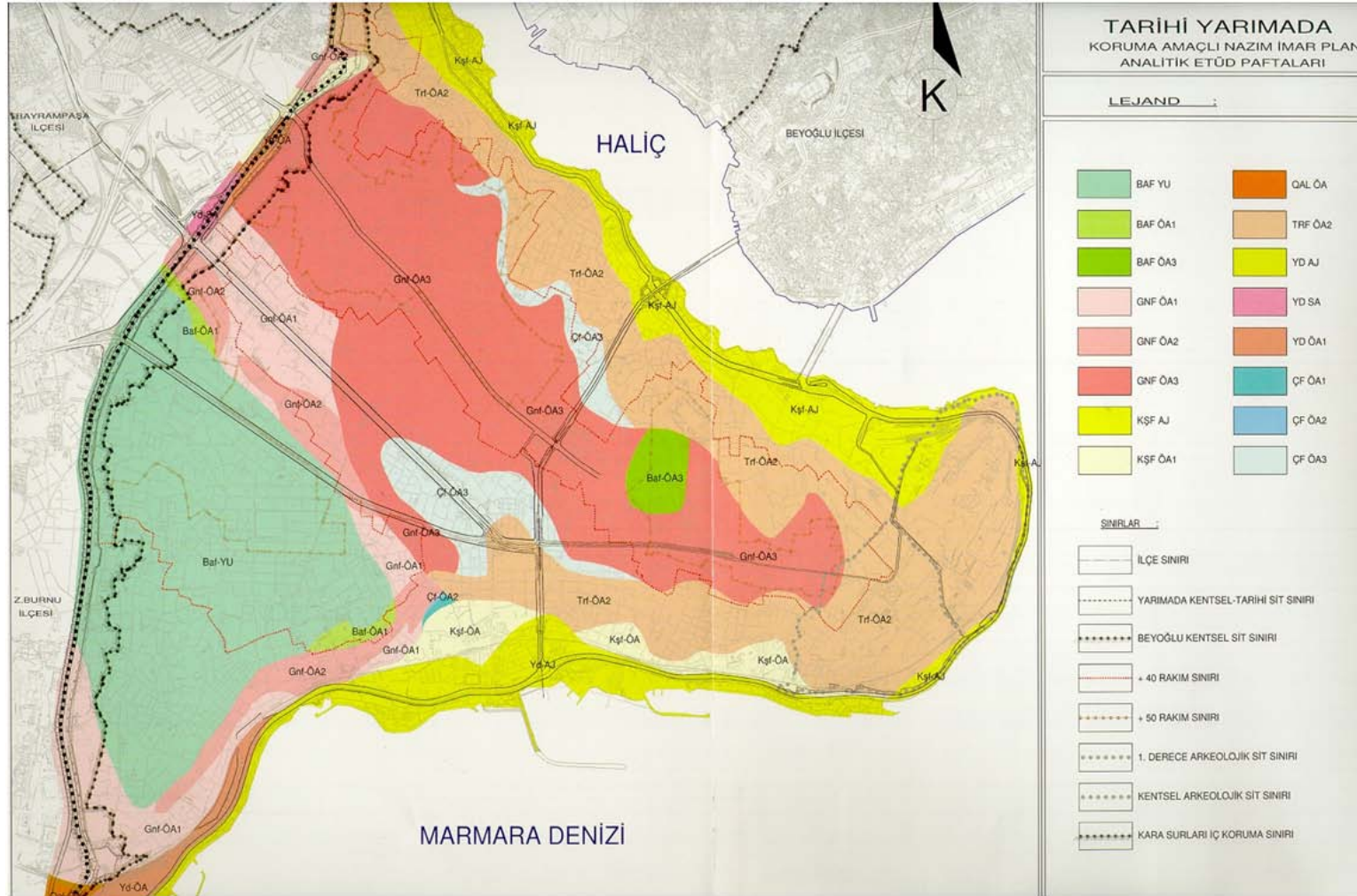
Şekil B. 39 : Kuzey bölüm doğu cephesi, onarım öncesi kuzey pastophorion (Zeynep Ahunbay).



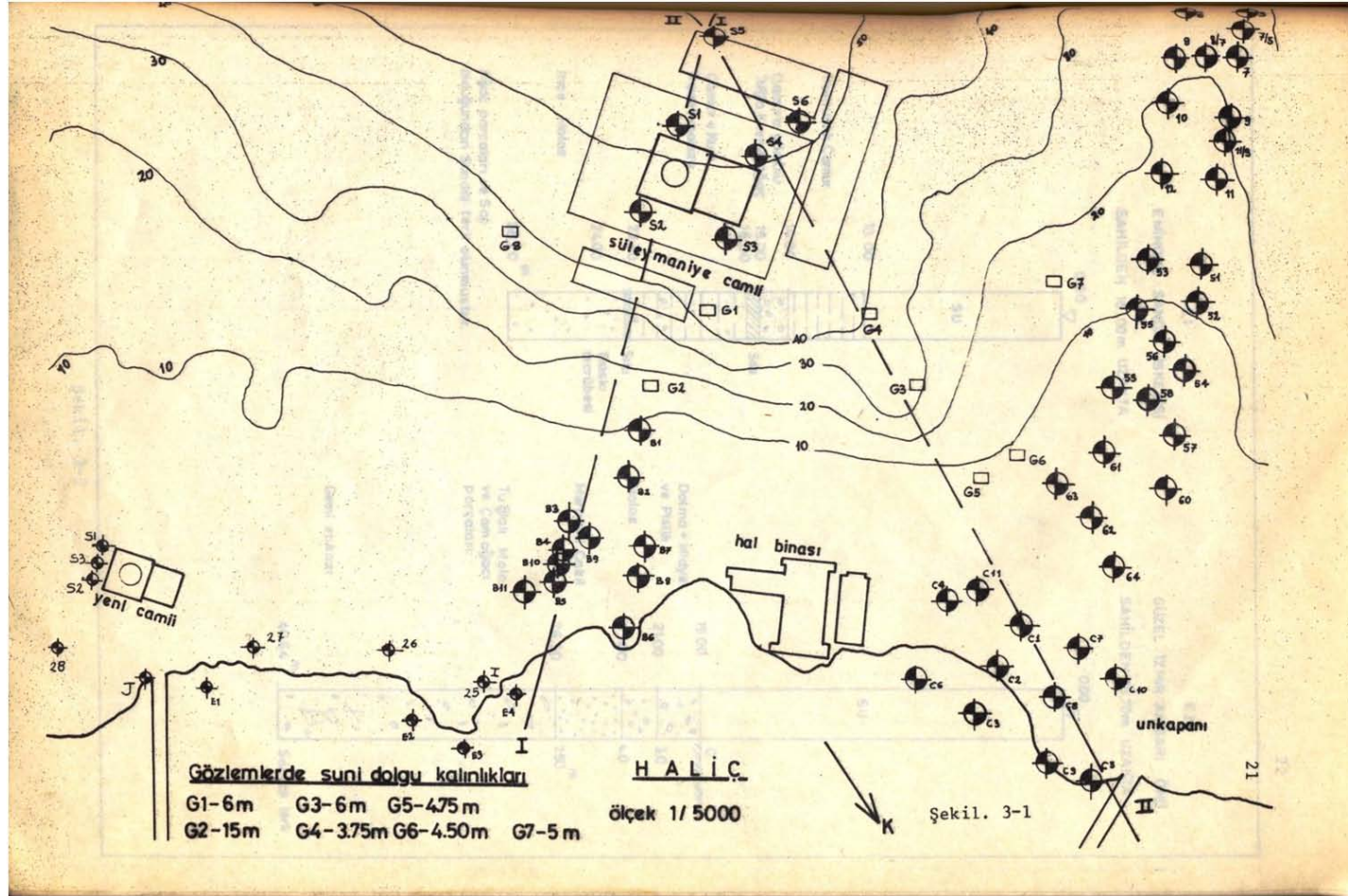
Şekil B. 40 : Kuzey bölüm doğu cephesi, onarım öncesi güney pastophorion (Zeynep Ahunbay).



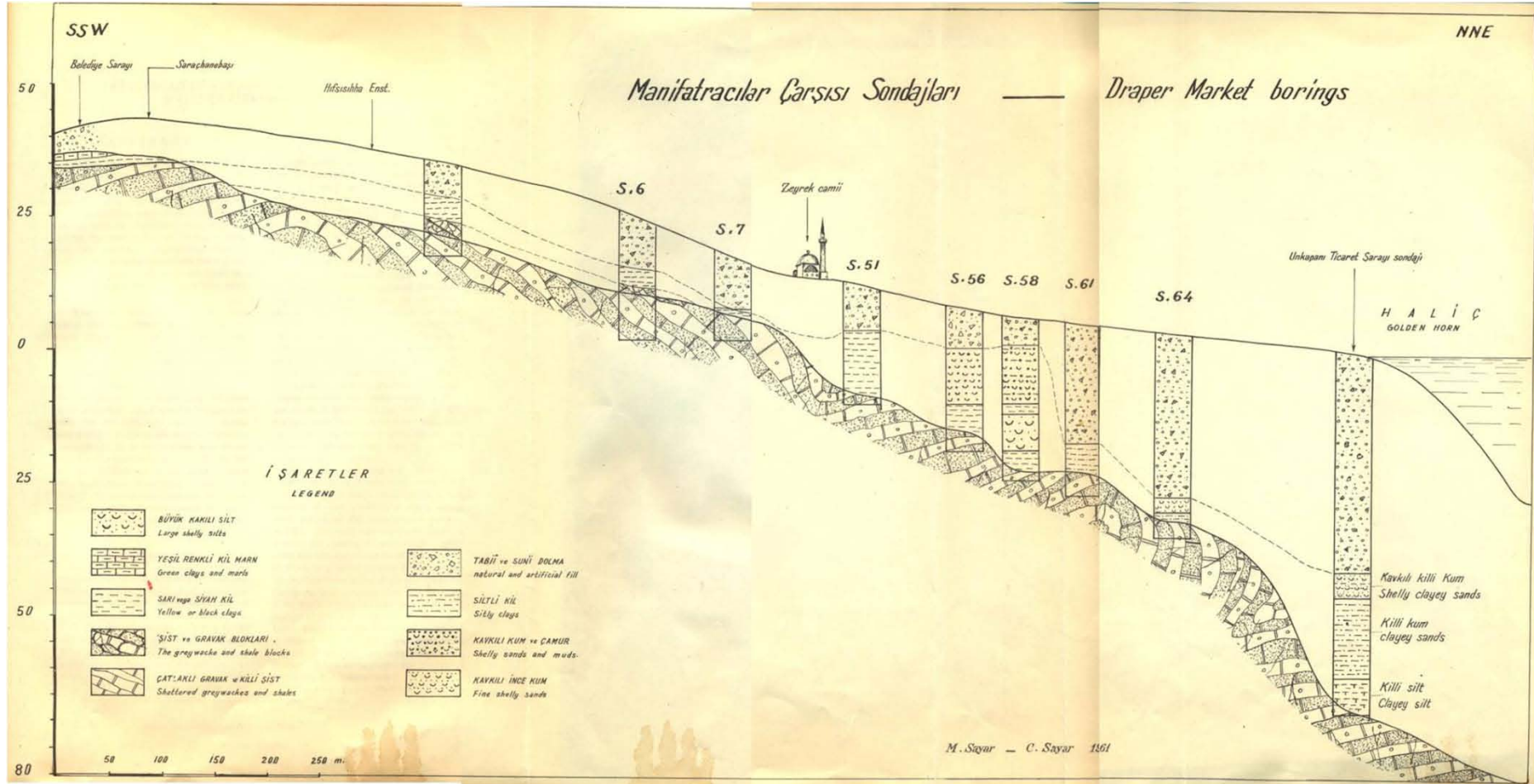
Şekil B. 41 : Kuzey bölüm doğu cephesi, onarım öncesi kuzey pastophoriondaki hasarlar (Zeynep Ahunbay).

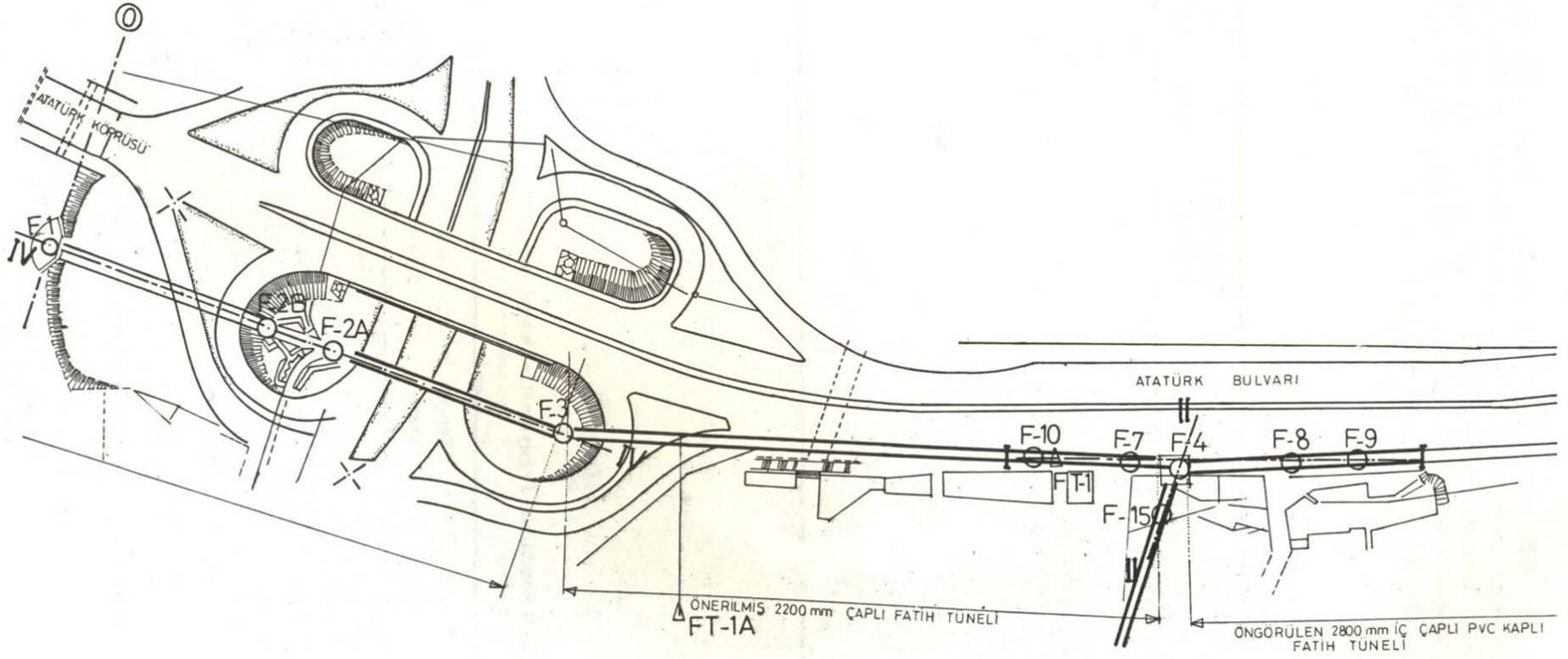


Şekil B.42 : Tarihi Yarımada Jeolojik yapı (Tarihi Yarımada Fatih-Eminönü 1/5000 Ölçekli Koruma Amaçlı Nazım İmar Planı Raporu, 2003).



Şekil B.44 : Manifaturacılar Çarşısı için yapılan sondaj noktaları (Sayar, Sayar, 1962).

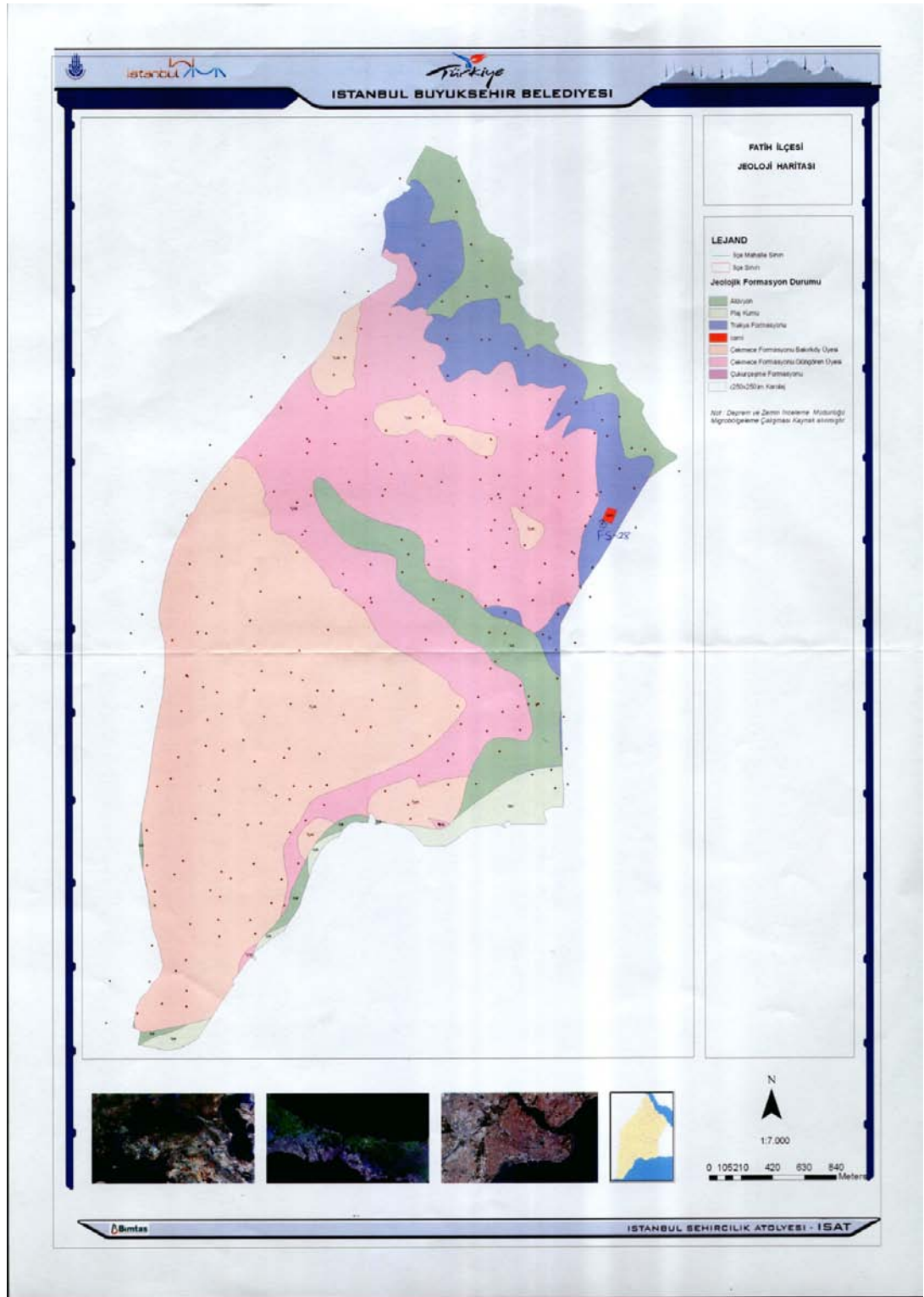




Şekil B.46 : 1982 yılında İski idaresi için Fatih Tüneli güzergâhı boyunca yapılan sondaj noktaları (Toğrol, 1986).

Çizelge B. 1 : 1982 yılında İski idaresi için Fatih Tüneli güzergâhı boyunca yapılan sondaj verileri (Toğrol, 1986).

Sondaj no	Zemin Kotu	Sondaj Derinliği	Dolgu Taban	Yer altı Su Seviyesi	Kaya Üst Kotu
F1	3,33	40,00	-32,37	0,47	-35,70
F2A	2,30	15,45	-13,15	0,80	
F2B	2,30	28,95	-25,10	0,80	
F3	2,62	12,45	-9,83	-0,38	
F10	8,59	16,15	-7,56	-0,61	
FT1	5,55	12,00	-1,45	-0,45	
F7	9,87	14,73	-3,13		-3,13
F4	10,00	13,40	-0,50	6,20	-0,50
F8	10,33	15,00	2,83	1,00	1,29
F9	11,20	16,00	4,20	1,85	2,10
FT2	16,45	20,00	9,45	13,55	8,45



Şekil B.47 : Fatih İlçesi jeoloji haritası (Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü).

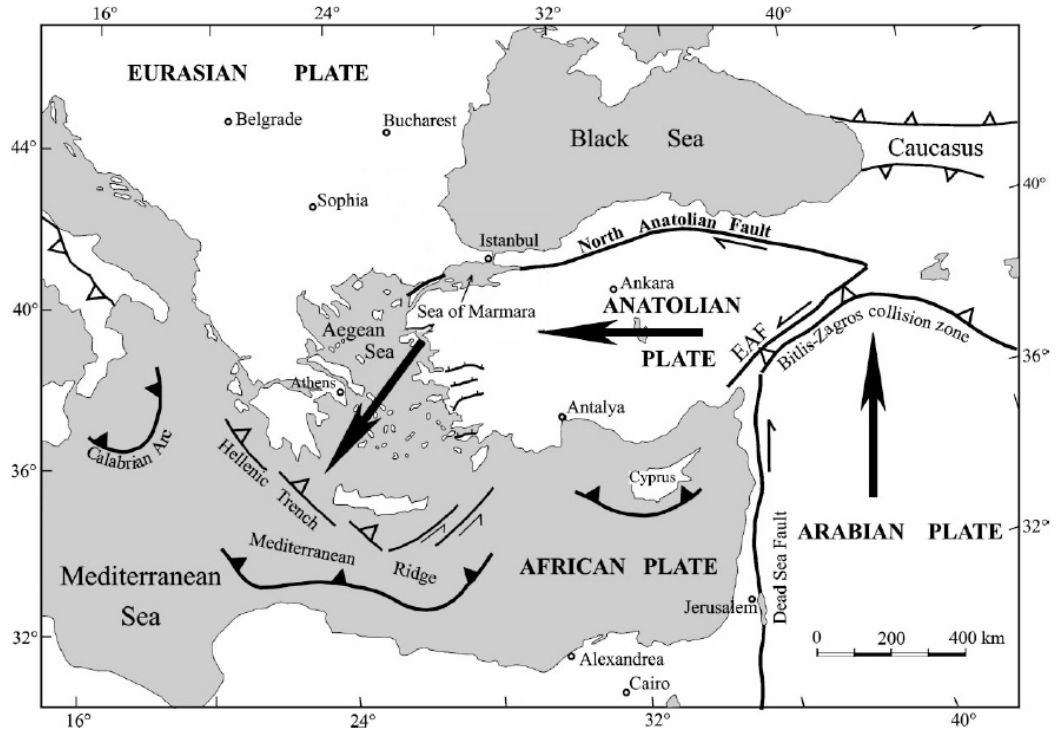
Şekil 48 (devam): Zeyrek Camii yakınında yapılan zemin etüdü verileri (Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü).



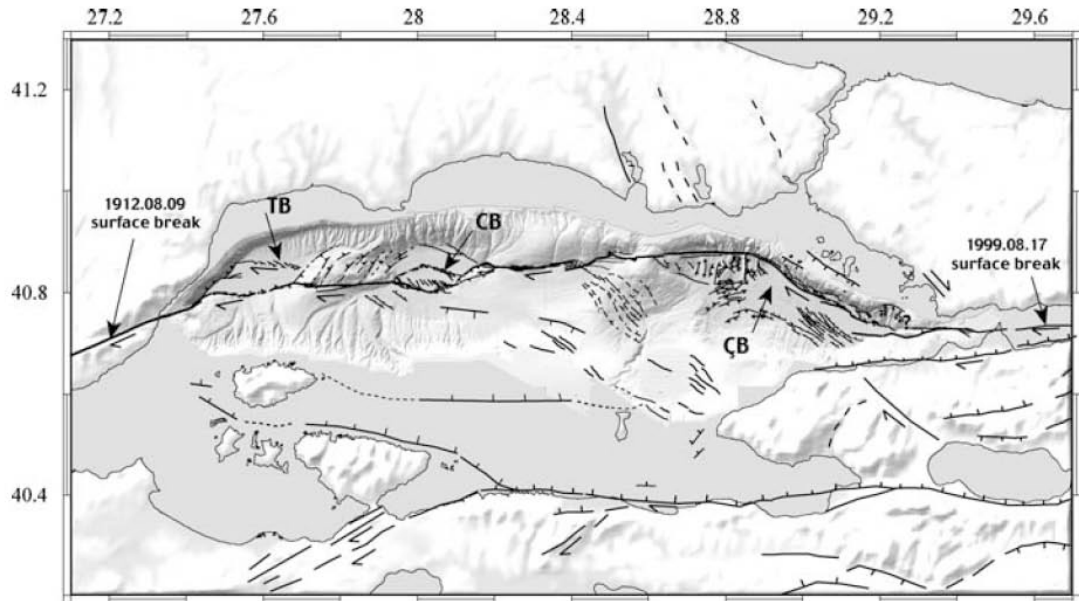
Şekil B. 49 : Apsis duvarı, sokak kotundan 2,5 metre derinliğe kadar yapılan inceleme kazısı (Zeynep Ahunbay).



Şekil B. 50 : Apsis duvarı, sokak kotundan 2,5 metre derinliğe kadar yapılan inceleme kazısında belgeleme çalışmaları (Zeynep Ahunbay).



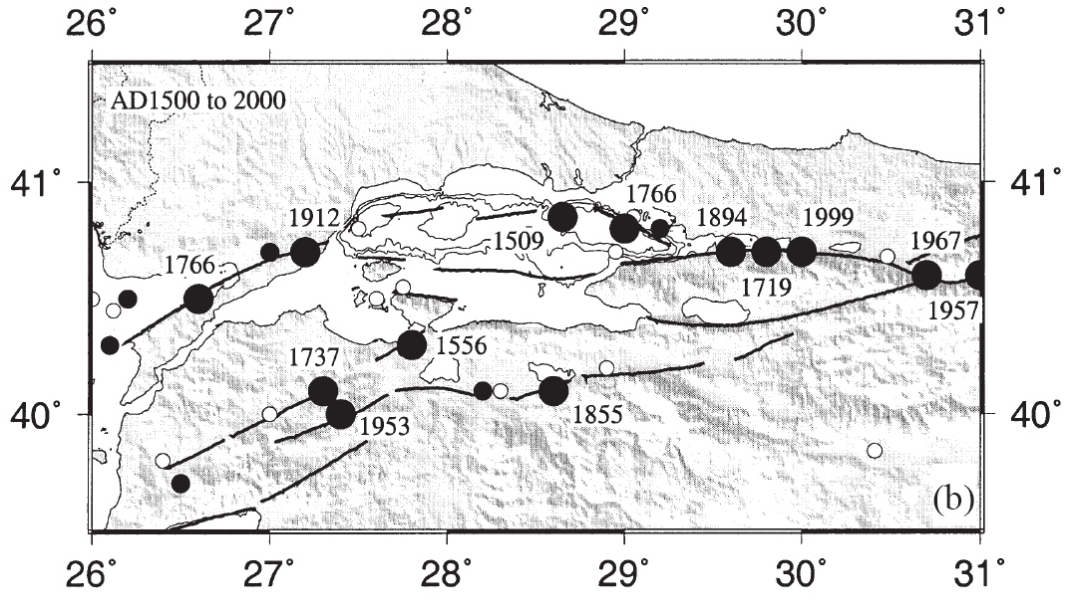
Şekil B. 51 : Avrasya, Arap ve Afrika Plakalarının hareketleri ve Anadolu Bloğu (Okay ve diğ., 2000).



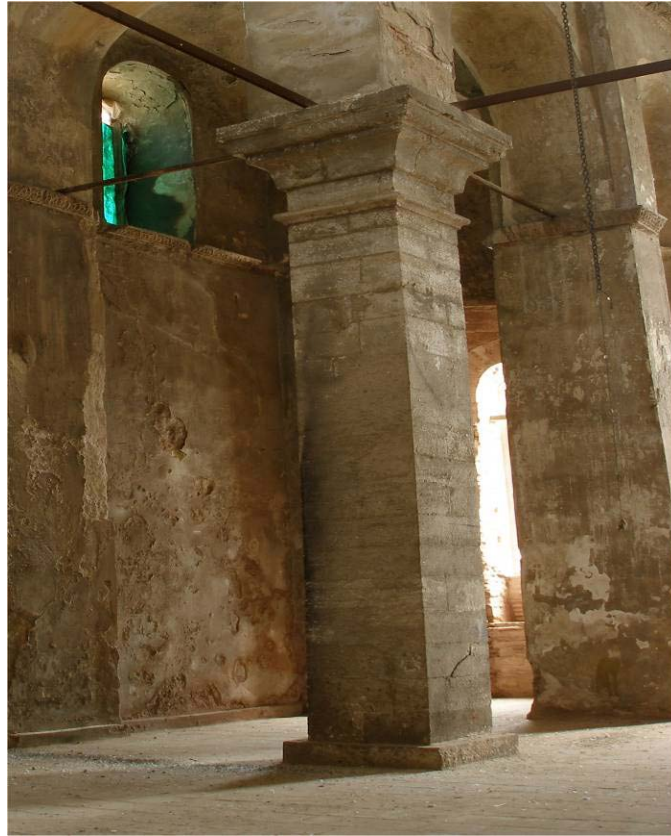
Şekil B. 52 : Kuzey Anadolu Fayı'nın batı kolları (Şengör ve diğ., 2005).

Çizelge B. 2 : Kuzey Anadolu Fayı'nda 0-2000 yılları arasında meydana gelen depremler (Ambraseys, 2006)

Marmara Sea					
Y	M	D	N	E	M_S
32	00	00	40.5	30.4	7.0
68	00	00	40.7	30.0	7.2
121	00	00	40.5	30.1	7.4
123	11	10	40.3	27.7	7.0
160	00	00	40.0	27.5	7.1
180	05	03	40.6	30.6	7.3
268	00	00	40.7	29.9	7.3
358	08	24	40.7	30.2	7.4
447	11	06	40.7	30.3	7.2
478	09	25	40.7	29.8	7.3
484	00	00	40.5	26.6	7.2
740	10	26	40.7	28.7	7.1
989	10	25	40.8	28.7	7.2
1063	09	23	40.8	27.4	7.4
1296	06	01	40.5	30.5	7.0
1343	10	18	40.9	28.0	7.0
1354	03	01	40.7	27.0	7.4
1419	03	15	40.4	29.3	7.2
1509	09	10	40.9	28.7	7.2
1556	05	10	40.6	28.0	7.2
1625	05	18	40.3	26.0	7.1
1659	02	17	40.5	26.4	7.2
1672	02	14	39.5	26.0	7.0
1719	05	25	40.7	29.8	7.4
1737	03	06	40.0	27.0	7.0
1766	05	22	40.8	29.0	7.1
1766	08	05	40.6	27.0	7.4
1855	02	28	40.1	28.6	7.1
1894	07	10	40.7	29.6	7.3
1912	08	09	40.8	27.2	7.3
1953	03	18	39.9	27.4	7.1
1957	05	26	40.7	31.0	7.2
1967	07	22	40.7	30.7	7.2
1999	08	17	40.8	30.0	7.4



Şekil B. 53 : Kuzey Anadolu Fayı'nda 1500-2000 yılları arasında meydana gelen depremlerin yerleri ve tarihleri (Ambraseys, Jackson, 2000)



Şekil B. 54 : Kuzey Bölüm kuzeydoğu ayağı.



Şekil B. 55 : Kuzey Bölüm güneybatı ayağı.



Şekil B. 56 : Kuzey bölüm güneydoğu ayağı.



Şekil B. 57 : Kuzey bölüm, demir gergilerde korozyon.



Şekil B. 58 : Zeyrek Camii kuzey bölüm galerisi, kuzey köşesi.



Şekil B. 59 : Zeyrek Camii kuzey bölüm galerisinde kuzey-güney doğrultusunda uzanan çatlak.



Şekil B. 60 : Kuzey bölüm narteks kuzey duvarındaki kemerli açıklıkta çatlak.

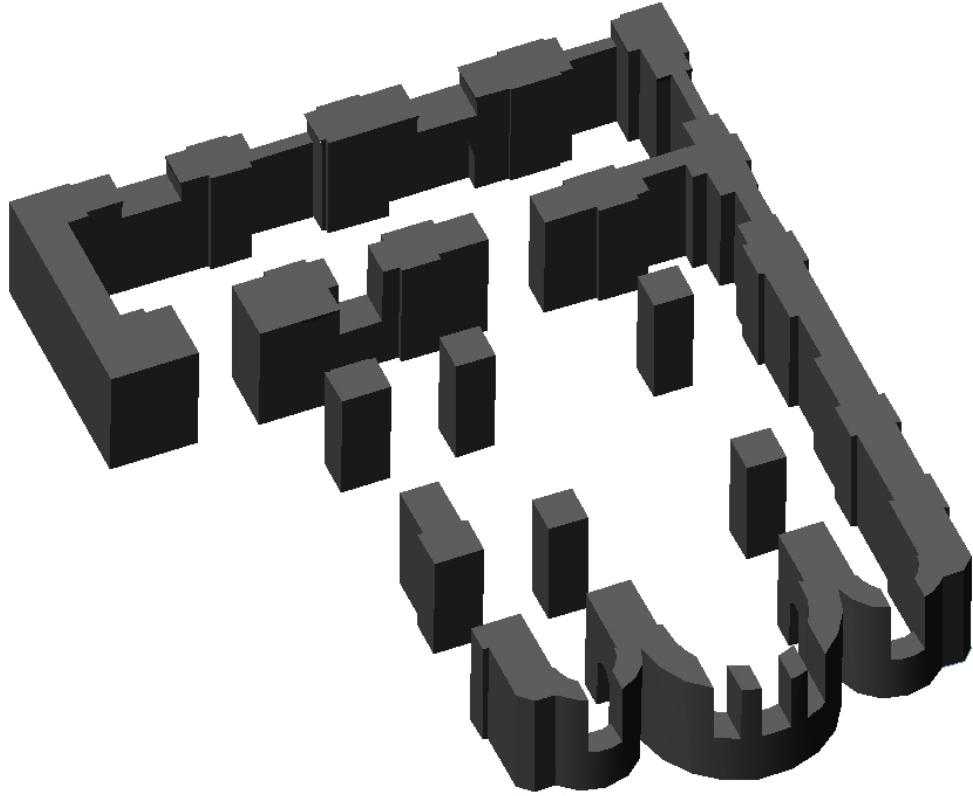


Şekil B. 61 : Zeyrek Camii kuzey bölüm doğu cephesinde, apsis pencereleri arasındaki ahşap gergitlerin onarımlarda tekrar yerlerine konulması.

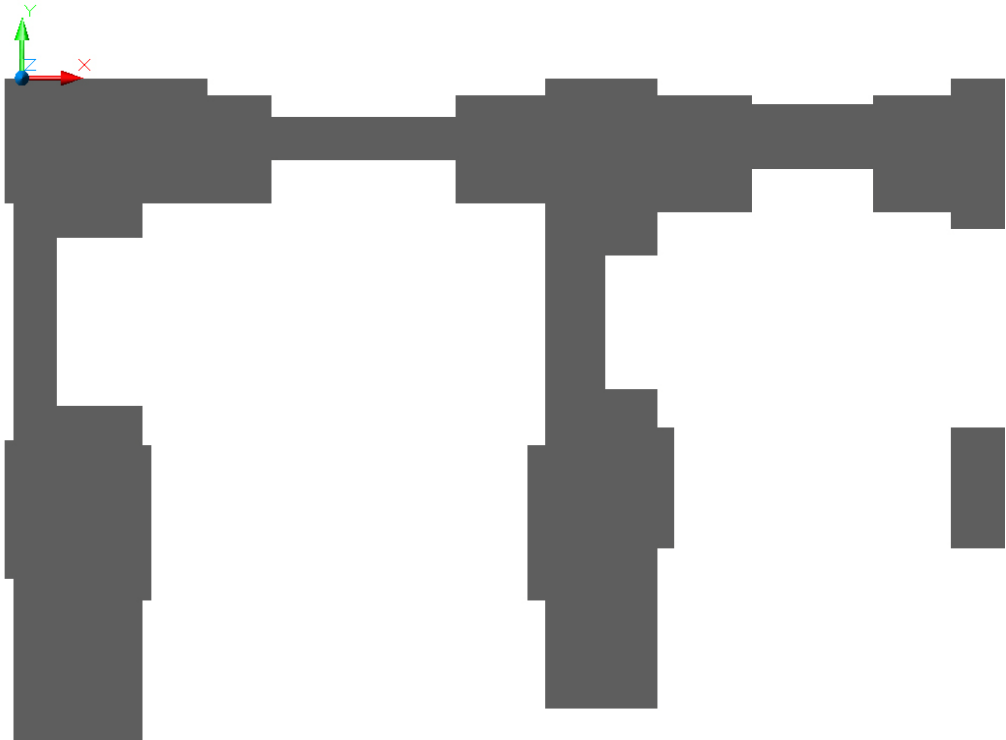


Şekil B. 62 : Kuzey bölüm galerisinde yok olan ahşap gergilerin boşlukları.

EK C: Analizlerde kullanılan geometrik modele ilişkin şekiller



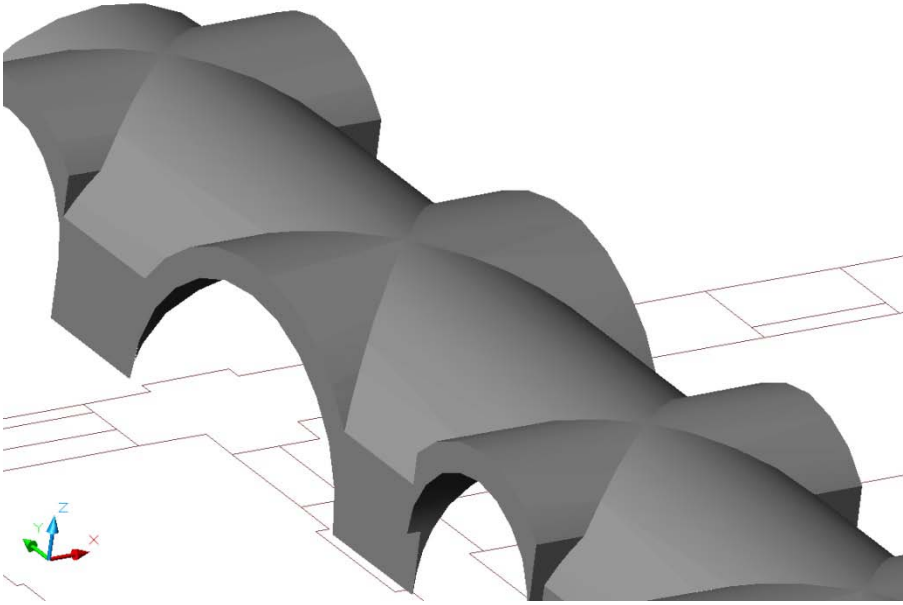
Şekil C.1: Modelin yapımında kullanılan plan.



Şekil C.2: Duvarların birbirlerine dik oldukları kabulü.



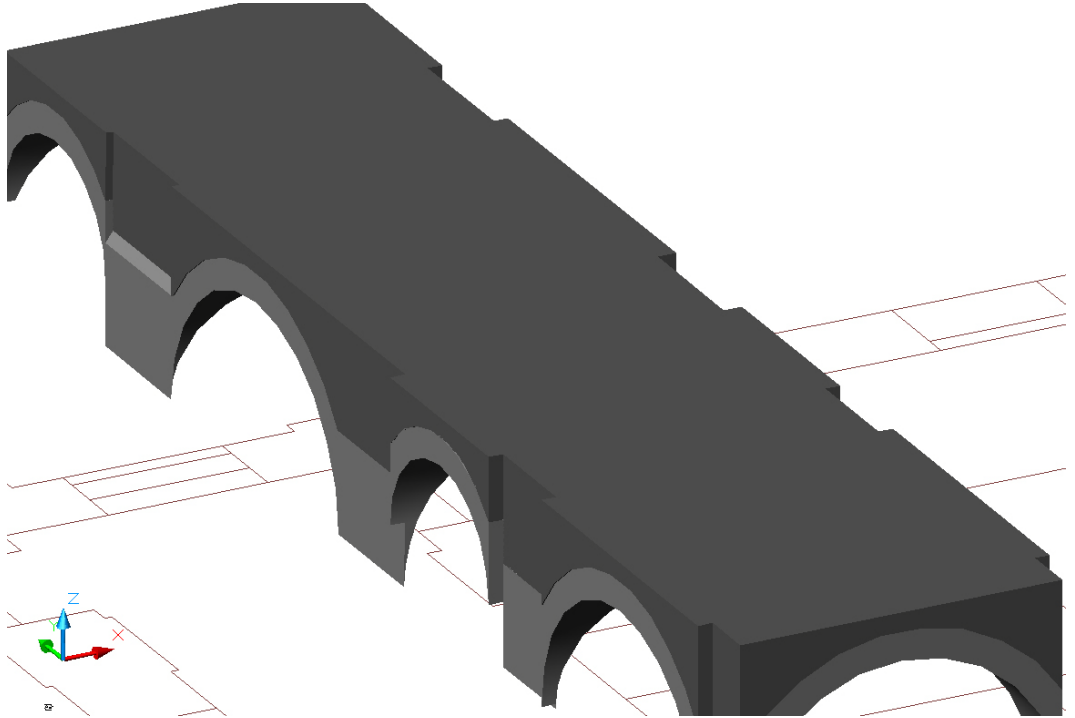
Şekil C.3: Ayaklar ve taşıyıcı duvarların köşeleri 90 derece olan ideal dörtgenlerin birleşimiyle oluşturulması.



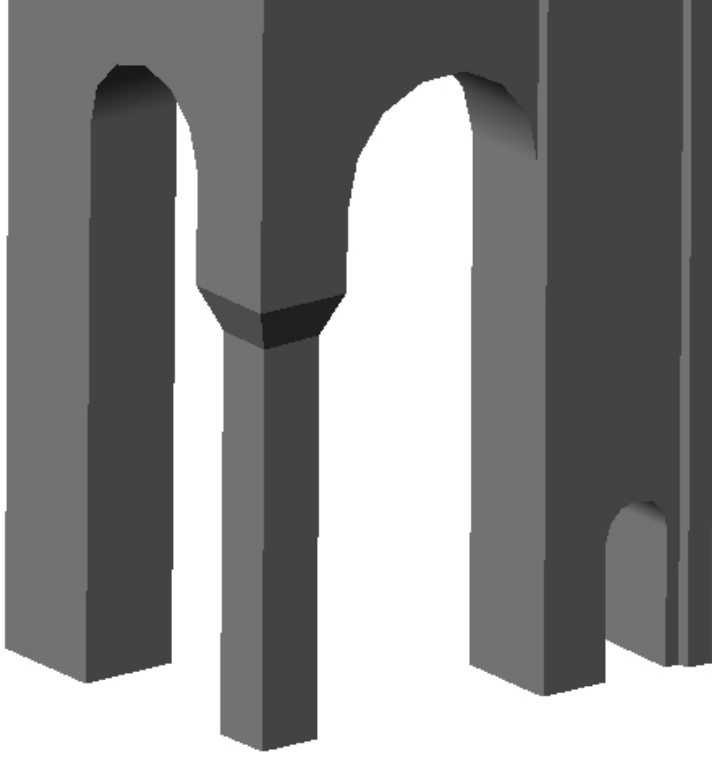
Şekil C.4: Çapraz tonozlarda tonozun karşılıklı kollarının aynı geometrik özellikleri gösterdiği kabulü.



Şekil C.5: Modelin parçalara ayrılabilir niteliği.



Şekil C.6: Taşıyıcı elemanlar ile taşıyıcı olmayan elemanların ayrımı.



Şekil C.7: Detaylı geometrik formlara sahip sütun başlıkları vb... gibi öğelerin ifade edilmesi.

EK D: Çizimler

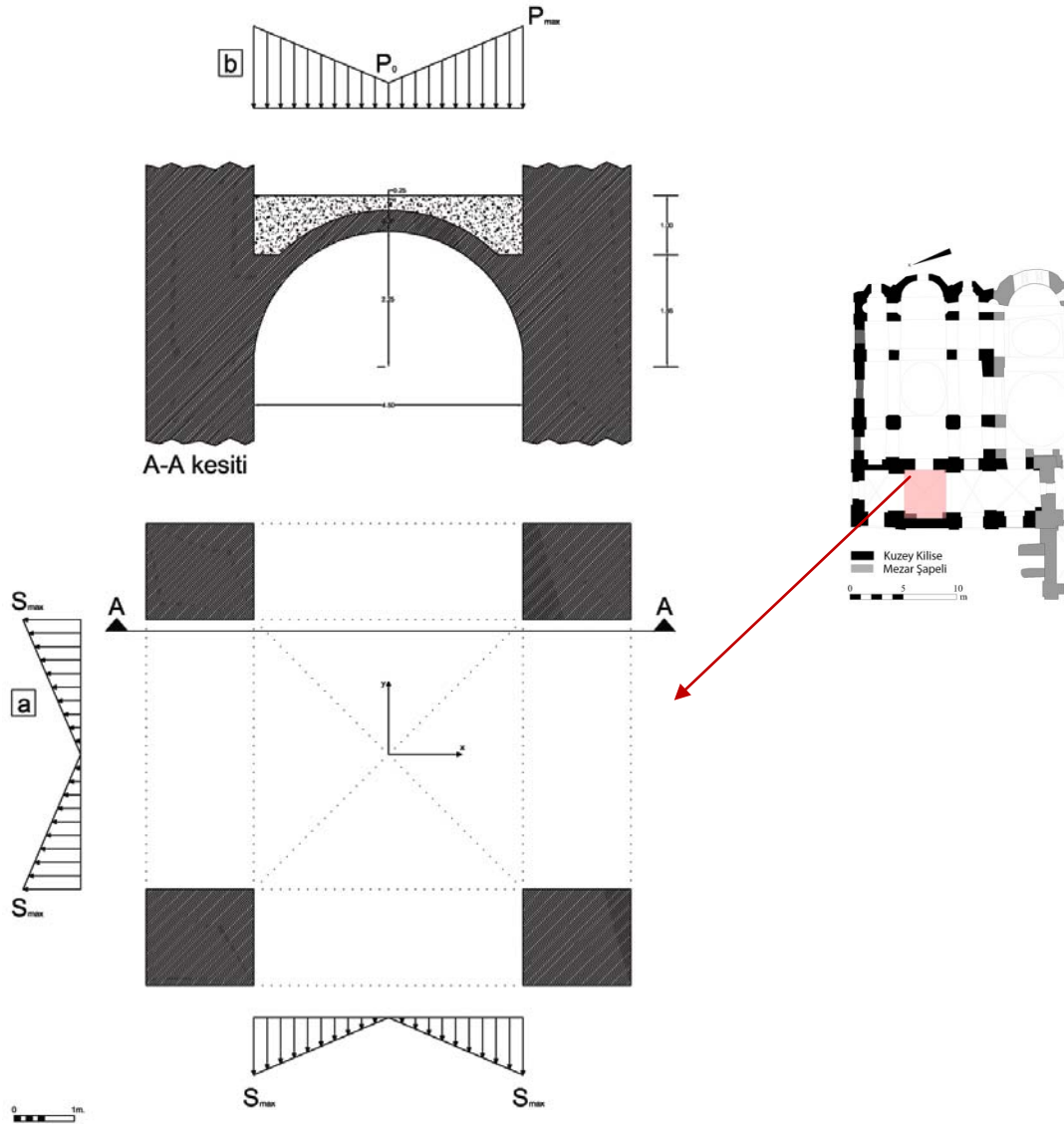
EK E: Tonoz itkileri ve gergi sistemine ilişkin kontroller

Galeri ve nartakste tonoz itkileri ve gergi sistemi ile ilgili kontroller

Kuzey Kilise narteks ve galerisinde yapılan kontroller, mekânları örten tonozların neden olduğu itkiler ve bu itkileri karşılayan duvar parçaları ile ilgilidir. Elde edilen sonuçlar gergi ve kılıçların boyutlandırılmasında kullanılmıştır.

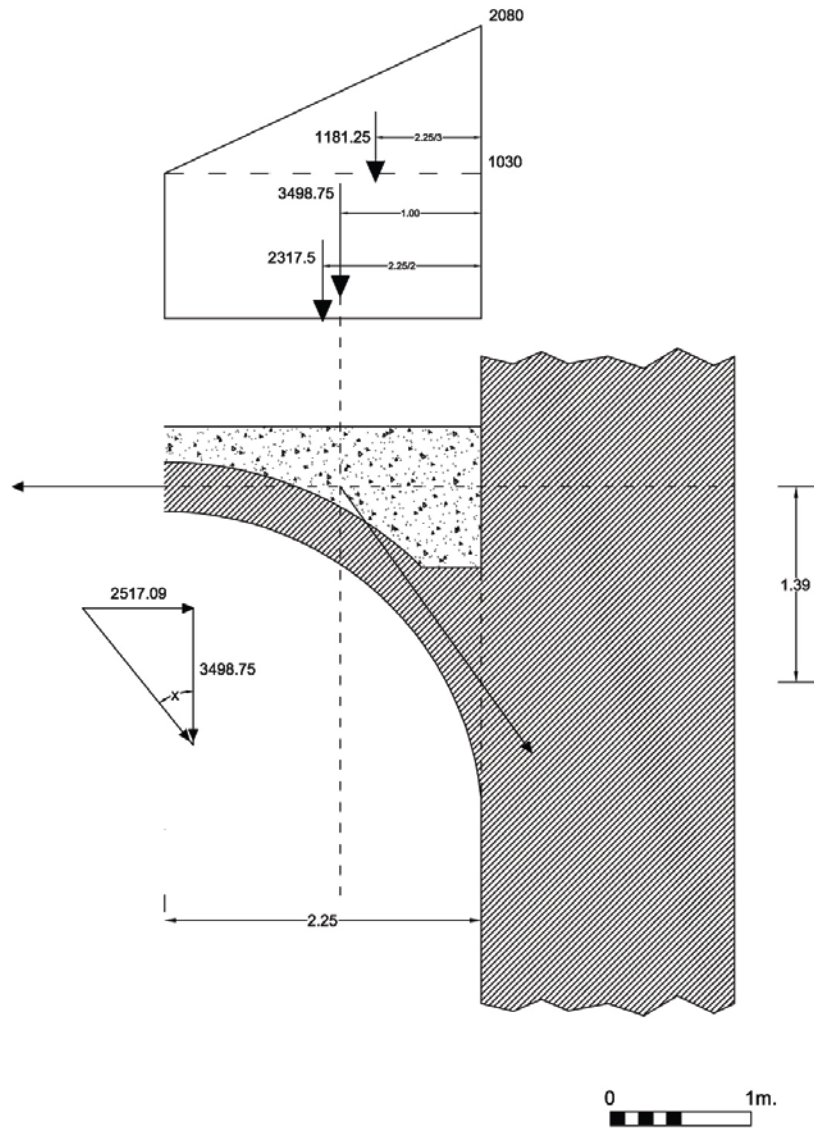
Narteks

Kuzey Kilise narteks tonozu, 35 cm kalınlığında tuğla tonoz örgüsü (1800 kg/m³), tonoz sırtında kilit bölümünde 25 cm kalınlığında dolgu tabakası (1400 kg/m³) ve üzerindeki döşeme kaplamasından (50kg/m²) oluşmaktadır (Şekil E. 1 ve Şekil E. 2).



Şekil E. 1 : Zeyrek Camii kuzey bölüm narteks tonozu.

Zemin kaplaması: 50



Şekil E. 2 : Zeyrek Camii kuzey bölüm narteks tonoz itkisi.

Tonoz itkisi:

Birim kalınlıktaki şerit için

S_{max} (maksimum yatay yük)

N_{max} (maksimum düşey yük)

Toplam tonoz yükü =

Her bir ayağa etkiyen düşey yük = 7872 kg

Z _____

Galeri

Kuzey Kilise galeri tonozu 35 cm kalınlığında tuğla tonoz örgüsü (1800 kg/m³), tonoz sırtında kurşun kaplama ve horasan harcı sıvasından meydana gelmektedir (Şekil E. 3 ve Şekil E. 4).

Yükler:

Tuğla tonoz örgüsü:

Toprak tabakası:

Kurşun kaplama:

Tonoz itkisi

Birim kalınlıktaki bir şerit için

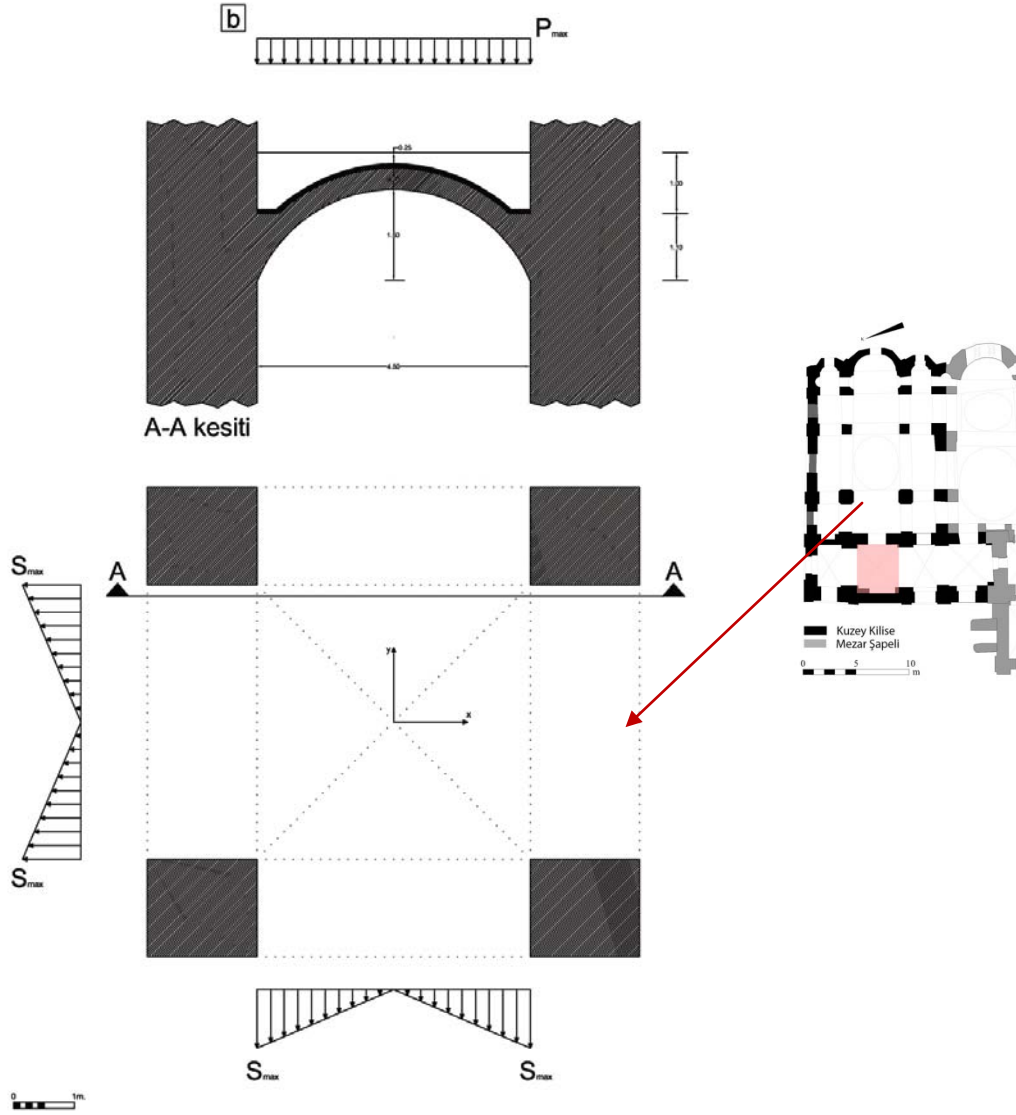
N

S_{max}

Toplam tonoz ağırlığı =

Her bir ayağa etkiyen düşey yük = 3554 kg

Z _____

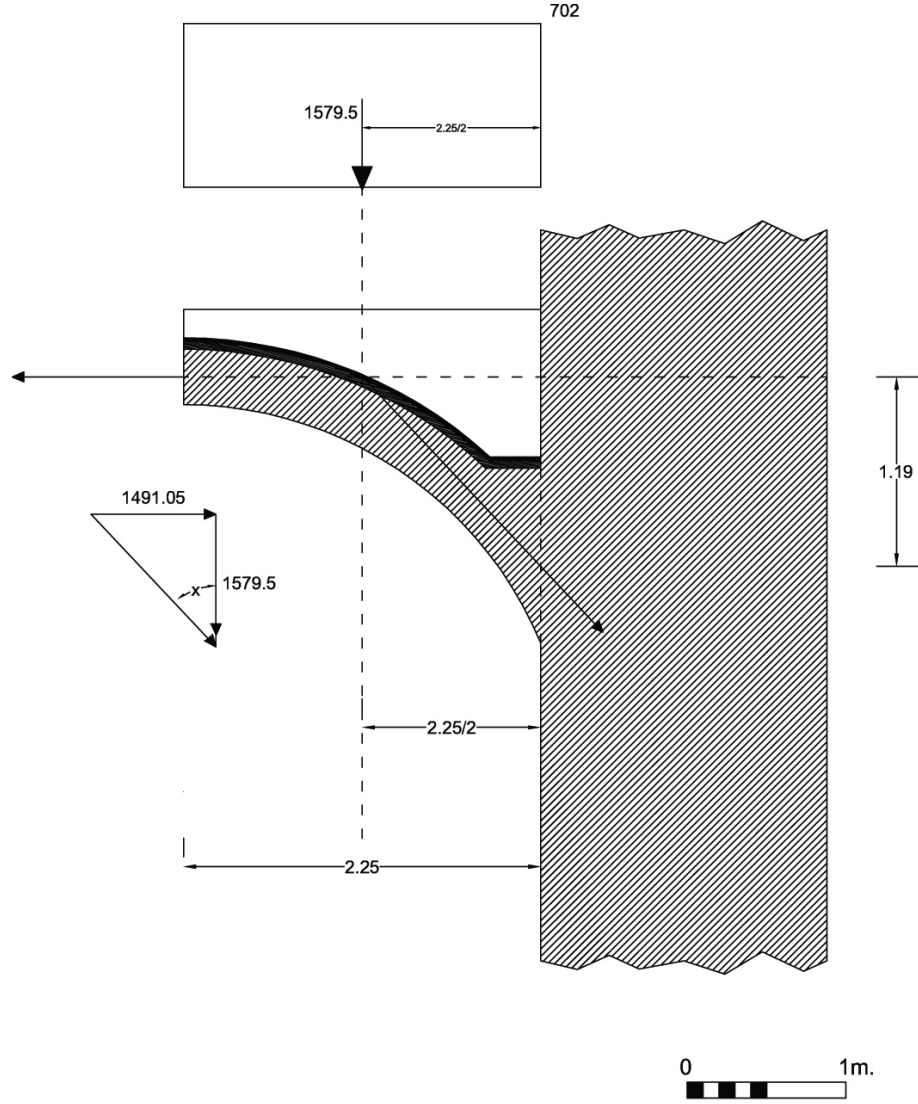


Şekil E. 3 : Zeyrek Camii kuzey bölüm galeri tonozu.

Galeri ve nartekste en büyük açıklığa sahip tonoz referans alınarak bu tonozdan oluşturulan ideal bir tonoz dizisi üzerinde çalışılmıştır. Hesaplamalarda aşağıdaki kabullerden yola çıkılmıştır:

*Bir tam tuğla kalınlığındaki tonozun her iki doğrultuda 4,5 m. açıklık geçtiği kabul edilmiştir.

*Hesaplarda, hem tonoz üzerindeki yükün hem de itkinin duvar üzerindeki dağılımı basitleştirilmiş biçimde ele alınmıştır. Tonoz üzerindeki yükün, kilitten üzengiye doğru lineer şekilde arttığı kabul edilmiştir.



Şekil E. 4 : Zeyrek Camii Kuzey Bölüm narteks tonoz itkisi.

*X eksenine paralel doğrultuda tonozun birim genişliğindeki bir şeridi ele alınmıştır. Söz konusu şeridin tonoz ayaklarına yakın bir kesitten alındığı kabul edilerek, tonoz yükünün tamamının etkidiği bir kemer elde edilmiştir.

*Tonozun her iki eksende simetrik olması nedeniyle y eksenine paralel bir şeridin göz önüne alınmasına gerek kalmamıştır.

*X ve Y eksenlerindeki itkinin dağılımı benzer şekilde basitleştirilmiştir. X ve Y eksenine paralel kemerlerde en büyük itki tonozun kenarlarında bulunmaktadır. Tonozun merkezine doğru itki azalmaktadır.

Tonoz itkilerinin hesabı da oldukça basitleştirilerek yapılmıştır. Toplam yükün yeri tespit edildikten sonra poligonun sadece ilk ve son bölümleri hesaba katılmıştır. Tonoz üzerinde tekil yük olmaması nedeniyle bu yöntemin kabul edilebilir olduğu

düşünülmüştür. Basınç eğrisinin tonoz kesiti içinde kaldığı ve gerilmelerin 1,50 kg/cm²'nin altında kaldığı tespit edilmiştir. Bu değerler, tonoz göçme mekanizmasının tonoz ayaklarının yer değiştirmesine bağlı olduğunu göstermektedir.

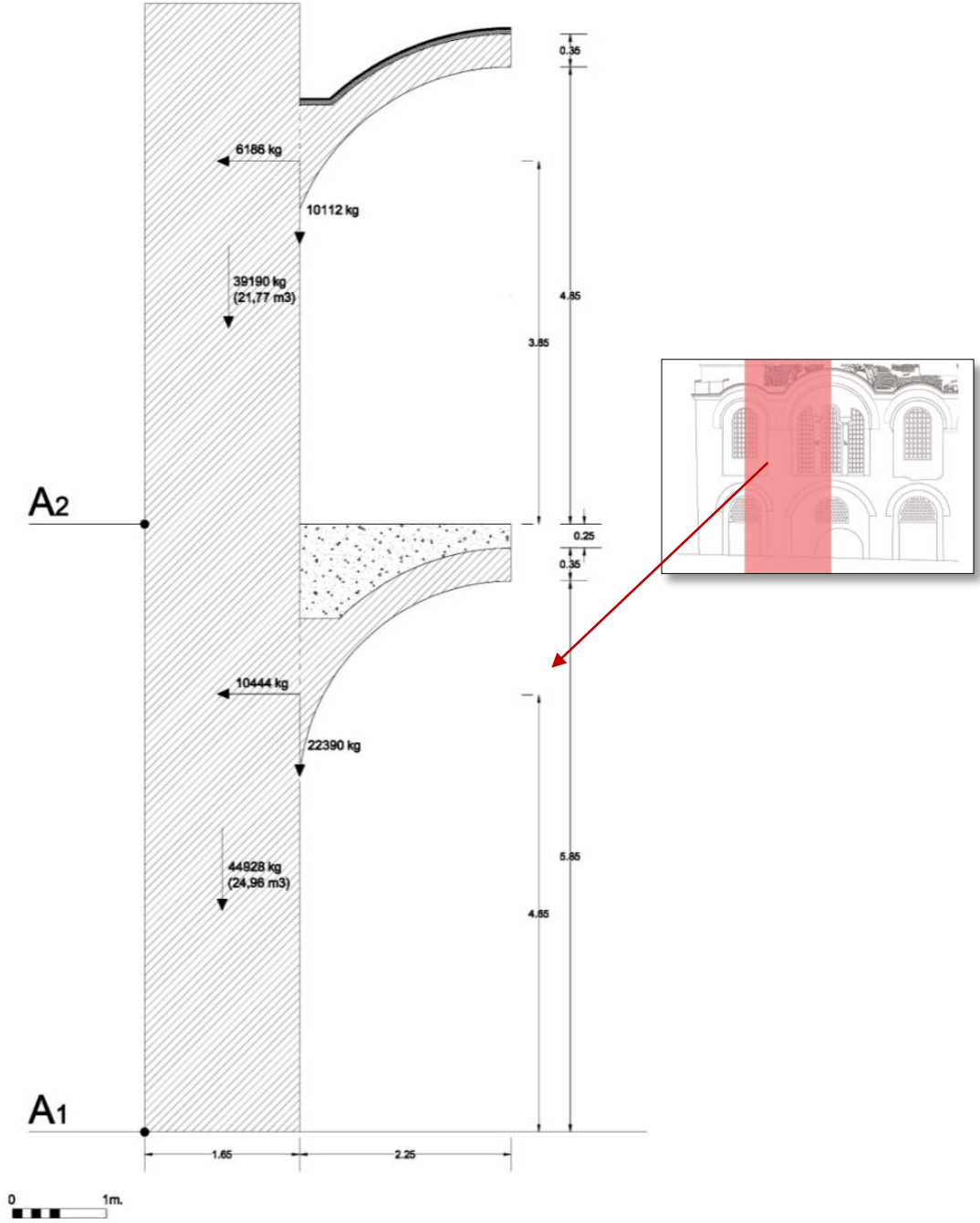
Batı duvarının devrilmesine yönelik kontrol

Batı cephesinde narteks ve galeri tonoz itkileri göz önüne alındığında en kritik bölgenin üçlü pencere düzenindeki açıklığın kenarlarındaki duvar parçaları olduğu görülür (Şekil E. 5). Söz konusu duvar parçaları galeri ve narteksin en büyük çapraz tonozunu taşımaktadır. A1 ve A2 noktaları etrafında batı duvarının devrilmesi için kontroller yapıldığında A1 noktası etrafında dönme durumunun daha kritik olduğu belirlenmiştir. A1 noktası etrafında duvarı devirmeye çalışan momentin 112280 kgm ve dönmeye karşı koyan momentin ise 123025 kgm olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler, batı duvarının deprem yükleri olmadan bile dışa doğru dönmeye oldukça yakın olduğunu göstermektedir. Galeri ve narteks tonozlarında yük artışı veya bir deprem etkisi, batı duvarının dönmesine kolaylıkla neden olabilecektir.

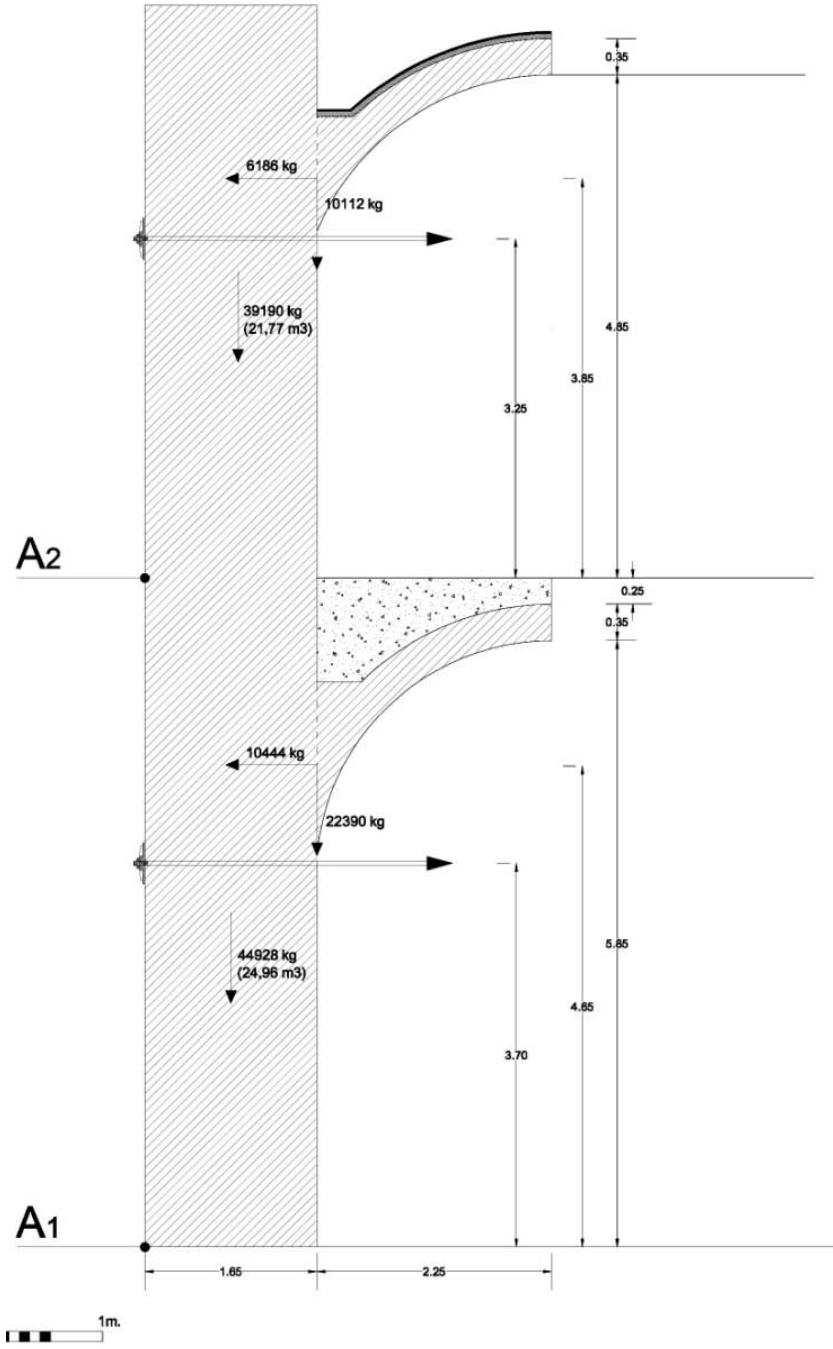
Narteks ve Galeri Gergi Sistemi

Zeyrek Camii Kuzey Bölüm narteks ve galeri tonozlarının neden olduğu itkilerin karşılanması ve böylece batı duvarının dışa doğru dönmesinin engellenmesi amacıyla bir gergi sisteminin kurulması gerekmektedir. Gergi sisteminin deprem anında aktif bir biçimde devreye girerek düzlem dışı hareketlerin önüne geçebileceği ve yapının davranışına katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Zeyrek Camii Kuzey Bölüm narteks ve galerisinde doğu-batı eksenindeki gergilerin sırasıyla +8.40 ve +2.20 kotlarından tonoz ayaklarını birbirine bağlaması uygundur. Her iki mekânda da gergiler tonoz başlangıç seviyesinin hemen altından geçmektedir (Şekil E. 6).



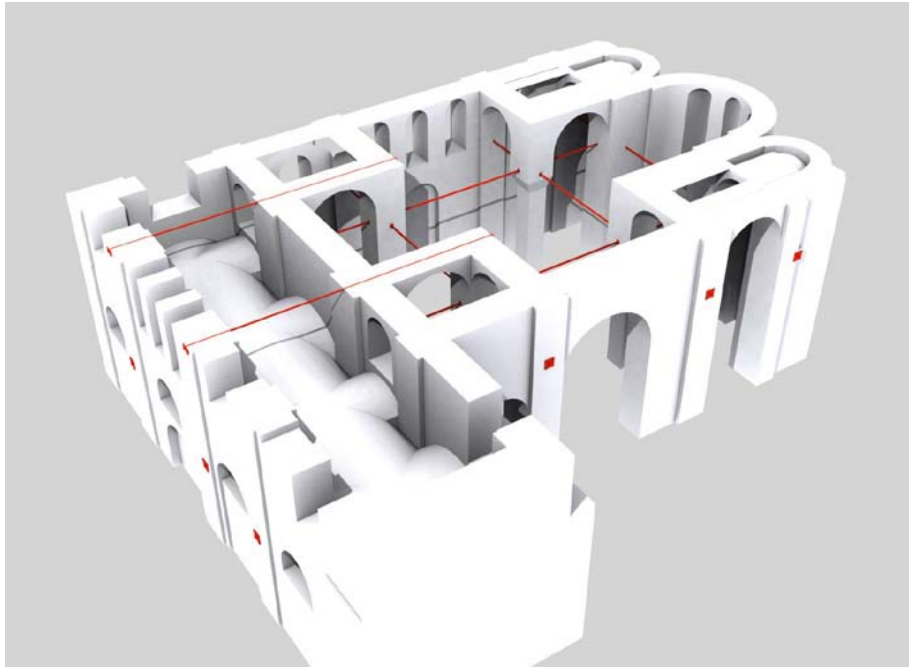
Şekil E. 5 : Narteks tonozu, mevcut yükleme durumunda kemer kesiti içindeki basınç eğrisi ve kesitlerde gerilme dağılımı.



Şekil E. 6 : Narteks ve galeride tonoz itkilerini karşılayan gergi sistemi.

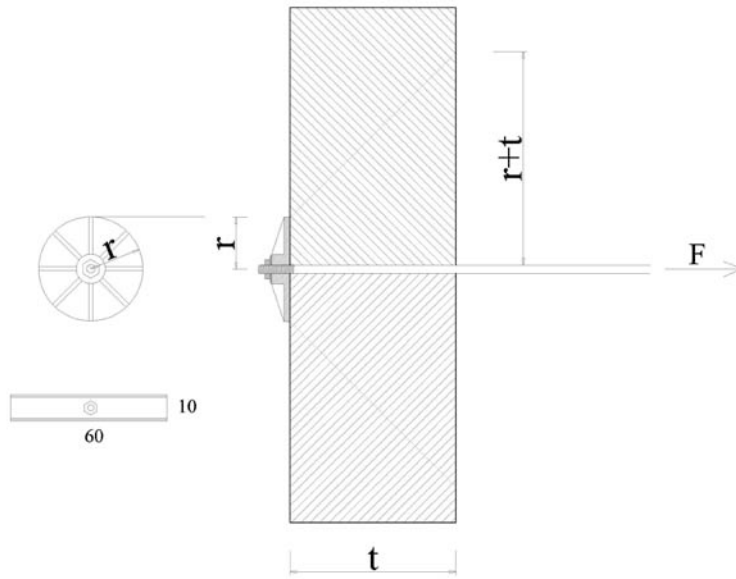


Şekil E. 7 : Narteks ve galeride gergi sistemi önerisi.



Şekil E. 8 : Narteks ve galeride gergi sistemi önerisi.

Gergi ve kılıç elemanlarının kontrolleri



Şekil E. 9 : Gergi ve kılıç detayı.

Dairesel levha kullanılması durumunda

Kaymaya bağlı kontrol

Dairesel levha kullanılması durumunda kayma dayanımına bağlı kontrolün konik biçimli bir duvar parçasını ilgilendirdiği kabul edilerek hesaparlarda kullanılacak yüzey alanı hesap edilmiştir.

— (konik yüzey alanı)

$$\overline{A} = 12,6558 \text{ m}^2$$

$F = A \cdot \tau = 12,6558 \cdot 0,10 \cdot 10^6 = 1265580 \text{ N}$ (Duvar kayma dayanımı 0,1 MPa olarak kabul edilmiştir)

Gerekli yatay yük = $F_{\max} = 1265580 \text{ N} = 897574 \text{ N}$ (Duvar düzlemine dik yatay birleşen)

Sürtünmeye bağlı kontrol

Duvarda kaymaya bağlı hasar durumunda, sürtünme devreye girer. Sürtünme katsayısının $\mu = 0,75$ olarak kabul edilmesi durumunda

$$F_{\max} = 2(2r+t)t \mu \sigma$$

$F = 2(2 \cdot 0,2 + 1,5)1,5 \cdot 0,75 \cdot 0,15 \cdot 10^6 = 0,64125 \cdot 10^6 = 641250 \text{ N}$ (ilgili yüzeyde basınç gerilmesinin 0,15 MPa olduğu yapının kendi ağırlığı etkisinde yapılan analizlerden elde edilmiştir).

Levhanın 20 cm. yarıçapında dairesel kesitli olduğu varsayıldığında, gerginin maksimum 641250 N değeri ile çekilebileceği tespit edilmiştir.

Dikdörtgen levha kullanılması durumunda

Kaymaya bağlı kontrol

Dikdörtgen levha kullanılması durumunda kayma dayanımına bağlı kontrolün piramit biçimli bir duvar parçasını ilgilendirdiği kabul edilerek hesaparlarda kullanılacak yüzey alanı hesap edilmiştir.

$$\frac{1}{2} \times 15,651 \times 2 = 15,651 \text{ m}^2 \quad (\text{piramit yüzeyin alanı})$$

$F = A \cdot \tau = 15,651 \times 0,10 \times 10^6 = 1565100 \text{ N}$ (Duvar kayma dayanımı 0,1 MPa olarak kabul edilmiştir)

Gerekli yatay yük $= F_{\max} = 1565100 \text{ N} = 1106692 \text{ N}$ (Duvar düzlemine dik yatay birleşen)

Sürtünmeye bağlı kontrol

Kontrol yine piramit biçimindeki parça için yapılmıştır. Ancak sürtünmenin piramidin sadece uzun olan iki yüzeyinde var olduğu kabul edilmiştir.

$$\frac{1}{2} \times 15,651 \times 2 = 15,651 \text{ m}^2 \quad (\text{piramit yüzeyin alanı})$$

Alanın yatay izdüşümü $6,29 \text{ m}^2$

$F_{\max} = A \mu \sigma = 6,29 \times 0,75 \times 0,15 \times 10^6 = 707625 \text{ N}$

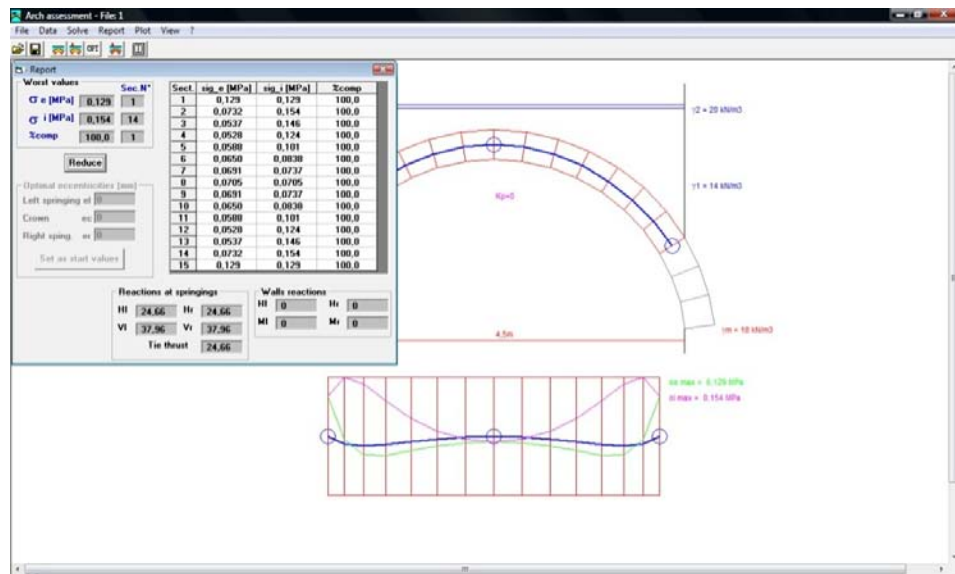
EK F: Galeri ve narteks tonoz itkilerine yönelik hesap sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması.

Narteks ve galeri tonozları ile batı cephesinde yapılan incelemelerde tonoz itkilerinin batı duvarının dışa doğru dönmesi ile ilgili hasar mekanizmasında kritik öneme sahip olmasından dolayı tonoz itkilerinin diğer yöntemlerle de incelenmesinin uygun olacağı düşünülmüştür.

ARCO yazılımı

Narteks ve galeri tonozları için elde edilen değerler, Brescia Üniversitesi Mühendislik Fakültesi öğretim üyelerinden Prof. Piero Gelfi'nin geliştirdiği kemer ve tonozların analizinde kullanılan "ARCO" yazılımı kullanılarak kontrol edilmiştir. Yazılım, kâgir bir kemerde dış yükler ile denge durumunda ve bütünüyle kemer kesiti içinde olan bir basınç eğrisinin bulunması halinde kemerin güvenli olduğunu tanımlayan "safe theorem" teorisine dayanmaktadır. Bununla birlikte dış yükler etkisinde oluşan gerilmelerin yeterince küçük olmaları gerekmektedir.

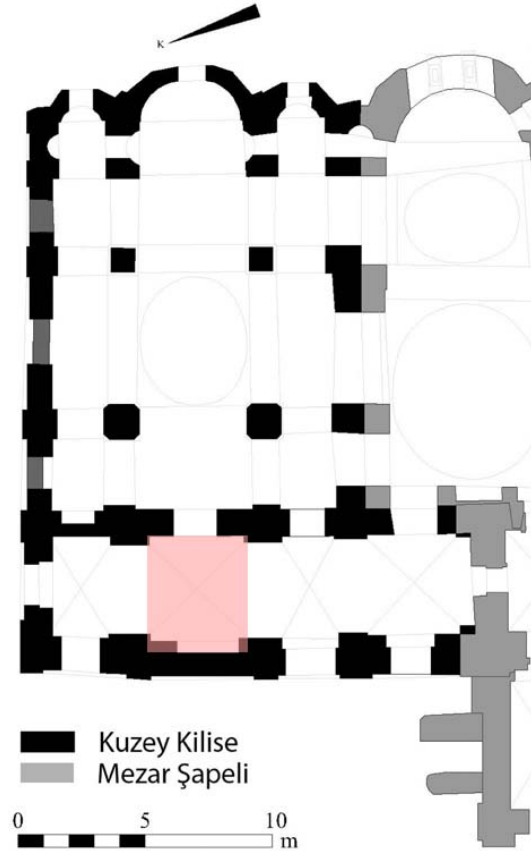
Zeyrek Camii Kuzey Bölüm narteksinde 4,5 metre açıklığı geçen 1 metre kalınlığındaki kemer için mesnet reaksiyonları, yatay birleşen 2466 kg/m ve düşey birleşen 3796 kg/m, galeride ise yatay birleşen 1487 kg/m ve düşey birleşen 1620 kg/m olarak tespit edilmiştir (Şekil F. 1). Bu değerlerin daha önce yapılan hesaplarda elde edilen sonuçlarla (narteks tonozunda yatay birleşen 2517 kg , düşey birleşen 3498kg) uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil F. 1 : Narteks tonozu, mevcut yükleme durumunda kemer kesiti içindeki basınç eğrisi ve kesitlerde gerilme dağılımı.

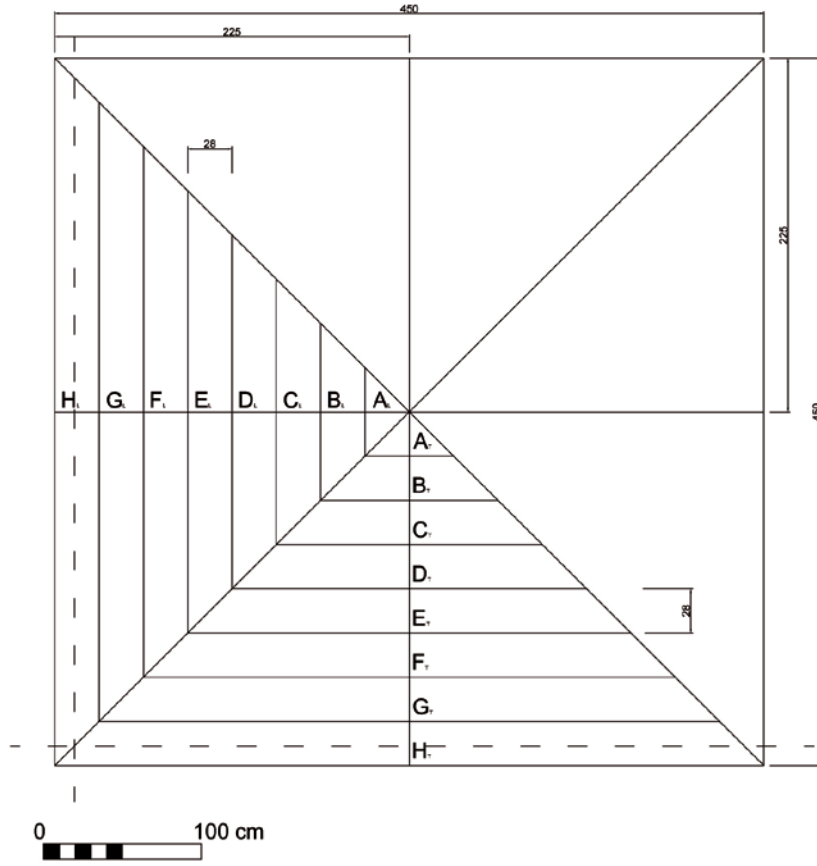
Analitik-grafik yöntem

Narteks ve galeri tonozlarının en büyüğü yaklaşık 4,50 x 4,50 m² lik bir boyuta sahiptir (Şekil F. 2). İncelenecek tonozun kare olması nedeniyle enine ve boyuna doğrultudaki kemer dizilerinin itkileri aynı olacaktır. Bu nedenle yalnızca bir yarım kemerin kontrolü tonozun geneli hakkında tüm verileri sunacaktır. Çapraz tonoz, yaklaşık 28 cm kalınlığında şeritlere (Lt) ayrılmıştır (Şekil F. 3).



Şekil F. 2 : Zeyrek Camii kuzey bölüm narteks tonozu.

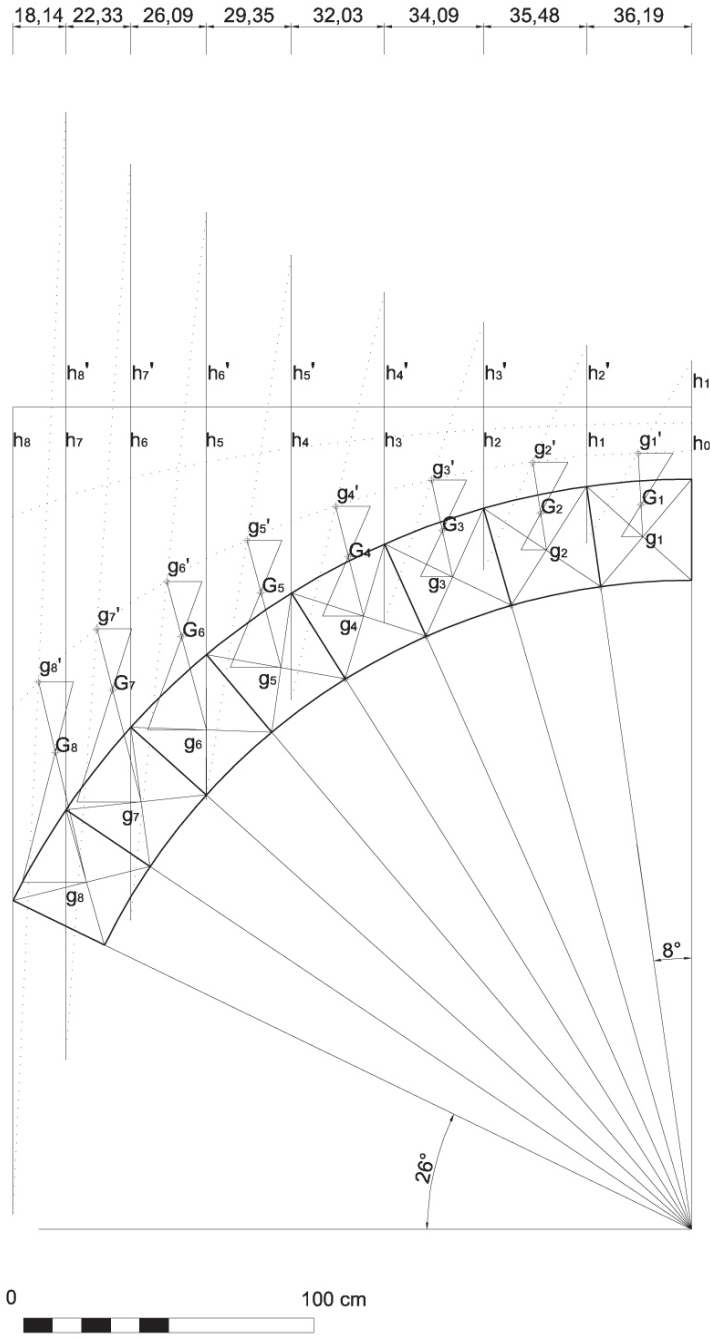
Çapraz tonozda yapılan kontroller esas itibariyle kemerlerde yapılan kontrollerden farklı değildir. Çapraz tonozun, diyagonal kemerlerin üzerine binmiş bir dizi kemerden oluştuğu düşünülebilir. Bu durumda en kenardaki kemerin kontrol edilmesi aslında tüm kemerlerin bir anlamda kontrol edilmesidir.



Şekil F. 3 : Çapraz tonozu meydana getiren kemerler.

Yapının narteksinde 35 cm kalınlığındaki tuğla tonozların üzerinde yaklaşık 25 cm kalınlığında dolgu bulunmaktadır. Dolgu miktarı kenarlara doğru gidildikçe artmaktadır. Hesaplamalarda tuğla tonozun birim hacim ağırlığı (y) 1800 kg/m³ dolgu için ise (y') 1400 kg/m³ değerleri kullanılmıştır.

Hem enine hem de boyuna doğrultudaki kemer şeritlerinde eşdeğer dolgu yükseklikleri $H_e = h(y/y')$ hesaplanmıştır (Şekil F. 4).



Şekil F. 4 : Tonozun en kenarındaki kemer şeridi.

Dolgu yükü:

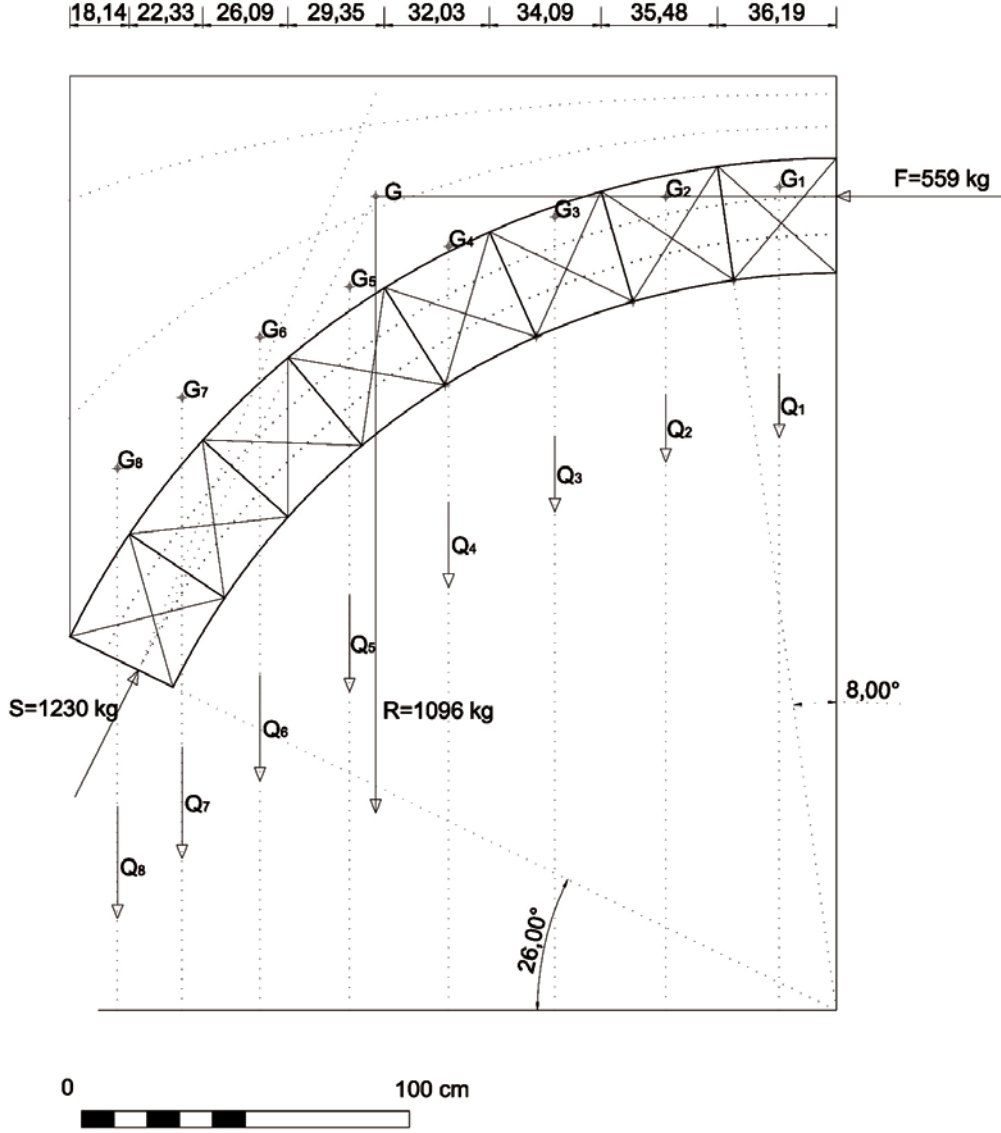
Çizelge F. 1 : Tonoz yükleri.

Tonoz	he (cm)	Bt (cm)	Pdolgu (kg)	Ptonoz (kg)	Qt (kg)
1	21,39	36,19	37,43	60	97,43
2	27,22	35,48	43,66	60	103,66
3	36,94	34,09	55,36	60	115,36
4	50,17	32,03	70,63	60	130,63
5	66,89	29,35	86,97	60	146,97
6	86,33	26,09	101,19	60	161,19
7	108,5	22,33	110,12	60	170,12
8	133	18,14	110,88	60	170,88

Tuğla tonoz yükü:

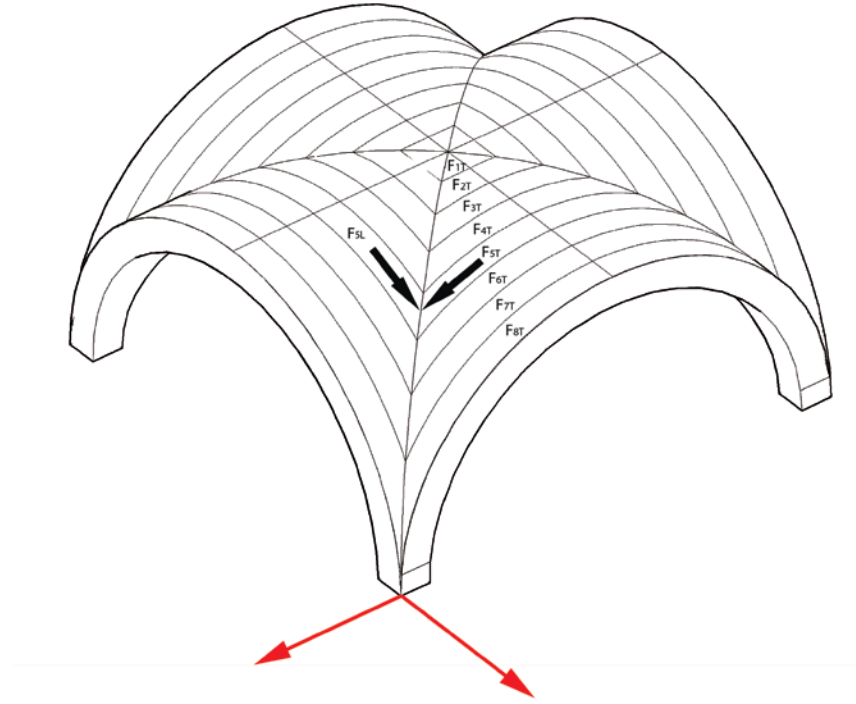
Toplam yük = $R_t = Q_{1t} + Q_{2t} + Q_{3t} + Q_{4t} + Q_{5t} + Q_{6t} + Q_{7t} + Q_{8t}$

$R_t = 97,43 + 103,66 + 115,36 + 130,63 + 146,97 + 161,19 + 170,12 + 170,88 = 1096,28 \text{ kg}$



Şekil F. 5 : Narteks çapraz tonozu, mevcut yükleme durumunda en kenardaki kemerin itkisi.

Çapraz tonozun genişlikleri 0.28125 metre olan 8 adet şeridi tonoz kenarından merkeze doğru gidildikçe küçülmektedir (Şekil F. 5). Her bir kemer için yukarıdaki hesaplar tekrar edilmiş ve her kemerin itkileri bulunmuştur. İtkileri hesap edilen enine ve boyuna kemerler yüklerini 2 diyagonal kemere, diyagonal kemerler ise yüklerini 4 ayağa aktarmaktadır (Şekil F. 6). Tonz itkisinin bir yağına etkiyen yatay birleşenin 4967 kg (3512 kg doğu-batı doğrultusunda ve 3512 kg kuzey-güney doğrultusunda) ve düşey birleşenin 8862 kg olduğu belirlenmiştir. Bu hesaba göre tonozun toplam ağırlığı 35448 kg olarak bulunmuştur.



Şekil F. 6 : Narteks tonozu, enine ve boyuna kemerlerin diyagonal kemere itkilerini aktarması.

Sonlu Elemanlar Modeli

Narteks çapraz tonozunun sonlu elemanlar modeli, sistemin kendi ağırlığı etkisinde analiz edilmiştir (Şekil F. 7). Tonoz itkisinin doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusunda yatay birleşenleri 2997 kg olarak bulunmuştur. Elde edilen değerin yaklaşık hesap ile bulunan itkiden biraz daha büyük olduğu görülmektedir.



Şekil F. 7 : Narteks tonozunun sonlu elemanlar modeli.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Umut Almaç

Doğum Yeri ve Tarihi: Sivas 1978

E-Posta: almacum@itu.edu.tr

Lisans: İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans: İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Yapı Bilgisi Programı

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

- 2007-2011, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi. Araştırma Görevlisi
- 2005-2006, Koç Üniversitesi Vakfı, Seddülbahir Kalesi Restorasyon ve Yeniden Kullanım Projesi.
- 2005, Ateşler Turizm ve İnşaat Ltd., İstanbul
- 2004, Kabataş Erkek Lisesi Vakfı, Ortaköy, İstanbul.

Yayın ve Patent Listesi:

- Barros, R. S., **Almaç, U.**, Oliveira, D. V., Grazzini, A., 2008: Reforço sísmico da fachada de um palácio do Séc. XII, *4th CINPAR - International conference on Structural Defects and Repair*, June 2008, University of Aveiro, Portugal. (Poster)
- Barros, R. S., **Almaç, U.**, Grazzini, A., 2008: Analysis of the Podestà Palace's Façade, *International Seminar on Seismic Risk and Rehabilitation of Stone*, July 2008, Maso, Faial, Portugal. (Poster)
- Barros, R. S., **Almaç, U.**, Oliveira, D. V., Grazzini, A., 2008: Reforço sísmico da fachada de um palácio do Séc. XII", *4th CINPAR - International conference on Structural Defects and Repair*, June 2008, University of Aveiro, Portugal. (Tam metin)
- Barros, R. S., **Almaç, U.**, Grazzini, A., 2008: Analysis of the Podestà Palace's Façade, *International Seminar on Seismic Risk and Rehabilitation of Stone*, July 2008, Maso, Faial, Portugal. (Tam metin)
- **Almaç, U.**, 2009: Anıtsal Olmayan Yığma Yapıların Taşıyıcı Sistem Analizi, *Kâgir Yapılarda Koruma ve Onarım Semineri*, Eylül 2009, İstanbul.
- Ahunbay, Z., Ekimci B., Ferah, F. E., **Almaç, U.**, 2009. "Public Kitchen of Haseki Sultan within the Takiyya Complex in Al-Quds/Jerusalem", 2009, ISBN: 978-92-

9063-190-3, Istanbul Research Center for Islamic History, Art and Culture, Al-Quds/Jerusalem 2015 Program, 2008 Report.

▪ Barros, R. S., **Almaç, U.**, Oliveira, D. V., Grazzini, A "Finite Element Analysis of an Old Building Façade and Reinforcement", 2009, *International Symposium on Historical Earthquakes and Conservation of Monuments and Sites in the Eastern Mediterranean Region, 500th Anniversary Year of the 1509 September 10, Marmara Earthquake*. September 2009, İstanbul. (Poster)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

▪ **Almaç, U.**, 2009: Preliminary Observations on Structural Condition of a Byzantine Monument in Historic Peninsula of Istanbul: Pantokrator Church (Zeyrek Camii), *International Symposium on Historical Earthquakes and Conservation of Monuments and Sites in the Eastern Mediterranean Region, 500th Anniversary Year of the 1509 September 10, Marmara Earthquake*. September 2009, İstanbul, Turkey (Genişletilmiş özet)

▪ **Almaç, U.**, 2009: Preliminary Observations on Structural Condition of a Byzantine Monument in Historic Peninsula of Istanbul: Pantokrator Church (Zeyrek Camii), *International Symposium on Historical Earthquakes and Conservation of Monuments and Sites in the Eastern Mediterranean Region, 500th Anniversary Year of the 1509 September 10, Marmara Earthquake*. September 2009, İstanbul, Turkey (Poster)

▪ **Almaç, U.**, 2010: Preliminary Observations on Structural Condition of a Byzantine Monument in Historic Peninsula of Istanbul: Pantokrator Church, *7th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*, October 2010 Shanghai, China.(Tam metin)

▪ **Almaç, U.**, 2010: İstanbul Tarihi Yarımada'da Bulunan bir Bizans Anıtının Taşıyıcı Sistem Durumunun Öndeğerlendirmesi ve Sağlamlaştırma Önerileri, *1. Uluslararası Lisansüstü Araştırmaları Sempozyumu*, Kasım 2010, ODTÜ, Ankara, Türkiye. (Tam metin)