



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARİHİ YAPILARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİNİN
BURSA ÖRDEKLİ HAMAMI ÖRNEĞİNDE İNCELENMESİ

M.Bilal BAĞBANCI

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2009



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARİHİ YAPILARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİNİN
BURSA ÖRDEKLİ HAMAMI ÖRNEĞİNDE İNCELENMESİ

M.Bilal BAĞBANCI

Doç.Dr. Reşat ÖZCAN
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2009

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARİHİ YAPILARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİNİN
BURSA ÖRDEKLİ HAMAMI ÖRNEĞİNDE İNCELENMESİ

M. Bilal BAĞBANCI

DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez 06./03./2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oy-
çokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç.Dr.Reşat ÖZCAN

Danışman



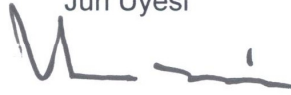
Doç.Dr.Alper İLKİ

Jüri Üyesi



Prof.Dr.Sedat ÜLKÜ

Jüri Üyesi



Yrd.Doç.Dr.Mizan DOĞAN

Jüri Üyesi



Prof.Dr.Nilüfer AKINCITÜRK

Jüri Üyesi



ÖZET

Binlerce yıllık kültürel mirasımız olan ve birçok deprem, yangın, savaş ve doğal afet geçirmiş tarihi yapı ve anıtlara yapılacak olan müdahalelerden önce tarihi yapının oluşturulma biçiminin, malzeme özelliklerinin, statik ve dinamik yükler altındaki davranışlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu anlamda yapının korunması için yapılacak olan müdahalelerde birçok disiplinin bir arada çalışması yapının gelecek kuşaklara aktarılmasında bir güvence olacaktır.

Bursa Ördekli Hamamı ile ilgili yapılan bu çalışmada öncelikle yapının tarihçesi, uğradığı hasar ve deformasyonlar, taşıyıcı elemanların yük taşıma mekanizmaları, malzeme karakteristikleri ve mukavemetleri, zemin ve geoteknik özellikleri incelenmiştir. Daha sonra tarihi yapının malzeme olarak değişkenlik gösterdiği bölgeler belirlenerek deney çalışmaları için numuneler alınmıştır. Yapıda kullanılan malzemelerin kimyasal, mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiş, duvarlarda taş-harç birleşiminden oluşan, üst yapıya ait olan eğrisel örtülerde de tuğla-harç birleşiminden oluşan kompozitin mekanik ve fiziksel özellikleri tespit edilmiştir. Daha sonra yapının tümüne ait üç boyutlu katı modeli oluşturulmuş ve çeşitli analizlerin yapılabilmesi için sonlu eleman modeli hazırlanmıştır.

Analiz çalışmalarında ise; yapının kendi ağırlığı altındaki analizleri yapıldıktan sonra yapının A1 türü burulma düzensizliği kontrol edilmiştir. Yapının deprem analizinde doğal titreşim periyotları hesaplandıktan sonra davranış spektrumu yöntemi kullanılarak deprem analizleri yapılmıştır. Ayrıca 2007 Türk Deprem Yönetmeliği kullanılarak duvarların kayma dayanımlarının emniyetli kayma dayanımlarıyla karşılaştırılması yapılmıştır. Oturma varsayımları yapının duvarlarında oluşturulduktan sonra yapının tüm analiz sonuçları değerlendirilerek yapının yıkık bölümlerinin yıkılma nedenleri adım adım araştırılmıştır.

Tarihi yapıların güçlendirme ve koruma yöntemleri belirlenmeden önce; yapıya ilişkin sayısal analizlerinin gerçekleştirilmesi ve elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurularak restorasyon çalışmalarının yapılması, yapılacak çalışmaların hiç kuşkusuz daha bilinçli olmasını sağlayacaktır.

Keywords: Tarihi yığma yapılar, Malzeme deneyleri, Horasan harcı, Modelleme, Sonlu elemanlar yöntemi,

ABSTRACT

Before any attempt to be made for repair of the historical monuments and buildings which exposed lots of earthquakes, fires, wars and hazards from the past to nowadays, how to be formed, material strength, load carrying characteristics should be picked up. Many diciplines must working together for conservation or repair of this structures to keep the historical meaning of the structure.

In this study which Bursa Ördekli Public Bath is considered; the soil conditions and the geotechnical aspects, material characteristics and mechanical properties of structures will be determined on site and laboratory experiments. Samples will taken from the different spaces and various parts of the structures for determining the chemical, physical and mechanical properties of materials which are used in the construction of the Hamam. After the individual tests the composite materials (rubblestone-mortar in walls, brick-mortar in transition elements and domes) physical and mechanical parameters will calculated. Later on the finite element model of the structure will be formed for making the various analysis of the structure.

In the analysis phase, first of all linear self weight analysis will be performed. After this analyse, torsional irregularity effects during eathquake is investigated. Natural frequencies of the structure will calculate for the dynamic analysis. After all analysis, comparisons will made with the analysis results and the collapse parts of the structure. The results will avaluate and try to find out the collapse mechanism of the structure.

Before determination the strengthening and conservation methods of the structure, the numerical analysis must have been done and restoration works are made with the conscious on historical structures.

Keywords: Historical Masonry Structures, Material Tests, Horasan Mortar, Micro Modelling, Macro Modelling, Finite Element Method

İÇİNDEKİLER	Sayfa
TEZ ONAY SAYFASI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER DİZİNİ	xxiii
GİRİŞ	1
1. KAYNAK ÖZETLERİ	4
1.1. Yapının tarihçesi, mimari özellikleri ve strüktürel problemler	4
1.2. Yapının malzeme özellikleri ve uygulanan testler	5
1.3. Yapının temel zemini ve özellikleri.....	7
1.4. Tarihi yapıların mikro ve makro analizleri	8
1.5. Tarihi yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle analizi	9
2. MATERYAL ve YÖNTEM	13
2.1. Tarihi Kagir Yapıların Mevcut Durumlarının Belirlenmesi Amacıyla Yapılan Çalışmalar	13
2.1.1.Yapının tarihçesi, mimari özellikleri ve taşıyıcı sisteminin belirlenmesi.	13
2.1.1.1. Yapının tarihçesi ve mimari özellikleri	13
2.1.1.2. Yapının taşıyıcı sisteminin belirlenmesi	14
2.1.2. Yapısal hasar biçimlerinin tanımlanması ve bozulmaların izlenmesi ...	15
2.1.3. Tarihi yapılarda malzeme özelliklerinin belirlenmesi için yapılan testler	16
2.1.3.1. Yerinde yapılan testler	17
2.1.3.2.Labovatuvar ortamında yapılan testler	33
2.1.4. Yapının temel zemini özelliklerinin belirlenmesi	42
2.2. Tarihi Kagir Yapıların Yapı Güvenliğinin Belirlenmesi İçin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi	43
2.2.1. Tarihi yapıların mikro ve makro analizleri	43
2.2.1.1. Mikro modelleme	43
2.2.1.2.Makro modelleme	47

2.2.2. Tarihi yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle analizi	50
3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA.....	54
3.1. Bursa Ördekli Hamamının Mevcut Durumunun Belirlenmesi Amacıyla Yapılan Çalışmalar	54
3.1.1. Yapının tarihçesi, mimari özellikleri ve taşıyıcı sisteminin belirlenmesi	54
3.1.1.1. Yapının tarihçesi ve mimari özellikleri	54
3.1.1.2. Yapının taşıyıcı sisteminin belirlenmesi	71
3.1.2. Yapısal hasar biçimlerinin tanımlanması ve bozulmaların izlenmesi ...	73
3.1.3. Yapının malzeme özelliklerinin belirlenmesi için yapılan testler	77
3.1.3.1. Laboratuvar ortamında yapılan testler	80
3.1.3.2. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi	98
3.1.4. Yapının temel zemini özellikleri	109
3.1.5. Bölgenin sismik özellikleri	111
3.2. Ördekli Hamamının Yapı Güvenliğinin Belirlenmesi İçin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi	114
3.2.1. Yapının üç boyutlu modelinin oluşturulması	114
3.2.2. Yapının sonlu eleman modeli	121
3.2.3. Yapının malzeme özelliklerinin belirlenmesi	127
3.2.4. Yapının kendi ağırlığı altındaki analizi	133
3.2.5. A1 türü burulma düzensizliğinin kontrolü.....	143
3.2.6. Yapının Deprem Analizi	147
3.2.6.1. Yapının X yönündeki deprem analizi	155
3.2.6.2. Yapının Y yönündeki deprem analizi	160
3.2.6.3. Yapının Z yönündeki deprem analizi	165
3.2.7. Deprem Kuvvetleri Altında Duvarlarda Oluşan Kayma Gerilmelerinin Kontrolü	170
3.2.8. Zamana bağlı oturma analizi	174
3.2.9. Araştırma Sonuçlarının Tartışılması	186
3.2.9.1. Yapının mevcut durumunun belirlenmesi.....	186
3.2.9.2. Yapıda kullanılan malzeme özellikleri.....	187
3.2.9.3. Yapının üç boyutlu modellenmesi	187
3.2.9.4. Yapının sonlu eleman seçimi ve analizleri	188
3.2.9.5. Yapının yıkık olan bölgelerinin yıkılma sebeplerinin araştırılması	190

4. SONUÇ	199
KAYNAKLAR	201
TEŞEKKÜR	206
ÖZGEÇMİŞ	207

KISALTMALAR DİZİNİ

SEM	- Sonlu Elemanlar Metodu
NDT	- Zarar vermeyen Yöntemler
CQC	- Tam karesel birleştirme
ABYYHY	- Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
XRD	- X-Işını Kırınım Yöntemi
SEM	- Taramalı Elektron Mikroskobu
EDX	- Enerji Yayıcı X ışınları Analizi
DTA	- Diferansiyel Termal Analiz
ICP	- Lazer Aşındırma Analizi
TGA	- Termogravimetrik Analiz
CAD	- Bilgisayar Destekli Tasarım

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1	Ördekli Hamamından alınan numunelerin su emme oranları.....	81
Çizelge 3.2	Ördekli Hamamından alınan numunelerin kaynar su emme oranları.....	83
Çizelge 3.3	Ördekli Hamamından alınan numunelerin birim hacim ağırlıkları.....	84
Çizelge 3.4	Ördekli Hamamından alınan numunelerin doluluk ve boşluk oranları...	85
Çizelge 3.5.	Ördekli hamamında kullanılan malzemelerin statik elastisite modülleri.	86
Çizelge 3.6	Ördekli hamamında kullanılan malzemelerin eğilme dayanımları.....	88
Çizelge 3.7	Ördekli hamamında kullanılan malzemelerin küp basınç mukavemetleri	89
Çizelge 3.8	Ördekli hamamında kullanılan malzemelerin silindir basınç mukavemetleri.....	91
Çizelge 3.9	Bursa civarında 1900 - 2004 yılları arasında can kaybı ve hasara neden olmuş önemli depremler ($M_s > 5.0$).....	111
Çizelge 3.10	Yapıda kullanılan malzemelerin ortalama değerleri	130
Çizelge 3.11	Yapıda kullanılan malzemelerin fiziksel ve mekanik değerleri.....	132
Çizelge 3.12	Ördekli Hamamının planda rijitlik merkezinin tespit edilmesi	145
Çizelge 3.13	Ördekli Hamamının planda ağırlık merkezinin tespit edilmesi	145
Çizelge 3.14	Yapının modal frekansları ve kütle katılımları	153
Çizelge 3.15	Yerel zemin sınıfına bağlı spektrum karakteristik periyodları.....	154
Çizelge 3.16	+1,671 kotu ile +6,10 kotunda duvarlarda oluşan kayma gerilmesinin duvar kayma emniyet gerilmesi ile karşılaştırılması	173
Çizelge 3.17	%5 sönüme göre oluşan azalma oranları	197

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Yapının strüktürel analizleri için yapılan deneysel araştırmalar (Binda 2007).....	18
Şekil 2.2	Sonik ölçümler (Rossi 1996).....	21
Şekil 2.3	Duvarda sonik hız dağılımı (Binda 2007).....	22
Şekil 2.4	Çatlak yerinin radarla tespiti (Binda 2007).....	22
Şekil 2.5	Metal bağlantı elemanının belirlenmesi (Binda 2007).....	23
Şekil 2.6	Yüzey sertliğinin ölçülmesi (Aköz 2005).....	24
Şekil 2.7	Serbest titreşim deney algoritması (Koçak 1999).....	25
Şekil 2.8.	Venedik Saint Mark Bazilikasının temel yapısının incelenmesi (Rossi 1996)	27
Şekil 2.9.	Venedik Saint Mark Çan Kulesinin temelinde video kamera araştırması a)Açılan bölümde temel kesiti b) Bilgisayar programı ile temel kesitinin tekrar düzenlenmesi (Rossi 1996).....	28
Şekil 2.10	Flatjack aletiyle deformasyon ölçümleri (Aköz 2005).....	30
Şekil 2.11	Shearjack aletiyle kayma deformasyon ölçümleri (Aköz 2005).....	31
Şekil 2.12	Borehole dilatometric testinde malzeme karakteristiğinin görünümü (Rossi 1996).....	32
Şekil 2.13	Duvarın içinde bulunan ahşap eleman.....	33
Şekil 2.14	Eğilme mukavemeti tayininde kullanılan düzenek (TS 699).....	38
Şekil 2.15	Nokta yükleme deneyi (Aköz, 2005).....	39
Şekil 2.16	Brezilya silindiri deneyi (Ulusay, 2005).....	39
Şekil 2.17	120 ohm dirençli birim deformasyon ölçer yapılandırılmış karot örneği (Ulusay, 2005).....	40
Şekil 2.18	Deney sırasında gelişen eksenel ve çapsal deformasyonlar (Ulusay,2005).....	41
Şekil 2.19	Çapsal ve eksenel gerilme-birim deformasyon grafikleri (Ulusay,2005).....	41

Şekil 2.20	Yığmaya ait basit hücre ve benzeşim işlemi (Zucchini,2009)	45
Şekil 2.21	Ele alınan modelin geometrik sembolleri (Zucchini,2009)	45
Şekil 2.22	Hücresinin düşey yükler altındaki antisimetrik deformasyon mekanizması (Zucchini,2009).....	46
Şekil 2.23	Hücresinin kayma yükleri altındaki antisimetrik deformasyon mekanizması: a) y doğrultusu b) x doğrultusu	46
Şekil 2.24	Eşdeğer kayma gerilmesi çizgileriyle kompozit akma yüzeyi. Malzeme eksenleri boyunca çekme ve basınç için farklı mukavemet değerleri (Lourenco 1996).....	48
Şekil 2.25	Rankine tipi akma yüzeyi ($T_{xy} \geq 0$) (Lourenco 1996).....	49
Şekil 2.26	Hill tipi akma yüzeyi ($T_{xy} \geq 0$) (Lourenco 1996).....	49
Şekil 2.27	Sonlu elemanlar modeli görünüşler (a) Batı–Doğu; (b) Güney–Doğu; (c) Doğu– Kuzey. ile yapının a)1. modu b)2. modu c)4. modları (Ivorra ve ark., 2006).....	52
Şekil 2.28	Griffith Köprüsü, sonlu elemanlar modeli ve gerilmeler (Fanning ve ark.,2001)	52
Şekil 2.29	Bazilika tipi kilisenin sonlu elemanlar modeli ve gerilmeler (Mele ve ark.,2003).....	53
Şekil 2.30	Bizans kilisesi sonlu elemanlar modeli ve gerilmeler (Psycharis ve ark. 2003).....	53
Şekil 3.1	Ördekli Hamamı hava fotoğrafı (Osmangazi Belediyesi).....	55
Şekil 3.2	Ördekli Hamamı rölövesi (Osmangazi Belediyesi).....	56
Şekil 3.3	A-A kesiti (Osmangazi Belediyesi)	56
Şekil 3.4	B-B kesiti (Osmangazi Belediyesi)	56
Şekil 3.5	Kubbeye geçişi sağlayan tromplar	58
Şekil 3.6	Soğukluktan ılıklığa geçişi sağlayan iki basamakla çıkılan kapı	58
Şekil 3.7	Erkekler soyunmalık güney cephesinin bir sıra taş, üç sıra tuğla ile örülmesi.....	59
Şekil 3.8	Hamamın kuzey cephesinde dökülen kesme taşlar.....	59
Şekil 3.9	Ilıklıkta bulunan pandantifler.....	60
Şekil 3.10	Sıcaklık kubbesinde yer alan filgözleri.....	61

Şekil 3.11	Nemden etkilenen kubbe.....	62
Şekil 3.12	Nemden etkilenen pandantif	62
Şekil 3.13	Soyunmalık kuzey duvarında bulunan çatlaklar.....	63
Şekil 3.14	Erkekler soyunmalıkta yıkık duvarlar.....	63
Şekil 3.15	Erkekler soğukluk bölümünün doğu yönündeki yıkık duvarlar ve temelleri.....	64
Şekil 3.16	Soyunmalık kuzey duvarında bulunan çatlaklar.....	64
Şekil 3.17	Erkekler ılıkılıkta bulunan atık su kanalı.....	65
Şekil 3.18	Erkekler güney cephesinde boşalan ahşap hatıl boşlukları.....	66
Şekil 3.19	Türk hamamı külhan ve ısıtma sistemi(Aru,1949).....	68
Şekil 3.20	Cehennemlikte bulunan duman kanalları.....	68
Şekil 3.21	Su deposunda bulunan kazan izi ve duman kanalları.....	68
Şekil 3.22	Külhanın yıkık durumda bulunan tonoz örtülü üst örtüsü.....	69
Şekil 3.23	Erkekler soğukluk bölümünün temellerinde yapılan kazı	74
Şekil 3.24	Erkekler soğukluk bölümü ile ılıkılık bölümünü ayıran duvarın temel kazısı ve yaklaşık derinliği	75
Şekil 3.25	Erkekler soğukluk bölümünde oluşan malzeme eksilmeleri.....	75
Şekil 3.26	Erkekler soğukluk bölümünde kemer ve pandantif birleşimlerinde oluşan çatlaklar kubbe başlangıçlarında malzeme kayıpları.....	76
Şekil 3.27	Erkekler soğukluk bölümünde tromp köşe bölgesinde, kemer ve tromp arasında oluşan malzeme kayıpları.....	76
Şekil 3.28	Yapı planında örnek alınan numunelerin yerlerinin gösterilmesi.....	78
Şekil 3.29	Yapının kuzey cephesinden örnek alınan numunelerin yerlerinin gösterilmesi.....	79
Şekil 3.30	Yapının güney cephesinden örnek alınan numunelerin yerlerinin gösterilmesi.....	79
Şekil 3.31	Kılcallık deneyinin yapılması.....	80
Şekil 3.32	Kılcallık katsayısı-zaman grafiği.....	80
Şekil 3.33	Ördekli Hamamında kullanılan malzemelerin ortalama kütlece su emme oranları.....	82

Şekil 3.34	Ördekli Hamamında kullanılan malzemelerin ortalama hacimce Su emme oranları.....	82
Şekil 3.35	Kaynar suda hacimce su emme oranlarının hacimce su emme oranlarıyla karşılaştırılması.....	83
Şekil 3.36	Kaynar suda kütlece su emme oranlarının kütlece su emme oranlarıyla karşılaştırılması.....	83
Şekil 3.37	Ördekli Hamamı'nda kullanılan malzemelerin boşluk oranları.....	85
Şekil 3.38	Harç malzemesinin ultrases geçiş süresinin tayini.....	87
Şekil 3.39	Tuğla numunesinin eğilme deneyi sırasındaki hali.....	89
Şekil 3.40	Tuğla numunesinin eğilme deneyi sonrasındaki hali.....	89
Şekil 3.41	Tuğla numunesinin küp basınç mukavemetinin belirlenmesi	90
Şekil 3.42	Harç numunesinin küp basınç mukavemetinin belirlenmesi.....	90
Şekil 3.43	Silindirik deretaşının basınç mukavemeti deneyi.....	91
Şekil 3.44	Silindirik küfeki taşının basınç mukavemeti deneyi.....	91
Şekil 3.45	Taş numunelerin dinamik elastisite modülü deneyi.....	92
Şekil 3.46	Taş numunelerin dinamik elastisite modülü deneyi.....	92
Şekil 3.47	Taş numunelerin gerilme-uzama grafiği.....	92
Şekil 3.48	Temel, duvar ve kubbeden alınan numunelerin elek analizleri.....	93
Şekil 3.49	Harcın genel XRD diyagramı.....	94
Şekil 3.50	Harcın elektron mikroskopik görüntüsü ve elementel kompozisyonu...	94
Şekil 3.51	T1 numaralı örneğin ince kesit görüntüleri.....	95
Şekil 3.52	T2 numaralı örneğin ince kesit görüntüleri.....	96
Şekil 3.53	T3 numaralı örneğin ölçekli ince kesit görüntüleri.....	97
Şekil 3.54	T3 numaralı örneğin ölçeksiz ince kesit görüntüleri.....	97
Şekil 3.55	Harç malzemesinin Elastisite Mod. – Porozite Grafiği.....	98
Şekil 3.56	Dere taşı malzemesinin Elastisite Mod. – Porozite Grafiği.....	99
Şekil 3.57	Tuğla malzemesinin Elastisite Mod. – Porozite Grafiği.....	99
Şekil 3.58	Harç malzemesinin Elastisite Mod. – Basınç Mukavemeti Grafiği.....	100
Şekil 3.59	Dere taşı malzemesinin Elastisite Mod. – Basınç Mukavemeti Grafiği.....	100
Şekil 3.60	Tuğla malzemesinin Elastisite Mod. – Basınç Mukavemeti Grafiği.....	101
Şekil 3.61	Harç malzemesinin Elastisite Mod. – Ses Geçiş Hızı Grafiği.....	101

Şekil 3.62	Harç malzemesinin Elastisite Mod. – Ses Geçiş Hızı Grafiği.....	102
Şekil 3.63	Harç malzemesinin Elastisite Mod. – Ses Geçiş Hızı Grafiği.....	102
Şekil 3.64	Harç malzemesinin Ses Geçiş Hızı – Porozite Grafiği.....	103
Şekil 3.65	Dere taşı malzemesinin Ses Geçiş Hızı – Porozite Grafiği.....	103
Şekil 3.66	Tuğla malzemesinin Ses Geçiş Hızı – Porozite Grafiği.....	104
Şekil 3.67	Harç malzemesinin Çekme Mukavemeti – Porozite Grafiği.....	104
Şekil 3.68	Dere Taşı malzemesinin Çekme Mukavemeti – Porozite Grafiği.....	105
Şekil 3.69	Tuğla malzemesinin Çekme Mukavemeti – Porozite Grafiği.....	105
Şekil 3.70	Harç malzemesinin Basınç Mukavemeti – Porozite Grafiği.....	106
Şekil 3.71	Dere taşı malzemesinin Basınç Mukavemeti – Porozite Grafiği.....	106
Şekil 3.72	Tuğla malzemesinin Basınç Mukavemeti – Porozite Grafiği.....	107
Şekil 3.73	Harç malzemesinin Basınç – Çekme Mukavemeti Grafiği.....	107
Şekil 3.74	Dere taşı malzemesinin Basınç – Çekme Mukavemeti Grafiği.....	108
Şekil 3.75	Tuğla malzemesinin Basınç – Çekme Mukavemeti Grafiği.....	108
Şekil 3.76	Araştırma çukuru kesiti.....	109
Şekil 3.77	Sondaj kuyusu kesiti	109
Şekil 3.78	Türkiye deprem bölgeleri haritası (illere ait haritalar)	111
Şekil 3.79	Marmara Bölgesi aktif fayları ve tarihi depremler (Barka,1997).....	112
Şekil 3.80	Kubbeye geçiş elemanlarının modellenmesi tromp ve pandantif detayı	115
Şekil 3.81	Kemer ve tonozun modellenmesi	115
Şekil 3.82	Üst örtülerin modellenmesi tonoz ve kubbe detayı.....	115
Şekil 3.83	Yapının külhan bölümünün oluşturulması.....	116
Şekil 3.84	Yapının su deposu ve tüteklük bölümlerinin oluşturulması.....	116
Şekil 3.85	Yapının halvet bölümlerinin oluşturulması.....	116
Şekil 3.86	Yapının sıcaklık bölümlerinin oluşturulması.....	117
Şekil 3.87	Yapının ılıklik bölümlerinin oluşturulması.....	117
Şekil 3.88	Yapının soğukluk bölümlerinin oluşturulması.....	117
Şekil 3.89	Yapının erkeklere ait bölümlerinden alınan kesit.....	118
Şekil 3.90	Yapının erkeklere ait bölümlerinden alınan kesit.....	118

Şekil 3.91	Yapının kadınlara ait bölümlerinden alınan kesit.....	118
Şekil 3.92	Yapının perspektif görünüşü.....	119
Şekil 3.93	Yapının kuzey cephe görünüşü.....	119
Şekil 3.94	Yapının güney cephe görünüşü.....	119
Şekil 3.95	Yapının doğu cephe görünüşü.....	120
Şekil 3.96	Yapının doğu cephe görünüşü.....	120
Şekil 3.97	Yapının tüm bölümlerinin alttan görünüşü.....	120
Şekil 3.98	Yapının tüm bölümlerinin üstten görünüşü.....	121
Şekil 3.99	Yapının sonlu elemanlar modelinin üstten görünüşü.....	121
Şekil 3.100	Yapının sonlu elemanlar modelinin alttan görünüşü.....	122
Şekil 3.101	Yapının sonlu elemanlar modelinin perspektif görünüşü.....	122
Şekil 3.102	Yapının su deposu ve külhan bölümlerindeki bacaların sonlu elemanlara bölünmüş görüntüsü	123
Şekil 3.103	Yapıda modellenen tromp detayının sonlu elemanlara bölünmüş görüntüsü.....	123
Şekil 3.104	Soğuklukta yer alan aydınlatma fenerinin sonlu elemanlara bölünmüş görüntüsü	123
Şekil 3.105	Yapıda modellenen pandantif detayının sonlu elemanlara bölünmüş görüntüsü.....	123
Şekil 3.106	Yapıdaki kubbeler ve fil gözlerinin sonlu elemanlara bölünmüş görüntüsü	123
Şekil 3.107	Yapıdaki tonozların sonlu elemanlara bölünmüş görüntüsü	123
Şekil 3.108	8,7 ve 6 düğüm noktalı 3-D Tuğla tipi elemanlar	124
Şekil 3.109	5 ve 4 düğüm noktalı 3-D Tuğla tipi elemanlar	124
Şekil 3.110	Gerilme bileşenlerinin eksen takımına göre gösterilmesi.....	125
Şekil 3.111	Elastisite modülü için alınan esas yönler.....	128
Şekil 3.112	Taş veya tuğla ile harcın oluşturduğu kompozit	129
Şekil 3.113	Yapının zemine oturduğu düğüm noktalarının gösterilmesi	133
Şekil 3.114	Yapının düşey yöndeki yer değiştirmeleri	134
Şekil 3.115	Yapının duvarlarında oluşan düşey yöndeki yer değiştirmeler.....	134
Şekil 3.116	Yapının külhan ve su deposu bölümlerinde düşey yöndeki yer	

	değişirmeler	135
Şekil 3.117	Yapının ılıklik, sıcaklık ve halvet bölümlerinde oluşan düşey yöndeki yer değişirmeler.....	135
Şekil 3.118	Yapının kadınlar ve erkekler soğukluk bölümlerinde oluşan düşey yöndeki yer değişirmeleri.....	136
Şekil 3.119	Maksimum yer değişirmenin oluştuğu erkekler soğukluk kubbelerini taşıyan kemer kısmının üstten görünüşü	136
Şekil 3.120	Üç eksenli gerilme durumu için Mohr Dairesi	137
Şekil 3.121	Ördekli Hamamının sıcaklık bölümünden örnek olarak alınan parça...	137
Şekil 3.122	Modelde oluşan minimum asal gerilme dağılımlarının vektörel olarak gösterilmesi	137
Şekil 3.123	Modelde oluşan maksimum asal gerilme dağılımlarının vektörel olarak gösterilmesi.....	138
Şekil 3.124	Modelde oluşan maksimum asal gerilme dağılımlarının vektörel olarak gösterilmesi.....	138
Şekil 3.125	Yapının duvarlarının sonlu elemanlar görünümü.....	138
Şekil 3.126	Yapının külhan ve su deposu bölümlerinin sonlu elemanlar görünümü	138
Şekil 3.127	Yapının ılıklik, sıcaklık ve halvet bölümlerinin sonlu elemanlar görünümü.....	138
Şekil 3.128	Yapının erkekler ve kadınlar soğukluk bölümlerinin sonlu elemanlar görünümü	138
Şekil 3.129	Yapının kendi ağırlığı altında duvarlarda oluşan minimum gerilme değerleri	139
Şekil 3.130	Yapının kendi ağırlığı altında duvarlarda oluşan maksimum gerilme değerleri.....	139
Şekil 3.131	Yapının kendi ağırlığı altında külhan ve su deposu bölümlerinde oluşan minimum gerilme değerleri.....	140
Şekil 3.132	Yapının kendi ağırlığı altında külhan ve su deposu bölümlerinde oluşan maksimum gerilme değerleri.....	140
Şekil 3.133	Yapının kendi ağırlığı altında ılıklik, sıcaklık ve halvet bölümlerinde	

	oluşan minimum gerilme değerleri.....	141
Şekil 3.134	Yapının kendi ağırlığı altında ılıklik, sıcaklık ve halvet bölümlerinde oluşan maksimum gerilme değerleri.....	141
Şekil 3.135	Yapının kendi ağırlığı altında soğukluk bölümlerinde oluşan minimum gerilme değerleri.....	142
Şekil 3.136	Yapının kendi ağırlığı altında soğukluk bölümlerinde oluşan maksimum gerilme değerleri.....	142
Şekil 3.137	Yapının plan şemasında x-x yönündeki duvarlarının gösterimi	144
Şekil 3.138	Yapının plan şemasında x-x yönündeki duvarlarının gösterimi.....	144
Şekil 3.139	Yapının plan şemasında ağırlık merkezi ile rijitlik merkezi koordinatlarının gösterilmesi	146
Şekil 3.140	Yapının birinci mod şekli.....	148
Şekil 3.141	Yapının ikinci mod şekli.....	148
Şekil 3.142	Yapının üçüncü mod şekli.....	149
Şekil 3.143	Yapının dördüncü mod şekli.....	149
Şekil 3.144	Yapının beşinci mod şekli.....	150
Şekil 3.145	Yapının altıncı mod şekli.....	150
Şekil 3.146	Yapının yedinci mod şekli.....	151
Şekil 3.147	Yapının sekizinci mod şekli.....	151
Şekil 3.148	Yapının dokuzuncu mod şekli.....	152
Şekil 3.149	Yapının onuncu mod şekli.....	152
Şekil 3.150	İvme spektrumu grafiği.....	154
Şekil 3.151	Yapının x yönündeki yer değiştirmeleri.....	155
Şekil 3.152	Maksimum yer değiştirmenin oluştuğu erkekler soğukluk tromp geçişi	155
Şekil 3.153	Yapının duvarlarında kemerin oturduğu bölgede oluşan maksimum gerilmeler.....	156
Şekil 3.154	Erkekler soğukluk bölümünde trompun yükünü duvarlara aktardığı kısımlarda oluşan gerilmeler.....	156
Şekil 3.155	Yapının duvarlarında kemerin oturduğu bölgede oluşan maksimum gerilmeler.....	157

Şekil 3.156	Erkekler soğukluk bölümünde trompun yükünü duvarlara aktardığı kısımlarda oluşan gerilmeler.....	157
Şekil 3.157	Yapının duvarlarında kemerin oturduğu bölgede oluşan maksimum gerilmeler.....	158
Şekil 3.158	Erkekler soğukluk bölümünde trompun yükünü duvarlara aktardığı kısımlarda oluşan gerilmeler.....	158
Şekil 3.159	Yapının duvarlarında kemerin oturduğu bölgede oluşan minimum gerilmeler.....	159
Şekil 3.160	Erkekler soğukluk bölümünde trompun yükünü duvarlara aktardığı kısımlarda oluşan maksimum	159
Şekil 3.161	Yapının soğukluk bölümlerinde oluşan Y yönündeki yer değiştirmeler	160
Şekil 3.162	Maksimum yer değiştirmenin olduğu kadınlar soğukluk kısmı	160
Şekil 3.163	Yapının duvarlarında pencere ve kapı köşeleri, duvar birleşim bölgeleri ve kadınlar soğukluk kuzey duvarında oluşan gerilmeler.....	161
Şekil 3.164	Kadınlar soğukluk bölümünde kapı ve pencere köşelerinde oluşan gerilmeler.....	161
Şekil 3.165	Yapının su deposu ve külhan bölümlerinde oluşan minimum gerilmeler	162
Şekil 3.166	Yapının su deposu ve külhan bölümlerinde oluşan maksimum gerilmeler.....	162
Şekil 3.167	Yapının ılıklik, sıcaklık ve halvet bölümlerinde oluşan minimum gerilmeler	163
Şekil 3.168	Yapının ılıklik, sıcaklık ve halvet bölümlerinde oluşan maksimum gerilmeler.....	163
Şekil 3.169	Yapının soğukluk bölümlerinde oluşan minimum gerilmeler.....	164
Şekil 3.170	Yapının soğukluk bölümlerinde oluşan maksimum gerilmeler.....	164
Şekil 3.171	Yapının soğukluk bölümlerinde oluşan düşey yer değiştirmeler.....	165
Şekil 3.172	Yapının soğukluk kubbelerini taşıyan kemerde oluşan maksimum yer değiştirme.....	165
Şekil 3.173	Yapının duvarlarında oluşan minimum gerilmeler.....	166

Şekil 3.174	Yapının duvarlarında oluşan maksimum gerilmeler.....	166
Şekil 3.175	Yapının su deposu ve külhan bölümlerinde oluşan minimum gerilmeler.....	167
Şekil 3.176	Yapının su deposu ve külhan bölümlerinde oluşan maksimum gerilmeler.....	167
Şekil 3.177	Yapının su deposu ve külhan bölümlerinde oluşan minimum gerilmeler.....	168
Şekil 3.178	Yapının su deposu ve külhan bölümlerinde oluşan maksimum gerilmeler.....	168
Şekil 3.179	Yapının soğukluk bölümlerinde oluşan minimum gerilmeler.....	169
Şekil 3.180	Yapının soğukluk bölümlerinde oluşan maksimum gerilmeler.....	169
Şekil 3.181	Burulma momenti etkisiyle duvara etkiyen yatay kuvvet	170
Şekil 3.182	Hamamın +1,671 kotundan alınan plan görünüşü	172
Şekil 3.183	Hamamın +6.10 kotundan alınan plan görünüşü	172
Şekil 3.184	Yapının erkekler soğukluk bölümünün kemer altındaki duvarı	175
Şekil 3.185	Duvarlardaki oturmanın kuzey-güney doğrultusunda arttırılması	175
Şekil 3.186	Duvarlardaki oturmanın kuzey-güney doğrultusunda arttırılarak yıkık bölgenin tamamına ulaştırılması	175
Şekil 3.187	Yapının erkekler soğukluk bölümünün güney duvarı	175
Şekil 3.188	Yapının erkekler soğukluk ile kadınlar soğukluk arasındaki duvarı ...	175
Şekil 3.189	Yapının erkekler soğukluk bölümünün mevcut halde yıkık olan bölgeleri	175
Şekil 3.190	Doğu yönündeki duvarın 1 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları.....	176
Şekil 3.191	Doğu yönündeki duvarın 2 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları.....	176
Şekil 3.192	Doğu yönündeki duvarın 4 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları.....	176
Şekil 3.193	Doğu yönündeki duvarın 6 mm çökmesi halinde oluşan maksimum	

	gerilme miktarları.....	177
Şekil 3.194	Doğu yönündeki duvarın 8 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları.....	177
Şekil 3.195	Doğu yönündeki duvarın 10 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları.....	177
Şekil 3.196	Doğu yönündeki duvarın 12 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları.....	178
Şekil 3.197	Doğu yönündeki duvarın 14 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları.....	178
Şekil 3.198	Doğu yönündeki duvarın 16 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları.....	178
Şekil 3.199	Doğu yönündeki duvarın 18 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları.....	179
Şekil 3.200	Doğu yönündeki duvarın 20 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları.....	179
Şekil 3.201	Doğu yönündeki duvarın 1 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları.....	179
Şekil 3.202	Doğu yönündeki duvarın 2 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları.....	180
Şekil 3.203	Doğu yönündeki duvarın 4 mm çökmesi halinde oluşan minimum Gerilme miktarları.....	180
Şekil 3.204	Doğu yönündeki duvarın 6 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları	180
Şekil 3.205	Doğu yönündeki duvarın 8 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları.....	181
Şekil 3.206	Doğu yönündeki duvarın 10 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları.....	181
Şekil 3.207	Doğu yönündeki duvarın 12 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları.....	181
Şekil 3.208	Doğu yönündeki duvarın 14 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları.....	182

Şekil 3.209	Doğu yönündeki duvarın 16 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları.....	182
Şekil 3.210	Doğu yönündeki duvarın 18 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları.....	182
Şekil 3.211	Doğu yönündeki duvarın 20 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme	183
Şekil 3.212	Güney yönündeki duvarın 1mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları.....	183
Şekil 3.213	Güney yönündeki duvarın 20 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları.....	183
Şekil 3.214	Güney yönündeki duvarın 1 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları.....	184
Şekil 3.215	Güney yönündeki duvarın 20 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları.....	184
Şekil 3.216	Kadınlar soğukluk ile erkekler soğukluk arasındaki duvarın 1 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları	184
Şekil 3.217	Kadınlar soğukluk ile erkekler soğukluk arasındaki duvarın 20 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları	184
Şekil 3.218	Kadınlar soğukluk ile erkekler soğukluk arasındaki duvarın 1 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları	184
Şekil 3.219	Kadınlar soğukluk ile erkekler soğukluk arasındaki duvarın 20 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları	184
Şekil 3.220,221	Yapının x yönündeki deprem analizinde erkekler soğukluk bölümünde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerin minimum ve maksimum gerilmeler üzerinde gösterilmesi.....	191
Şekil 3.222	Erkekler soğukluk bölümünde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerde çatlak oluşturulması.....	191
Şekil 3.223	Soğukluk bölümünde oluşan minimum gerilmelerde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerin gösterilmesi	192
Şekil 3.224	Soğukluk bölümünde oluşan minimum gerilmelerde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerin bir başka açıdan gösterilmesi	192

Şekil 3.225	Soğukluk bölümünde oluşan maksimum gerilmelerde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerin gösterilmesi	193
Şekil 3.226	Soğukluk bölümünde oluşan maksimum gerilmelerde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerin bir başka açıdan gösterilmesi	193
Şekil 3.227	Soğukluk bölümünde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerde malzeme eksilmesi yapılan kısımlar	194
Şekil 3.228	Soğukluk bölümünde oluşan minimum gerilmelerde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerin gösterilmesi	194
Şekil 3.229	Yeni çatlaklar ve malzeme boşalmaları oluşturulan yapıda oluşan minimum gerilme değerleri.....	195
Şekil 3.230	Soğukluk bölümünde oluşan minimum gerilmelerde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerin bir başka açıdan gösterilmesi	195
Şekil 3.231	Soğukluk bölümünde oluşan maksimum gerilmelerde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerin gösterilmesi	196
Şekil 3.232	Soğukluk bölümünde oluşan maksimum gerilmelerde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerin bir başka açıdan gösterilmesi	196
Şekil 3.233,234	%10 sönüm oranına göre x yönünde yapılan deprem analizlerinde Soğukluk Kubbelerinde oluşan maksimum asal gerilmelerin gösterilmesi	198
Şekil 3.235,236	%10 sönüm oranına göre x yönünde yapılan deprem analizlerinde Soğukluk Kubbelerinde oluşan minimum asal gerilmelerin gösterilmesi	198
Şekil 3.237,238	%20 sönüm oranına göre x yönünde yapılan deprem analizlerinde Soğukluk Kubbelerinde oluşan maksimum asal gerilmelerin gösterilmesi	198
Şekil 3.239,240	%20 sönüm oranına göre x yönünde yapılan deprem analizlerinde Soğukluk Kubbelerinde oluşan minimum asal gerilmelerin gösterilmesi	198

SİMGELER DİZİNİ

- K - Kapilarite katsayısı
Q - Emilen su miktarı
F - Yüzey alanı
t - Zaman
S_k - Kütlece su emme oranı
S_h - Hacimce su emme oranı
G_d - Malzemenin doymun haldeki kütlesi
G_k - Değişmez kütleye kadar kurutulmuş kütle
G_{ds} - Malzemenin doymun haldeki su içindeki kütlesi
β_h - Birim hacim ağırlık
W_k - Değişmez kütleye kadar kurutulmuş deney numunesi ağırlığı
W_{sh} - Doymun haldeki deney numunesinin havadaki ağırlığı
W_{ss} - Doymun haldeki deney numunesinin su içindeki ağırlığı
γ - Özgül ağırlık
W - Ağırlık
V - Ultrases hızı
L - Toplam uzunluk
f_b - Basınç mukavemeti
f_t - Çekme mukavemeti
P_k - Kırılmaya sebep olan en büyük yük
A - Yük uygulanan yüzünün alanı
m - Kütle
k - Yay katsayısı
σ - Normal gerilme
τ - Kayma gerilmesi
ε - Şekil değiştirme
G - Kayma modülü
E - Elastisite modülü
ν - Poisson oranı

- T - Periyod
- f - Frekans
- a - Yerçekimi ivmesi

GİRİŞ

Çalışmanın konusu; örnek olarak ele alınan tarihi yapıda “Bursa Ördekli Hamamı” kullanılan malzemelerin kimyasal, mekanik ve fiziksel deneylerinin yapılarak malzeme özelliklerinin belirlenmesi, yapının modelinin oluşturulması, sonlu elemanlar yöntemiyle statik ve dinamik yükler altındaki analizlerinin yapılması ve oturma analizlerinin yapılarak yapının yıkık olan bölgelerinin yıkılma sebeplerinin tespit edilmesi ve önerilerin sunulmasıdır.

Bursa Ördekli Hamamı ile ilgili yapılacak bu çalışmada öncelikle yapının tarihçesi, uğradığı hasar ve deformasyonlar, taşıyıcı elemanların yük taşıma mekanizması, malzeme karakteristikleri ve mukavemetleri, zemin ve geoteknik özellikleri incelenecektir. Daha sonra tarihi yapının malzeme olarak değişkenlik gösterdiği bölgeler belirlenerek numuneler alınacaktır. Yapıda kullanılan malzemelerin (taş, tuğla ve harç) kimyasal, mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenerek duvarlarda taş-harç birleşiminden oluşan, üst yapı olan eğrisel örtülerde ise tuğla-harç birleşiminden oluşan kompozitin mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenecektir. Yapının modeli oluşturularak sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizleri yapılacaktır.

Bu bağlamda; analiz çalışmaları yapılacak olan tarihi yapı üç bölüm olarak incelenecektir. Birinci bölümde tarihi kagir yapılarla ilgili çalışmalar anlatılacaktır. İkinci bölümde tarihi yapıların mevcut durumlarının belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar anlatılacaktır. Üçüncü bölümde ise Ördekli Hamamı'nın mevcut durumu tespit edilerek malzeme deneyleri yapılacaktır. Daha sonra deneylerden elde edilen veriler sonlu eleman modeline aktarılarak yapının sonlu eleman analizleri yapılacaktır. Yapının deprem sırasında oluşabilecek burulma etkilerine karşı A1 türü burulma düzensizliği kontrolü yapılacak ve 2007 Türk Deprem Yönetmeliğine göre duvarların kayma dayanımları hesaplanacaktır. Son olarak yapının yıkılmış olan erkekler soğukluk kubbesinin neden yıkıldığının tespit edilerek restorasyon önerileri sunulacaktır.

Yapı ile ilgili olarak yapının tarihçesi, geçirdiği onarımlar, yangınlar, depremler, yapıdaki hasarlar, temel zemini özellikleri araştırılarak yapı hakkında detaylı bilgi verilerek tarihi yapıyla ilgili yapılacak deneylere geçilecektir.

Yapıda farklı özellik gösteren taş, harç, küfeki taşı, tuğla örnekleri belirlenerek numuneler alındıktan sonra yapıda kullanılan malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi amacıyla fiziksel (petrografik özellikler, kılcal su emme, hacimce ve ağırlıkça su emme deneyleri, birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, porozite ve kompozite), mekanik (basınç deneyi, eğilme deneyi, elastisite modülü), kimyasal (asit kaybı deneyi, elek analizi, kızdırma kaybı deneyi, mineralojik bileşenler (X-Ray), elementer analiz- SEM (scanning electron microscope-taramalı elektron mikroskobu) deneyleri yapılacaktır.

Modelleme ve analiz aşamasından önce; mevcut yapıdan alınan taş, tuğla ve harç malzemelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri kullanılarak kompozit malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenecektir.

Daha sonra yapıya ait 3 boyutlu CAD (computer-aided design-bilgisayar destekli tasarım) modeli yapının mevcut rölöve ve restitüsyon projeleri kullanılarak oluşturulacak ve analiz çalışmalarının yapılabilmesi için sonlu eleman ağı oluşturulacaktır. Sonlu eleman modelinde yapı belirli bölümlere ayrılarak her bölüme ait taş-harç ve tuğla-harç malzeme parametreleri programa girilecektir. İlk olarak yapının kendi ağırlığı altındaki analizleri yapılacaktır. Yapının deprem analizleri öncesi yapıda A1 türü burulma düzensizliği kontrolü yapılacaktır. Bu hesaplama sonrasında da yapının dinamik analizleri yapılacaktır. Analizler sonucunda elde edilen verilerle yapının sınır gerilme değerlerini aştığı bölgeler tespit edilecek ve yapıdaki yıkık ve çatlak olan bölgelerle karşılaştırılacaktır. Sonlu elemanlar yöntemine ek olarak 2007 Türk Deprem Yönetmeliği kullanılarak duvarların kayma dayanımlarının emniyetli kayma dayanımlarıyla karşılaştırılması yapılacaktır. Daha sonra yıkılma sebeplerinin bulunabilmesi için öncelikle oturma oluşabilecek bölgeler belirlenerek bu bölgelerde oluşan gerilmeler incelenecektir. Ayrıca deprem analizlerinden elde edilen sonuçlara göre yapıda belirli bölgelerde hasar oluşturularak deprem analizleri tekrarlanacak ve gerilmeler incelenecektir. Tüm analiz sonuçları değerlendirilerek yıkılmanın nasıl gerçekleştiği tespit edilecek ve yapının mevcut durumunun iyileştirilmesi için alınacak tedbirler belirlenecektir.

Ülkemizin büyük bir kısmının deprem bölgesinde olması tarihi yapılar için yapılacak olan analiz çalışmalarını son derece önemli kılmaktadır. Bu konuda ülkemizde yapılan tarihi yapıların korunmasına ilişkin çalışmaların çoğunda herhangi bir analiz yöntemi kullanılmamaktadır. Tarihi yapıların güçlendirme ve koruma yöntemleri belirlenmeden önce; yapıya ilişkin sayısal analizlerin gerçekleştirilmesi ve elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurularak restorasyon çalışmalarının yapılması, yapılacak çalışmaların hiç kuşkusuz daha bilinçli olmasını sağlayacaktır.

Ülkemizde yapılan hatalı uygulamalar ve yanlış restorasyon çalışmaları sonucunda yapılarımıza büyük zararlar verilmektedir. Bu nedenle çalışmanın amacı; benzer özellik gösteren diğer yapılara da örnek teşkil etmesini sağlamak, restorasyon çalışmalarının disiplinler arası olarak bilimsel yöntemlerle yürütülmesi gerektiğini vurgulamak ve bu çalışmaların titiz ve kapsamlı araştırma ve analizler gerektirdiğini anlatmaktır.

1. KAYNAK ÖZETLERİ

Tarihi yapılarla ilgili olarak birçok araştırma yapılmaktadır. Bu araştırmalardan bazıları; yapıların tarihçesi, mimari özellikleri ve strüktürel problemleri, malzeme özellikleri ve uygulanan testler, temeller ve zemin özellikleri, mikro ve makro analizler ile tarihi yapıların lineer, non-lineer ve dinamik analizleri şeklindedir.

1.1. Yapının Tarihçesi, Mimari Özellikleri ve Strüktürel Problemler

- Uluengin, F., Uluengin, F., Uluengin, B., 2001, “Osmanlı Anıt Mimarisinde Kullanılan Yapı Detayları” YEM, İstanbul.

Bu kitapta, Osmanlı Mimarisinde kullanılan yapı detayları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Özellikle geçiş elemanları, kemerler, kubbeler ve eğrisel elemanlar ile taşıyıcı sistem detaylı bir biçimde ele alınmıştır.

- Ahunbay, Z.,1996, “Tarihi Çevre Koruma Ve Restorasyon” YEM, İstanbul.

Bu kitapta koruma düşüncesinin gelişimi ve kuramsal temelleri, korunacak değerler ve değerlendirme ölçütleri, anıtlarda bozulmaya neden olan etkenler, restorasyon teknikleri, koruma ile ilgili uluslar arası tüzükler ve ilke kararları ayrıntılı olarak incelenmiştir.

- Kuban, D.,2000, “Tarihi Çevre Korumanın Mimarlık Boyutu Kuram ve Uygulama”, YEM, İstanbul.

Bu kitapta özellikle değerlendirme ve tasarım ilkeleri ile birlikte uygulama kapsamında tarihi araştırma, yapının fiziksel tanımının yapılması, strüktür ve malzeme konuları ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

- Madran, E.,Özgönül N., 2005 “Kültürel ve Doğal Değerlerin Korunması”, Yalçın Mat., Ankara.

Bu kitapta yapı ölçeğindeki sorunlar, yapım tekniği ve malzeme sorunları, çevresel kökenli sorunlar ile birlikte ulusal ve uluslar arası düzenlemeler ve koruma süreci ayrıntılı olarak incelenmiştir.

1.2. Yapının Malzeme Özellikleri ve Uygulanan Testler

- Rossi, P.P. 1996. “Possibilities of the Experimental Techniques For the Structural Analysis of Historical Constructions” P. Roca., J.L.González, A.R. Mari and E.Oñate(Editors.), International Congress of Structural Analysis of Historical Constructions. CIMNE, Barcelona, p.24-46.

Bu çalışmada tarihi yapılarda uygulanan hasarsız test yöntemleri(NDT), hafif hasarlı test yöntemleri, karot alma, modelleme, dinamik analizler, izleme yöntemleri anlatılmıştır. Tarihi yapıların yapısal özellikleri ile malzeme karakteristiklerini anlamak için yapılması gereken işlemler ele alınmıştır.

- Roca P., Molins C.,1997 “In Situ Experimental tests performed on masonry constructions” Studies in Ancient Structures,Y.T.Ü. Mimarlık Fak.Basımevi, İstanbul, p.187-196

Bu bildiriye; çok açıklıklı üç farklı köprünün deneysel ve sayısal yöntemlerle analizleri yapılmıştır. Deneysel olarak flat-jack testi ile statik ve dinamik testleri yapılmıştır. Elde edilen verilerle, ölçümler ve beklenen sonuçlar karşılaştırılarak sayısal model geliştirilmiştir.

- Binda L., Modena C., Baronial G., Abbaneol S., 1997 “Repair and investigation techniques for stone masonry walls”, Construction and Building Materials, Vol. 11, No. 3, p.133-142

Bu çalışmada; yığma duvarların onarımı sırasında kullanılacak olan uygun enjeksiyon yöntemleri ile onarım sonrası flat-jack testi ile enjeksiyonun verimliliği araştırılmıştır.

- Lourenco, P.B., D.V. Oliveira, S. Mourao. 2001. “Numerical Analysis as a Tool to Understand Historical Structures. The Example of the Church of Outeiro”, 2nd International Congress on Studies in Ancient Structures, Antalya. p.355-364.

Bu bildiriye; bir kilise yapısının yapısal özellikleri incelenmiştir. Yapının tarihi özellikleri, yapıda oluşan çatlaklar ve yer değiştirmelerin izlenmesi, yerinde ve

laboratuarda yapılan testler ile malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri tespit edilmiştir.

- Baronio, G., Binda, L., Tedeschi, C., Tiraboschi C., 2003 “Characterisation of the Materials Used in the Construction of the Noto Cathedral”, *Construction and Building Materials*, 17, p.557-571.

Bu bildiri; Noto Katadrali yapısında kullanılan malzemeler üzerinde fiziksel, kimyasal ve mekanik testler yapılarak malzeme karakteristikleri araştırılmıştır. Katedralin yıkık olan bölgelerinden alınan numuneler incelenerek yıkılmanın sebepleri araştırılmıştır.

- Güleç, A., Acun S., Ersen A., 2005 “A Characterization Method for the Fifth-Century Traditional Mortars in the Land Walls of Constantinople, Yedikule”, *Studies in Conservation*, 50, p.295-306.

Bu bildiri; Yedikule’de bulunan surlardan 5 farklı özellik gösteren duvar harçları incelenmiştir. Bu incelemede harçların mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri tespit edilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

- Binda, L., 2007, “Investigation and Diagnosis of Historic Materials”, *International Symposium Studies on Historical Heritage*, Antalya, p.295-304

Bu bildiri; tarihi yapılarda uygulanan kötü onarımlar, yapının strüktürel sistemini anlamak için uygulanması gereken yöntemler, çatlak izleme, statik ve dinamik incelemeler ve hasarsız test yöntemleri üzerinde durulmuştur.

- Tassios, T.P., Miltiadou-Fezans A., Vintzileou E., 2007 “Evaluation, Experimental Methods and Tests”, *International Symposium Studies on Historical Heritage*, Antalya, p.459-468.

Bu bildiri; yapının yapısal özelliklerinin belirlenmesi için uygulanması gereken yöntemler üzerinde durulmuştur. Yapının geometrik özellikleri, iç yapısı, malzeme dayanımları, dinamik özellikleri, laboratuvar test metodları ve zamana bağlı izleme yöntemlerinden bahsedilmiştir.

1.3. Yapının Temel Zemini ve Özellikleri

- Peynircioğlu, H., Toğrul, E., Aksoy İ. H., 1981, “İstanbul’da Osmanlı Döneminde İnşa Edilen Camilerin Temelleri”, 1.Uluslararası Türk İslam Bilim ve Teknoloji Tarihi Kongresi”, İ.T.Ü. İstanbul, s.37-46

Bu bildiriye İstanbul’da bulunan bazı camilerin temel yapıları incelenmiş, ayrıntılı olarak detay çizimleri verilmiştir. Tarihi yapılar, inşa edildikleri devirlerde söz konusu olmayan günümüz koşullarından etkilenmektedir. Tünel, metro, kanalizasyon boru hatları, derin kazılar, yer altı suyu kullanımı, geçirimsiz yüzeyler oluşturularak yer altı su seviyelerinde alçalmalara sebebiyet vermek bunlardan bazılarıdır. Bildiriye İstanbul’un zemin özellikleri anlatılarak Süleymaniye, Yeni Cami ve Nur-u Osmaniye Camilerinin temel sistemleri anlatılmıştır.

- Svaldi A. Dei., Mazzucato A., 2007 “Foundation analysis of the Rialto Bridge in Venice” International Symposium Studies on Historical Heritage, Antalya, p.495-502

Bu bildiriye; restorasyon çalışmalarında önemli bir rol oynayan yapı zemin ilişkileri incelenmiştir. Bu özellik Venedik gibi farklı oturma yapabilecek yerlerde daha büyük önem kazanmaktadır. Çalışmada Rialto Köprüsü’nün temel zeminini incelenerek köprünün zeminde oluşturacağı gerilmeler hesaplanmıştır.

- Bayraktar A., Keypour H., Fahjan Y., Arun G., 2007 “Historical monuments and their foundations” International Symposium Studies on Historical Heritage, Antalya, p.19-26

Bu bildiriye; birbirinden farklı olan yapıların temel sistemleri incelenmiştir. Temelerde bulunan kuyular, kapılar, galeriler ve tünellerin yapım sistemlerinin anlaşılması ve yapıların restorasyonlarının bu özellikler dikkate alınarak yapılmasının önemi üzerinde durulmuştur.

1.4. Tarihi Yapıların Mikro ve Makro Analizleri

- Lourenco, P.B. 1996. "Computational Strategies for Masonry Structures". Delft University Press, Stevinweg 1, 2628 CN Delft, The Netherlands.

Bu çalışmada; Tarihi yığma yapıların mikro ve makro modellenmesinde izlenecek yöntem anlatılmıştır. Sonlu elemanlar ve plastisite, homojenleştirme teknikleri, anisotrop sürekli model, malzemenin elastik olamayan davranışları ile ilgili yöntemler üzerinde durulmuştur.

- Giambanco G., Rizzo S., Spallino R., 2001 "Numerical Analyses of Masonry Structures Via Interface Models", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 190, p.6493-6511.

Bu çalışmada; tarihi yığma yapılarda kullanılan harcın davranışını belirlemek amacıyla teorik formüller kullanılmış ve sayısal uygulamalar yapılmıştır. Kayma ve çekme gerilmeleri uygulanan modellerde harç malzemesinin kohezyon özelliğini kaybetme şekli belirlenmiştir.

- Berto, L., A. Saetta., R. Scotta., R. Vitaliani. 2002 "An Orthotropic Damage Model For Masonry Structures", International Journal for Numerical Methods in Engineering, 55, p.127-157.

Bu çalışmada; yığma yapılar için ortotropik hasar modeli kullanmışlardır. Hasar gelişiminin malzemenin simetrisini bozabileceğini ve ortotropik malzemenin genel olarak anizotropiye doğru bir değişime uğrayacağını belirtmişlerdir. Bu nedenle sayısal hasar değişkenleri anizotropik yönler kullanılarak belirlenmiştir. Dikdörtgen tabanlı ve eğimli piramit, malzemenin içsel sürtünme açısıyla ilişkili olarak limit yüzey olarak tanımlanmıştır. Yapılan birçok test ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir ilişki tespit edilmiştir.

- Giordano A., Mele E., Luca A., 2002 "Modelling of Historical Masonry Structures: Comparison of Different Approaches Through a Case Study", Engineering Structures, 24, p.1057-1069.

Sao Vicente De Fora manastırının 2 kemer ve üç ayaktan oluşan test modeli üzerinde 3 ayrı sonlu eleman programı kullanılarak modellenmesi sağlanmış ve tüm

model üzerinde uygulanan test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışmada üç ayrı sonlu eleman modelleme tekniği kullanılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

- Zucchini A., Lourenço P.B., (2002), A Micro-Mechanical Model For the Homogenisation of Masonry, International Journal of Solids and Structures, 39, p.3233-3255.

Bu çalışmada; basit yığma yapı elemanlarının bilgisayar modelleri üzerinde deformasyonlar yaratılarak homojen bir kesit elde edilmeye çalışılmıştır. Basit hücrelerin detaylı sonlu eleman modelleri oluşturulduğunda homojen kesitin küçük hatalarla oluşturulduğu gözlenmiştir.

- Zucchini, A., Lourenço P.B., 2009 “A Micro-mechanical Homogenisation Model for Masonry: Application to Shear Walls” International Journal of Solids and Structures, 46 (3-4) p.871-886.

Bu çalışmada; yığma yapının mikro modelinin gerilme altındaki hasar modeli ve basınç altındaki plastik modeli için tekrarlı çözümleme işlemleri ile hasar katsayıları ve eleman birleşimlerde oluşan plastik gerilmeler tespit edilmiştir. Basit hücre ele alınmış ve bu hücrenin ayrıntılı geometrisiyle ve elemanlarıyla tanımlanması gerçekleştirilmiştir. Model belirlendikten sonra benzeşimi yapılacak non-lineer hücrenin gerilme altındaki hasar ve plastik davranışı için iteratif işlemler oluşturulmuş ve hücre düşey yüklenmeye ve daha sonra kayma gerilmelerine maruz bırakılarak plastik model için elastisite bağıntıları oluşturulmuştur.

1.5. Tarihi Yapıların Linear, Non-Linear ve Dinamik Analizleri

- Di Pasquale, S.,(1979), "The Dome of Santa Maria del Fiore: An Opportunity to State A Theory of Masonry Structures, Proceedings of IASS Symposium, Madrid, s.843-866.

Bu çalışmada, kagir duvarlarla ilgili olarak malzeme özellikleri ve yapısal davranışlar anlatılarak İtalya Floransa’da bulunan ve XV. yüzyıl yapısı olan Santa

Maria Del Fiore Katedrali'nin kubbesi sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş ve analiz sonuçları incelenmiştir.

- Karaesmen, E., Ünay, A.İ., 1988 "A Study of Structural Aspects of Domed Buildings with Emphasis on Sinan's Mosques" Proceedings of IASS-MSÜ Int. Symposium, İstanbul, p.93-104

Mimar Sinan'ın kubbeli yapıları incelenmiş ve bu yapıların yük aktarma sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. Şehzade Mehmet Camisi'nin malzeme ve yapısal özellikleri ile ilgili bilgiler verilerek ana kubbenin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi yapılmıştır.

- Karaesmen, E., Erkay, C., Boyacı, N., Şenkaya, E., Yakut, A., 1992 "Evolution of Domed Building in Seismic Zones with Emphasis on Sinan's Major Works", METU-Parir Education and Research Foundation, Ankara.

Mimar Sinan'ın deprem kuşağı üzerinde yer alan yapıları ele alınarak, Şehzade Mehmet Camisi ve Edirnekapı Mihrimah Sultan Camisi sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiştir. Bu modelleme yardımıyla yapının deprem yükleri altındaki davranışı incelenmiştir.

- Erdik, M., Durukal, E., 1993 "Ayasofya'nın Deprem Davranışı", 2. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 10-13 Mart 1993, İstanbul, s.198-207.

Ayasofya'nın deprem yükleri altındaki davranışını incelenmek üzere sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve yapıda gerçekleştirilen çevrel titreşim deneyleri sonuçları çerçevesinde model düzenlenmiştir. Ayasofya'nın yapısal özelliklerini belirlemek ve doğru bir model yaratmak amacıyla, binanın davranışı ile ilgili veriler karşılaştırılmıştır.

- Ünay A.İ., (1997), "A Method For the Evaluation of the Ultimate Safety of Historical Masonry Structures" Ph.D Thesis, METU.

Bu çalışmada; tarihi yapının düşey yük analizi sonrasında zayıf noktalarda bulunan elemanların, Eksenel Yük-Eğilme Momenti (N-M) diyagramları üretilerek taşıma gücü hesaplanmıştır.

- Koçak A., 1999 “Tarihi Yapıların Statik ve Dinamik Yükler Altında Lineer ve Non-Linear Analizi: Küçük Ayasofya Camii Örneği”, doktora tezi, YTÜ.

Küçük Ayasofya Camii'nin zemin ve geoteknik incelemesi ile malzeme deneyleri ve çevrel titreşim deney verileri kullanılarak tarihi yapının statik ve dinamik yükler altında lineer ve non-linear analizleri yapılmıştır. Daha sonra çeşitli mesnet oturumları düzenlenerek hasar analizleri yapılmıştır.

- Fanning P.J, Boothby T.E., 2001 “Three-Dimensional Modelling and Full-Scale Testing of Stone Arch Bridges, Computers and Structures”, 79, p.2645-2662.

Bu çalışmada servis yükleri altındaki taş kemer köprülerin uygun malzeme özelliklerinin bulunarak köprülerin modellenmesinde kullanılması sağlanmıştır. Üç ayrı köprü için yapılan bu çalışmada üç boyutlu bilgisayar modellerine etkilene servis yükleri ile test sonuçları karşılaştırılmıştır.

- Lourenco P.B., Oliveira D.V., Mourao S., 2001 “Numerical Analysis as a tool to understand historical structures. The example of the church of Outeiro”, 2nd International Congress on Studies in Ancient Structures, p.355-364.

Bu bildiride nümerik analizlerin önemini vurgulamak üzere bir kilise yapısının sonlu eleman çözümleri yapılarak hasar nedenleri bulunmaya çalışılmış ve yapının güçlendirilmesi için öneri getirilmiştir.

- E. Mele, A. De Luca, A. Giordano, 2003 “Modelling and analysis of a basilica under earthquake loading” Journal of Cultural Heritage 4 p.355–367

Çalışma iki ana bölüm olan yapının statik ve dinamik analizleri ile iki boyutlu statik itme analizlerinden oluşmaktadır. İtme analizinden elde edilen sonuçlarla limit analiz sonuçları karşılaştırılmış ve yapının non-linear modelinin gerçek davranışı sonlu elemanlar modeliyle tespit edilmeye çalışılmıştır.

- Teomete E., 2004 “Finite Element Modeling of Historical Masonry Structures; Case Study: Urla Kamanlı Mosque”, Yüksek lisans tezi, İYTE, İzmir.

Bu çalışmada, Urla Kamanlı Camii'nde kullanılan taş, tuğla ve harç malzemelerinin deneyleri yapılarak mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Yapının sonlu eleman modeli

oluşturulmuş ve statik ve dinamik yükler altındaki lineer ve non-lineer davranışları mesnetlerde oturma senaryoları düzenlenerek incelenmiştir.

- Salvador Ivorra, Francisco J. Pallares, 2006 “Dynamic investigations on a masonry bell tower”, Engineering Structures, Volume 28, Issue 5, p.660-667

Bu çalışmada beşik tonozlu 3 farklı yığma köprü incelenmiştir. Yapılar non-lineer olarak ele alınmış ve drucker-prager akma kriteri kullanılmıştır. Yapılardan geçen araçların ağırlığı altında yapıların performansı sonlu elemanlar yöntemi ile bulunarak, köprülerdeki hasarlarla karşılaştırılmıştır

- Özkul T.A., Karagüler M., Ergüneş O.I., Kaya Y., Pavlatos C.F., 2007 “Static and dynamic analysis of panagia ton isodion church”, International Semposium Studies on Historical Heritage, p.535-542

SAP 2000 programı kullanılarak statik ve dinamik yükler altında yapının davranışı analiz edilmiştir.

- Psycharis I, Mauzakis H., Pavlopoulou E., Miltiadou A., 2007 “Investigation of the seismic response of a byzantine church-comparison with the existing damage”, International Semposium Studies on Historical Heritage, p.559-566

Bu bildiride bir Bizans kilisesinin sismik etkisi incelenmiştir. Yapılan sonlu eleman çözümleri ile mevcut yapıda oluşan çatlaklar karşılaştırılmıştır. Bu sayede yapının zayıf bölgeleri ortaya çıkarılarak deprem sırasında oluşabilecek hasarlar incelenmiştir.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

2.1. Tarihi Kagir Yapıların Mevcut Durumlarının Belirlenmesi Amacıyla

Yapılan Çalışmalar

Tarihi kagir yapıların mevcut durumun belirlenmesi amacıyla yapının tarihçesi, mimari özellikleri, taşıyıcı sistemi, hasar biçimleri ve bozulmalar, malzeme özellikleri, temel zemini özellikleri ve bölgenin sismik durumu incelenmelidir.

2.1.1. Yapının tarihçesi, mimari özellikleri ve taşıyıcı sisteminin belirlenmesi

2.1.1.1. Yapının tarihçesi ve mimari özellikleri

Anıtın tarihsel gelişiminin, onu oluşturan toplumsal koşulları içinde incelenmesi, yapıldığı dönemin estetik, kültürel, dini, politik, sosyal, teknik ve ekonomik etkenlerinin araştırılması yapının tarih içindeki anlam önemini gösterir (Kuban 2000, s.145).

Tarihi yapılar hakkındaki araştırmaların ilk aşamasında elde edilebilen bilgiler çoğu kez yapım tarihi ve yaptıran kişinin kimliği ile sınırlı kalabilir. Eğer yapının bir yazıtı bulunmuyor ve yaptıran kişinin hangi tarihte yaşadığı bilinmiyorsa, tarihlendirme binanın üslup, yapım tekniği, plan, cephe düzeni gibi özelliklerine bakılarak yaklaşık olarak yapılabilir (Ahunbay 1996, s.60). Bu nedenle mimarlık tarihi kitaplarından yararlanılarak üzerinde çalışılan anıtla aynı dönemde yapılan diğer yapılar hakkında bilgi sağlanır, karşılaştırmalı bir değerlendirmeye gidilebilir. Yapının zaman içinde geçirdiği deprem, yangın ve onarımları saptamak, ilk durumunu anlayabilmek için tarih kitaplarına ve belgeliklere başvurulması gerekmektedir (Ahunbay 1996, s.60).

Yapının özgün durumuna ait tarihi özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapıya ait kitap, eski kitap, mimarlık tarihi kitapları, eski dergi, gazete, film, eski fotoğraflar, minyatür, gravür, eskizler, suluboya resimler, eski harita, vaziyet planı, daha önce yapılmış mimari çizimler, krokiler, tapu, çap, röperli kroki, kot-kesit, yazılı kaynak, satış belgeleri, Koruma Kurulu kararları vb. olup olmadığı araştırılmalıdır. Bu tip dokümanların bazıları ölçeklerinin yanlış olabileceği, çizimlerin yanlış veya hatalı olabileceğini göz önünde bulundurularak doğrudan kullanılmamalı, doğrulukları daima kontrol edilmelidir (Uluengin 2002, s.27).

Yapı veya yapı grupları hakkında ilk yapım, sonradan yapılan değişiklikler, yapının ilk ve son sahipleri, yapının geçirdiği onarımlar, özgün malzemeler, sonradan eklenen bölümler vb. hakkında bilgi sahibi olmak gerekir. Tarih araştırması daha çok bir arşiv araştırması şeklindedir. Bu konuda Osmanlı arşivleri, Başbakanlık arşivleri,

vakıf arşivleri, Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Yüksek Kurulu arşivi, rölöve bürosu arşivi, yerel belediyeler, müzeler, Mimar ve Mühendis Odaları, yazma ve fotoğraf kütüphaneleri, özel kütüphaneler, kişisel özel koleksiyonlar (kartpostal koleksiyonu vb.), tapu kayıtları, eski haritalar, özel kişiler (bu özel kişiler bina sahibi, mimar, müteahhit, kalfa, ustabaşı, mahalle sakini gibi) yardımıyla bilgi sahibi olunabilir (Uluengin 2002, s.27).

Tüm bu çalışmaların yanı sıra yapının inşa edildiği döneme ait yapı üretimine ilişkin belgelerin de araştırılması gerekmektedir. Örneğin, malzeme fiyatları ve işçiliklerle ilgili listelerden yapının incelenmesiyle anlaşılabilen birçok bilginin elde edilmesi mümkün olmaktadır (Kuban 2000, s.145).

2.1.1.2.Yapının taşıyıcı sisteminin belirlenmesi

Yapılara ait taşıyıcı sistemin doğru olarak belirlenmesi, yapının anlaşılması açısından çok önemlidir. Bu açıdan duvarlar, geçiş elemanları, eğrisel üst örtü ve temel özellikleri belirlenmelidir. Taşıyıcı sistemi oluşturan tek parça ya da merkezde pimlerle bağlanan çok parçalı sütunlar, ayaklar, kesme taş, moloz taş, kaba yonu taş, tuğla ya da taş ve tuğlanın birlikte kullanıldığı almaşık duvarlar yapıdan gelen düşey yüklerin sürekliliğini bozmadan temele ileten elemanlardır. Duvarların düşey ve yatay yükleri karşılayabilmeleri için bir bütün olarak davranmaları gerekmektedir. Bu nedenle duvarı oluşturan taş ve tuğlalar birbirlerine harç, kenet ve değişik düzeylerde oluşturulan ahşap veya dövme demir hatıllarla bağlanmıştır. Bazı durumlarda duvarlar, çatılardan gelen eğik yüklerin karşılanması amacıyla payandalarla desteklenmiştir. (Sesigür H. ve ark. 2007, s:11)

Tarihi yapılarda dikdörtgen alanların örtülmesi amacıyla bir kemerin kendi düzlemine dik doğrultuda ötelenmesi sonucunda yüzeysel bir yapı elemanı olan tonozlar oluşturulmuştur. Beşik tonoz, çapraz tonoz ve haçvari tonoz üst örtüde sıklıkla kullanılan tonoz türleridir. Üst örtüde kubbeyi taşımak, yükü duvarlara veya ayaklara aktarmak amacıyla kullanılan ve çoğunlukla gergi ile birlikte tasarlanan kemerler kesme taş, tuğla veya mermerden yapılmıştır.

Eğrisel üst örtünün örtülmesinde sıklıkla kullanılan kubbe, üzerine gelen yükü duvarlara ya da ayaklara aktarmaktadır. Yapım tekniği olarak kubbe, kemerin düşey simetri eksenini etrafında dönmesiyle oluşturulmaktadır. Genellikle tuğladan inşa edilen kubbelerde nadiren taş ve ahşap malzemedeki kubbeler de rastlanmaktadır. Kare

mekandan kubbeye geçişin sağlanabilmesi amacıyla pandantif, tromp veya türk üçgenleri ile oluşturulan geçiş elemanları kullanılmaktadır. Kubbelere, kemerler ve tromplarda kemer ya da kubbe davranışı nedeniyle oluşan itkilerin karşılanması amacıyla ahşap veya dövme demir gergiler kullanılmıştır. Aynı zamanda bazı yapılarda itkilerin etkisini azaltmak amacıyla ağırlık kuleleri de kullanılmıştır (Sesigür H. ve ark. 2007, s:11,12).

2.1.2. Yapısal hasar biçimlerinin tanımlanması ve bozulmaların izlenmesi

Yapının mevcut durumunun belirlenmesi, onarım ve güçlendirme çalışmalarının yapılabilmesi amacıyla yapıda belirli testlerin yapılması ve yapının ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Tarihi yapıda ölçüm yapılmasını gerektiren durumlar şunlardır:

- 1- Yığma yapıdaki ana çatlakların izlenmesi,
- 2- Düşey elemanların yatay yer değiştirmelerinin izlenmesi,
- 3- Düşey ve yatay elemanların dönme miktarlarının izlenmesi,
- 4- Yapı iç ve dış sıcaklıklarının izlenmesi,
- 5- Zemin ve taş temellerin davranışlarının belirlenmesi gerekir (Rossi 1996, s.43).

Ayrıca kagir yapıda düşey elemanlar boyunca oluşan çatlaklar araştırılmalı ve yapının çatlak rölövesi çıkarılmalıdır. Çoğu kez sıvalı olan yapıların raspası (sıva sökümü) sonucunda çatlaklar hakkında detaylı (eski ya da yeni) bilgi edilebilir. Yapı elemanlarında ezilme olup olmadığı ve sebepleri araştırılmalı ve yığma duvarlarda oluşan dönmelerin yapının taşıyıcı sistemine etkileri ve duvar yüzeyinde oluşan çatlakların yönü izlenerek oturmanın olup olmadığı belirlenmelidir. Yapıda çatlak oluşumu, o bölgedeki dayanımın sona ermesi ve yapıda serbest hareketin başlaması anlamına gelir. Çatlak oluşumundan sonra o bölgenin taşıdığı iç kuvvetler başka elemanlara aktarılmaktadır. Çatlaklar her zaman yapıda göçmeye neden olmaz. Önemli olan çatlağın zaman içinde gelişip yapının stabilitesini tehdit etmesidir. Böyle bir durumdan kuşkulanırsa çatlağın sürekli olarak izlenmesi gerekir. Çatlağın genişliği, yapıda hareketli yük ve sıcaklık değişimine bağlı olarak artıp eksilebilir. Burada önemli olan çatlağın uzun zaman içindeki eğilimidir. Bu nedenle çatlak genişlikleri olanak varsa en az bir yıl boyunca belli aralıklarla ve günün belli saatlerinde ölçülmelidir. Çatlak genişliğinin uzun zaman içindeki değişiminden çatlağın sabit ya da gelişen çatlak olduğuna karar verilebilir (Sesigür H. ve ark. 2007, s.14).

En basit çatlak ölçme tekniği hareket ettirilebilen çatlak genişliği ölçüm aleti extensometre kullanımıdır. Alet, çatlağın farklı yönlerine konulan iki metal tabakaya oturtulur ve bu sayede ölçüm yapılır. Ölçümün gerçekliliği için elektrik güç kaynağına bağlanan ölçüm aletleri otomatik olarak veriler toplamaktadır (Rossi 1996, s.43).

Yapının eğrisel olan elemanlarında derz açılmasının nedenleri, kubbede oluşan çatlakların yönü ve nedenleri tespit edilmelidir.

Yapıya ait dövme demir gergi elemanlarının korozyondan ne ölçüde etkilendiği, varsa gergilerdeki burkulmanın belirlenmesi, ahşap gergi elemanlarında da çürüme, mantarlaşma gibi bozulmalar araştırılmalıdır.

Araştırmalar sonucunda oluşan bozulmalar yapının rölövesi üzerinde çatlak genişlikleri ve derinlikleri, düşeyden ve yataydan sapmalar, ahşap ve metal elemanlar yapının taşıyıcı sistemini anlatacak şekilde ayrıntılı olarak gösterilmelidir (Sesigür H. ve ark. 2007, s:15).

2.1.3. Tarihi yapılarda malzeme özelliklerinin belirlenmesi için yapılan testler

Tarihi yapıların strüktürel özelliklerinin ve malzeme dayanımlarının belirlenmesi için ayrıntılı bir çalışma ve analiz yapılmalıdır. Bu açıdan mevcut durumun araştırılması (tetkik), hasar ve bozulmaların tanımlanması (teşhis), çözüm ölçütlerinin seçilmesi (tedavi) ve müdahale sonuçlarının uygunluğunun kontrol edilmesi (kontrol) gerekmektedir.

Her tarihi yapının özgün durumu, yapım teknikleri, geçirdiği değişiklikler, yapısal davranış ve malzeme özelliklerinin teşhis edilmesi gereklidir. Yapının doğru olarak teşhis edilebilmesi nitel-ölçülemeyen ve nicel-ölçülebilen yaklaşımlara bağlıdır. Nitel yaklaşım, yapısal hasar ve malzeme bozulmalarının doğrudan gözlemi ile tarihi ve arkeolojik araştırmaları, nicel yaklaşım ise malzeme ve yapı deneylerine, yapının izlenmesine ve yapısal analizlere bağlı olarak yapılmaktadır (Icomos Iscarsah 2007, s.12).

Tarihi yapı ile ilgili ayrıntılı bilgiye sahip olmak için yapının tarihi ve mimari özelliklerinin, özgün yapı malzemesi ve yapım tekniğinin belirlenmesi, yapıda sonradan yapılan müdahalelerin araştırılması, uygun test yöntemlerinin kullanılarak mevcut

durumunun belirlenmesi, yapıya etkiyen dış yüklerin, yapı davranışının ve malzeme tiplerinin tanımlanması ve yapı alanının, zemin durumunun ve çevre faktörlerinin araştırılması gerekmektedir.

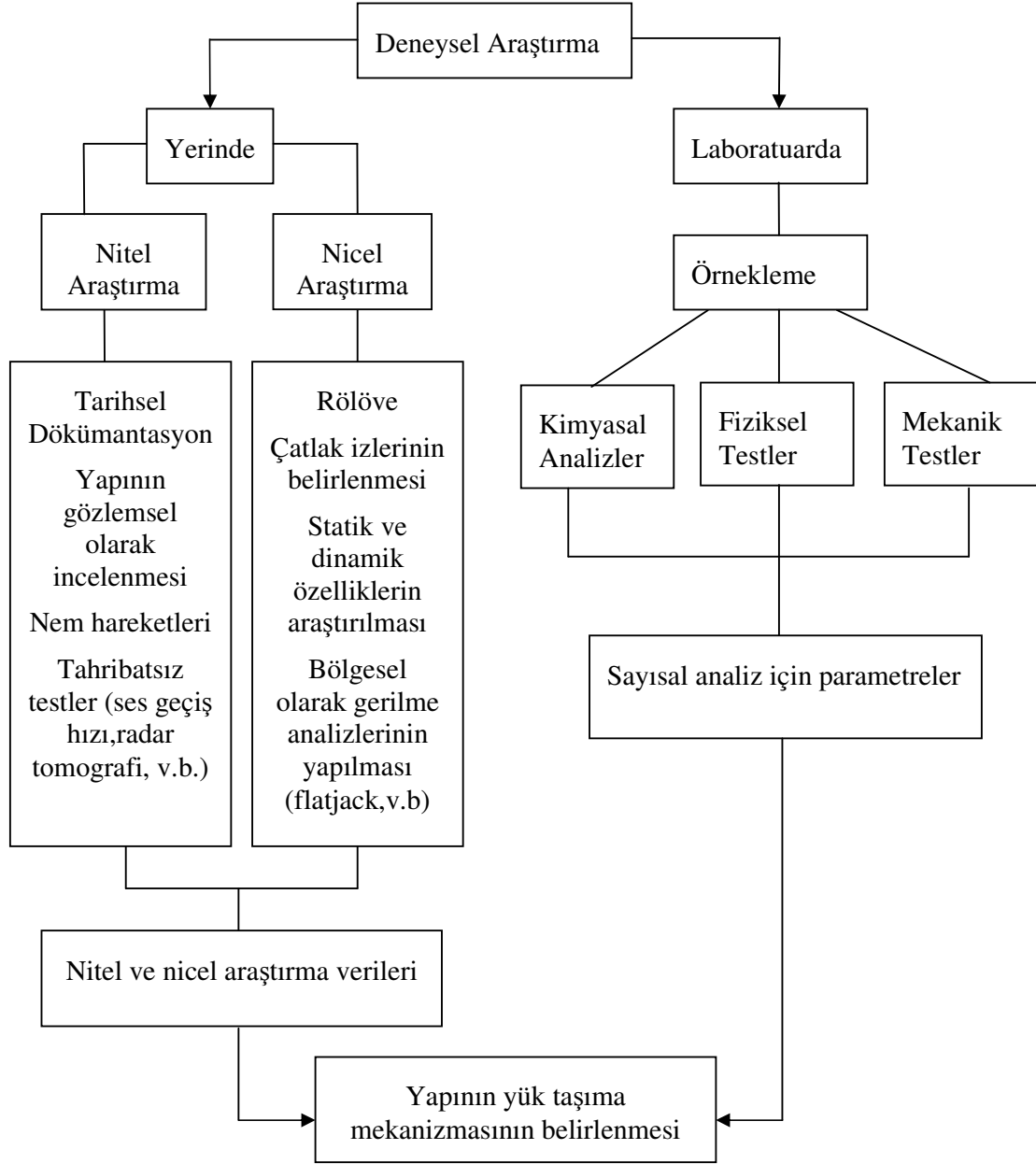
Laboratuvar deneyleri çeşitli mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin, yapının gerilme ve deformasyonlarının ve yapıdaki süreksizliklerin belirlenmesini sağlar. Bunlar malzemenin dayanım ve elastik özellikleri ile porozite gibi özellikleridir (Icomos Iscarsah 2007, s. 24).

Yapıya zarar veren deneyler yerine, tahribatsız (zarar vermeyen) deneyler tercih edilmelidir. Deneyler her zaman deney güvenilirliğini doğru olarak ölçebilecek uzmanlar tarafından yapılmalı ve deney verilerinin sonuçları dikkatle değerlendirilmelidir. Deneylerde değişik yöntemler kullanılmalı ve sonuçları karşılaştırılmalıdır (Icomos Iscarsah 2007, s.26).

2.1.3.1. Yerinde yapılan testler.

Tarihi yapılarda deneysel çalışmalar yapılmadan önce yapının geometrik özellikleri, çatlak tespiti ve tarihsel analizinin ayrıntılı olarak belirlenmesi gerekir. Bu analizlerin değerlendirilmesi sonrasında yapı ile ilgili mekanik parametreleri belirlemek amacıyla tahribatsız veya az tahribatlı yöntemlere geçilmelidir. Tahribatsız deneylerin bir çoğu sadece kagir yapılarda kullanılan malzemeler hakkında niteliksel sonuçlar vermektedir. Oysa kagir yapıların mekanik parametrelerinin güvenilir şekilde değerlendirmesini yapabilmek için az hasarlı testlerin yapılması gereklidir. Bu yüzden özellikle flat-jack testi ile kagir yapının gerilme durumu, deformasyonu ve yapının mukavemetinin belirlenmesi sağlanır. Aynı zamanda yapının mevcut durumunun belirlenmesinde titreşim analizleri ile yapının izlenmesi de oldukça önemli bir role sahiptir (Rossi 1996, s.24).

Deneysel çalışmaların bir diğer bölümü laboratuvarda yapılan fiziksel, mekanik ve kimyasal deneylerdir. Bu deneyler sayısal analizlerin yapılarak yapının yük taşıma mekanizmasının belirlenmesinde önemli yer tutmaktadır. Şekil 2.1'de bir yapının strüktürel analizlerinin yapılması öncesinde laboratuvar ve yapı yerinde yapılması gereken deneysel çalışmalar gösterilmiştir. Aşağıda hasarsız ve az hasarlı test yöntemlerinin en çok uygulananları başlıklar halinde açıklanmıştır.



Şekil 2.1 Yapının strüktürel analizleri için yapılan deneysel araştırmalar (Binda 2007, s.298)

a) Hasarsız Test Yöntemleri:

Yapının fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yapının taşıyıcı unsurlarının analizleri yapılmalıdır. Ayaklar, duvarlar, kemerler ve cepheleri oluşturan taşıyıcı elemanların yapının bulunduğu bölgeye bağlı olarak değişen yapı malzemesi ve yapım tekniklerinin dikkatli bir teşhisle incelenmesi gereklidir. Bu açıdan yapının geometrik olarak incelenebilmesi için çatlak oluşumlarının detaylı bir şekilde belirlenmesi ve yapının geçirmiş olduğu onarım ile yapının ne amaçlarla kullanıldığının tespit edilmesi gerekir. Yapının güvenli bir şekilde statik davranışının öğrenilebilmesi için az hasarlı deney yöntemlerinin uygulanması gereklidir. Bu yüzden yapılacak olan delme ve kesme işlemlerinin sadece çalışmanın gerekli bir ön aşaması olması nedeniyle izin verilmelidir.

Bu teşhis yöntemleri aynı zamanda yapının deformasyon davranışının çatlak izleme aletleri yardımıyla belirlenmesi ile eş zamanlı olarak yürütülmektedir. Çeşitli araştırmalar sonucunda yapının sağlamlığının belirlenmesi aşamasında strüktürel araştırmalar yapının statik durumu hakkında çok güvenli sonuçlar vermektedir.

Yapının strüktürü ile ilgili doğru bir geometrik çalışmanın yapılması gerekmektedir. Bu çalışmalar ister geleneksel yöntemle, isterse de fotogrametrik yöntemlerle yapılsın, mevcut durumunun rölövesinin çıkarılması gerekmektedir. Bu çalışma, yapıda sonradan oluşan düzensizlikleri (düşeyden sapma vb) ve kötü işçilikten dolayı oluşan hasarları göstermesi açısından çok önemlidir. Bu çalışma süresince, yapının yapısal ve mimari özelliklerinin, yapı malzemelerinin tam olarak belirlenmesi gerekmektedir. Yapıda görülen çatlak izlerinin yapının strüktüründe belirlenmesi çok önemlidir. Bu çatlak oluşumları ve çatlak derinliği ile ilgili ayrıntılı bir araştırma bize yapı ile ilgili bir ön değerlendirme yapabilmemizi sağlar. Bu geometrik çalışmanın aynı zamanda bize yapının temel yapısı hakkında bir fikir verebilmesi amacıyla bir araştırma çukurunun açılmasını veya temelden bir karot alınmasını gerektirir.

Yapının strüktürü ile ilgili olarak yapılan bu araştırmalar yapının geçmişini bilmemizde yardımcı olur. Bu sebeple yapı ile ilgili bu araştırmada yapının geçirmiş olduğu aşamaların, kullanılan yapım tekniklerini ve kullanılan yapı malzemelerinin belirlenmesi için çok önemlidir. Yapım aşamalarını ve sonradan yapı ile ilgili

müdahaleleri gösteren ayrıntılı bir çalışma, çatlakların oluşum sebeplerinin belirlenmesine yardım eder. Değişik kagir tiplerinin varlığı, çatlak oluşumlarının değerlendirilmesinde önemli bir yer tutar.

Yapı ile ilgili ön araştırma sonrasında ikinci aşama olan strüktür ve mekanik özelliklerin araştırıldığı test yöntemi belirlenmektedir. Bu aşama birçok çalışmada sadece NDT (non destructive techniques-zarar vermeyen yöntemler) ile yapılmaktadır. Bunun sebebi kullanılan aletin çok pahalı olmaması ve yapılan işlemin göreceli olarak daha kolay oluşudur. Ancak bu test yöntemi sadece tek başına yeterli değildir. NDT testlerin sonucunda ortaya çıkan sonuç bize yapının mekanik özelliklerinin belirlendiği ön bir değerlendirme aşamasında kalite indekslerini belirlememize yardım eden nitel verilerdir. Bu testler yapının statik analizinin yapılabilmesi için gerekli olan mekanik parametreleri sağlamazlar.

Yapının mekanik davranışının belirlenebilmesi için tek güvenilir yöntem yapıda sondaj deliği açılması ve yapıdan küçük kesitler alınması ile gerçekleşen az hasarlı testlerdir. Bu çalışmalar esnasında yapının strüktürünün değiştirilmemesi ve yapıda oluşan zararın geçici olması esastır. Ayrıca bu testlerin sonunda strüktürde hiçbir görünür izin olmaması gerekmektedir (Rossi 1996, s.24,27).

a.1) Sonik ölçümler

Tahribatsız test teknikleri içinde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri sonik metodlardır. Genel olarak bu test tekniği sonik veya ultrasonik dalgaların yapının bir noktasına uygulanarak kullanılır. Vurmalı sistemler, elektrodinamik veya pnömatik sistemler tarafından oluşturulan sinyaller, farklı pozisyonlarda yerleştirilen alıcılar tarafından toplanır. Elde edilen veriler sinyalin gidiş ve geri dönüş süresini ve sinyal dalgasının analizlerini içerir.

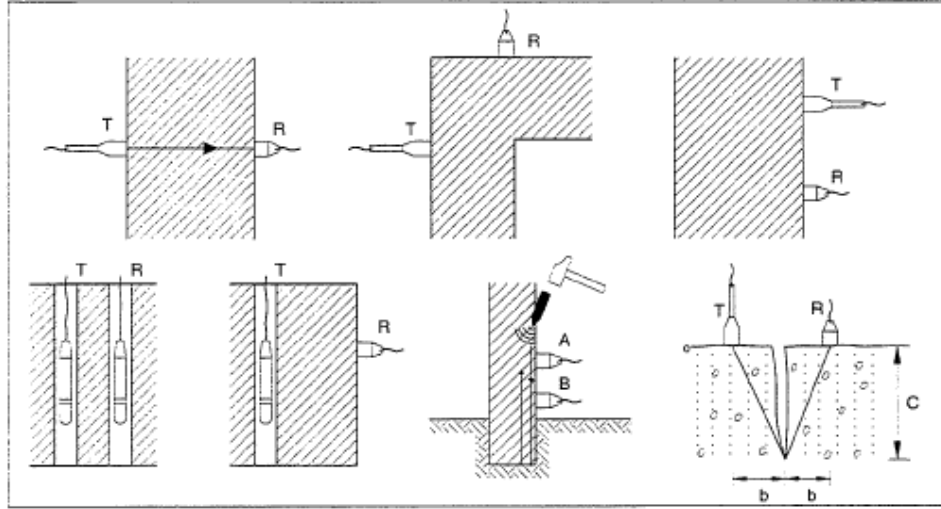
Ultrasonik dalgalar, aralarında boşluk olmayan yüzeyler üzerinde yapılacak olan çalışmalarda kullanılır. Yığma yapılar için bu ultrasonik dalgalar yerine, toprak ve kaya parçalarında kullanılan sonik dalgalar kullanılır. Yığma yapılarda sonik dalgalar kullanılmasının sebebi köşe noktaların ultrasonik dalgaların geçemeyeceği bir bariyer oluşturmasıdır.

Sonik testler; gönderilen sinyalin karşı taraftan alınmasıyla aynı zemin üzerine alıcı ve vericinin konmasıyla uygulanabilir. Verici, alıcıyla zıt yönlü veya aynı yüzeyde de olabilir. Sensörlerin aynı duvar üzerinde farklı yüksekliklere konması yapının derinliğine dair belirleyici bir bilgi edinmeyi mümkün kılar.

Sonik test metodunu kullanarak, aşağıdaki bilgiler elde edilebilir.

- Mekanik kalite durumu (deformasyon modüllerinin tahmin edilmesi)
- Yığma yapılarda kullanılan malzemelerin homojenlik durumu
- Bir yapı parçasının homojenliği
- Güçlendirme amaçlı kullanılan dolgu malzemelerin etkisi
- Sürekli malzemelerde oluşan çatlakların tespiti

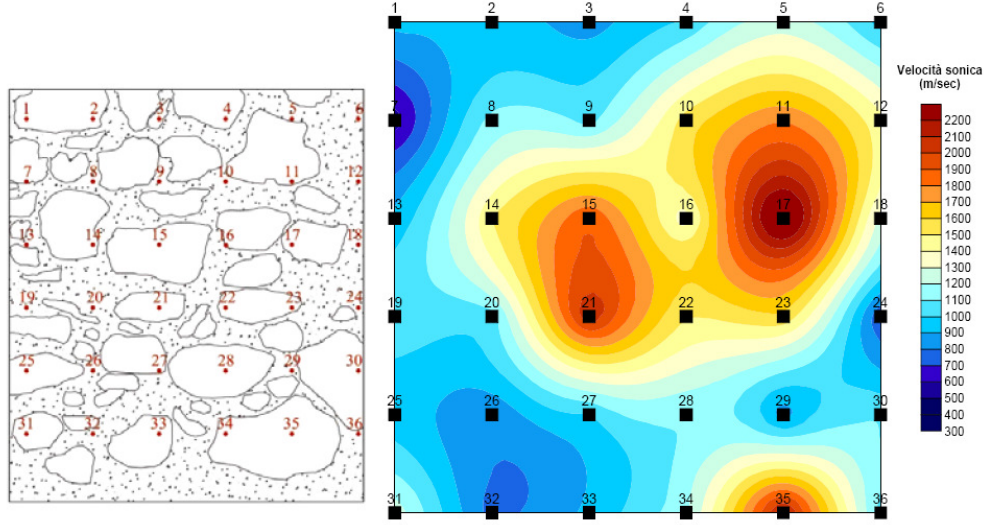
Şekil 2.2’de bir uygulanan sonik ölçümlerden bazıları gösterilmiştir (Rossi 1996, s.27).



Şekil 2.2 Sonik ölçümler

a.2) Sonik tomografi

Bu test tekniği sayesinde, sonik dalgaların uygulandığı düz bir satıhta yol alışlarının detaylı bir haritası görülebilir(Şekil 2.3). Bu metod, kesiti orantılı olarak ve farklı yönlerden alınan sonik dalgaların belirlenmesiyle oluşur. Hesaplanma süreci ters olan bu yöntemle, sonik sinyallerin yayılma zamanından ses sinyallerinin hızı esas alınır. Dikdörtgen bir “ağ” ile işaretlenen yığma kesit üzerinde iki sabit alıcı veya vericiyle hesaplar yapılır.



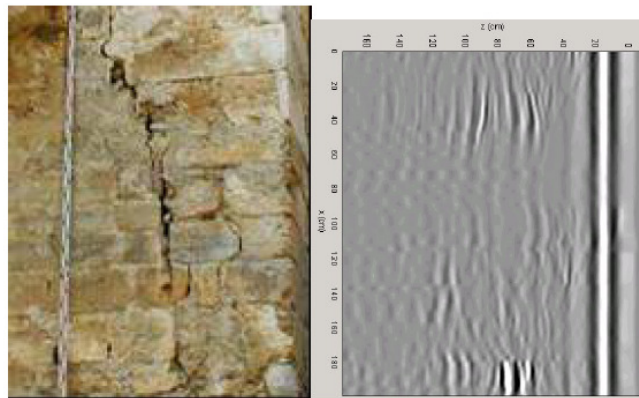
Şekil 2.3 Duvarda sonik hız dağılımı (Binda 2007, s.302).

Hesaplamalarda kullanılan başka bir hipotez ise uniform olmayan hız alanı sonik etkileşimlerin düz bir şekilde yayılmasından ziyade kırılma sonucunda kavisli bir şekilde yol almasıdır.

İncelik tomografisi denilen yöntemle sonik dalgaların sadece hızı değil, aynı zamanda frekans ve genlik de incelenebilir (Rossi, s.29).

a.3) Radar Ölçümü

Radar ölçümünde yüksek frekansta elektromanyetik dalgalar kullanılır. (100 MHz-1GHz). Bu dalgalar bir anten sayesinde çok kısa aralıklı süreler 0.5-5 μ s ile yayılır. Alınan sonuçlar farklı materyallerin yerlerini belirlemede yardımcı olur. Farklı nesnelere geri yansıyan sinyallerin toplanma prensibiyle işleyen bu sistem sayesinde rutubetli alanlar, çukurlar, metal strüktürler, borular ve bacaların yerleri tespit edilebilir. Şekil 2.4'te radarla çatlak yerlerinin tespiti gösterilmiştir (Binda 2007, s.303).

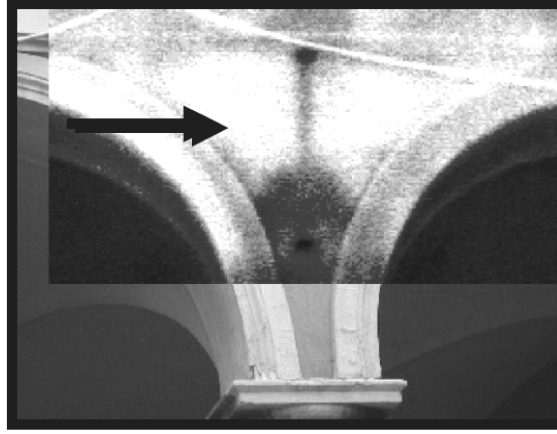


Şekil 2.4 Çatlak yerinin radarla tespiti

a.4) Termografik Analizler

Termografik analiz sistemi, ısının cisimlere uygulanması üzerine kurulmuştur. Teknik olarak ısı yayımı sırasında oluşan radyasyonun analiz edilmesiyle (ısıtma ve soğutma) sonuçlar elde edilir. Eğer inceleme aktifse, ısı ölçülür. Termal radyasyon, kızılötesi radyasyona duyarlı ve kızılötesi ışınları elektrik sinyallerine çevirip değişik renklerde şekile çevirebilen bir aygıt tarafından ölçülür (Rossi 1996, s.31).

Termovizyon yapıların içindeki malzemelerin yaydığı termal radyasyonu bir kamera sayesinde toplanmasıyla oluşturulur. Sonuçlar renk skalasında gösterilir. Termovizyonla boşluklar, farklı malzemeler, su ve ısıtma sistemleri, nem durumu belirlenebilmektedir (Şekil 2.5) (Binda 1996, s.302).



Şekil 2.5 Metal bağlantı elemanının belirlenmesi

a.5) Geri Tepme Testleri

Geri tepme testlerinin amacı harçların basınç dayanımları ile taş ve tuğla malzemelerin yüzey sertliğinin tespitidir. Bu test sayesinde ayrıca bölgesel hasarların da yeri tespit edilebilir. Malzemenin sertliğini ölçmek için düşük enerjili sarkaç (selerometer) veya Schmidt çekici kullanılabilir (Şekil 2.6). Bu test ile elde edilen sonuçlar bir “kalite çizelgesi” olarak sayılabilir ve örnekler üzerinde uygulanmış olan mekanik testler ile ilişkilendirilebilir.



N tipi schimidt çekici



P tipi schimidt çekici

Şekil 2.6 Yüzey sertliğinin ölçülmesi (Aköz, 2005).

a.6) Manyetometrik analizler

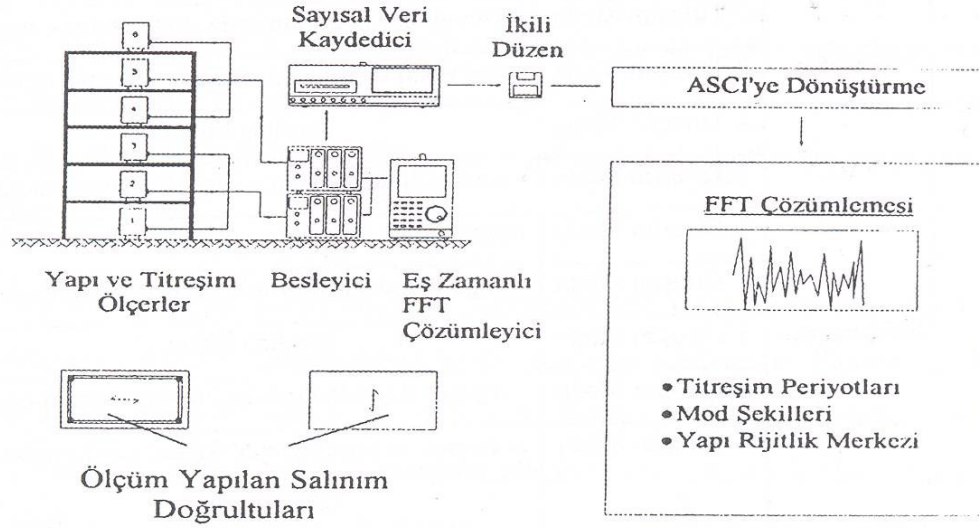
Manyetometri, yığma yapılarda bulunan metal elementlerin yerini tespit etmek için kullanılır. Testte kullanılan manyetik mil, yığma alana yerleştirilir, daha sonra milin manyetik etkisiyle metal cisimlerin yeri tespit edilir.

Bu teknik, beton elemanlardaki donatılmış bölgeleri görmek için kullanılır. Yığma yapıda ise taşların arasında bulunan zincirlerin, gergi çubukların ve plakaların yerini tespit etmek için kullanılır (Rossi 1996, s.31).

a.7) Serbest Titreşim Deneyleri

Yapı yerinde uygulanan dinamik testler yapının strüktürel davranışını ve yapısal durumunu belirlemek amacıyla uygulanan hasarsız test yöntemidir. Dinamik analizler, yapılara sürekli olarak etkiyen dinamik yüklerin etkisini (kara yolu, tren yolu, çan kuleleri gibi) veya düzensiz yüklenme durumlarını ölçmek amacıyla yapılır. Yapının değişik bölgelerine yerleştirilen özel titreşim ölçerler (seismometer) yardımıyla sinyaller genlik ve frekans olarak belirlenir. Uygulanan analiz tekniğiyle dinamik model için parametreler belirlenir.

Yapıda çeşitli nedenlerden kaynaklanabilen yatay yada düşey yöndeki çok küçük titreşimler (mikrotremor) özel titreşim ölçerler (seismometer) yardımıyla, ivme, hız yada yer değiştirme türünden olmak üzere kaydedilebilmektedir. Kullanılan titreşim ölçerlerin genlik sınırları 0.005-3000 mikrondur. Daha güvenilir sonuç verdikleri periyod sınırları 0.01 sn. ve 5 sn. ile belirlenmektedir. Titreşim ölçerden gelen analog hız sinyalleri, gerilim düşürücüden (attenuater) geçirilirken istenirse yerdeğiştirme ve ivmeye dönüştürülebilmektedir. Bu analog sinyallerin sayısal büyüklüklere çevrilip saklanması yada ekrandan izlenmesi olanağı vardır. Disket aracılığı ile kişisel bilgisayara taşınan kayıtlar özel bir bilgisayar programıyla ikili sayı düzeninden onlu sayı düzenine aktarılıp ASCII (American Standard Code For Information Interchange-Bilgi Değişimi İçin Amerikan Standart Kodlama Sistemi) modunda saklanır, gerilimden gerçek büyüklüğe çevrilir ve aşağıda özetlenen algoritma esas alınarak işlenir (Şekil 2.7), (Koçak 1999, s.44).



Şekil 2.7 Serbest titreşim deney algoritması

Titreşim ölçerlerden gelip her kanalda tutulmuş olan kayıtların dalga formu çizilir ve hepsi için en uygun olan bir çalışma aralığı belirlenir. Bu zaman aralığındaki veri sayısı, uygulanacak Hızlı Fourier Dönüşümü gereği ikinin kuvveti olmalıdır. Eğer göreceli değerlerle çalışılacaksa, ilgili titreşim ölçerlere karşı gelen kayıtların farkları alınır. Tüm kanallar için Hızlı Fourier Dönüşümü uygulanır.

b) Hafif Tahribatlı Testler

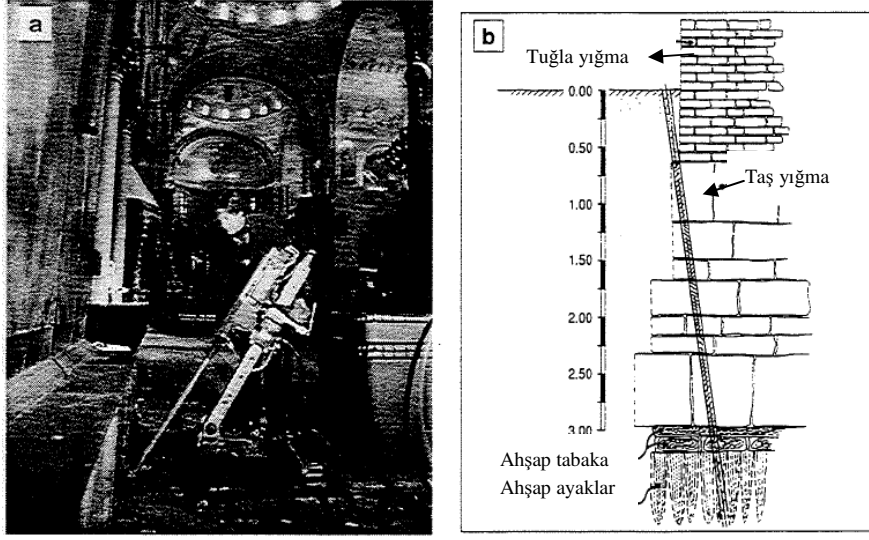
Hasarsız test yöntemleri yapının olağan durumunu belirlemek ve dolgu çalışmalarının gerekli olup olmadığını anlayabilmek için yetersizdir. Bunun için yığma yapıda hafif tahribatlı testlerin yapılması gereklidir. Bu test çalışması için mümkün olduğu kadar küçük ve görünebilir materyaller kullanılmalıdır. Ayrıca test basit olarak uygulanmalı ve zararın ufak çapta olabilmesi için kısa sürede bitirilmelidir.

Bu metodlarla yığma yapıların yapısal ve mekanik özellikleri güvenilir bir şekilde belirlenebilir.

b.1) Örnek alma tekniği

Yığma yapıyı oluşturan farklı tipten elemanların yapılarını belirleyebilmek için en çok göze çarpan bölgelerden ufak örnek parçaları almak gerekir. Çok nadir de olsa, yığma yapının iç kısımlarında iki farklı katman bulunması durumunda gerekli olan bir operasyondur. Örnek alınması sırasında elmas kesme uçlu dönen bir alet kullanılması zorunludur. Çok hafif, elle delik açmaya yarayan bir aletle, örnek parça alımı ulaşımı zor olan bölgelerden kolayca elde edilebilir. Bu örnek alma tekniği sayesinde toplanan parçalar laboratuvar ortamında incelenerek taş, tuğla ve harç malzemelerin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenebilir. Örnek alımından sonra oluşan delikler video kamera dilatometrik ve sonik ölçümler için kullanılarak strüktürel ve mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılabilir.

Örnek alma tekniği ayrıca yığma yapının temellerinin incelenebilmesi için oldukça önemlidir. Şekil 2.8’de Venedik’teki St. Mark’s bazilikasında delik açma makinasıyla yığma yapının temellerinin incelenmesi gösterilmiştir. Aynı şemada ayrıca yığma yapının temelinin strüktürel şeması gösterilmiştir.



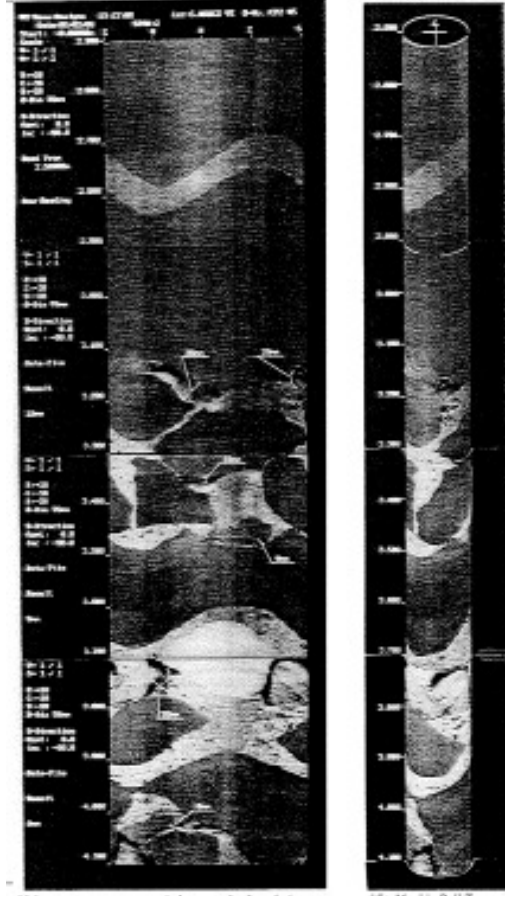
Şekil 2.8. Venedik St. Mark Bazilikasında temel yapısının incelenmesi (Rossi, 1996) a) Delme aleti b) Yığma yapının temel yapısı

b.2) Kamera yöntemiyle inceleme

Açılan deliklere yerleştirilen küçük renkli bir kamera ile deliklerin ön ve yan tarafların detaylı bir incelemesi yapılabilir (Şekil 2.9 Rossi 1996, s.33). Elde edilen sonuçlar daha sonra tekrar incelenmek için kaydedilebilir.

Bu incelemeyle ayrıca;

- Yığma yapının strüktürel özellikleri
- Yığma yapının içinde bulunan boşlukların ölçüsü
- Yığma yapının içerisinde bulunan çatlakların ölçüsü ve yayılma analizi sonuçları elde edilebilir (Rossi 1996, s.32).



Şekil 2.9. Venedik Saint Mark Çan kulesinin temelinde video kamera araştırması a) Açılan bölümde temel kesiti b) Bilgisayar programı ile temel kesitinin tekrar düzenlenmesi

b.3) Flat Jack testleri

Flat jack testleri yığma yapıların mekanik özelliklerinin analizini yapmaya yarayan bir test yöntemidir. Tarihi yapıtlardaki ilk uygulamalarda bu yöntemle iyi sonuçlar elde edilmiştir. Yığma yapıların dayanımı, deformasyon durumu ve gerilme durumu gibi testlerin gerçeğe yakın sonuçları için tek yol olarak flat jack testleri öngörülmüştür.

İnce bir flat jack'in harcın içine konulmasıyla uygulanan bu yöntem oldukça basit ve az hasar vericidir. Test bittikten sonra flat jackler geri çıkartılır ve bozulan harç

yüzeyi kolayca eski haline getirilebilir. Bu testlerin verimliliği alınan örneklerin dışarıdan bir etkiye maruz kalmamasıdır. Yöntem, büyük yüzeyler için davranış modelini simgeler.

Bu test tekniği ile;

- Gerilme dayanımı,
- Deformasyon ve dayanım,
- Harç katmanlarındaki kayma dayanımının tespit edilmesi,

sonuçları elde edilebilir.

Gerilmenin ölçümü:

Gerilmenin ölçümü, duvar düzlenme dik bir şekilde yapılır. Duvarın farklı yerlerine yerleştirilen iki referans noktası belirlenir ve aralarındaki mesafe (d_i) ölçülür. Duvarın yüzeyine dik olarak uygulanan kesimle gerilme ölçülür, uzaklık (d) kesim olduktan sonra $d < d_i$ kapatılır. Kesiğin içine ince bir flat jack yerleştirilir ve basınç artırılarak bir önceki ölçüm iptal edilir (Rossi 1996, s.34).

Bu durumda flat jack'e uygulanan basınç, duvara bu alet yerleştirilmeden önceki basınçla aynıdır. Elde edilen bilgiler flat-jack yüzeyi ile sabitlenmiş yüzey arasında oluşan bir katsayı ile düzeltilir.

Gerilme formülü;

$$\sigma = p \cdot K_m \cdot K_a \quad \text{Denklem 2.1.}$$

p = yağ basıncı

K_m = laboratuarda belirlenen jack katsayısı değeri

$K_a = A_j / A_c$ (jackin yüzeyi ile kesim yapılan yüzey arasındaki oran)

Tuğla duvarlardan, küçük bir el aletiyle iki tuğla arasındaki harçtan delik açmak oldukça kolaydır. Bu tip duvarlarda kullanılan flat-jack dikdörtgen olup 40x20 cm'dir. Ayrıca gerilme derecesini ölçebilmek için daha küçük jacklerde kemerler, ayaklar ve tonozlarda kullanılabilir. Taş yığmalarda ince harç olduğu için farklı kesim teknikleri kullanılabilir. Elmas kesme uçlu çelik bir disk ile yapılan bu kesimlerde kullanılan flat jack in boyutları genişlik 32 cm, derinlik 12 ve kalınlık 3 mm'dir. Bu çeşit dizayn ve yapıya sahip taşlar için özel kalınlıkta ince jackler gerekmektedir (Rossi 1996, s.35).

Dayanım ve deformasyon oranlarının tespiti:

Homojen ve izotrop malzemelerde bundan önce açıklanan flat-jack test tekniğiyle deformasyon tespiti yapılabilir (Şekil 2.10). Yüksek düzeyde anizotrop malzeme içeren yığma yapılarda uygulanan test tekniğinde bazı değişiklikler yapılmalıdır. Bu amaçla, ikinci kesim birincisine paralel olacak şekilde ve yaklaşık 50 cm uzaklığa yerleştirilmesi gerekir. İki jackin yeri belirlenir ve basınç uygulayacak uygun büyüklükteki jackler serbest kısma yerleştirilecek strain-gauge aletleriyle birçok ölçüm yapılabilir. Yatay ve düşey deformasyonlar bu yolla ölçülebilir. Bu yolla büyük bir alan için tek eksenli basınç testi yapılabilir. Pek çok yük eğrisi gerilme düzeyi artırılarak elde edilir. Yüklenmiş ve yüklenmemiş durumlar için elastisite modülleri ölçülür.



Şekil 2.10 Flatjack aletiyle deformasyon ölçümleri (Aköz, 2005)

Bu test tekniği ayrıca basınç mukavemetinin tespiti için de uygulanır. Harçlarda ilk çatlaklar oluşana kadar basınç uygulanır ve gerilme-uzama grafiği elde edilir (Rossi 1996, s.37).

Ek olarak bazı durumlarda tuğlada çatlaklar oluşabilir. Fakat bu durumda oluşan çatlakların hemen onarılması mümkündür.

Son zamanlarda gelişen test teknikleriyle ulaşılması zor yerlerde de testler yapılabilmektedir. Yüksek binalar ve kulelerde tırmanış iskeleleri kurularak bu yöntem uygulanabilmektedir.

Harç yüzeyinde kayma dayanımı:

Hidrolik bir jack eklentisi ile flat-jack test tekniği ile tuğlalar arasındaki harcın dayanıklılığı tespit edilebilir. Yığma örneğinin orta kısmından çıkarılan bir tuğla yerine aynı boyda bir hidrolik jack yerleştirilerek kayma testi yapılabilir (Şekil 2.11). Bu test tekniğiyle harcın en yüksek ve arda kalan kayma dayanımı belirlenir.

Farklı basınç değerleriyle ve dik açıyla uygulanan birkaç testle, yığmanın sürtünme açıları ve kohezyon durumları belirlenebilir. Bu test yapılarının sismik dayanımları üzerinde yapılan çalışmalar için önemlidir.

Testin sonunda jackler çıkartılır ve tuğla eski yerlerine oturtulur. Tuğlalar arasındaki harç ilk haline uygun olarak kapatılır.

Flat-jack testinden elde edilen sonuçların hepsi geniş bir şekilde laboratuvar ortamında incelenir. Ölçüm ve yerleştirme aletleri ile yapılan kalibrasyon testleri sonuçların doğruluğu açısından oldukça önemlidir.

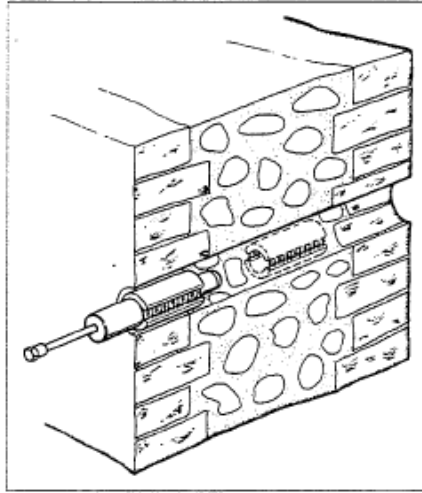


Şekil 2.11 Shearjack aletiyle kayma deformasyon ölçümleri (Aköz 2005)

b.4) Borehole Dilatometre Testi:

Sadece birbirlerine paralel olacak şekilde yerleştirilen flatjack'lerle yığmanın deformasyon ölçümleri yapılabilir. Yığmanın iç kısmındaki durumunu görebilmek için, karot yöntemiyle sonda yaparak dilatometrik testlerin uygulanması gerekir. 25cm uzunluğundaki özel bir borunun yığmanın iç kısmına yerleştirilerek hidrostatik basınçla deformasyon değerleri ölçülür (Şekil 2.12). Bu testin uygulandığı yığma kısım sınırlı olduğu için, dilatometre testlerinden elde edilen sonuçlar flat-jack testine göre daha az verimlidir.

Bu test tekniği dış katmanlarla iç katmanlar arasındaki deformasyon oranlarının tespiti için yararlıdır. Ayrıca temellerdeki deformasyon için de önemli sonuçlar verir (Rossi 1996, s.40).



Şekil 2.12 Borehole dilatometric testinde malzeme karakteristiğinin görünümü

b.5) Endoskopik Yöntem

Tıpta kullanılan endoskopi yöntemiyle benzer olan bu yöntemde yığma yapı elemanlarının çok büyük olması nedeniyle karotla veya gözle ulaşılamayan bölgelere ulaşılması ve görüntü alınması sağlanmaktadır. 1cm çapında açılacak olan delikten kablo gönderilerek görüntü alınır ve kullanılan malzemenin özelliği, boşluklardaki

yabancı maddeler belirlenebilir. Şekil 2.13'te endoskopi yöntemiyle duvarda tespit edilen ahşap eleman gösterilmiştir.



Şekil 2.13 Duvarın içinde bulunan ahşap eleman (Panagia Krina kilisesi, fotoğraf E.Vintzileou)

2.1.3.2. Labovatuvar ortamında yapılan testler

Tarihi yapılarda kullanılan malzemelerin karakteristik özelliklerini belirlemek amacıyla birçok test yapılmaktadır. Bu testlerden bazıları aşağıda açıklanmıştır. Bunlar:

a) Fiziksel testler:

a.1) Kılcal Su Emme Deneyi

Bu deney düzgün geometrik şekilli üç deney numunesi üzerinde yapılır. Küp veya silindir gibi düzgün geometrik şekilli deney numuneleri taş kesme testeresi ile dikdörtgenler prizması biçiminde hazırlanır veya karot aleti ile silindir biçiminde karot numuneler kullanılır.

Deney numuneleri iyice temizlendikten sonra, değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulur, desikatörde oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra 0,1 gr. duyarlılıkla tartılır (W_k). Malzemenin su ile temas eden yüzey alanı (A) cm^2 olarak bulunur. Numune içinde $20 \pm 5^\circ C$ sıcaklıkta su bulunan uygun büyüklükte bir kap içine konulmuş bagetlerin üzerine, 5 mm'lik kısmı su içinde kalacak şekilde suya daldırılır. Numunenin 1.,4.,9.,16.,25.,36.,49.,.....169. dakikalarındaki su emişinin ağırlığı 0,1 gr. duyarlılıkla tartılarak su emiş ağırlıkları tespit edilir (W_t). Emdiği su miktarı-zaman (Q-t) grafiği çizilir. Darcy kanunundan yararlanılarak kapilarite katsayısı bulunur.

- Hesaplamalar

Kapilarite katsayısı aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$K = \frac{Q^2}{F^2 \cdot t} \quad \text{Denklem 2.2.}$$

K: Kapilarite katsayısı (cm²/sn)

Q: Emdiği su miktarı (cm³)

F : Suya temas eden yüzey alanı (cm²)

t : Zaman (sn)

a.2) Kütlece ve Hacimce Su Emme Deneyi

Hacimce su emme oranı, değişmez kütleyle kadar kurutulmuş taşın, absorbe edebildiği su hacminin, malzemenin boşlukları dahil hacmine (bütün hacim) oranıdır.

Deney numuneleri 20°C ± 5°C sıcaklıkta su bulunan uygun büyüklükte ve derinlikte bir kap içerisine, yüksekliklerinin yaklaşık 1/4'üne kadar suya daldırılırlar. Bu durumda 1 saat bekletildikten sonra 1/2'sine kadar suya batacak şekilde su ilave edilir ve 1 saat daha bekletilir. Aynı şekilde 3/4'üne kadar suya batacak şekilde aynı sıcaklık aralığında bulunan su ilave edilerek 1 saat bekletildikten sonra deney numuneleri su içine tamamen batacak şekilde su ilave edilir. Bu durumda 45 saat süre ile bekletilir. Bu süre zarfında kaptaki su yüksekliğinin deney numunelerinin üzerini yaklaşık 1,5 cm-2 cm örtecek seviyede olması sağlanmalı ve deney numuneleri üzerinde oluşacak hava kabarcıkları uygun bir yöntemle giderilmelidir. Deneyin başlangıcından itibaren 48 saat sonunda sudan çıkarılan deney numuneleri, ıslatılarak sıkılmış bir bez veya sünger ile silinerek üzerindeki su damlaları alındıktan sonra, bekletilmeksizin 0,1 g hassasiyetle tartılır (Gd).

Deney numuneleri tekrar su içine daldırılır. Bu tartma işlemi 24 saat aralıklarla deney numuneleri değişmez kütleyle gelinceye kadar tekrarlanır. Taş deney numunelerinin suya doymun hale geldiği kabul olunan bu kütlesi ile bunu izleyen 24'er saatlik ara ile bulunan kütleleri arasında %0,1 den fazla fark bulunmazsa bu kütlenin değişmez kütle olduğu kabul olunur.

Bundan sonra doygun haldeki deney numuneleri arşimet terazisinde 0,1 g hassasiyetle tartılarak, su içindeki kütleleri bulunur (G_{ds}).

Daha sonra deney numuneleri değişmez kütleyle gelinceye kadar kurutulur. Desikator içerisinde soğutulduktan sonra 0,1 g hassasiyetle tartılarak kütlesi bulunur (G_k).

- Hesaplamalar

$$S_k = G_d - G_k \cdot 100 \text{ (m/m, \%)} \quad \text{Denklem 2.3.}$$

$$S_h = (G_d - G_k) / (G_d - G_{ds}) \cdot 100 \text{ (v/v, \%)} \quad \text{Denklem 2.4.}$$

Burada;

S_k : Taşın kütlece su emme oranı (m/m, X)

S_h : Taşın hacimce su emme oranı (v/v, %)

G_d : Taşın doygun haldeki kütlesi (g)

G_k : Değişmez kütleyle kadar kurutulmuş taşın kütlesi (g)

G_{ds} : Doygun haldeki taşın su içindeki kütlesi (g) dir.

a.3) Kaynar Suda Su Emme Deneyi

Deney numuneleri yüksekliklerinin yaklaşık yarısına gelecek kadar su bulunan su banyosuna konulur. Bu şekilde 1 saat bekletildikten sonra su ilave edilerek deney numunelerinin tamamen su içinde kalmaları sağlanır. Isıtılmaya başlanır. Kaynamanın başladığı andan itibaren 2 saat daha ısıtmaya devam edilir.

Kaynama süresince zaman zaman su banyosuna su ilave edilerek deney numunelerinin tamamen su altında kalmaları sağlanmalıdır. Kaynatmanın sonunda deney numuneleri su banyosundan çıkarılmaksızın oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılır. Bundan sonra yapılacak işlemler ve hesaplamalar hacimce ve ağırlıkça su emme deneyi ile aynıdır.

a.4) Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Deney numuneleri $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıkta su bulunan uygun büyüklükte bir kap içerisine yarısına kadar daldırılarak 1 saat beklenir. Daha sonra en az 24 saat su içerisine

birakılır. Arşimet terazisinde su içinde yapılacak tartım sırasında su emerek sonuçları etkilemeyecek derecede doygun hale getirilen numuneler sudan çıkarılarak Arşimet terazisi içinde 0,1gr. duyarlılık ile tartılır (W_{ss}). Bundan sonra deney numunesi üzerindeki su damlları, ıslatılıp sıkılmış bir bez veya süngerle alınır ve beklemezsizin tartılır (W_{sh}). Deney numuneleri değışmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulur ve tartılarak eğırlığı belirlenir (W_k).

Hesaplamalar:

$$\beta_h = \frac{W_k}{W_{sh} - W_{ss}} \quad \text{Denklem 2.5.}$$

β_h :Taşın birim hacim ağırlığı (g/cm^3)

W_k :Değışmez Kütleye kadar kurutulmuş deney numunesi ağırlığı (g),

W_{sh} :Doygun haldeki deney numunesinin havadaki ağırlığı (g),

W_{ss} :Doygun haldeki deney numunesinin su içindeki ağırlığı (g)

a.5) Özgöl Kütle Deneyi

Numuneyi temsil edecek şekilde, değışik parçalardan kırılarak alınan numune, tamamı göz açıklığı 0,2 mm olan kare gözlü elekten geçecek şekilde öğütölür, değışmez ağırlığa kadar kurutulur. Kurutulup soğutulmuş olan öğütölmüş tozdan $10 \pm 0,1$ g kadar numune alınır, bu toz numune içinde V_1 hacminde su bulunan Le Chatelier Balonu içine kuru bir huni yardımıyla konur ve son hacmi V_2 okunur.

$$\gamma = \frac{W}{V_2 - V_1} \quad \text{Denklem 2.6.}$$

γ : Taşın özgöl ağırlığı (g/cm^3)

W : 0,2 mm kare gözlü elekten geçen toz numunenin ağırlığı (g),

V_1 : Suyun ilk hacmi (cm^3),

V_2 : Toz numune ile doldurulmuş suyun son hacmi (cm^3)

a.6) Doluluk ve Boşluk Oranları

Doluluk oranı: Değışmez kütleye kadar kurutulmuş taşın, boşlukları hariç hacminin (dolu hacim), boşlukları dahil hacmine (bütün hacim) oranıdır.

Porozite (Gözeneklilik Oranı) : Porozite, değişmez kütleyle kadar kurutulmuş taşın, boşluk hacminin boşlukları dahil hacmine oranıdır.

b) Mekanik testler:

b.1) Statik Elastisite Modülü Deneyi

Bu deneyde, iki adet prob denilen piezoelektrik transdüser deney numunesinin karşılıklı yüzeyine yerleştirilir, problemlerin birinden gönderilen ses dalgaları diğerinden alınır. Ses dalgalarının iletim süresi (t,µs) ölçülür. Deney sonunda ses geçiş hızı ölçülür

$$V = \frac{L}{t} \quad \text{Denklem 2.7.}$$

V : Ultrases hızı (mm/µs)

L : Toplam uzunluk (mm)

t : Geçiş zamanı (µs)

Deneyi yapılan numunenin birim hacim ağırlığı biliniyorsa statik elastiklik modülü de aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$E = \frac{V^2 \cdot 10^4}{9,81} \cdot \beta \quad \text{Denklem 2.8.}$$

b.2) Eğilme deneyi

Yapılan deneylerde alt mesnetler, merkezleri arasındaki mesafe 100mm veya 150mm olacak şekilde konulanmıştır. Alt mesnetlerle yükleme parçası eksenleri birbirine paralel olmalı, yükleme parçası deney numunesinin orta noktası ile çakıştırılacak şekilde yerleştirilmelidir (Şekil 2.14). Deney numunesi darbesiz olarak kırılana kadar yük uygulanır. Kırılma anındaki yük tesbit edilir.

Hesaplamalar:

$$f_{eğ} = \frac{3 \cdot P_k \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad \text{Denklem 2.9.}$$

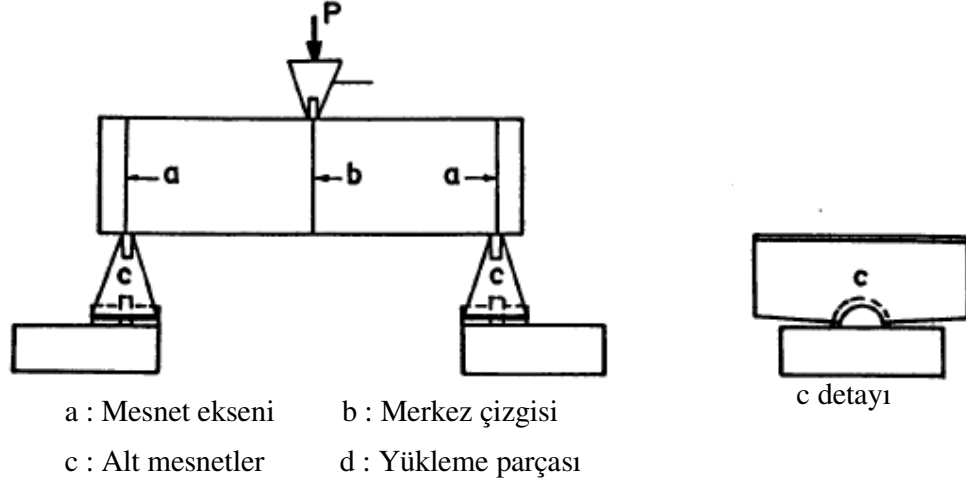
$f_{eğ}$: Taşın eğilme mukavemeti, (N/mm²)

P_k : Kırılmaya neden olan en büyük yük (N)

l : Deney numunesinin alt mesnetler arasında kalan boyu (mm)

b : Deney numunesinin genişliği (mm)

h : Deney numunesinin kalınlığı (mm)



Şekil 2.14. Eğilme mukavemeti tayininde kullanılan düzenek (TS 699- Tabi yapı taşları-Muayene ve deney metodları s.61).

b.3) Basınç Deneyi

Basınç mukavemeti deneyi için küp veya silindirik numuneler kullanılır. Silindirik numunelerin yükseklik/çap oranı 1/1 den küçük olmayacak şekilde hazırlanmalıdır. Basınç uygulanacak yüzeyler deney presinin tablaları arasına ve tam ortaya gelecek şekilde yerleştirilir. Yük deney numunesi kırılana dek uygulanır. Pres göstergesinden okunan en büyük yük tespit edilir.

$$f_b = \frac{P_k}{A}$$

Denklem 2.10.

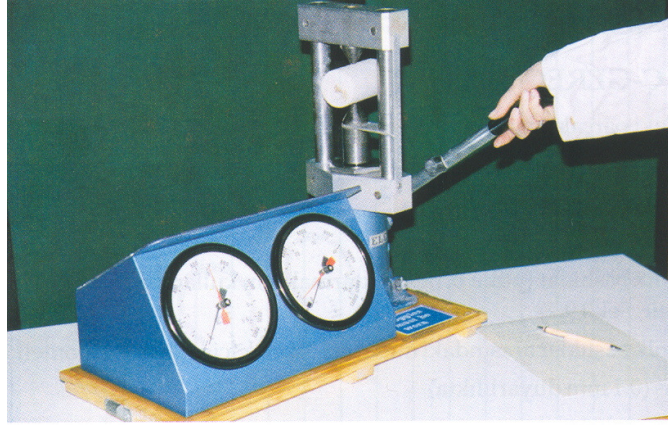
f_b : Taşın basınç mukavemeti (N/mm²)

P_k : Kırılmaya sebep olan en büyük yük (N)

A: Yük uygulanan yüzünün alanı (mm²)

b.4) Nokta Yükleme Deneyi

Kayaçların dayanımlarına göre sınıflandırılmasında kullanılan nokta-yükü dayanım indeksinin tayini amacıyla yapılır. Nokta yükü dayanım indeksi, tek eksenli basınç ve çekme dayanımı gibi diğer dayanım parametrelerinin dolaylı olarak belirlenmesinde ve bazı kaya kütlesi sınıflama sistemlerinde kayaç malzemesinin dayanım parametresi olarak kullanılır. Şekil 2.15'te deneyin yapılış şekli gösterilmektedir (Ulusay ve ark, 2005 s.48).



Şekil 2.15 Nokta yükleme deneyi

Nokta yükü dayanım indeksi:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2}$$

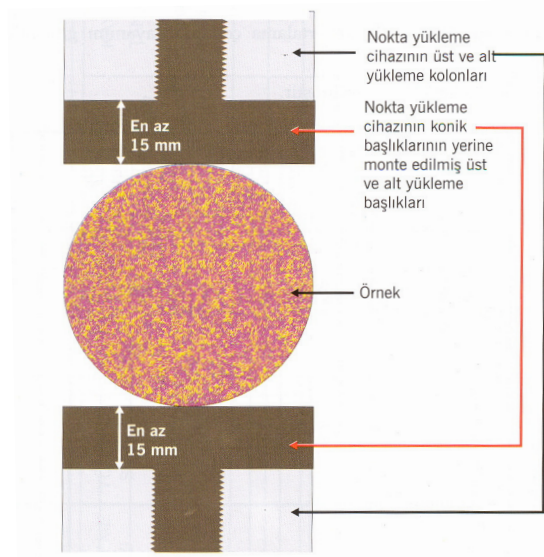
Denklem 2.11.

P: Yenilme Yüğü

D_e : Eşdeğer karot çapı

b.5) Brezilya silindiri yöntemiyle çekme dayanımı tayini:

Bu deney, disk şeklinde hazırlanmış kayaç örneklerinin çapsal yükleme altında çekilme dayanımlarının dolaylı yoldan tayini amacıyla yapılır (Şekil 2.16). Pratik olması açısından yaygın şekilde kullanılan bir yöntemdir.



Şekil 2.16 Brezilya silindiri deneyi(Ulusay, 2005,s.75).

Hesaplama yöntemi:

$$\sigma_t = \frac{0,636.F}{D_t}$$

Denklem 2.12.

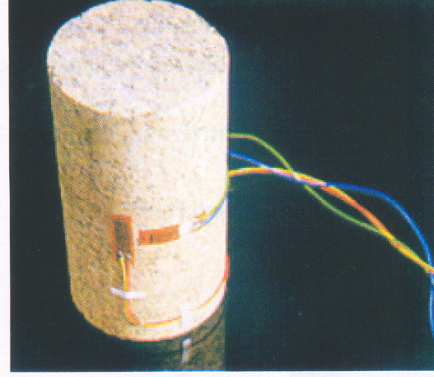
F: Örneğin yenilmesi anında uygulanan yük

D: Örnek çapı (mm)

t : Örnek kalınlığı (mm)

b.6) Elastisite modülü ve poisson oranı tayini

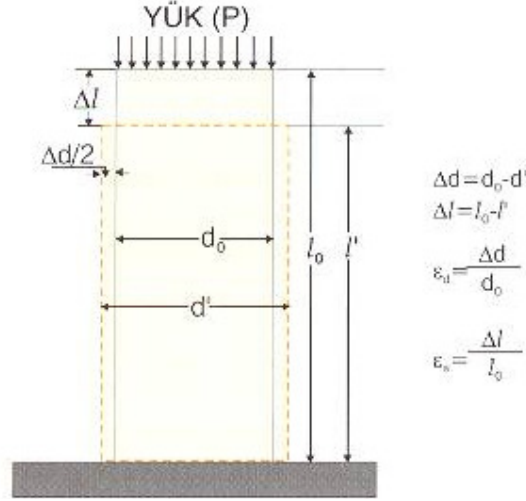
Bu deneyde boy/çap oranı 2.5-3.0 arasında olacak şekilde alt ve üst yüzeyleri birbirine paralel, yan yüzeyleri pürüzsüz, düz ve herhangi bir kırık-çatlak içermeyen karot örnekleri hazırlanır. Birim deformasyon ölçerler (strain gauges), uygulamada genellikle deneye tabi tutulacak örneğin silindirik yüzeylerinin orta noktasına biri yatay, diğeri düşey yönde olacak şekilde yapıştırılır (Şekil 2.17). Deney örneği prese yerleştirildikten sonra, birim deformasyon ölçerlerin uçları bağlantı kabloları aracılığıyla birim deformasyon göstergesinin iki ayrı kanalına bağlanır. Birim deformasyon göstergesinin her iki kanalı da sıfırlanır ve yükleme yapılmadan önce ilk değerler okunur.



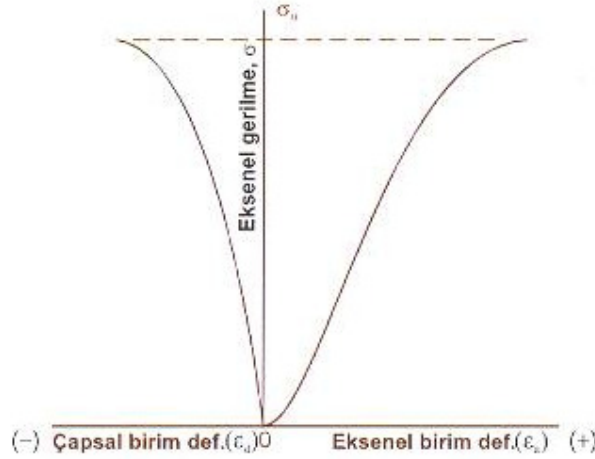
Şekil 2.17 120 ohm dirençli birim deformasyon ölçer yapıştırılmış karot örneği (Ulusay ve ark., 2005,s.86)

Örneğin 5 ile 10 dakika arasında yenilmesini sağlayacak bir yükleme hızı seçilerek, bu hız preste ayarlanır veya alternatif olarak 0.5–1 MPa/s'lik bir gerilme hızı uygulanır. Sabit yükleme altında, belirli yük düzeylerinde düşey ve yatay birim deformasyonlar, birim deformasyon ölçerlerin bağlı olduğu kanallardan; bu değerlere karşılık gelen eksenel (düşey) yük değerleri ise, presin üzerindeki göstergeden birlikte okunarak kaydedilir.

Eksenel birim deformasyon (ϵ_a) ve çapsal birim deformasyon (ϵ_d) (Şekil 2.18) deformasyon okumalarından bulunur. Yükleme işleminin farklı aşamalarında alınan okumalara göre ϵ_a - σ ve ϵ_d - σ grafikleri çizilir (Şekil 2.19).



Şekil 2.18 Deney sırasında gelişen eksenel ve çapsal deformasyonlar (Ulusay ve ark,2005,s.88).



Şekil 2.19 Çapsal ve eksenel gerilme-birim deformasyon grafikleri (Ulusay ve ark,2005,s.88).

c) Kimyasal testler:

Fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenen malzemelerin onarımında kullanılacak malzeme ile uyumunun araştırılması amacı ile taş, tuğla ve özellikle harç numunelerinin mikro-yapısal özelliklerinin belirlenmesi ve harç yapımı amacıyla;

- Petrografik analizler,
- Asit kaybı deneyi ve elek analizi
- Kızdırma kaybı deneyi
- Suda çözünen tuzlar
- X-Işını Kırınım Yöntemi, X-ray diffraction analysis (XRD)
- Taramalı Elektron Mikroskobu, Scanning electron microscope– Enerji Yayıncı X ışınları Analizi, Energy dispersive X-ray analysis (SEM-EDX)
- Diferansiyel Termal Analiz, Differential thermal analysis (DTA)
- Lazer aşındırma analizi, Inductively coupled plasma analysis (ICP)
- Termogravimetrik analiz, Termogravimetric analysis (TGA)

testleri yapılır (Aköz 2005, Acun ve ark., 2007, s.296).

2.1.4. Yapının temel zemini özelliklerinin araştırılması

Temel zemini ile ilgili yeterli bilgi bulunmaması durumunda temel zemininin yeterli sayıda gözlem çukurları ve sondajlar ile incelenmesi gerekir. Sondaj sayısı yapı alanı, derinliği ise temel genişliği ile orantılıdır. Kabaca 100 m² için bir sondaj yapılması, sondaj derinliğinin temel altında en az 5 m olacak şekilde seçilmesi uygun olmaktadır.

Temel zeminini oluşturan her tabaka için yapılacak laboratuvar deneylerinde dane büyüklükleri, birim hacim ağırlıkları, su muhtevası ve boşluk oranı gibi büyüklüklerin belirlenmesi gerekir. Belirsizlik durumunda standart penetrasyon, taşıma gücü ve gerekli diğer ölçümlerin yapılması yararlı olacaktır. Tarihi yapılarda zemin sorunları genelde yapının inşa edilmesinden hemen ya da bir süre sonra ortaya çıkmaktadır. Yapıda ve çevrede önemli ve ani bir değişiklik olmaksızın yıllarca yerinde durmuş bir yapının temel zemininde son yıllarda bir sorun çıkması olasılığı yoktur. Bu tür yapılarda olası oturmalar yıllar önce tamamlanmış durumdadır (Sesigür ve ark. 2007, s.14).

2.2.Tarihi Kagir Yapıların Yapı Güvenliğinin Belirlenmesi İçin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizleri

2.2.1.Tarihi yapıların mikro ve makro analizleri

Tarihi yapıların strüktürel analizi için genellikle sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılır. Strüktürel analiz, yapının tamamı ya da belirli bir elemanın analitik modelinin hazırlanmasıyla başlar. Bu işleme yapının ayrıştırılması denir. Ayrışma sırasında, yapı analizinin amacına uygun bir şekilde ve sayıda elemanlara ayrılır. Yapıyı oluşturan strüktürel elemanların da daha küçük parçalarla tanımlanması gerekebilir (Ünay, 2002 s.106). Sonlu elemanlar yöntemi, katı mekaniği, sıvı mekaniği, akustik, elektromanyetizma, biyomekanik, ısı transferi gibi alanlarda karşıya çıkan karmaşık sınır koşullarına sahip sistemlere, düzgün olmayan geometriye sahip sistemlere, kararlı hal, zamana bağlı ve özdeğer problemlerine, lineer ve lineer olmayan problemlere uygulanabilir.

Analitik modelin doğruluğu için yapının geometrik boyutları, mesnetler ve elemanların birleşim noktaları, malzeme davranışları, sınır şartları ve serbestlik derecelerinin gerçeğe yakın oluşturulması gerekmektedir.

Tarihi yapıların sonlu elemanlarla incelenmesinde iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar mikro ve makro modelleme teknikleridir. Mikro modellemede yapının belirli bir parçası ve bu parçayı oluşturan malzemeler ayrı ayrı modellenirken, makro modellemede yapının tümü modellenerek ele alınır.

2.2.1.1. Mikro modelleme

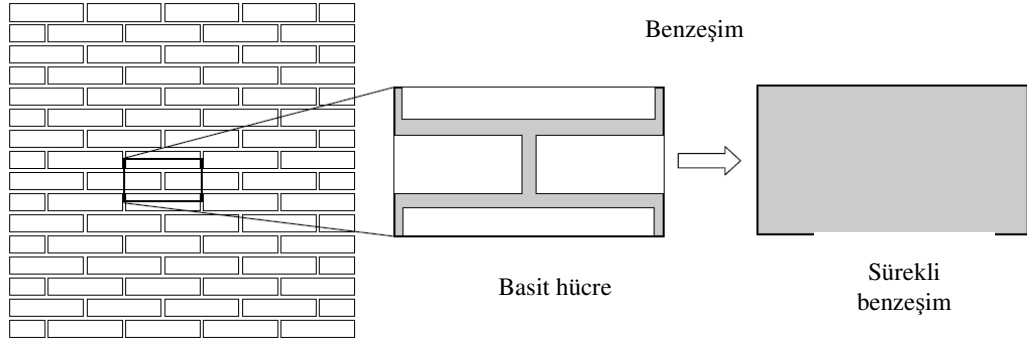
Yığma yapılar, bünyelerindeki elemanlar ve birleşim yerleriyle heterojen özelliktedir. Geometrisindeki farklı kombinasyonlar, doğal yapısı ve aralarındaki harcın özellikleri nedeniyle yığma oluşumunu anlamak oldukça zordur. Yığmayı oluşturan elemanların düzeni ve aralarındaki bağ kompozitin özelliklerini belirlemede önemli bir yer tutmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalar kompozitin oranlarının değişimi ile mukavemetinde, sağlamlık derecesinde, enerji dağılımında ve kuvvet-yerdeğiştirme oranlarında büyük farklılaşmaların olduğunu göstermiştir.

Mikro modelleme yöntemi ile ilgili birçok önemli çalışma yapılmıştır. (Giambanco ve ark., 2001)'e göre yığma yapının kompleks yapısı kompozitin doğal yapısından kaynaklanmaktadır. Birleşim yerlerinde oluşan zayıf bölgeler kompozitin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Mikro modellemeyi, birbirlerine arayüzlerle

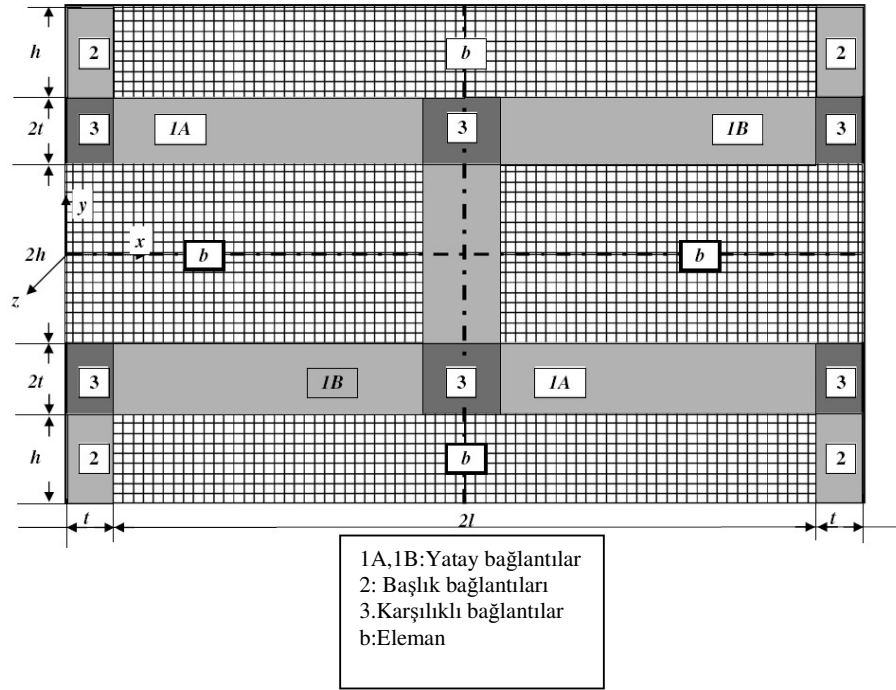
bağlanan elemanların teşkil ettiği modelin analizi olarak tanımlamışlardır. Bu teknikle, ara yüzler ve elemanların uygun modellerinin oluşturulması, birleşim yerlerinin doğru olarak tanımlanması sayesinde gerçekçi ve kesin sonuçlar elde edilebilmektedir. (Giambanco ve ark.,2001) çalışmalarında ara yüzeylerin formüle edilebilmesi için plastisite, hasar mekaniği ve kırılma mekaniğini kullanmışlardır. Harç birleşimlerinin davranışını belirlemek için basit bir arayüz modeli kullanmışlar, hiperbolik arayüzey ve tribolojik yasalarla sürtünmeli arayüzeyi tanımlamaya çalışmışlardır.

(Giardano ve ark., 2002)'a göre mikro modelleme tekniği için iki farklı yöntem kullanmışlardır. Bunlar (FEMDE-finite element method with discontinuous elements) sürekli olmayan sonlu elemanlar metodu ve (DEM-discrete element method) ayrık elemanlar metodu şeklindedir. Sürekli olmayan sonlu elemanlar metodunda lineer veya non-lineer sürekli ortam elemanları kullanılmış, harç birleşimleri arayüz elemanları olarak tanımlanmış ve iki sıra halinde üst üste getirilerek aralarında sürtünme yasaları kullanılmıştır. CASTEM 2000 sonlu elemanlar programı kullanılmış, deney sonuçları ile sayısal analiz sonuçları arasında yakın ilişki tespit edilmiştir. Ayrık eleman metodunda ise yapı rijit veya deforme olmuş ayrı bloklardan oluşturulmuş, Coulomb sürtünme yasası kullanılarak birleşimler elasto-plastik elemanlarla tanımlanmıştır. Metod, birleşim noktalarında büyük yerdeğiştirmeler, elemanlarda küçük deformasyonlar olacak şekilde formüle edilmiş ve böylece kayma, dönme ve parçalanmaya bağlı yıkılma mekanizması doğru olarak tanımlanabilmiştir. UDEC sayısal modelleme programı kullanılarak deneysel ve sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmış ve aralarında yakın ilişki bulunmuştur.

(Zucchini ve ark., 2002)'e göre ortotropik malzemenin mekanik özelliklerini basit bir mikro modeli ele alarak tanımlamışlardır. Bilinmeyen iç gerilme ve uzamalar basit hücrelerin denge bağıntıları kullanılarak bulunmuştur. Bu model çekme gerilmeleri altındaki non-lineer problemlerin çözümünde (Zucchini ve ark. 2004) ve basınç gerilmeleri altında (Zucchini ve ark. 2007) iyi sonuçlar vermiştir. Son olarak yapılan 2009 tarihli araştırmada mikro modelin gerilme altındaki hasar modeli ve basınç altındaki plastik modeli için tekrarlı çözümleme işlemleri ile hasar katsayıları ve eleman ve birleşimlerde oluşan plastik gerilmeler tespit edilmiştir. Bu işlem için Şekil 2.20'de görülen basit hücre ele alınmış ve bu hücrenin ayrıntılı geometrisiyle ve elemanlarıyla tanımlanması gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.21).

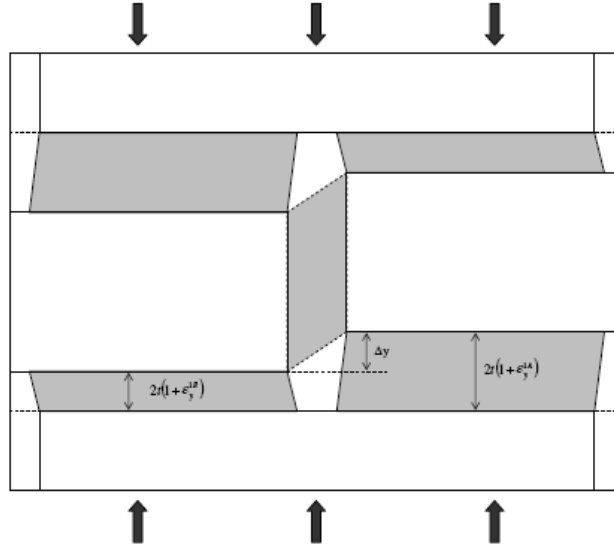


Şekil 2.20 Yığmaya ait basit hücre ve benzeşim işlemi

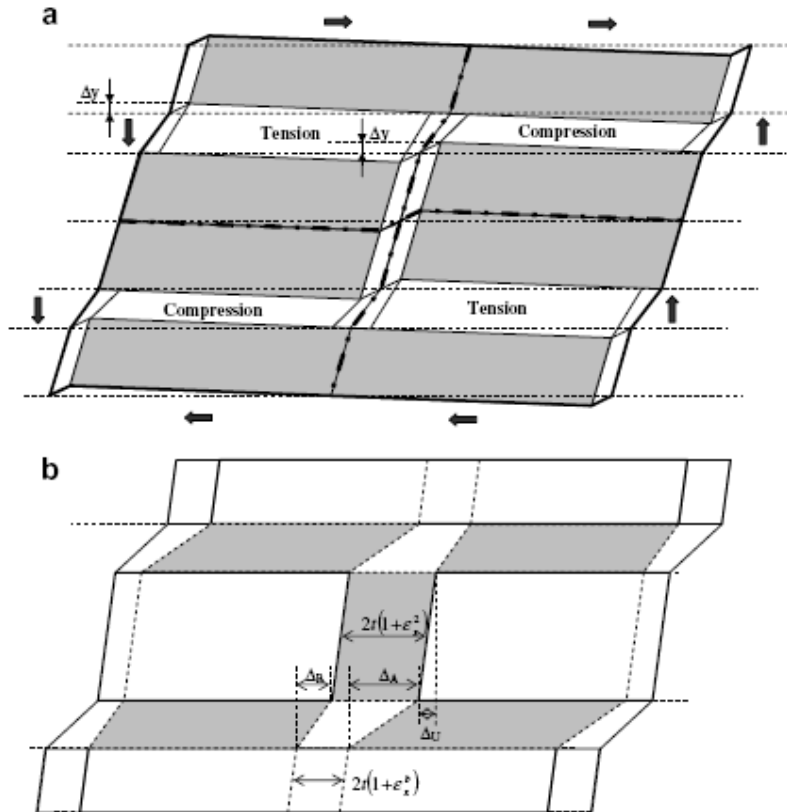


Şekil 2.21 Ele alınan modelin geometrik sembolleri
(Zucchini ve ark., 2009)

Model belirlendikten sonra benzeşimi yapılacak non-lineer hücrenin gerilme altındaki hasar ve plastik davranışı için iteratif işlemler oluşturulmuş ve hücre Şekil 2.22'de görüldüğü üzere düşey yüklenmeye ve daha sonra kayma gerilmelerine maruz bırakılmıştır (Şekil 2.23).



Şekil 2.22 Hücrenin düşey yükler altındaki antisimetrik deformasyon mekanizması (Zucchini ve ark., 2009)



Şekil 2.23 Hücrenin kayma yükleri altındaki antisimetrik deformasyon mekanizması: a) y doğrultusu b) x doğrultusu (Zucchini ve ark., 2009)

Bu iki yükleme hali birleştirilerek plastik model için katsayılar tayin edilmiş ve çekme ve basınç altında hasar modeli oluşturulmuştur. Bu işlemler sonrasında yığma için birleştirilmiş hücre gerilme bağıntıları bulunmuştur. Son olarak bir yığma duvar örneği üzerinde uygulama yapılarak deneysel veriler, ara yüz modeli ve birleştirilmiş model arasındaki yük-yer değiştirme oranları grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma sonucunda, benzeştirilmiş hücreden elde edilen sonuçlarla yapılan nümerik uygulamalar, deneysel sonuçlar ve sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan hesaplamalar kabul edilebilir sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlarla duvarın basit deformasyonundan yıkılmasına kadar incelenme imkanı sağlanmıştır. Bu sayede kompleks yapıların daha az bilgisayar gücüyle standart bir sonlu eleman modeliyle çözümü sağlanacak ve birçok araştırmanın önü açılacak çalışmalar yapılabilecektir.

2.2.1.2. Makro modelleme

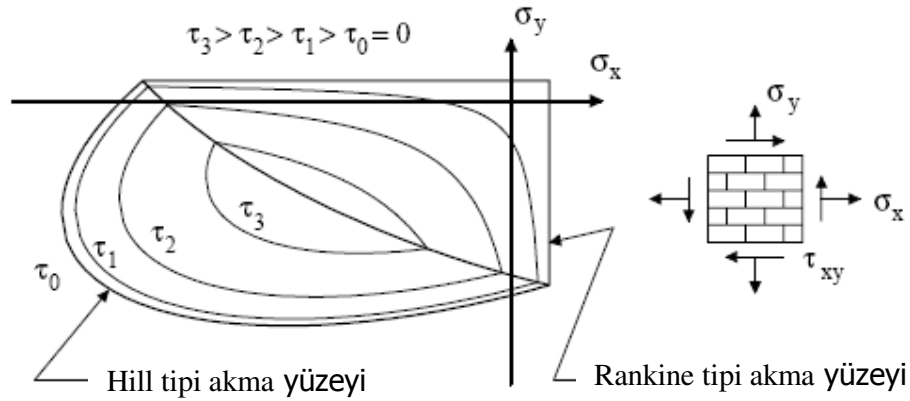
Tüm yığma yapıya mikro modelleme tekniğini uygulamak oldukça zordur. Bunun için kompozite ait olan ortalama gerilme ve zorlanma miktarlarının bulunması ve bunun tüm modele aktarılması gerekmektedir. Yığmayı oluşturan birimlerin ve harcın geometrik özellikleri ve izotropik yapıları kompozitin anizotropik yapısının anlaşılmasında önemli yer tutmaktadır.

Makro modelleme konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Giardano ve ark., (2002) gevrek malzemelerin bilgisayar analizleri için iki farklı yöntem kullanmışlardır. Ayrık metod veya dağınık metod olarak adlandırılan bu metodlardan ayrık metod da çatlak geometrisi modifiye edilmekte, dağınık metod da ise geometri değişmemekte ve çatlaklar bünyesel yasalarla modifiye edilmektedir.

(Fanning ve Boothby, 2001) üç eksenli gerilme hali için beton model kullanmış ve kemer köprüde Drucker-Prager yöntemini kullanarak malzemeyi tanımlamıştır. Yapıda uygulanan testlerle analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. (Berto ve ark.,2002) yığma yapılar için ortotropik hasar modeli kullanmışlardır. Hasar gelişiminin malzemenin simetrisini bozabileceğini ve ortotropik malzemenin genel olarak anizotropiye doğru bir değişime uğrayacağını belirtmişlerdir. Bu nedenle sayısal hasar

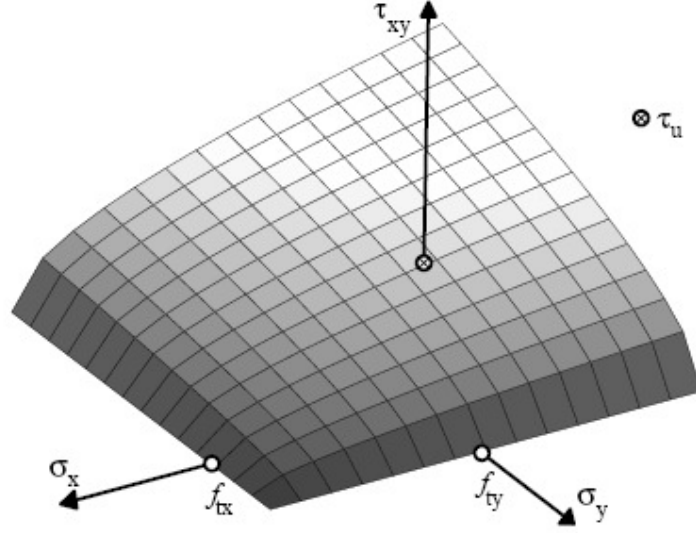
değişkenleri anizotropik yönler kullanılarak belirlenmiştir. Dikdörtgen tabanlı ve eğimli piramit, malzemenin içsel sürtünme açısıyla ilişkili olarak limit yüzey olarak tanımlanmıştır. Yapılan birçok test ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir ilişki tespit edilmiştir.

Etkin bir makro modelleme için malzemenin tüm gerilme durumlarının bilinmesi gerekir. Ancak tüm bunlar için etkin bir test yöntemi oluşturmak ve anizotropik malzemenin elastik olmayan davranışını belirlemek zordur. (Lourenco, 1996) makro modelleme için iki farklı yaklaşımın kullanılabileceğini belirtmiştir. İlki basit bir akma kriterinin kullanılmasıdır. Bunun için Hoffman akma kriterinin etkili ve esnek bir kullanımının olduğu söylenebilir. Ancak bu yöntemle ilgili çalışmalarda test verilerinin çok farklı olduğu görülmüştür. Bu nedenle yöntem verimli bulunmamıştır. İkinci yaklaşım ise, gevreğe yakın izotropik malzemenin ortotropik davranışını tanımlamak için geleneksel bağıntıların kullanılmasıdır. Gevrek malzemelerin davranışı ele alınırken kullanılan formüller genellikle değişik inelastik kriterler için çekme ve basınç özelliklerinin incelenmesiyle elde edilir. Lourenco çalışmasında ortotropik malzemenin davranışını basınç için Hill tipi akma kriteri ve çekme için Rankine tipi akma kriterini kullanmıştır (Şekil 2.24).

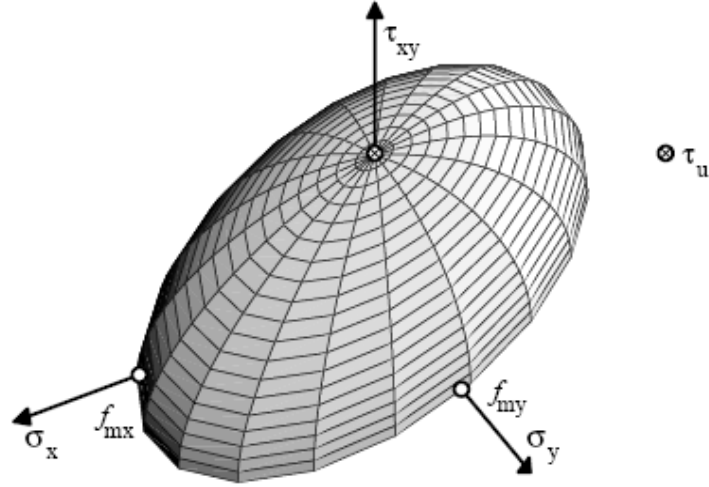


Şekil 2.24 Eşdeğer kayma gerilmesi çizgileriyle kompozit akma yüzeyi. Malzeme eksenleri boyunca çekme ve basınç için farklı mukavemet değerleri (Lourenco P.B., 1996)

Ortotropik malzemenin davranış modeli ele alınırken basınç için Hill tipi, çekme için Rankine tipi akma yüzeyleri kullanılmaktadır. Şekil 2.25'te Rankine tipi akma yüzeyi, şekil 2.26'da ise Hill tipi akma yüzeyi gösterilmiştir.



Şekil 2.25 Rankine tipi akma yüzeyi ($T_{xy} \geq 0$)
(Lourenco P.B., 1996)



Şekil 2.26 Hill tipi akma yüzeyi ($T_{xy} \geq 0$)
(Lourenco P.B., 1996)

2.2.2. Tarihi yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle analizi:

Tarihi yapılarla ilgili olarak birçok çalışma yapılmaktadır. Bunlar; hasarsız ve az hasarlı test yöntemleri, laboratuvarlarda yapılan deneysel çalışmalar, yapısal hasarların rölövesi, çatlakların izlenmesi, yapının geçirmiş olduğu onarımlar ve eklentiler, duvar morfolojisi, zemin koşulları, mimari özellikleri v.b. ile elde edilen bilgiler ışığında sonlu elemanlar yöntemiyle analizlerinin yapılmasıdır. Yapıdaki çatlakların izlenmesi ve nem durumunun mevsimlere göre belirlenmesi gibi aşamalar ise yıllarca sürebilecek araştırmalar niteliğindedir. Yukarıda sayılan tüm çalışmaların gerçekleşmesi birçok uzmanın birlikte çalışmasını gerektiren bir husustur. Bu nedenle tarihi yapıların analizleri çoklu bir problem olup hassas ve zamana yayılan, birçok disiplini bir araya getiren çalışmalardır.

Yığma yapıların analizleri bilgisayar teknolojisinin gelişmiş olmadığı dönemlerde basitleştirici kabullerle ve bilinmeyen sayısını minimuma indirerek çözülmekteydi, ancak günümüzde bilgisayar teknolojisinin de ilerlemesiyle karmaşık ve büyük modeller nümerik yöntemlerle rahatlıkla çözülebilmektedir. Nümerik yöntemler içerisinde en çok kullanılan yöntem sonlu elemanlar yöntemidir.

Sonlu elemanlar yönteminde çubuk, kabuk, levha, prizma, plak, v.b elemanlara bölünebilen yapının üç boyutlu modeli yakınsama kriterleriyle yapının serbestlik derecesine bağlı olarak kısa bir zaman diliminde çözülebilmektedir. Ayrıca yapının tümünün belirli parçalara ayrılarak analizlerinin yapılmasına imkan sunulmaktadır. Böylece farklılık gösteren bölgelerin malzeme özellikleri, serbestlik dereceleri de farklı olarak tanımlanabilmektedir. Bir başka özellik ise yapıların hem lineer hem de non-lineer olarak analizlerinin yapılabilmesidir. Böylece ele alınan modelin analiz sonuçları da gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir.

Yığma yapıların mekanik özelliklerinin tespit edilebilmesi için birçok yöntem uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden yapıya en az tahribat verenleri tercih edilmektedir. Bu nedenle flatjack ve shearjack testleri en çok uygulanan testler olup bu testlerle yapının mekanik özellikleri belirlenebilmektedir. Bölüm 2.1.3.1'de anlatılan bu yöntem sahada uygulanabilmekte ve yapıya az tahribat vermektedir. Ayrıca yapı elemanlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri de laboratuvar ortamında uygulanacak testlerle belirlenmelidir. Yığma strüktürü oluşturan elemanlardan alınan numunelerle de basınç,

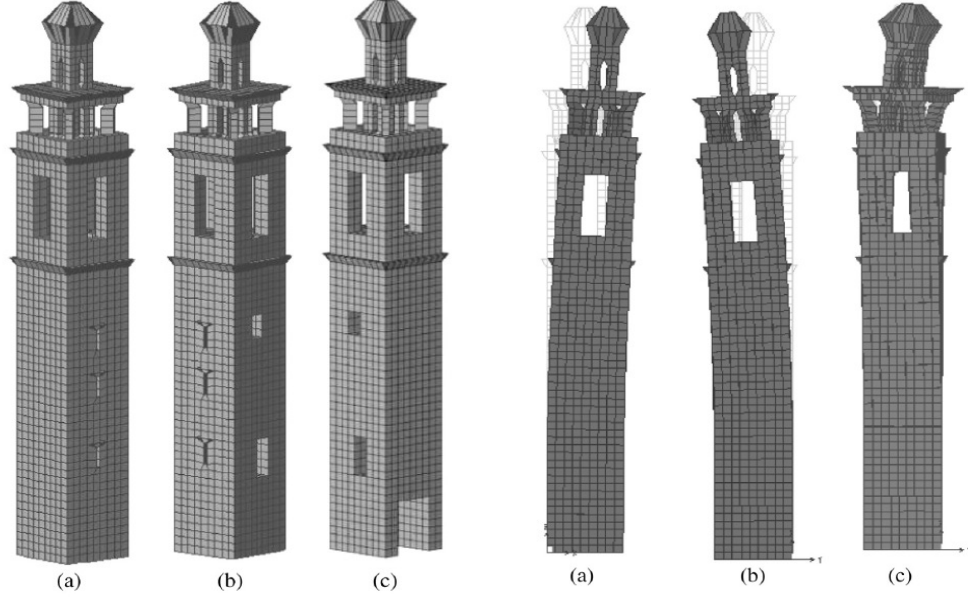
çekme, elastisite modülü, poisson oranı, v.b. mekanik özellikler de deneysel yöntemlerle tespit edilebilmekte ve yığma yapılar için hazırlanmış yönetmeliklerle kompozitin mekanik özellikleri belirlenebilmektedir. Bunun için Eurocode 6-Design of masonry structures (Yığma yapıların tasarımı), deprem yönetmelikleri ve birçok ülkeye ait yönetmelikler kullanılmaktadır. Ayrıca yapılan birçok araştırma yığma yapının davranışının beton davranışına benzediğini göstermiştir. Bu nedenle araştırmacılar yığma duvar analizlerinde, beton eleman analizinde kullanılan akma şartı eğrilerini kullanmışlardır.

Tarihi yapılarda kullanılan malzemelerin gevrek özellikte olması nedeniyle basınç yüklerine karşı dayanımları iyidir. Ancak elemanların kayma ve eğilme etkileri altındaki dayanımları basınç dayanımına göre daha azdır. Burada en önemli unsur bağlayıcı olarak kullanılan harcın mekanik ve fiziksel özelliklerinin yapıda kullanılan diğer elemanlarla uyumlu olması, iyi bir aderans oluşturmasıdır. Tarihi yapılarımızda kullanılan harçlar üzerinde yapılan çalışmalar kullanılan horosan harcının yapılarımızın bugüne dek gelmesinde önemli rol oynadığını göstermektedir.

Yapıların modellenmesi yapısal analiz programlarında oldukça zordur. Bu nedenle genellikle yapıların modellenmesinde üç boyutlu çizim programlarından yararlanılmaktadır. Böylece yapıların daha ayrıntılı ve kompleks olarak modellenebilmesi sağlanabilmektedir. Üç boyutlu olarak modellenen yapıların statik ve dinamik yükler altındaki analizleri lineer ve non-lineer olarak ele alınabilmektedir. Analiz programları sayesinde yapıldığı yıllarda teknolojik imkansızlıklardan dolayı hatalı olarak inşa edilmiş birçok tarihi yapı kurtarılmakta ve kültürel mirasımızın yaşatılmasında büyük bir rol oynamaktadır. Aşağıda farklı tipteki durumlar için yapılan analizlerden birkaçı örnek olarak gösterilmiştir.

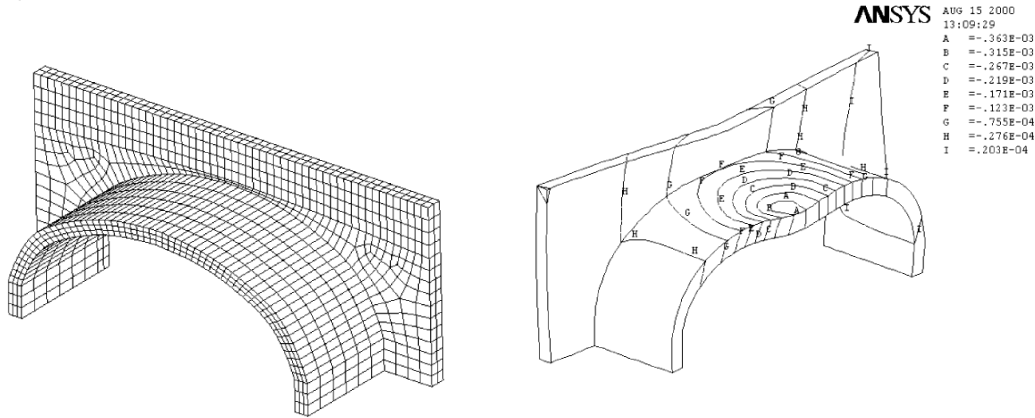
Şekil 2.27'de yığma bir çan kulesinin sonlu elemanlar modeli gösterilmektedir. Valensiya-İspanya'da bulunan ve 23 m. yüksekliğindeki kilisenin çanı faaliyette iken yapıda oluşan titreşim frekansları ile deprem sırasında oluşabilecek titreşimler karşılaştırılmış ve yapının restorasyon çalışmalarına yön verilmiştir. Yapılan çalışmalar, çanın faaliyeti sırasında yapıda oluşturduğu titreşimlerle deprem kuvvetlerinin oluşturacağı titreşimlerin yakın ilişkili olduğu gözlenmiştir. Bu durumun düzeltilmesi için bilgisayar kontrollü yeni bir çan sistemi yapının restorasyonunda uygulanmıştır.

Yapılan bu çalışma kulenin yapıldığı yıllarda uygulanabilseydi belkide bu yapısal problemin farkına varılacaktı. Ancak günümüzde ileri teknoloji ve bilgisayar programları sayesinde bu tip problemler için önlem alınabilmektedir.



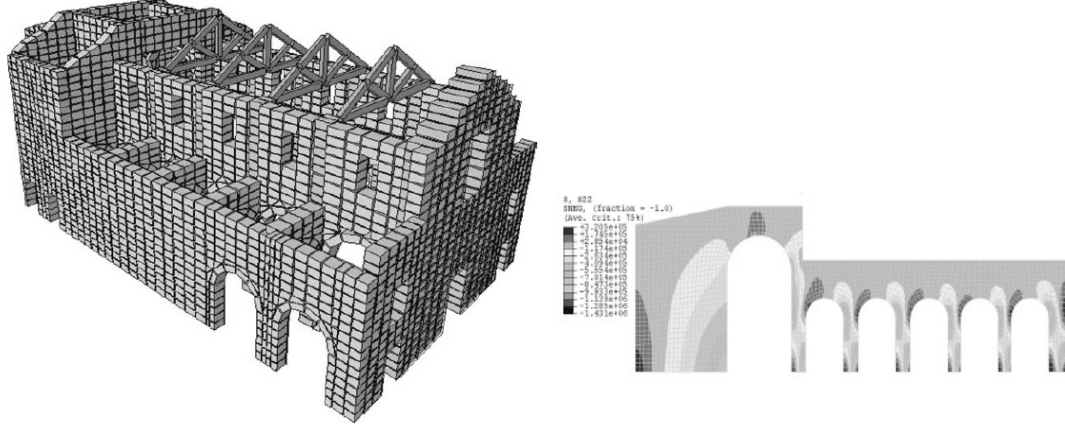
Şekil 2.27 Sonlu elemanlar modeli görünüşler (a) Batı–Doğu; (b) Güney–Doğu; (c) Doğu–Kuzey. ile yapının a)1. modu b)2. modu c)4. modları (Ivorra ve ark. 2006)

Bir başka örnek Fanning ve ark. tarafından incelenen beşik tonozlu yığma köprülerdir. Bu çalışmalarda yapı non-lineer olarak ele alınmış ve drucker-prager akma kriteri kullanılmıştır. Yapılardan geçen araçların ağırlığı altında yapıların performansı sonlu elemanlar yöntemi ile incelenerek, köprülerdeki hasarlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 2.28).



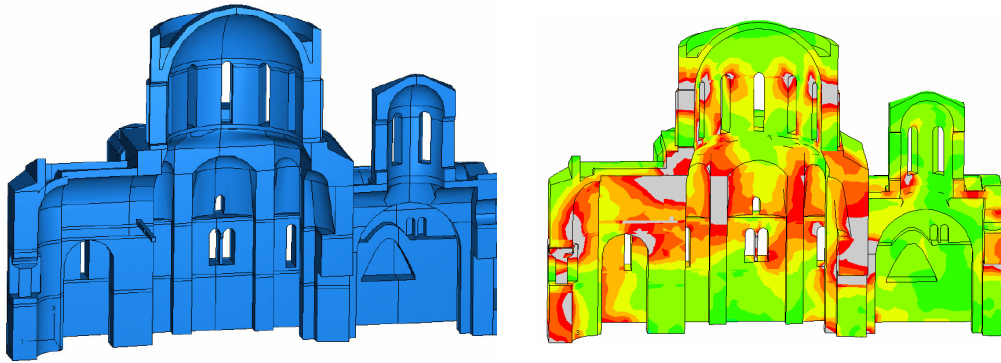
Şekil 2.28 Griffith Köprüsü, sonlu elemanlar modeli ve gerilmeler (Fanning ve ark. 2001 s.2647-52)

Mele ve ark. tarafından yapılan bir diğer çalışmada Şekil 2.29’da sonlu elemanlar modeli görülen bazilika tipi kilise ele alınmıştır. Çalışma iki ana bölüm olan yapının statik ve dinamik analizleri ile iki boyutlu statik itme analizlerinden oluşmaktadır. İtme analizinden elde edilen sonuçlarla limit analiz sonuçları karşılaştırılmış ve yapının non-lineer modelinin gerçek davranışı sonlu elemanlar modeliyle tespit edilmeye çalışılmıştır (Mele ve ark. 2003).



Şekil 2.29 Bazilika tipi kilisenin sonlu elemanlar modeli ve gerilmeler (Mele ve ark. 2003)

I. Psycharis ve ark. tarafından Bizans kilisesi rneği üzerinde yapılan bir başka çalışmada zaman tanım alanı kullanılarak yapılan deprem analizleri sonuçları incelenmiş ve yapının mevcut hasarlarıyla karşılaştırılmıştır. Kubbe ve duvarlarda oluşan hasarlı bölgelerin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan deprem analizi sonuçlarıyla yakın ilişkisi olduğu tespit edilmiştir (I. Psycharis ve ark. 2003) (Şekil 2.30).



Şekil 2.30 Bizans kilisesi sonlu elemanlar modeli ve gerilmeler (Psycharis ve ark. 2003).

3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

3.1.Bursa Ördekli Hamamının Mevcut Durumunun Belirlenmesi Amacıyla Yapılan Çalışmalar

Mevcut durumun belirlenmesi amacıyla yapının tarihçesi, mimari özellikleri, taşıyıcı sistem, hasar biçimleri ve bozulmalar, malzeme özellikleri, temel zemini özellikleri ve bölgenin sismik durumu incelenmiştir.

3.1.1. Yapının tarihçesi, mimari özellikleri ve taşıyıcı sisteminin belirlenmesi

3.1.1.1. Yapının tarihçesi ve mimari özellikleri

Ördekli Hamamı 15. yy'a tarihlenmektedir. Tayakadın Mahallesi, Hamam Sokak'ta bulunan yapı Yıldırım Bayezid (1389-1402) döneminde yapılmaya başlanmış ve Çelebi Sultan Mehmet döneminde tamamlanmıştır. Kadınlar ve erkekler olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Eski-Yeni Hamam olarak da adlandırılmaktadır¹. Zaman içinde birçok değişikliğe uğrayan hamam, günümüze kadar gelebilmiştir.

Ördekli Hamamı günümüzde plan özelliklerini büyük ölçüde korumaktadır. Kadınlar ve erkekler için ayrı ayrı yapılmış bir çifte hamamdır. Erkekler bölümü girişi Abdal Mehmet Caddesi, kadınlar bölümü girişi ise Hamam Sokağı üzerinde yer almaktadır (Şekil 3.1, 3.2). Yapı, erkekler soyunmalık mekanı dışında uzunlamasına doğu-batı doğrultusunda dikdörtgen plana sahiptir. Dış ölçüleri batı yönünde 27 m., kuzey yönünde 42 m., güney yönünde 37 m. ve doğu yönünde eğik olarak 26 ve 18 m. uzunluğundadır. Günümüzde erkekler soyunmalık kısmının üst örtüsü ve giriş cephesi yıkık bir durumdadır.

Ördekli Hamamı, diğer hamamlarda olduğu gibi sahip olduğu işlevlere bağlı olarak soyunmalık, ılıklik, sıcaklık ve su deposundan oluşan üç ana mekandan oluşmaktadır. Hamamın soyunmalık kısmı aynı zamanda camekan veya soğukluk olarak da adlandırılmaktadır². Bu mekandan daha ılık bir mekan olan ılıklik bölümüne geçilmektedir³. Ilıklık bölümü soğukluk ile sıcaklık arasında bir geçiş ve sıcaklığa hazırlık mekanıdır. Burada tuvalet ve traşlığın bulunduğu birkaç oda bulunmaktadır.

¹ Büyük bir şehrin bir semtinde bir hamam yapılıncaya, Bursa'da olduğu gibi İstanbul'da da, yeni hamam denir, buna bir yenisi ilave olunca da eski-yeni ismi verilir. Bu hamam da Nalıncılar Hamamı'ndan sonra yapıldığı için yeni, sonradan yapılan birçok benzeri yüzünden de Eski-Yeni ismini almıştır. Ördekli Hamamı Rölöve ve Restitüsyon Raporu (Osmangazi Belediyesi,2005)

² Soğukluk: Hamamın girişi olan ve soyunulan eşyaların bulunduğu mekana verilen addır. (Roma döneminde Frigidarium veya Apodytorium olarak adlandırılmıştır.)

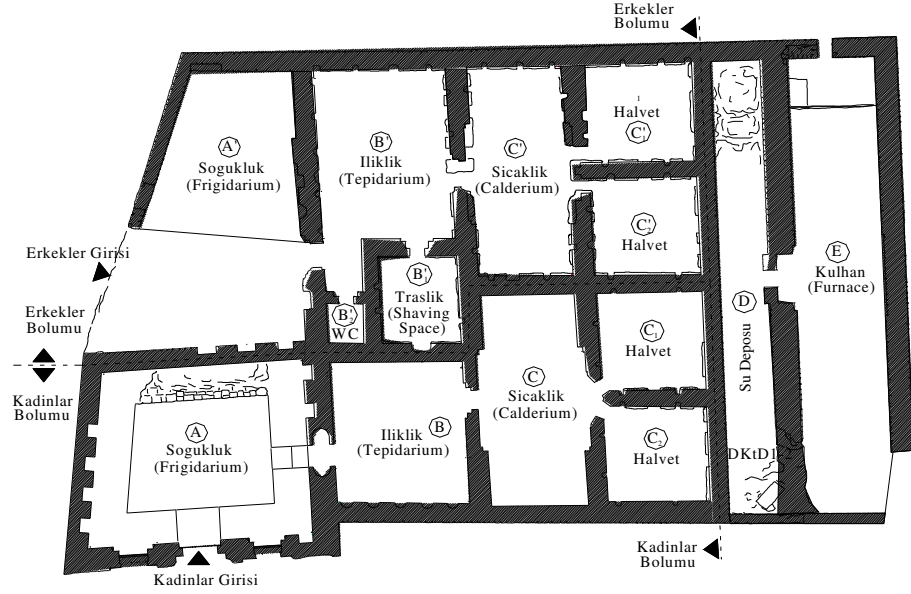
³ Ilıklık: Hamamın ılık olan bölümüdür.

Hamamın en önemli mekanı olan sıcaklık değişik birçok değişik plan şemasından oluşmaktadır. Sıcaklıkta özel yıkanma odalarının bulunduğu halvetler ve eyvanlar yer almaktadır¹ (Şekil 3.3,3.4). Sırasıyla aşağıda yapının bu mekanlarına ait plan özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

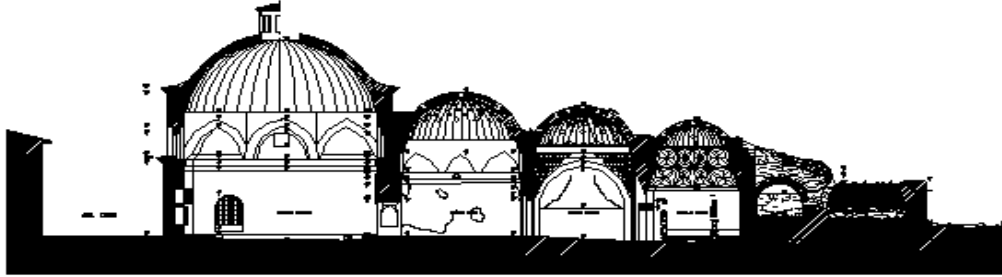


Şekil 3.1 Ördekli Hamamı hava fotoğrafı (Osmangazi Belediyesi, 2005)

¹ Sıcaklık: Hamamın en sıcak bölümüdür. Yarı açık mekanlardan oluşan eyvanlardan ve özel hücrelerden oluşan halvetlerden oluşmaktadır. Bu mekan Roma döneminde Calderium olarak adlandırılmıştır. Hamamlarda sıcak suyun temin edildiği bölüm de sıcaklık mekanı ile birlikte değerlendirilmektedir. Suyun depolandığı ve ısıtıldığı bölümlerden oluşan birime Külhan denilmektedir. Roma döneminde hamamlar ayakların yükseltilmesiyle oluşturulan “Hypocaust” sistemi ile döşemenin altında oluşturulan kanallar yardımıyla mekanlar ısıtılmıştır. Bu mekan “Cehennemlik” olarak da adlandırılmaktadır.



Şekil 3.2 Ördekli Hamamı rölövesi (Osmangazi Belediyesi,2005)



Şekil 3.3 A-A kesiti (Osmangazi Belediyesi,2005)



Şekil 3.4 B-B kesiti (Osmangazi Belediyesi,2005)

a) Yapının plan özellikleri

Ördekli Hamamı plan özellikleri sırasıyla kadınlar soğukluk, ılıklik, sıcaklık ve erkekler soğukluk, ılıklik, sıcaklık ile su deposu ve külhan mekanlarından oluşmaktadır. Planda kadınlar bölümünde soğukluk A, ılıklik B, sıcaklık C, sıcaklıkta bulunan kuzey halvet C₁, güney halvet C₂, erkekler bölümünde soğukluk A', ılıklik B', sıcaklık C', sıcaklıkta bulunan kuzey halvet C₁', güney halvet C₂' ve su deposu E, külhan ise F harfleriyle gösterilmiştir (Şekil 3.2).

Kadınlar bölümünün soyunmalığı 10,30 metre çapında sekizgen kasmağa oturan bir kubbe ile örtüldür. 6,65 metre çapındaki kubbe ile örtülü ılıkliktan, dikdörtgen planlı, iki yanı eyvanlı ve beşik tonoz ile örtülü sıcaklık bölümüne geçilmektedir. Sıcaklık 5.50 m. çapındaki kubbeye geçilmiştir. Sıcaklıktan, iki dar kapıyla, kare planlı ve kubbe çapları yaklaşık 5,50 m. olan halvetlere geçilmektedir (Osmangazi Belediyesi, 2005).

Erkekler bölümünün soyunmalığı bir kubbe ve güney yönünde yarım kubbe ile geçilmiştir. Kadınlar bölümündeki planı yansıtmaktadır. Soyunmalık bölümünden, 6.75 m. çapında kubbe ile örtülü ılıklik bölümüne geçilmektedir. ılıklik bölümünde bir hela ve bir halvet bulunmaktadır. ılıklik girişinde küçük bir mekan oluşturulmuş ve üzeri kubbeye geçilmiştir. Bu mekânın kuzey duvarından bir kapı ile helaya geçilmektedir. Ayrıca ılıkliktan açılan bir diğer kapı ile üzeri kubbe ile örtülü halvete geçilmektedir. ılıkliğin batı duvarından bir kapı ile kubbe çapı 5,50 m. olan iki yanı eyvanlı sıcaklık bölümüne geçilmektedir. Sıcaklıktan iki dar kapıyla iki halvete girilmektedir. Kare planlı bu iki halvetin de üzeri yaklaşık 5,50 m. çapında kubbeye geçilmiştir. Halvetlerin arkasında su deposu ve külhan bulunmaktadır. Her iki bölümde beşik tonozla geçilmiştir.

a.1) Kadınlar soğukluk mekânı (A) plan özellikleri: Kadınlar soğukluk mekânının girişi kuzeyde bulunan dar ve basık kemerli bir kapı ile sağlanmaktadır(Şekil 3.3). Soyunmalığın iç mekân ölçüleri yaklaşık olarak 10x12 m.'dir. Kubbeye geçiş elemanı tromplarla sağlanmıştır¹ (Şekil 3.5). Trompların üzerinde yer alan kubbe sekizgen bir kasmağa oturtulmuş ve 10,30 m. çapındadır. Kubbeye geçişi sağlayan tromplar

¹ Tromp: Duvarların köşe noktalarında oluşturan tonoz formunda sekizgen bir tabandan kubbeye geçişi sağlar.

yardımıyla oluşturulan kubbenin ortasında 2 m. çapında bir aydınlatma feneri bulunmaktadır.

Giriş kapısına ait detaylar oldukça yetersizdir. Kapı kanatları ve kapı kasası şu an mevcut değildir. Ilıklığa geçişi sağlayan batı duvarındaki kapı sonradan yapılan çimento katkılı bir harç ile sıvanmıştır. Kubbe kasnağında üç pencere, giriş kapısının her iki yanında birer pencere bulunmaktadır. Güney duvarında sonradan açılan ve erkekler soyunmalığına geçişi sağlayan bir kapı bulunmaktadır.

Mekanın duvarları boyunca 190 cm. genişliğinde, 20-50 cm yüksekliğinde bir platform oluşturulmuştur. Eşya koymak amacıyla yer yer nişler bulunmaktadır. Ilıklık bölümüne iki basamakla çıkılmaktadır (Şekil 3.6) (Osmangazi Belediyesi, 2005).



Şekil 3.5 Kubbeye geçişi sağlayan tromplar



Şekil 3.6 Soğukluktan ılıklığa geçişi sağlayan iki basamakla çıkılan kapı

Duvarlar, dış cephede bir sıra taş, üç sıra tuğla ile kaplanmış, kirpi saçakla bitirilmiştir (Şekil 3.7). Duvar kalınlıkları 105-135 cm arasında değişiklik göstermektedir. Yer yer dış cephedeki kesme taşların döküldüğü görülmüştür (Şekil 3.8). Mekan içeriden çimento esaslı harç ile sıvanmıştır.



Şekil 3.7 Erkekler soyunmalık güney cephesinin bir sıra taş, üç sıra tuğla ile örülmesi



Şekil 3.8 Hamamın kuzey cephesinde dökülen kesme taşlar

a.2) Kadınlar ılıklik mekanı (B) plan özellikleri:

Soğukluktan sonra geçilen ılıklik mekanı 7x8 m.'ye oturan bir tabanı ve 6.65 m. çapında bir kubbesi bulunmaktadır. Kubbeye geçiş pandantiflerle sağlanmıştır¹ (Şekil 3.9). Bu mekanda iki kapı bulunmaktadır. Doğu duvarındaki kapıdan soğukluğa, batı duvarındaki kapıdan ise sıcaklığa geçilmektedir. Kuzey duvarında bir pencere bulunmaktadır. Pencerenin doğraması ve camları günümüzde mevcut değildir. Pandantifler ile geçilen kubbe sonradan çimento esaslı harç ile sıvanmıştır. Kubbede bulunan filgözleri, kubbeye dışarıdan yapılan müdahaleler sonucunda günümüzde kapalı durumdadır. Dış duvarlar bir sıra taş, üç sıra tuğla ile örülmüştür. Döşemenin altında ısıtma amaçlı yaklaşık 50-60 cm yükseklikte duman kanalları bulunmaktadır (Osmangazi Belediyesi, 2005).



Şekil 3.9 Iılıklikta bulunan pandantifler

a.3) Kadınlar sıcaklık (C) mekanı plan özellikleri: Sıcaklık mekanı dikdörtgen bir plana sahiptir. Ortada kare plana oturan bir kubbe ve iki yanda beşik tonozlar ile oluşturulan eyvanlardan ve batı yönünde eklenen iki halvetten oluşmaktadır. Sıcaklığın iç ölçüleri 5x12 m.'dir. Kare plana oturan kubbenin çapı 5,50 m.'dir. Kubbeye geçişi sağlayan pandantifler basit mukarnaslardan oluşmaktadır. Kubbenin üzerindeki filgözleri açık olduğundan mekan oldukça nem almaktadır (Şekil 3.10). Başta kubbenin sıvaları olmak üzere duvarları da bu nemden oldukça etkilenmiştir. Batı yönünde

¹ Pandantif: Küresel ters üçgen formunda tuğladan yapılmış geçiş elemanı.

sıcaklığa eklenilen kare plana oturan kubbeli iki halvet ise 5.5x5.5 m. iç ölçülerindedir. Kubbe çapları 5.50 m.'dir. Kubbeye geçiş elemanları Türk üçgenleri ile oluşmuştur¹. Halvetlere geçiş, sivri kemerli bir kapı ile sağlanmıştır. Batı duvarı üzerine bulunan bu kapılar nemden ve kötü kullanımdan kaynaklanan sorunlardan dolayı oldukça kötü durumdadır.



Şekil 3.10 Sıcaklık kubbesinde yer alan filgözleri

Duvarlar dış cephede bir sıra taş, üç sıra tuğla ile örülmüştür. Kapı açıklıklarının yanları çimento esaslı harç ile sıvanmıştır. Kubbeden aldığı nemden dolayı sıvalar bozulmuştur. Duvarlarda, eskiden kurnaların bulunduğu yerlerde oyuklar oluşmuştur.

Kadınlar güney (C₁) ve kuzey halvetleri (C₂) kubbeye örtülü olup, kubbeye geçiş geometrik süslemeli Türk üçgenleri ile sağlanmıştır. Tuğla ile örülmüş olan kubbe kıtıklı horasan harcı ile sıvanmıştır. Kubbede bulunan filgözleri açık olması nedeniyle nemden olumsuz etkilenmiştir (Şekil 3.11,12).

Duvarlarda suyun dolaştığı künkler görülmektedir. Zeminin altında ısıtma amaçlı yaklaşık 50-60 cm. yükseklikte duman kanalları vardır. Duman kanallarının üstü taş plaklarla örtülmüştür (Osmangazi Belediyesi, 2005).

¹ Türk üçgeni: Tabanın köşeleri ve prizmatik üçgen birimlerin birbirine bağlandığı eşkenar dörtgen şekilli diziler.

Yaklaşık 100 cm kalınlığındaki dış duvarlar bir sıra taş; üç sıra tuğla ile örülmüştür. Duvarlarda kurnaların olduğu yerlerde oyuklar oluşmuştur. Zamanla zeminde oldukça moloz birikmiştir. Kapı özgün niteliğini yitirmiş ve nemden dolayı mekanın duvarlarındaki sıvalar dökülmüştür (Osmangazi Belediyesi, 2005).



Şekil 3.11 Nemden etkilenen kubbe



Şekil 3.12 Nemden etkilenen pandantif

a.4) Erkekler soğukluk mekanı (A') plan özellikleri: Erkekler soyunmalık bölümü yamuk bir plana sahiptir. İç ölçüleri doğuda 17 m., batıda 15.3 m., kuzeyde 11.5 m. ve güney yönünde 5.3 m.'dir. Kuzeyde bir kubbe ve güney yönünde bir yarım kubbeden oluşmaktadır. Bu kubbeler yaklaşık 150 cm'lik bir kemerle bağlanmıştır. Tuğla ile örülmüş olan kubbenin üzeri horasan harcı ile sıvanmıştır. Kubbeye geçiş elemanı tromp, pandantif ve basit mukarnaslardan oluşmaktadır (Şekil 3.13).

Erkekler soğukluk mekanının üst örtüsünün çok büyük bir bölümü ve batı duvarı günümüzde yıkık bir durumdadır (Şekil 3.14). Duvarlarda büyük ölçüde deformasyon mevcuttur.



Şekil 3.13. Erkekler soğuklukta bulunan mukarnashlı pandantif



Şekil 3.14 Erkekler soyunmalıkta yıkık duvarlar

Doğu duvarı üzerinde giriş kapısına ait kapı eşiği yapılan kazı sonucunda ortaya çıkarılmıştır (şekil 3.15). Kuzey duvarında sıvalar dökülmüş ve yer yer büyük çatlaklar oluşmuştur (şekil 3.16). Soğukluk mekanı cephede bir sıra taş, üç sıra tuğla olarak inşa edilmiştir.



şekil 3.15 Erkekler soğukluk bölümünün doğu yönündeki yıkık duvarlar ve temelleri



şekil 3.16 Soyunmalık kuzey duvarında bulunan çatlaklar

Duvardaki, nişler oldukça kötü durumdadır. Güney duvarı üst örtüsü taşıyan kemer izlerine kadar mevcuttur (Şekil 3.16). Bu duvar üzerinde bulunan pencere sonradan kapatılmıştır. Kuzey duvarında kadın soyunma mekânına sonradan bir kapı açılmıştır (Osmangazi Belediyesi, 2005).

a.5) Erkekler ılıklik mekanı (B') plan özellikleri: Soğukluk mekanından ılıklik mekânına alçak bir basamakla inilmektedir. Erkekler ılıklik mekanı aralık, tuvalet ve traşlık hacimlerinden oluşmaktadır. Aralık 2x3 m., traşlık 4x5 m., tuvalet 2x2 m. ve ana mekan 7x10 m. boyutlarındadır. Kubbe 6,75 m. çapındadır. Kubbeye geçiş pandantiflerle sağlanmıştır. Traşlığın doğu duvarı üzerinde kadınlar bölümünden gelen kirli su kanalı bulunmaktadır. Bu kanalın atık su kanalı olduğunu düşünülmektedir (Şekil 3.17).

Ilıklık girişi kubbe ile örtülüdür. Tuğla ile örülmüş olan kubbeye geçiş sekizgen kasnaktaki pandantifler ile sağlanmıştır. Kubbedeki filgözleri zaman içinde toprakla örtülmüştür. Nemden dolayı kubbelerin sıvaları bozulmuştur. Ilıklıktan geçilerek ulaşılan helanın üzeri kubbeye örtülüdür. Zemin döşemesi zamanla toprak ve moloz ile yükselmiştir. Döşemenin altında ısıtma amaçlı yaklaşık 50-60 cm yükseklikte duman kanalları bulunmaktadır (Osmangazi Belediyesi, 2005). Ördekli Hamamı Rölöve ve Restitüsyon Raporu. Kurnaların bulunduğu yerlerde oyuklar oluşmuştur. Ilıklıktan kuzey yönünde özel halvete geçilirken batısından da sıcaklık mekânına girilmektedir. Ilıklıkta bulunan halvetin üzeri kubbe ile örtülüdür. Kubbeye geçiş mukarnaslarla sağlanmıştır. Kubbedeki filgözleri açık olması nedeniyle nem sorunu yaşanmaktadır. Sıvalar yer yer dökülmüştür.



Şekil 3.17. Erkekler ılıklikta bulunan atık su kanalı

a.6) Erkekler sıcaklık mekanı (C') plan özellikleri: Sıcaklık mekanı dikdörtgen bir plana sahiptir. Ortada kare plana oturan bir kubbe ve iki yanda beşik tonozlar ile oluşturulan eyvanlardan ve batı yönünde eklenen iki halvetten oluşmaktadır. Sıcaklığın iç ölçüleri 5x12 m.'dir. Kare plana oturan kubbenin çapı 5,50 m.'dir. Kubbeye geçişi sağlayan pandantifler ve üzerinde basit mukarnaslardan oluşmaktadır. Kubbenin üzerindeki filgözleri açık olduğundan mekan oldukça nem almaktadır. Başta kubbenin sıvaları olmak üzere duvarları da bu nemden oldukça etkilenmiştir. Batı yönünde sıcaklığa eklenen kare plana oturan kubbeli iki halvet ise 5,5x5,5 m. iç ölçülerindedir. Kubbe çapları 5,50 m.'dir. Kubbeye geçiş elemanları Türk üçgenleri ile oluşmuştur. Halvetlere geçiş, sivri kemerli bir kapı ile sağlanmıştır. Batı duvarı üzerine bulunan bu kapılar nemden ve kötü kullanımdan kaynaklanan sorunlardan dolayı oldukça kötü durumdadır.

Duvarlar dış cephede moloz taş ile örülmüştür. Boşalan ahşap hatıl boşlukları bulunmaktadır (Şekil 3.18). Kapı açıklıklarının yanları çimento esaslı harç ile sıvanmıştır. Kubbeden aldığı nemden dolayı sıvalar bozulmuştur. Duvarlarda, eskiden kurnaların bulunduğu yerlerde oyuklar oluşmuştur.



Şekil 3.18 Erkekler güney cephesinde boşalan ahşap hatıl boşlukları

Erkekler güney (C₁') ve güney (C₂') halvetleri kubbeye örtülü olup, kubbeye geçiş geometrik süslemeli Türk üçgenleri ile sağlanmıştır. Tuğla ile örülmüş olan kubbe

kıtkılı horasan harcı ile sıvanmıştır. Kubbede bulunan filgözleri açık olması nedeniyle nemden olumsuz etkilenmiştir.

Duvarlarda suyun dolaştığı künkler görülmektedir. Zeminin altında ısıtma amaçlı yaklaşık 50-60 cm yükseklikte duman kanalları vardır. Duman kanallarının üstü taş plaklarla örtülmüştür.

Yaklaşık 100 cm kalınlığındaki dış duvarlar bir sıra taş; üç sıra tuğla ile örülmüştür. Duvarlarda kurnaların olduğu yerlerde oyuklar oluşmuştur. Zamanla zeminde oldukça moloz birikmiştir. Kapı özgün niteliğini yitirmiş ve nemden dolayı mekanın duvarlarındaki sıvalar dökülmüştür (Osmangazi Belediyesi, 2005).

a.7) Su deposu (D) ve külhan (E) plan özellikleri:

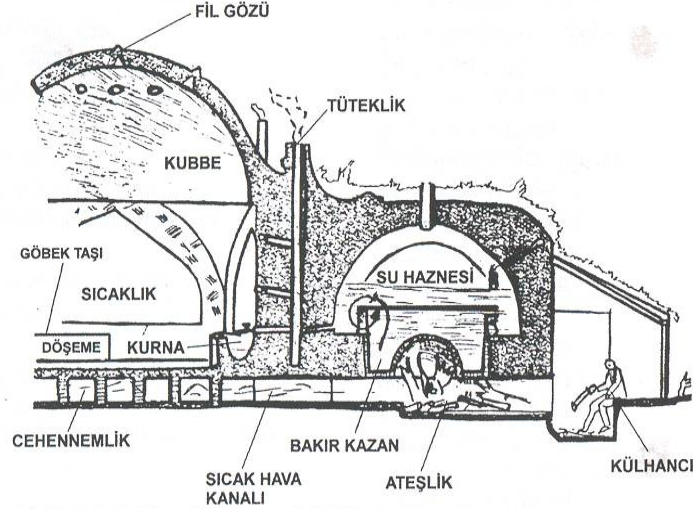
Su deposu, kadınlar ve erkeklere ait olan halvetlerin batı duvarına bitişik dikdörtgen planlı beşik tonozlu bir mekandan oluşmaktadır. İç ölçüleri 2,5x2,5 m. boyutlarında ve 2,5 m. yüksekliğindedir. Külhan ve su deposunun üzeri tonozla örtülmüştür. Doğu duvarının kalınlığı 100 cm., batı duvarının kalınlığı 140 cm.'dir. Su deposunun erkekler halvetlerine açılan iki küçük penceresi bulunmaktadır. 2,60 m. çapında ve 45 cm. derinliğindeki bakır kazanın su deposu içinde olduğu bilinmektedir. Kazanın altında döşemenin altından giden 5 duman kanalı bulunmaktadır. Bu kanallar yardımıyla döşemenin altında yaklaşık 1m. yüksekliğinde dumanın dolaştığı cehennemlik bulunmaktadır. Bu duman kanallarının üstü taş plaklarla örtülmüştür. Külhanın iç ölçüleri ise 4,5x 2,5 m.'dir.

Su deposunu ve hamamı külhan ısıtmaktadır.¹ Su deposunun üzeri beşik tonozla geçilmiştir. Yer yer sıvalı yüzeyler bulunmaktadır. Doğu duvarı 100 cm. batı duvarı 140 cm. kalınlığındadır.

Duvar örgü malzemesi moloz taştır. Erkekler kısmı halvetlerine bakan iki adet penceresi bulunmaktadır. Batı duvarından günümüzde açık olan külhana geçiş bulunmaktadır. Bu geçiş, buradaki bacanın yıkılması ile oluştuğu düşünülmektedir. Kuzey duvarı tamamen yıkılmıştır. Zamanla toprak seviyesi yükselmiştir. 2,6 x 25,1m.

¹ Külhanda ateşin yanması için dışarıya açılan şömine şeklinde kemerli bir açıklık bulunmaktadır. Bunun tam üstünde ortada bakır konkav bir ısıtıcının bulunduğu su deposu bulunmaktadır. Bu kazanlar zamanla aşınmaları nedeniyle zaman zaman bakımları yapılmaktadır. Bu kazanların çapı 90-240 cm. arasında değişmektedir.

ebadında ve 2.5 m yüksekliğe sahip mekanın ortasında yaklaşık 260 cm çapında, 45 cm derinlikte bakır bir kazan bulunduğu düşünölmektedir. Kazanın altında yaklaşık 1.0 m yükseklikte ateşin yakıldığı cehennemlik yer almaktadır. Cehennemlikten beş adet duman kanalı hamamı döşemenin altında bulunan kanallara dağılmaktadır (Şekil 3.19-21), (Osmangazi Belediyesi, 2005).



Şekil 3.19 Türk hamamı külhan ve ısıtma sistemi (Aru, 1949)



Şekil 3.20 Cehennemlikte bulunan duman kanalları



Şekil 3.21 Su deposunda bulunan kazan izi ve duman kanalları

Külhan bölümü moloz taş örgüsüne sahiptir. Batı duvarında su deposunun tam karşısına gelen kısımda duvarda bir genişleme mevcuttur. Kuzey duvarı, kerpiç ve moloz taş kullanılarak karmaşık bir biçimde örülmüştür. Güney duvarında bir oyuk oluşturulmuştur. Zemin kotu zamanla toprak ve moloz ile dolmuştur(Şekil 3.22). Külhan bölümünün ise tonoz örtüsü olmayıp, sadece duvarları mevcuttur. Su deposunun da tonoz örtüsünün kuzey yönüne bakan kısımları yıkık haldedir (Osmangazi Belediyesi, 2005).



Şekil 3.22 Külhanın yıkık durumda bulunan tonoz örtülü üst örtüsü

b) Tesisat sistemi

Hamamlarda tesisat sistemi su ve ısıtma sisteminden oluşmaktadır. Su tesisatı sistemi, kaynaktan temiz suyun temin edilerek su deposuna taşınmasını ve buradan da suyun içeriye dağıtılması ve pis suyun hamamdan atılması yardımıyla oluşmaktadır. Isıtma sistemi ise ılık, sıcaklık ve su deposu mekanlarının cehennemlik ile döşemeden ısıtılması ve dumanın tüteklikten çıkması sonucu duvarları da ısıtan sistemden oluşmaktadır.

Bu tesisat sisteminde künklerden faydalanılmaktadır. Düşeyde kullanılan künkler ısıtma sistemine ait olan tüteklik künkleri ve yatayda dolaşan künkler de temiz suyun temininde kullanılmaktadır. Diğer bir künk çeşidi ise tonozlarda ve kubbelerde aydınlatma amacıyla kullanılmaktadır.

b.1) Su tesisatı sistemi: Su deposu, künkler, kurnalar, kirli su kanalları ve tuvalet su tesisatının elemanlarıdır. Su tesisatı suyun bir kaynaktan temin edilerek su deposuna ulaştırılması, suyun buradan dağıtılması ve pis suyun yapı dışına atılmasını içeren üç bölümden oluşmaktadır. Suyun temin edilmesi ve dağıtılması temiz su tesisatını, pis suyun uzaklaştırılması ise killi su tesisatını oluşturmaktadır.

b.2) Temiz su tesisatı: Su deposu sıcak ve soğuk suyun olduğu iki mekandan olduğu gibi tek bir mekandan da oluşabilmektedir. Künkler yardımıyla buradan sıcak ve soğuk su içeriye dağılmaktadır. Sıcak ve soğuk suyun dağılımı künk sayısına bağlı olarak değişim göstermektedir. Tek bir hat varsa bu sıcak suyu, çift sıra hat varsa birinin sıcak, diğerinden de soğuk suyun taşındığı anlaşılmaktadır.

b.3) Soğuk su sistemi: Bu sistemde su ya su deposunda depolanmakta, ya da doğrudan burada depolanmadan içeriye verilmektedir. Suyun depolandığı durumlarda hamama buradan künkler yardımıyla su iletilmektedir. Burada 20cm. x 60 cm. boyutlarında dikdörtgen bir açıklıktan su dağıtılmaktadır.

b.4) Sıcak su sistemi: Sıcak su sıcak su bölümünden dağılmaktadır. Su deposunda bulunan sıcak su bölümü külhanın tam üstünde bulunmaktadır. Külhan döşemenin hemen altında yer almaktadır. Külhanda yanan ateş depoda bulunan suyun bakır konkav ısıtıcı ile ısınmasını sağlamaktadır.

b.5) Pis su tesisatı: Kirli suyun hamamlardan uzaklaştırılmasında tuvaletler kullanılmaktadır. Halvetlerden gelen pis su döşemede eğim verilerek girişlerde toplanmakta, sıcaklıkta bulunan ana mekandan ılıklığa geçişte döşemede açık su kanalları yardımıyla taşınmaktadır. Bu kanallar duvar boyunca kurnaların en alt noktasından dolaşmaktadır. Cehennemliği oluşturan kagir duvarların üzerinde kesme taş döşeme kaplamaları bulunmaktadır. Kirli su kanalları ılık girişinde tek bir yerde toplanarak ılıkta bulunan tuvalete atılmaktadır.

b.6) Isıtma tesisatı sistemi:

Isıtma sistemi, su deposunun hemen altında yer alan külhan, ılık ve sıcaklık mekanlarına ait döşemelerin altında yer alan cehennemlik ve burada dolaşan dumanı duvarların içinde düşeyde yer alan duman bacalarından oluşmaktadır. Sivri kemerli bir niş içinde bulunan külhanın bu nişin üstünde yükselen geniş bir bacası bulunmaktadır.

Ördekli Hamamı'nın yapılan incelemeler sonucunda günümüze gelinceye kadar birçok yerinde onarımlar yapıldığı gözlenmiştir. Özellikle kadınlar ve erkekler soğukluk kısımlarında yapılan restorasyonlar göze çarpmaktadır. Bursa'da 1854 yılında meydana gelen şiddetli depremin Ördekli Hamamı'na da büyük ölçüde zarar verdiği düşünülmektedir.

3.1.1.2. Taşıyıcı sistemin belirlenmesi

Hamam, moloz taş, kaba yonu, kesme taş, tuğla ve ahşap malzemelerden oluşan kagir bir yapıdır. Kullanılan moloz ve kesme taş duvarlarda kullanılan başlıca yapı malzemesidir. Devşirme kesme taş kapı ve pencere açıklıklarında ve duvarların köşelerinde yer almıştır. Tuğla genellikle yapının üst bölümlerinde kemerler, tonozlar ve kubbelerde kullanılmıştır. Kadınlar soyunmalık giriş cephesinde görülen ahşap hatıllar ve kadınlar sıcaklık cephesinde ahşap hatıl boşlukları ahşabın düşeyden gelen yükleri dağıtmak amacıyla yatayda kullanıldığını göstermektedir. Kubbeler, tonozlar ve kemerlerde tuğla bağlayıcı olarak kireç harcı ile birlikte kullanılmıştır. Su sistemine ait yatayda dolaşan künkler (terracotta borular) sıcaklık mekanlarında duvar boyunca yer almaktadır. Yapıda bulunan yatay künkler su tesisatı, düşey borular ısıtma sistemine ait tüteklilik ile aydınlatma sistemlerinde kullanılmıştır.

Yapının strüktürel sistemi; duvarlar, kemerler, geçiş elemanları, üst örtü ve döşemelerden oluşmaktadır. Sırasıyla bu sistemi oluşturan yapı öğeleri şu şekildedir:

Duvarlar: Duvarlar hamamın düşey taşıyıcı elemanlarıdır. Duvarlar almaşık duvar tekniğinde örülmüştür. Kadınlara ait soyunmalık cephesi bir sıra küfeki taşı ve 3 sıra tuğla ile kesme taş/tuğla almaşık duvar örgüsünde, ılık kaba yonu/tuğla, sıcaklık ise moloz taş duvar sistemiyle yapılmıştır¹. Erkekler için soğukluk, ılık ve sıcaklık cepheleri kaba yonu taş/tuğla almaşık duvar örgüsündedir. Yakın çevrelerde zengin olan doğal kaynaklardan dolayı kireçtaşı-küfeki taşı ve moloz taş duvarın içinde bulunan en

¹ Kaba yonu taş/tuğla almaşık duvar örgüsü: Kaba yonu taş ve tuğla birlikte kullanılmıştır. Küçük tuğlalar birleşim noktalarına paralel, büyük tuğlalar ise hem yatayda, hem de düşeyde birleşim noktalarında kullanılmıştır.

Moloz taş duvar örgüsü: Küçük ve büyük boyutlarda moloz taşlar yapının düşey birleşim noktalarında birlikte kullanılmıştır. Dış cephede, moloz taşların birleşimlerinde küçük taşlar ve harç düzgün bir yüzet oluşturmak amacıyla birlikte kullanılmıştır. Duvarın içinde ise; moloz taş ve harç duvar kalınlığı boyunca serbest olarak doldurulmuştur. Duvarların köşe noktalarında kullanılan büyük boyutlarda moloz taşlar yardımıyla yapı güçlendirilmiştir. Kadınlar sıcaklık cephesi bu yöntemle inşa edilmiştir.

Kesme taş/tuğla almaşık duvar örgüsü: Bu duvar sisteminde bir sıra küfeki taşı üç sıra tuğla ile düşeyde ve yatayda ince birleşimlerle kullanılmıştır.

belirgin yük taşıyıcı malzemelerdir. Dış duvarların kalınlıkları 105-135 cm., iç duvarlar ise 100-110 cm. arasında değişmektedir.

Duvarlar cephelerde sıvanmamış, ancak iç mekanlarda sıvanmıştır. Su ve su buharının direk etkisine maruz kalmayan soyunmalık mekanında kireçli sıva, ılıklik ve sıcaklık mekanlarında ise horasan sıva kullanılmıştır. Yatayda kullanılan ahşap hatıllar cephe yüzeyine yakın ve çift sıra olarak konumlandırılmıştır. Duvar ve pencere açıklıklarında, kemerler, tonozlar ve kubbelerde tuğla kullanılmıştır. Kullanılan tuğla boyutları 29x29 cm'dir. Sıcaklık mekanının duvarlarında bulunan yatay künkler su tesisatına, düşeyde bulana künkler ise ısıtma sistemine aittir. Kullanılan silindirik terracotta künkler birbirine eklemenecek şekilde 39 cm. uzunluğunda, bir yönde 12,5 cm, diğer yönde 14 cm. çapında ve 0,75 cm. kalınlığındadır. Bu künkler su deposundan gelen suyu ihtiyaca bağlı olarak tek veya çift sıra olacak şekilde hamama taşımaktadır. Ilıklık ve sıcaklıkta yer alan cehennemlikte (hypocaust) dolaşan dumanın dışarı atılması için düşeyde künkler kullanılmıştır. Duvarların üzerinde bulunan baca tuğlalarla yükseltilmiştir. Cephede duvarlar ve kasnaklar kirpi saçak ile sonlandırılmıştır.

Kemerler: Tromplarda, ılıklik ve sıcaklıkta bulunan geçişlerde, pencere ve kapı açıklıklarında ve nişlerde strüktürel eleman olarak kemerler kullanılmıştır.

Geçiş elemanları: Geçiş elemanları, kare mekandan kubbeye geçişi sağlayan strüktürel elemanlardır. Kubbeye geçiş elemanı ne olursa olsun mutlaka kubbeye geçmeden önce dışarıda sekizgen, içeride eğrisel tuğladan oluşan belli yükseklikte kasnak bulunmaktadır. Kubbe kasnaktan sonra başlamaktadır. Kubbeden gelen yükler bu elemanlar yardımıyla duvarlara aktarılmaktadır. Bu elemanlar, tromplar, pandantifler, düzlem üçgenler ve Türk üçgenlerinden oluşmaktadır. Bu elemanlar tuğla ve bağlayıcı olarak kullanılan kireç harcının yatayda kalın ve düşeyde ince olarak kullanılmasıyla oluşmuştur.

Üst örtü: Kubbelerden ve tonozlardan oluşan üst örtü genellikle tuğla ve kireç harcından oluşmaktadır. Dikdörtgen mekanlarda üst örtü olarak tonozlar kullanılmaktadır. Uzun kenar boyunca tuğlaların dik olarak yerleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Kubbeler tuğla ve bağlayıcı olarak kireç harcından oluşmaktadır. Hamamda kubbenin üstünde ışığın içeriye girmesi için altıgen formda künklerden oluşan fil gözleri bulunmaktadır. Aydınlatma sistemine ait olan fil gözleri genellikle

kubbe üzerinde iki dairesel çizgide ve sayıları da yukarıya doğru gidildikçe azalmaktadır.

Döşemeler: Pis su tesisatına ait olan pis su kanalları döşemenin üzerinde bulunmaktadır. Halvetlerden gelen pis su, sıcaklıkta bulunan kurnalar boyunca devam ettikten sonra ılıkılıkta tek bir kanalda toplanmakta ve ılıkılıkta bulunan tuvalet veya ılıkılığın köşesinden çıkan bir delik ile dışarıya atılmaktadır.

3.1.2. Yapısal hasar biçimlerinin tanımlanması ve bozulmaların izlenmesi

Ördekli Hamamında yapılan incelemelerde;

- 1- Hamamın erkekler soğukluk bölümünün yarım ve tam kubbesinin yıkık olduğu,
- 2- Erkekler soğukluk bölümünün güney yönündeki duvarının ılıkılık yönüne bakan yarısının mevcut, diğer yarısının yıkık olduğu,
- 3- Erkekler soğukluk tam ve yarım kubbelerini taşıyan ortadaki kemerin ılıkılık yönündeki başlangıç kısmının yerinde, diğer kısımlarının yıkık olduğu,
- 4- Erkekler soğukluk bölümü ile kadınlar soğukluk bölümünün arasındaki duvarda yer yer çatlakların olduğu,
- 5- Erkekler soğukluk kubbe başlangıçlarında ve pandantiflerde malzeme eksilmeleri ve bunların sıvalarla kapatıldığı,
- 6- Külhan bölümünün üst örtüsü, su deposunun üst örtüsünün kuzey yönüne bakan küçük bir bölümü, su deposu ile külhan arasındaki bacanın yıkık olduğu,
- 7- Kadınlar soğukluk bölümünün kubbesinin yenilendiği tespit edilmiştir.

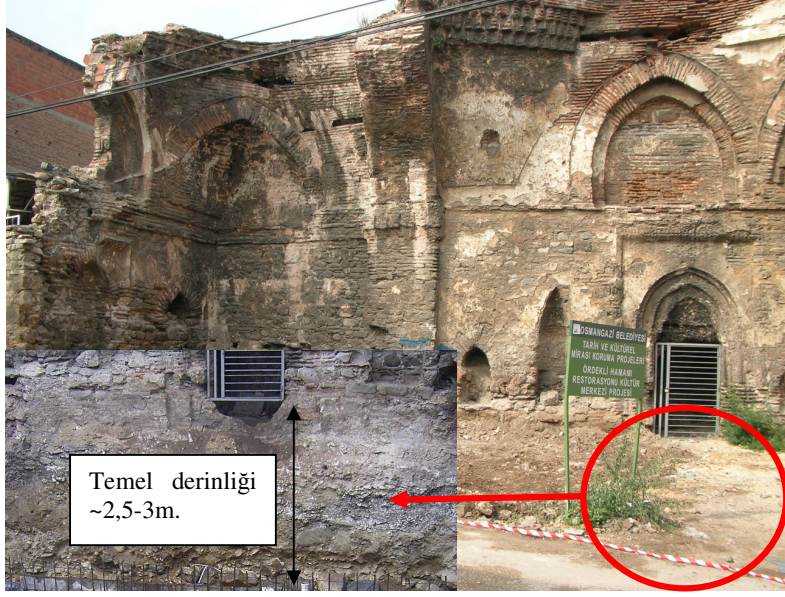
Hamamın özellikle Osmangazi Belediyesi tarafından erkekler soğukluk bölümünde açılan temelleri incelenmiş ve zeminde oturma olup olmadığı kontrol edilmiştir. Temelde kullanılan taşlar genellikle granit ve dere taşlarından oluşmaktadır. Kullanılan malzemelerin ebatları duvarlarda kullanılanlarda daha büyük seçilmiştir (Şekil 3.23). Bu taşlardan bazılarında sünme tespit edilmiştir. Ancak bölgenin zemin sınıfının iyi olması ve yer altı su seviyesinin derinlerde olması nedeniyle yıkılmanın

zeminin oturmasından kaynaklanabileceği ihtimalini azaltmaktadır. Ayrıca 600 yıllık bir gemiŖe sahip olan yapının oturmasını tamamladığı dűŖünülmektedir.



Ŗekil 3.23 Erkekler sođukluk giriŖ bűlűműnűn temellerinde yapılan kazı

Yapının erkekler sođukluk ve ılıkık bűlűműnűn ortak duvarının altında yapılan kazılarda temel derinliđinin yaklaŖık 2,5~3 m. arasında olduđu belirlenmiŖtir (Ŗekil 3.24).



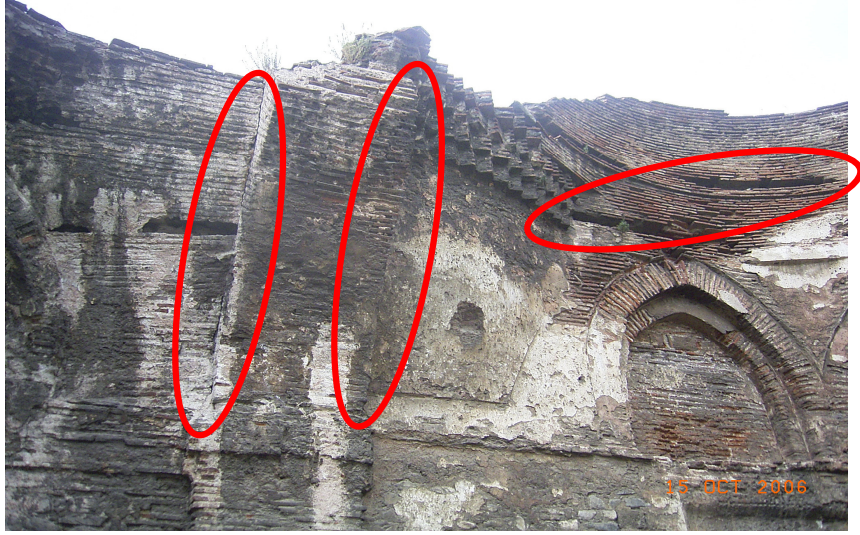
Şekil 3.24 Erkekler soğukluk bölümü ile ılıklik bölümünü ayıran duvarın temel kazısı ve yaklaşık derinliği

Yapıdaki çatlaklar incelendiğinde çatlakların genellikle trompların köşe bölgelerinde, kemerle pandantiflerin birleştiği bölgelerde, tromplar ile kubbe arasında, malzeme boşalmaları ise genellikle kubbe başlangıçlarında, pandantif ve tromplarda, az sayıda da duvarlarda olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.24,25).



Şekil 3.25 Erkekler soğukluk bölümünde oluşan malzeme eksilmeleri

Çatlakların yönü genellikle dikey yönlü olup kubbeye doğru yönelmektedir. Çatlak genişlikleri ise yer yer 2~3cm'ye kadar ulaşmaktadır (Şekil 3.26,27).



Şekil 3.26 Erkekler soğukluk bölümünde kemer ve pandantif birleşimlerinde oluşan çatlaklar kubbe başlangıçlarında malzeme kayıpları



Şekil 3.27 Erkekler soğukluk bölümünde tromp köşe bölgesinde ve kemer tromp arasında oluşan malzeme kayıpları

3.1.3. Ördekli Hamamı'nın malzeme özelliklerinin belirlenmesi için yapılan testler

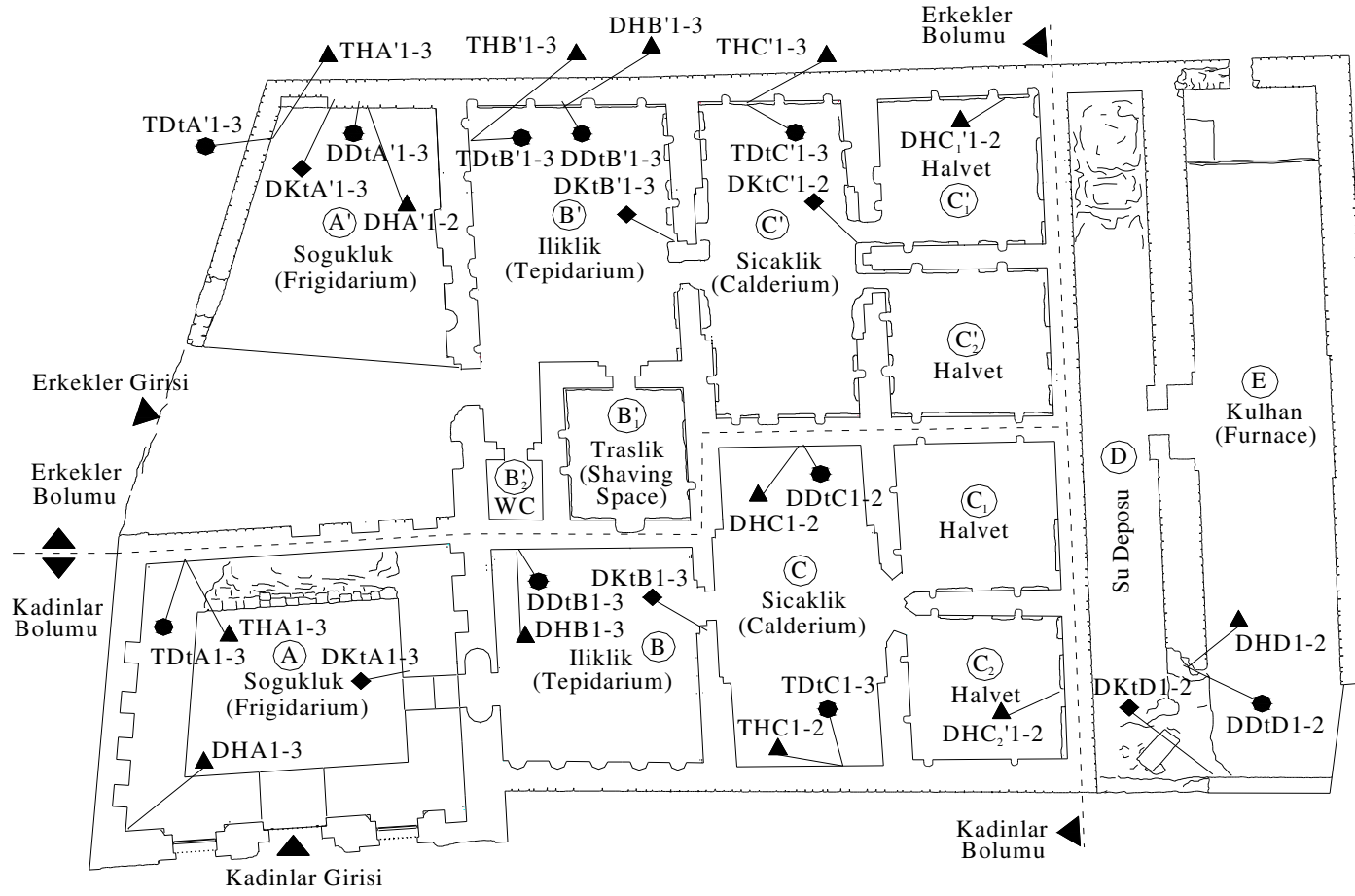
Ördekli Hamamı'nda yapılan incelemeler sonucunda yapının temel kısmında ve taşıyıcı duvarlarında dere taşının, bağlayıcı malzeme olarak da horasan harcının kullanıldığı, kemer ve kubbelerde ise tuğlanın ve bağlayıcı olarak da horasan harcının kullanıldığı tespit edilmiştir. Kaplama olarak da taşıyıcı özelliği düşük olan küfeki taşı tercih edilmiştir. Yapının statik çalışma prensibini tespit edebilmek için öncelikle bu malzemelerin fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinin, yapının farklı bölgelerinden alınan malzeme örnekleri üzerinde incelenerek belirlenmesi gerekmektedir. Böylece tarihi yapıda kullanılan malzemelerin mevcut haldeki durumları tespit edilecek ve daha sonra da yapılacak modele aktarılacaktır.

Tarihi yapıdan alınan örnekler üzerinde fiziksel deneylerden; kılcal su emme deneyi, kütlece ve hacimce su emme deneyi, kaynar su emme deneyi, birim hacim ağırlık ve özgül ağırlık deneyi, doluluk ve boşluk oranları tespit edilmiştir. Mekanik deneylerden; statik elastisite modülü tayini, eğilme deneyi, basınç deneyi, yarmada çekme deneyi, dinamik elastisite modülü tayini ve kompozit malzeme deneyleri yapılmıştır. Kimyasal deneylerden de asit kaybı deneyi ve kızdırma kaybı deneyleri yapılmıştır.

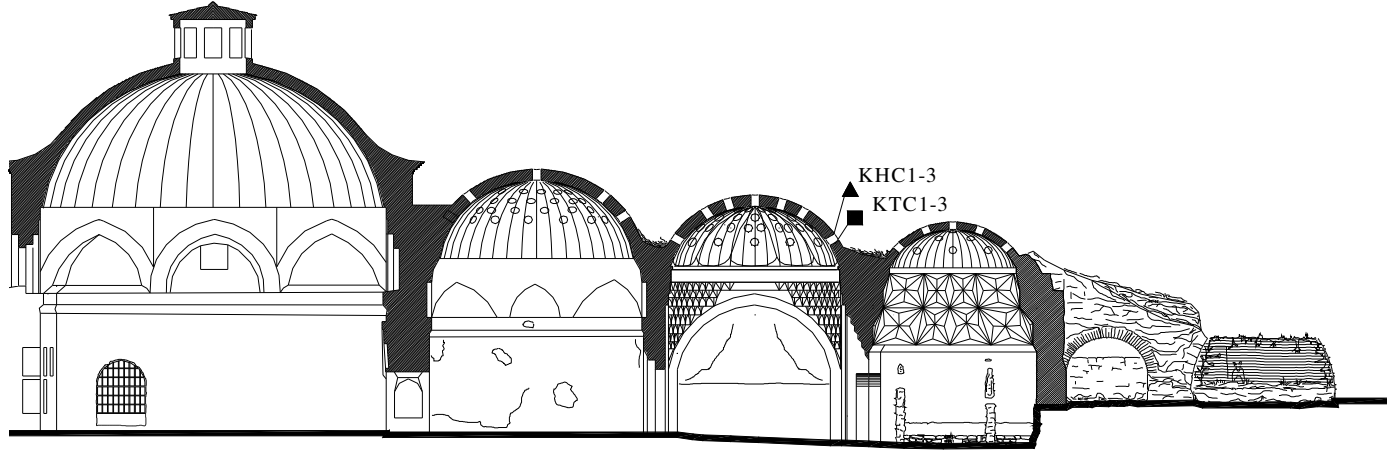
Örnekleme metodolojisi:

Aşağıda yapının rölövesi (mevcut durum planı), iki uzunlamasına (boyuna) kesit ve üç kısa (enine) kesit yardımıyla yapıdan alınan malzemeler gösterilmiştir. Alınan numuneler belli bir metodolojiyle gösterilmiştir. Bu metodolojide sırasıyla yapıdan alınan numunelerin yapıdaki yeri, malzemenin cinsi, malzemenin alındığı mekan ve adedi belirtilmiştir. Numunelerin yapıdaki yeri; temeller (T), duvarlar (D) ve kubbeler (K) harfleri ile gösterilmiştir. Malzemenin cinsi; dere taşı (Dt), küfeki taşı (Kt), tuğla (T) ve harç (H) ile belirtilmiştir. Malzemenin alındığı mekanlar; soğukluklar (A,A'), ılıkliklar (B,B'), sıcaklıklar (C,C'), halvetler (C₁,C₁',C₂,C₂'), su deposu (D), külhan (E), erkekler traşlık (B₁') ve erkekler hela (B₁') harfleri ile gösterilmiştir. Deney numuneleri ise rakam verilerek ifade edilmiştir(Şekil 3.28-30).

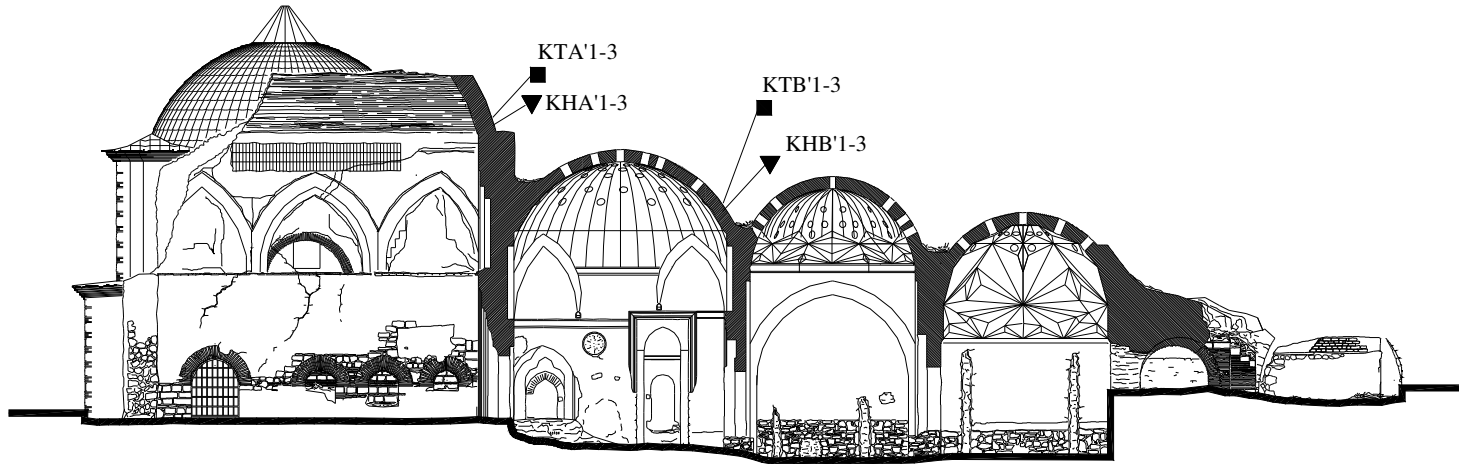
Örneğin DTA'1 ile kodlu numune Duvar, Tuğla, A' Mekanı, 1 no'lu numuneyi belirtmektedir.



Şekil 3.28 Yapı planında örnek alınan numunelerin yerlerinin gösterilmesi



Şekil 3.29 Yapının kuzey cephesinden örnek alınan numunelerin yerlerinin gösterilmesi



Şekil 3.30 Yapının güney cephesinden örnek alınan numunelerin yerlerinin gösterilmesi

3.1.3.1. Labovatuvar ortamında yapılan testler

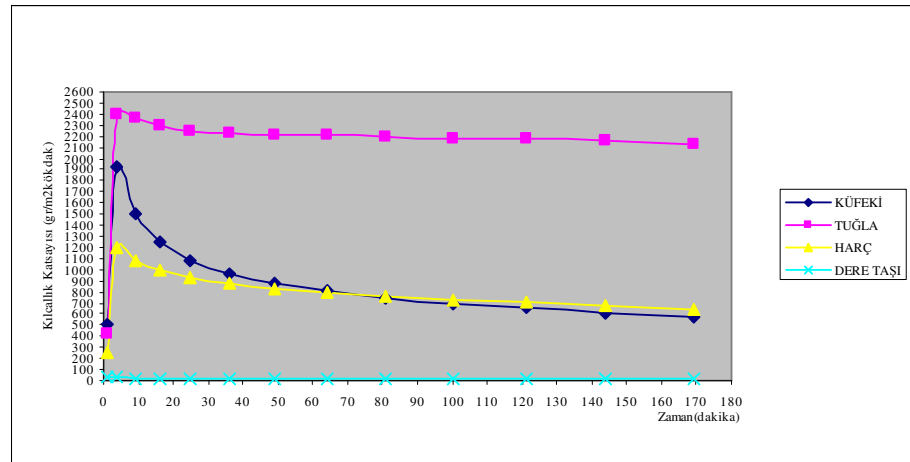
a) Fiziksel testler

a.1) Kılcallık deneyi

Yapılan deneyler sonucunda; yapıda kullanılan dere taşının çok az miktarlarda su emdiği anlaşılmaktadır. Küfeki taşının boşluklu bir yapıya sahip olması ve zamanla dış etkiler sonucunda yıpranmış olması nedeniyle kılcal su emmesi horasan harcından daha fazla olmuştur. Ancak ortalama 70 dakika sonrasında harcın kılcal su emmesi küfeki taşına göre daha fazla olmuştur. Tuğlanın kılcal su emme miktarı ise en yüksek olanıdır. Şekil 3.31’de hamamda kullanılan malzemelerin kılcal su emme deneyi gösterilmiştir. Şekil 3.32’de ise grafiksel olarak zamana bağlı kılcallık katsayısı değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.31 Kılcallık deneyinin yapılması



Şekil 3.32 Kılcallık katsayısı-zaman grafiği

a.2) Kütlece ve hacimce su emme deneyi

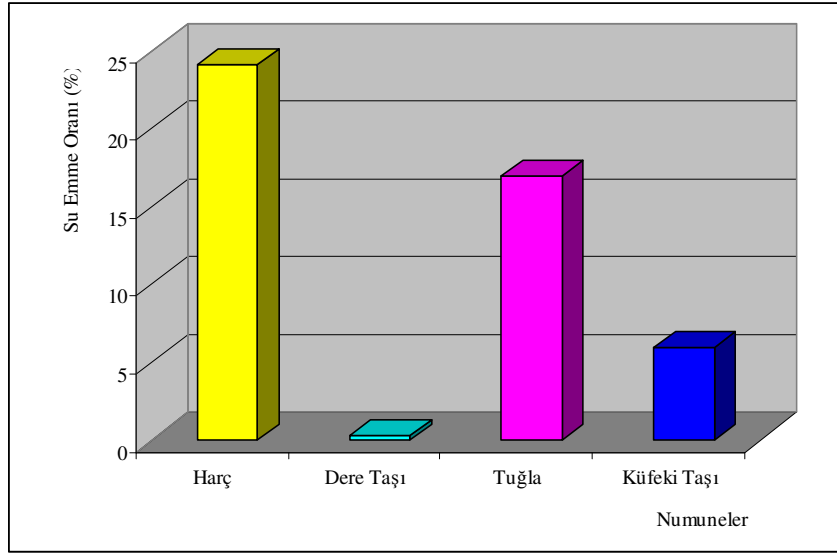
Aşağıdaki tabloda Ördekli Hamamı'ndan alınan örneklerin kütlece ve hacimce su emme oranlarını göstermektedir.

Çizelge 3.1 Ördekli Hamamı'ndan alınan numunelerin su emme oranları

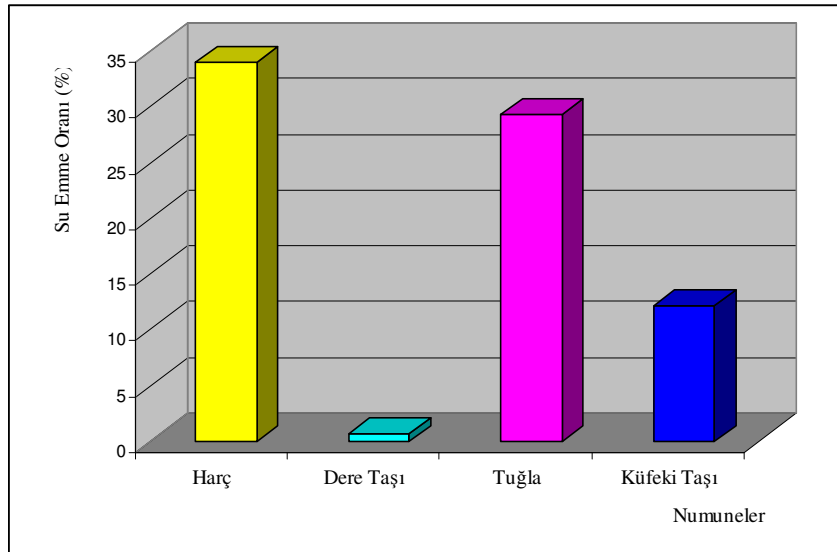
Numuneler	Etüv kurusu Ağ. (Gram) Gk	Suya doymuş Ağ. (Gram) Gd	Su içindeki ağ. (Gram) Gds	Kütlece su emme oranı % Sk=(Gd-k)/Gk	Hacimce su emme oranı % Sh=(Gd-Gk) / (Gd-Gds)	
HARÇ	THA1	292,38	368,19	159,70	25,93	36,36
	THB'1	333,06	429,21	181,10	28,87	38,75
	THC2	311,09	397,20	169,20	27,68	37,77
	DHA'1	329,75	397,20	167,11	20,45	29,31
	DHC2	430,20	528,48	211,58	22,85	31,01
	DHD1	422,66	518,31	223,63	22,63	32,46
	KHA'2	438,07	526,08	244,10	20,09	31,21
	KHB'1	313,09	388,20	166,20	23,99	33,83
	KHC1	394,58	489,31	218,03	24,01	34,92
			ORTALAMA	24,06	33,96	
DERE TAŞI	TDtA'1	936,60	939,38	584,80	0,30	0,78
	TDtB3	879,23	882,09	547,40	0,33	0,85
	TDtC'1	1015,22	1018,57	631,70	0,33	0,87
	DDtA'2	936,80	938,78	583,30	0,21	0,56
	DDtB'1	955,81	957,84	595,30	0,21	0,56
	DDtD2	946,93	948,77	589,63	0,19	0,51
				ORTALAMA	0,26	0,69
TUĞLA	KTA'1	373,41	440,04	217,80	17,84	29,98
	KTA'2	385,70	451,53	225,70	17,07	29,15
	KTB1	384,97	442,59	236,90	14,97	28,01
	KTB2	379,91	441,71	221,60	16,27	28,08
	KTC'1	356,29	421,67	207,80	18,35	30,57
	KTC'2	380,91	445,58	226,30	16,98	29,49
				ORTALAMA	16,91	29,21
KÜFEKİ TAŞI	DKtA'1	582,38	606,66	343,90	4,17	9,24
	DKtA'2	619,52	645,37	367,30	4,17	9,30
	DKtB'2	460,86	481,31	271,90	4,44	9,77
	DKtB'3	416,12	445,18	230,2	6,98	13,52
	DKtC2	496,03	536,25	275,20	8,11	15,41
	DKtC3	508,12	549,18	290,7	8,08	15,89
				ORTALAMA	5,99	12,19

Hacimce ve kütlege su emme oranları incelendiğinde; harç malzemesinin, kılcallıkla su emme deneyinde en fazla su emen tuğlaya oranla daha fazla su emdiği görülmektedir. Su emme oranları tarihi yapıların onarımları sırasında uygulanacak grout injeksiyon metodunun belirlenebilmesi için önem taşımaktadır (Binda, 2003 Syf: 571).

Hamam'da kullanılan malzemelerin ortalama olarak kütlege ve hacimce su emme oranları Şekil 3.33 ve Şekil 3.34'de gösterilmiştir.



Şekil 3.33 Ördekli Hamamında kullanılan malzemelerin ortalama kütlege su emme oranları



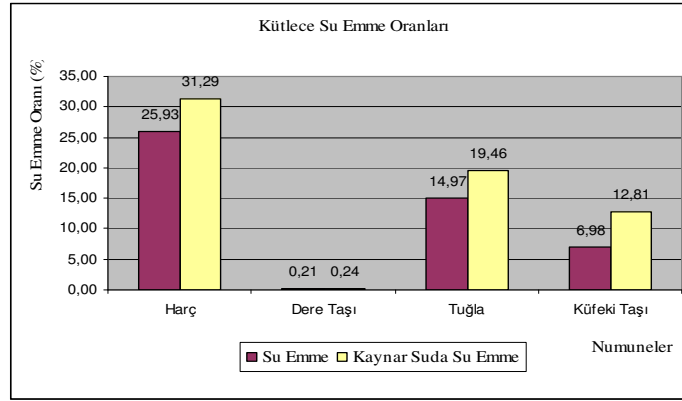
Şekil 3.34 Ördekli Hamamında kullanılan malzemelerin ortalama hacimce su emme oranları

a.3) Kaynar suda su emme deneyi

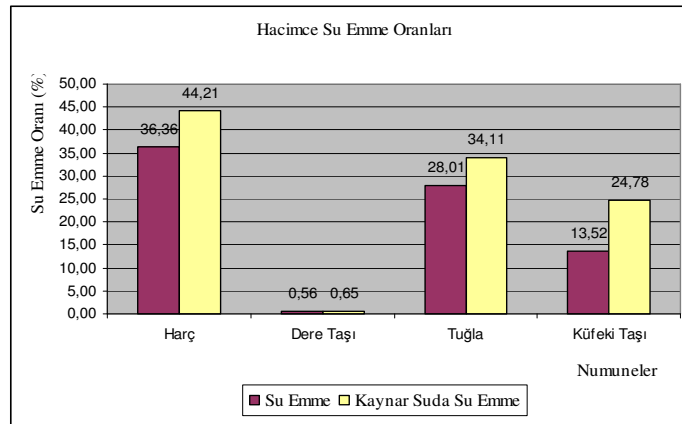
Kaynar suda su emme deneyleri her numune için birer örnek üzerinde yapılmıştır. Çizelge 3.2 ve Şekil 3.35,36'dan anlaşılacağı üzere küfeki taşında kaynar su emme sonrasında hem hacimce hem de kütlece su emme oranlarının yaklaşık iki katına çıktığı gözlenmiştir. Küfeki taşının diğer malzemelere göre daha gözenekli bir yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 3.2 Ördekli Hamamı'ndan alınan numunelerin kaynar su emme oranları

Numuneler		Etüv kurusu ağı. (Gram)	Suya doymuş ağı. (Gram)	Su içindeki ağı. (Gram)	Kütlece su emme oranı (%)	Hacimce su emme oranı (%)
Harç	THA1	292,38	383,88	176,9	31,29	44,21
Dere taşı	DDtA'2	936,80	939,09	584,20	0,24	0,65
Tuğla	KTB1	384,97	459,90	240,20	19,46	34,11
Küfeki taşı	DKtB'3	416,12	469,42	254,3	12,81	24,78



Şekil 3.35 Kaynar suda hacimce su emme oranlarının hacimce su emme oranlarıyla karşılaştırılması



Şekil 3.36 Kaynar suda kütlece su emme oranlarının kütlece su emme oranlarıyla karşılaştırılması

a.4) Birim hacim ağırlık deneyi

Çizelge 3.3'de Ördekli Hamamı'nda kullanılan malzemelerin birim hacim ağırlıkları tespit edilmiştir. Buna göre harç malzemesinin birim hacim ağırlığı diğer malzemelere göre daha düşük bulunmuştur.

Çizelge 3.3 Ördekli Hamamından alınan numunelerin birim hacim ağırlıkları

Numuneler		Etüv kurusu ağı. (Gram) Gk	Suya doymuş ağı. (Gram) Gd	Su içindeki ağı. (Gram) Gds	Birim hacim ağırlığı (g/cm ³) $\beta_h = Gk / (Gd - Gds)$
HARÇ	THA1	292,38	368,19	159,7	1,40
	THB'1	333,06	429,21	181,1	1,34
	THC2	311,09	397,20	169,20	1,36
	DHA'1	329,75	397,20	167,11	1,43
	DHC2	430,20	528,48	211,58	1,36
	DHD1	422,66	518,31	223,63	1,43
	KHA'2	438,07	526,08	244,10	1,55
	KHB'1	313,09	388,20	166,20	1,41
	KHC1	394,58	489,31	218,03	1,45
					ORTALAMA
DERE TAŞI	TDtA'1	936,60	939,88	583,80	2,63
	TDtB3	879,23	882,09	547,40	2,63
	TDtC'1	1015,22	1018,57	631,70	2,62
	DDtA'2	936,80	938,78	583,30	2,64
	DDtB'1	955,81	957,84	595,30	2,64
	DDtD2	946,93	948,77	589,63	2,64
					ORTALAMA
TUĞLA	KTA'1	373,41	440,04	217,80	1,68
	KTA'2	385,70	451,53	225,70	1,71
	KTB1	384,97	442,59	236,90	1,87
	KTB'2	379,91	441,71	221,60	1,73
	KTC'1	356,29	421,67	207,80	1,67
	KTC'2	380,91	445,58	226,30	1,74
					ORTALAMA

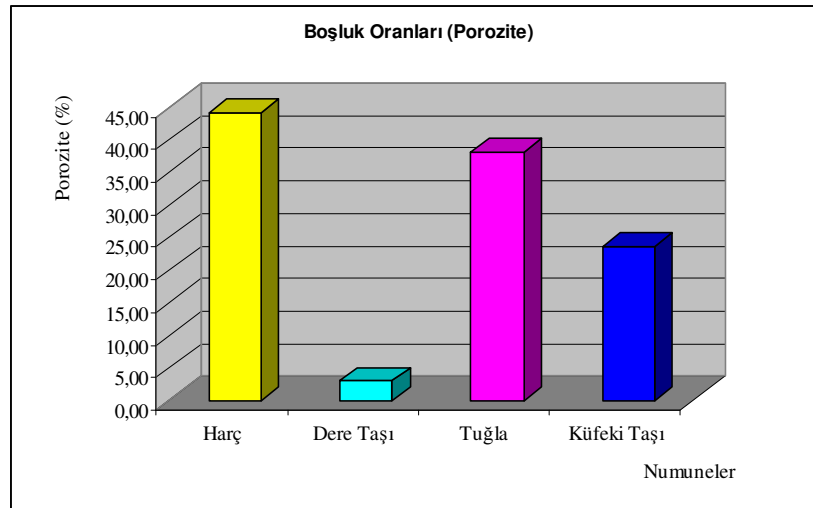
KÜFEKİ TAŞI	KKtA'1	582,38	606,66	343,90	2,22
	KKtA'2	619,52	645,37	367,30	2,23
	KKtB'2	460,86	481,31	271,90	2,20
	KKtB'3	416,12	445,18	230,2	1,94
	KKtC2	496,03	536,25	275,20	1,90
	KKtC3	508,12	549,18	290,7	1,97
					ORTALAMA

Doluluk ve boşluk oranları:

Ördekli Hamamı'nda kullanılan malzemelerin birim hacim ağırlıkları ve özgül kütleleri belirlendikten sonra malzemelerin doluluk ve boşluk oranları tespit edilerek Çizelge 3.4'e aktarılmıştır. Şekil 3.37'teki grafikte ise doluluk oranları gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 Ördekli Hamamından alınan numunelerin doluluk ve boşluk oranları

Numuneler	Birim hacim ağırlığı (g/cm ³) βh	Özgül kütle (g/cm ³) γ	Doluluk oranı (kompasite) $k=\beta h/\gamma$	Boşluk oranı (porozite) $p=1-k$
Harç	1,42	2,54	55,91	44,09
Dere Taşı	2,63	2,71	97,05	2,95
Tuğla	1,73	2,79	62,01	37,99
Küfeki Taşı	2,07	2,71	76,38	23,62



Şekil 3.37 Ördekli Hamamı'nda kullanılan malzemelerin boşluk oranları

b) Mekanik testler

b.1) Statik elastisite modülü deneyi

Çizelge 3.5'te Ördekli Hamamı'nda kullanılan malzemelerin statik elastiklik modülü deney sonuçları gösterilmiştir. Hamamda kullanılan tüm malzemeler için prizmatik numuneler kullanılmış olup, deretaşı ve küfeki taşında ayrıca silindirik numuneler için de statik elastisite modülü deneyleri yapılmıştır. Şekil 3.38'de harç malzemesi için ultrases geçiş süresinin tayini gösterilmiştir.

Çizelge 3.5.Ördekli hamamında kullanılan malzemelerin statik elastisite modülleri

Numune	Prizmatik / Silindirik Numune				Ses Geçiş Süresi (µsn)	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Statik Elastisite Modülü (N/mm ²)	
	a (mm)	b (mm)	Çap (Ø) mm	Boy (L) (mm)				
HARÇ	THA1	39,89	43,38		134,77	73,00	1,40	4779,73
	THB'1	39,93	40,25		160,44	86,00	1,34	4672,04
	THC2	36,05	43,58		147,48	80,00	1,36	4637,00
	DHA'1	38,65	40,28		156,75	80,00	1,43	5502,02
	DHC2	39,87	41,12		152,65	82,00	1,50	5185,67
	DHD1	40,54	38,76		148,67	79,00	1,50	5296,40
	KHA'2	40,67	42,92		164,86	81,00	1,55	6435,55
	KHB'1	39,82	40,56		144,32	74,00	1,41	5364,21
	KHC1	45,52	46,25		139,69	72,00	1,45	5474,98
	ORTALAMA							5260,85
DERE TAŞI	TDtA'3			72,19	143,62	44,00	2,64	28127,32
	TDtB2			55,05	128,18	42,00	2,64	24589,28
	TDtC'2			55,04	129,25	43,00	2,62	23671,48
	DDtA'1			72,04	143,96	40,00	2,63	34065,87
	DDtB'2			72,28	142,58	41,00	2,63	31805,72
	DDtD1			54,95	130,13	39,00	2,64	29392,03
	TDtA'1	40,93	42,27		156,51	43,00	2,65	35105,61
	TDtB3	42,93	44,52		158,37	44,00	2,64	34201,44
	TDtC'1	43,92	43,95		161,81	45,00	2,64	34134,19
	DDtA'2	40,54	42,60		161,22	44,00	2,64	35443,48

	DDtB'1	41,42	42,04		161,18	44,00	2,64	35425,90
	DDtD2	43,45	40,99		158,72	43,00	2,64	35969,16
	ORTALAMA							31827,62
TUĞLA	KTA'1	31,61	44,86		162,89	93,00	1,68	5154,50
	KTA'2	31,38	43,78		164,37	88,00	1,71	5958,65
	KTB1	33,89	41,20		171,98	86,00	1,87	7484,67
	KTB2	32,43	42,46		170,50	88,00	1,73	6479,24
	KTC'1	30,40	46,22		154,93	87,00	1,67	5283,07
	KTC'2	32,62	43,21		165,63	86,00	1,74	6443,24
	ORTALAMA							6133,90
KÜFEKİ TAŞI	KKtA'1			53,21	117,13	38,00	2,22	21057,96
	KKtB'2			53,09	128,93	41,00	2,23	22031,37
	KKtC'2			54,82	123,32	40,00	2,20	20917,93
	KKtA'2	43,93	40,61		164,74	52,00	1,94	19427,28
	KKtB'3	44,62	41,96		162,73	51,00	1,90	19345,46
	KKtC'3	44,22	40,97		123,98	41,00	1,97	17975,25
	ORTALAMA							20125,87



Şekil 3.38 Harç malzemesinin ultrasases geçiş süresinin tayini

b.2) Eğilme deneyi

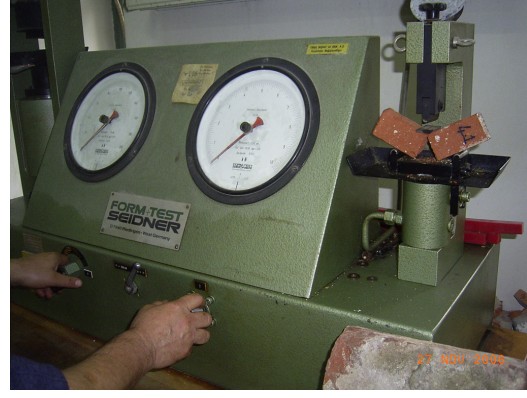
Eğilme deneyinde mesnet aralığı 100 mm olarak düzenlenmiştir. Çizelge 3.6'da Ördekli Hamamı'nda kullanılan prizmatik numunelerin eğilme dayanımları gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 3.39'te tuğla malzemesinin eğilme deneyi öncesindeki durumu, Şekil 3.40'da ise eğilme deneyi sonrasındaki hali gösterilmiştir.

Çizelge 3.6 Ördekli Hamamı'nda kullanılan malzemelerin eğilme dayanımları

Numune	Prizmatik Numune			Kırılma yükü (Pk) (N)	Eğilme dayanımı feğ (N/mm ²) (3xP _k xL)/ (2x _b xh ²)	
	b (mm)	h (mm)	Boy (L) (mm)			
HARÇ	THA1	39,89	43,38	100,00	1000,00	2,00
	THB'1	39,93	40,25	100,00	750,00	1,74
	THC2	36,05	43,58	100,00	900,00	1,97
	DHA'1	38,65	40,28	100,00	1200,00	2,87
	DHC2	39,87	41,12	100,00	1000,00	2,23
	DHD1	40,54	38,76	100,00	1200,00	2,96
	KHA'2	40,67	42,92	100,00	1750,00	3,50
	KHB'1	39,82	40,56	100,00	1150,00	2,63
	KHC1	45,52	46,25	100,00	1550,00	2,39
	ORTALAMA					2,48
DERE TAŞI	TDtA'1	40,93	42,27	100,00	7800,00	16,00
	TDtB3	42,93	44,52	100,00	7700,00	13,57
	TDtC'1	43,92	43,95	100,00	7450,00	13,17
	DDtA'2	40,54	42,60	100,00	7450,00	15,19
	DDtB'1	41,42	42,04	100,00	7250,00	14,86
	DDtD2	43,45	40,99	100,00	7900,00	16,23
	ORTALAMA					14,84
TUĞLA	KTA'1	31,61	44,86	100,00	1500,00	3,54
	KTA'2	31,38	43,78	100,00	1500,00	3,74
	KTb1	33,89	41,20	100,00	1550,00	4,04
	KTb2	32,43	42,46	100,00	1450,00	3,72
	KTC'1	30,40	46,22	100,00	1600,00	3,70
	KTC'2	32,62	43,21	100,00	1550,00	3,82
	ORTALAMA					3,76
KUFEKİ TAŞI	KKtA'2	43,93	40,61	100,00	3400,00	7,04
	KKtB'3	44,62	41,96	100,00	3450,00	6,59
	KKtC'3	44,22	40,97	100,00	3350,00	6,77
	ORTALAMA					6,80



Şekil 3.39 Tuğla numunesinin eğilme deneyi sırasındaki hali



Şekil 3.40 Tuğla numunesinin eğilme deneyi sonrasındaki hali

b.3) Basınç deneyi

Eğilme deneyi sonrasında elde edilen numuneler basınç testine tabi olmuşlardır. Basınç testi yapılırken numunelerin tabakalaşma yönleri de değiştirilerek testler yapılmıştır (Şekil 3.41,42). Çizelge 3.7’de küp basınç deney sonuçları sunulmuştur.

Çizelge 3.7 Ördekli Hamamı’nda kullanılan malzemelerin küp basınç mukavemetleri

Numune	Küp Numune		1. Numune Kırılma Yüğü (Pk1) (N)	2. Numune Kırılma Yüğü (Pk2) (N)	Basınç Dayanımı 1 fb1 (N/mm ²) Pk1/(40.a)	Basınç Dayanımı 2 fb1 (N/mm ²) Pk2/(40.b)	Ortalama Basınç Dayanımı fb (N/mm ²)	
	a (mm)	b (mm)						
HARÇ	THA1	39,89	43,38	9500,00	11100,00	5,95	6,40	6,18
	THB'1	39,93	40,25	7500,00	8100,00	4,70	5,03	4,86
	THC2	36,05	43,58	9000,00	7900,00	6,24	4,53	5,39
	DHA'1	38,65	40,28	11000,00	13500,00	7,12	8,38	7,75
	DHC2	39,87	41,12	10500,00	12000,00	6,58	7,30	6,94
	DHD1	40,54	38,76	13000,00	16000,00	8,02	10,32	9,17
	KHA'2	40,67	42,92	14000,00	22500,00	8,61	13,11	10,86
	KHB'1	39,82	40,56	12500,00	16000,00	7,85	9,86	8,85
	KHC1	45,52	46,25	16500,00	19000,00	9,06	10,27	9,67
ORTALAMA							7,74	
DERE TAŞI	TDtA'1	40,93	42,27	160000,00	325000,00	97,73	192,22	144,97
	TDtB3	42,93	44,52	170000,00	290000,00	99,00	162,85	130,92
	TDtC'1	43,92	43,95	160000,00	270000,00	91,07	153,58	122,33

	DDtA'2	40,54	42,60	190000,00	290000,00	117,17	170,19	143,68
	DDtB'1	41,42	42,04	160000,00	340000,00	96,57	202,19	149,38
	DDtD2	43,45	40,99	230000,00	350000,00	132,34	213,47	172,90
						ORTALAMA		144,03
TUĞLA	KTA'1	31,61	44,86	10000,00	15000,00	7,91	8,36	8,13
	KTA'2	31,38	43,78	12000,00	19000,00	9,56	10,85	10,20
	KTB1	33,89	41,20	14000,00	22000,00	10,33	13,35	11,84
	KTB2	32,43	42,46	13600,00	13700,00	10,48	8,07	9,28
	KTC'1	30,40	46,22	11000,00	13000,00	9,05	7,03	8,04
	KTC'2	32,62	43,21	12000,00	19500,00	9,20	11,28	10,24
							ORTALAMA	
KÜFEKİ TAŞI	KKtA'2	43,93	40,61	27000,00	32000,00	15,37	19,70	17,53
	KKtB'3	44,62	41,96	36000,00	67000,00	20,17	39,92	30,04
	KKtC'3	44,22	40,97	37000,00	47000,00	20,92	28,68	24,80
							ORTALAMA	



Şekil 3.41 Tuğla numunesinin küp basınç mukavemetinin belirlenmesi



Şekil 3.42 Harç numunesinin küp basınç mukavemetinin belirlenmesi

b.4) Silindir basınç mukavemeti

Tarihi yapıdan alınan taş örnekleri silindirik basınç mukavemetleri belirlenmek üzere test edilmiştir. Bu test yönteminde 50 mm ve 90 mm çaplarında ve değişik boylarda numuneler kullanılmıştır (Şekil 3.43,44). Deney sonuçları Çizelge 3.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.8 Ördekli Hamamı'nda kullanılan malzemelerin silindir basınç mukavemetleri

Numune	Çap (Ø) mm	Boy (L) (mm)	Kırılma yükü (P _k) N	Basınç dayanımı (f _b) N/mm ²	
KÜFEKİ TAŞI	DKtA'1	53,21	110,50	36000,00	16,19
	DKtA'2	53,09	107,09	38000,00	17,17
	DKtB'2	54,82	109,76	40000,00	16,95
	DKtB3	55,07	107,12	46000,00	19,31
	DKtC'2	55,04	106,52	48000,00	20,17
	DKtD1	55,12	106,83	44000,00	18,44
					18,04
DERE TAŞI	TDtA'3	72,19	143,62	440000,00	107,50
	TDtB2	55,05	108,29	340000,00	142,85
	TDtC'2	55,04	109,16	300000,00	126,09
	DDtA'1	72,04	145,96	640000,00	157,02
	DDtB'2	72,28	142,58	560000,00	136,48
	DDtD1	54,95	110,11	320000,00	134,94
					134,14



Şekil 3.43 Silindirik deretaşının basınç mukavemeti deneyi



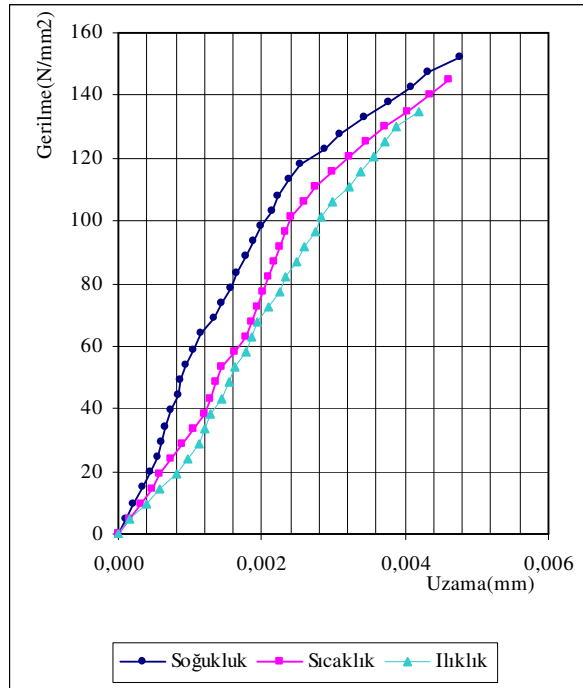
Şekil 3.44 Silindirik küfeki taşının basınç mukavemeti deneyi

b.5) Elastisite modülü deneyi

Bu deney yöntemi taş numuneler üzerinde yapılmıştır (Şekil 3.45,46). Numunelerin basınç etkisiyle düşey yer değiştirme oranları ölçülerek aşağıdaki grafikte (Şekil 3.47) gösterilmiştir.



Şekil 3.45,46 Taş numunelerin elastisite modülü deneyi

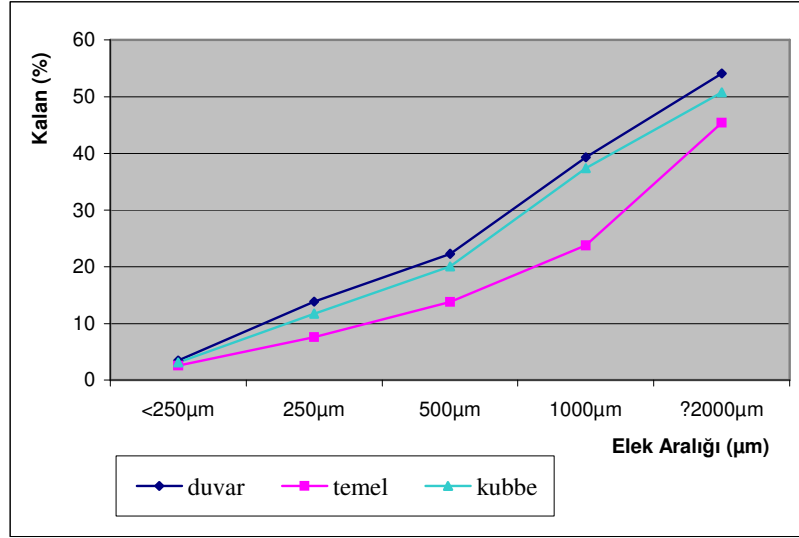


Şekil 3.47 Taş numunelerin gerilme-uzama grafiği

c) Kimyasal testler

c.1) Asit kaybı deneyi

Temel, duvar ve kubbelerden alınan harç örnekleri %10 hidroklorik asitle tepkimeye sokularak silikat agregalar elek analiziyle belirlenmiştir. Bu analizlerde de temelde kullanılan harçlardaki agregaların duvar ve kubbeye oranla daha ince taneli olduğu görülmektedir (Şekil 3.48).



Şekil 3.48 Temel, duvar ve kubbeden alınan numunelerin elek analizleri

Ördekli Hamamı'nda kullanılan harçlarda basınç dayanımı ile çekme dayanımı oranı yaklaşık 3/1 olarak hesaplanmıştır. Bu oran gevrek malzemeler için yüksek bir oran olup harcın bu özelliği sayesinde hamamda deprem sırasında oluşacak zararlı etkilerin azaltılmasına katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Bağlayıcı olarak horasan harcının kullanılması hamamın birçok bölgesinin ayakta kalmasında büyük rol oynamıştır.

c.2) Kızdırma kaybı deneyi

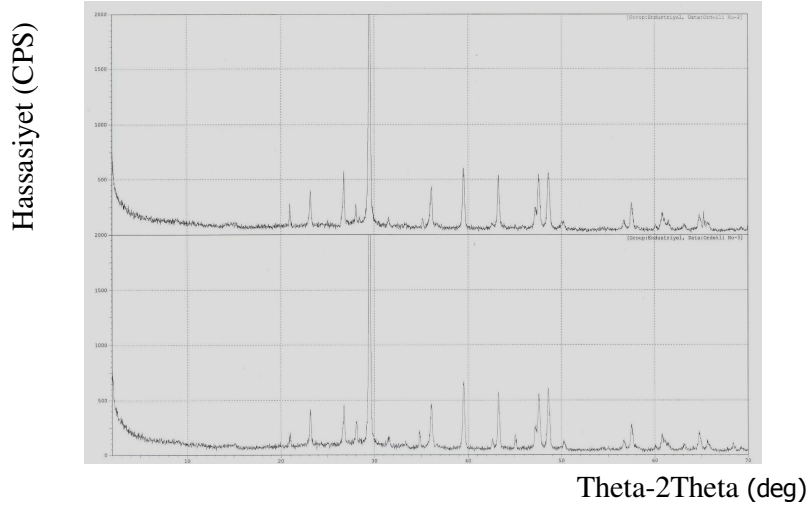
Harcın hidrolik özelliği, bünyesindeki CO_2/H_2O oranıyla tespit edilir. Kireç harçlarının hidrolik özelliği düşük CO_2/H_2O oranıyla anlaşılır. Bu oran yüksek oranda silikat içeren kireçlerdeki harçlarda 1 ile 10 arasındadır.

Sıcaklık ve soğukluk temellerinden alınan örneklerde H_2O kaybı %5-6, C_2O kaybı ise %17-18 civarında tespit edilmiştir. Bu oranlardan C_2O/H_2O oranının %3 civarında olduğu görülmektedir. Bu da puzolanik malzemelerle agrega arasında hidrolik bir reaksiyonun oluştuğunu göstermektedir. Duvarlardan alınan örneklerde de H_2O kaybı

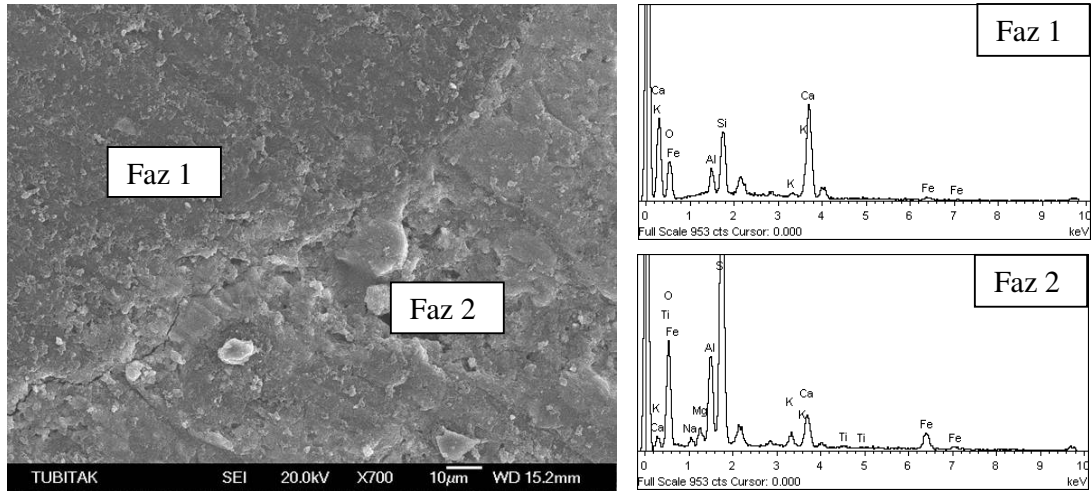
%4-5, C_2O kaybı ise %20-21 civarında tespit edilmiştir, C_2O/H_2O oranının da %5 civarında olduğu görülmektedir. Bu sonuçların yani C_2O/H_2O oranının %10'dan küçük olması tarihi yapıda kullanılan harcın puzolanik özellik gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu özellik yapıya plastiklik kazandırdığı için deprem yükleri altında yapının daha iyi direnç göstermesini sağlayacaktır. Yapının 14. yüzyıldan günümüze gelebilmesinde bu özelliğinin büyük katkısı olduğu düşünülmektedir.

c.3) XRD-SEM testleri

XRD testi ve SEM-EDX analizleri neticesinde yapıda kullanılan harç malzemesinin çoğunlukla $CaCO_3$, SiO_2 ve feldispar elementlerinden oluştuğu ve bunların dışında da daha düşük oranlı olarak Albite, MgO , Al_2O_3 , KCl , Fe elementlerinin var olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.49,50).



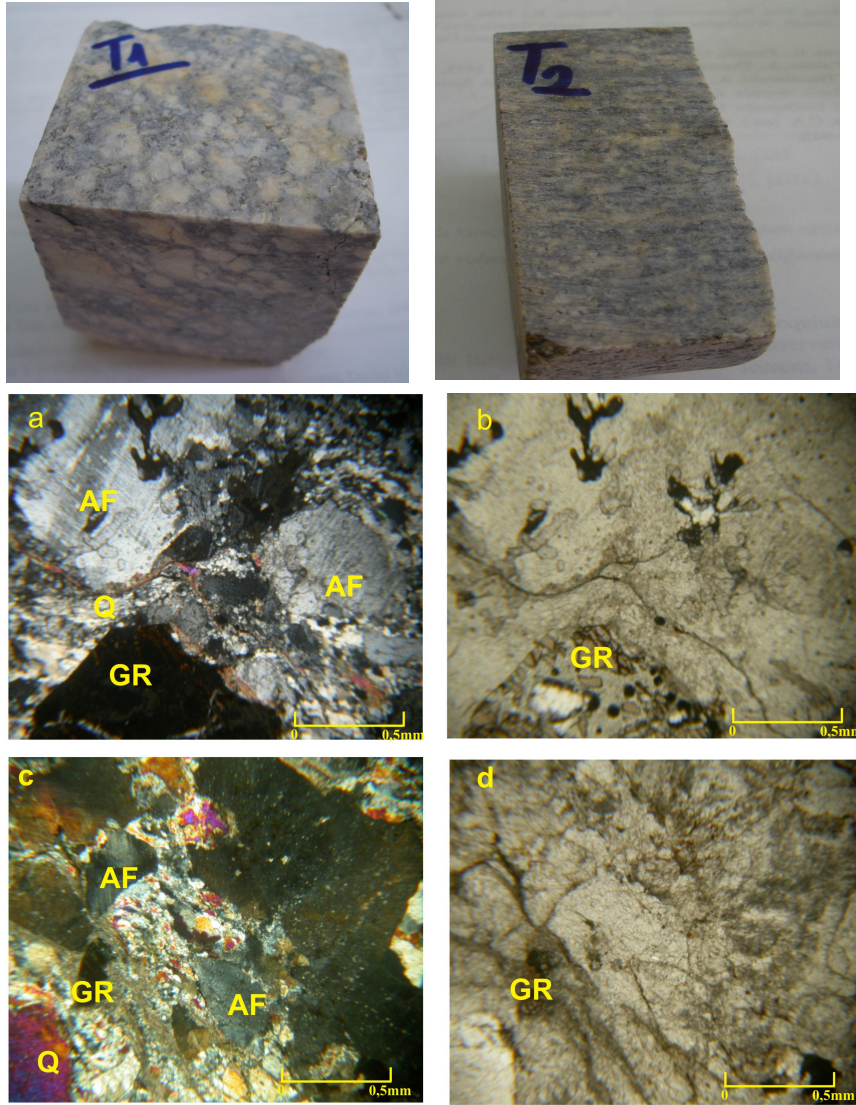
Şekil 3.49 Harcın genel XRD diyagramı



Şekil 3.50 Harcın elektron mikroskopik görüntüsü ve elementel kompozisyonu

c.4) Petrografik analizler

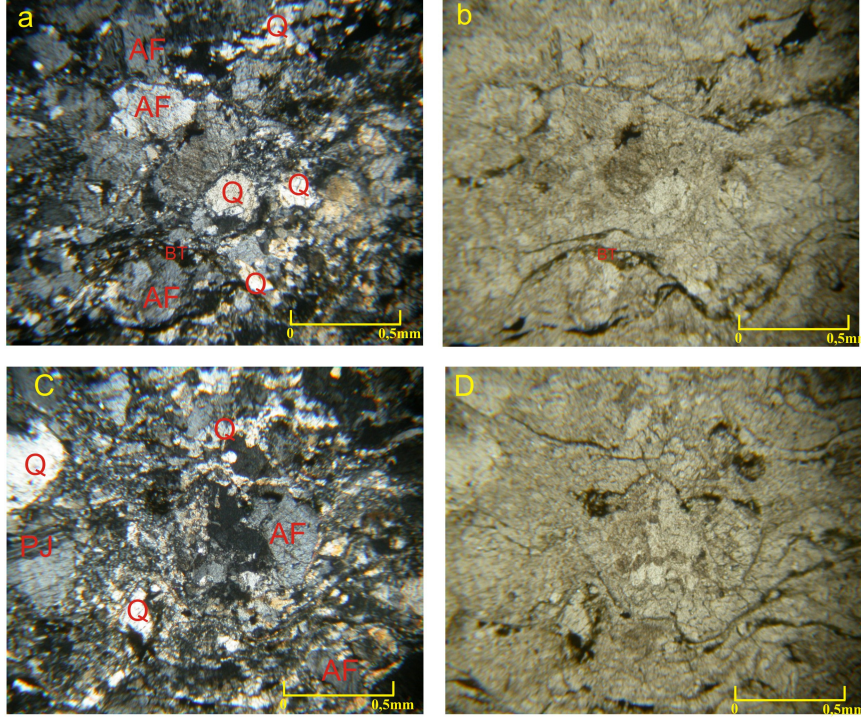
Hem temel hem de duvardan alınan örneklerde yapılan petrografik incelemelerde kullanılan malzemelerin mağmatik bir kayacın metamorfizması ile oluştuğu, metamorfizma etkisiyle kuvars minerallerinde rekristalizasyonun görüldüğu, kayaçta metamorfik kayaçlarda indeks mineral olan granatların varlığı görülmüştür. Ayrıca mikro ölçekte kıvrımlanmalarda hakimdir. Kayaçta felsik (açık renkli) minerallerin hakim olması soncunda kayacın bir metagranitoid kayası olduğu görülmüştür (Şekil 3.51,52). Bu taşların Bursa Kentinin güneyinde yer alan Uludağ'ın (rakım: 2550 m.) eteklerinden kullanılmak üzere getirildiği düşünölmektedir.



Şekil 3.51 T1 numaralı örneğin ince kesit görüntüleri.

a,c çift nikol ve b,d tek nikol görüntüsü,

AF : Alkali feldispat (Genelde mikroklin), Q : Kuvars, GR : Granat



Şekil 3.52 T2 numaralı örneğin ince kesit görüntüleri.

a, c, çift nikol ve b,d, tek nikol görüntüsü

AF : Alkali feldispat , PJ : Plajoklas ,Q : Kuvars, BT : Biyotit

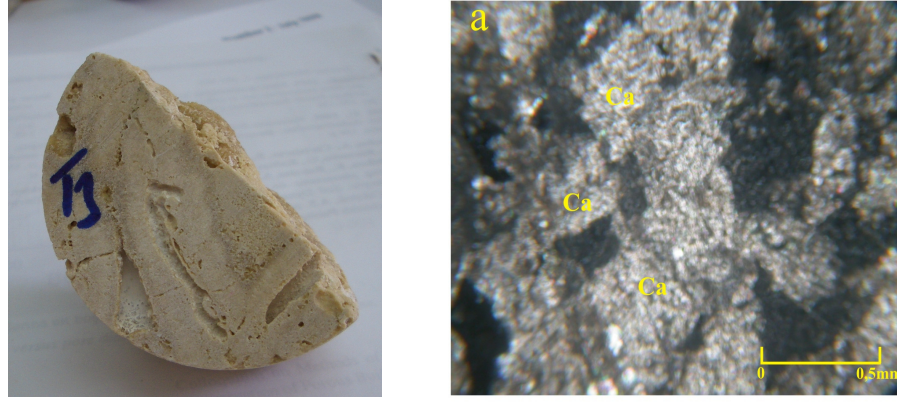
Petrografik analizler yapıdan alınan küfeki taşı örnekleri için de yapılmıştır. Küfeki taşı kolay işlenebilir özelliğinden dolayı yapıda iç ve dış duvarlarda kaplama elemanı, kapı girişlerinde süsleme elemanları olarak tercih edilmiştir.

Küfeki taşı atmosfer koşullarında bekletildiğinde bünyesine CO_2 alarak hızlı karbonatlaşma süreci ile boşluklarının bir bölümü Kalsiyum bikarbonat $Ca(HCO_3)_2$ ile dolar, porozitesi azalır dayanımı ve birim hacim ağırlığı artarken, su emmesi de azalır. Söz konusu “karbonatlaşma” sonucunda basınç dayanımındaki artışın gelişimi beton ile büyük benzerlik göstermektedir (Arıoğlu ve ark,2005). Yapının iç ve dış duvarlarından +500mm ila +5000mm yüksekliklerinden küfeki taşları silindirik ve prizmatik olarak alınmıştır.

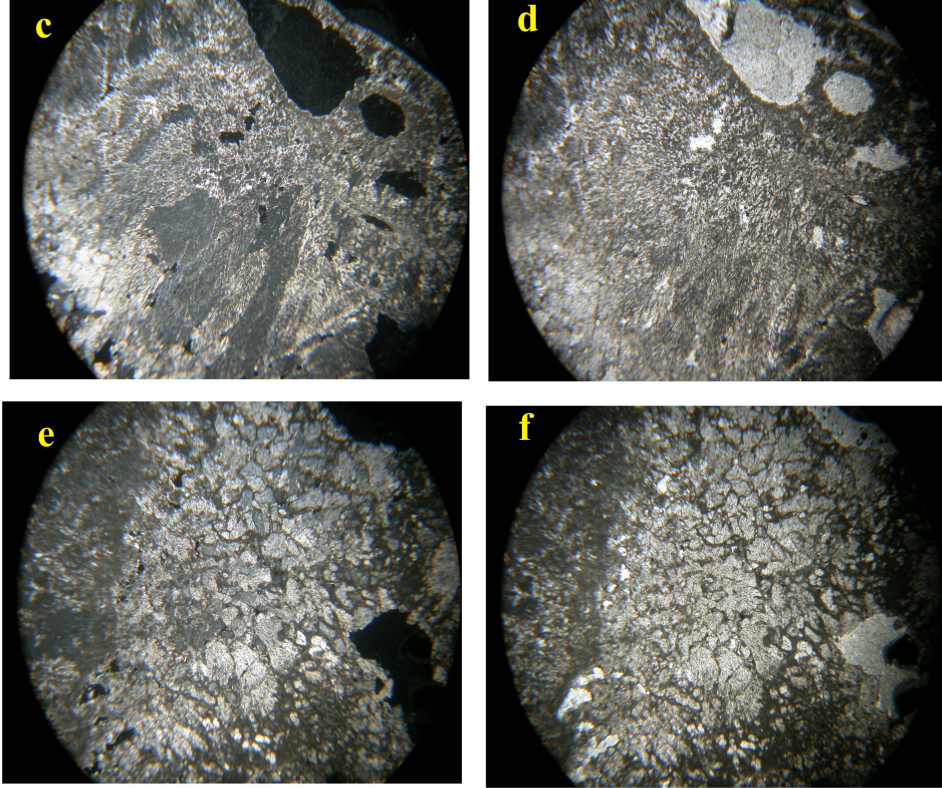
Yapının dış cephesinde kullanılan küfeki taşları içerde kullanılanlara göre hem fiziksel hem de mekanik özellikler açısından daha kötü sonuçlar vermiştir. En büyük sebebinin dış hava koşulları nedeniyle donma-çözülme etkilerine maruz kalması ve boşluk oranlarının artması şeklinde olduğu düşünülmektedir. Yapısında su mevcuttur,

bu suyun bir bölümü uçarken bir bölümü de dış çeperlerden içeriye doğru zamanla gelişen kalınlıkta karbonatlaşmanın sonucunda oluşan katman içinde hapsolmaktadır. Bünyede suyun varlığı dinamik yükler altında yapının taşıma gücüne önemli ilave katkı getirmektedir (Arioğlu ve ark,2005).

Yapılan petrografik analizlerde küfeki taşı fosilli kireçtaşı olarak tanımlanmıştır. İnce kesit alanında Bryzo fosil kavkuları rastlanmıştır ve bu kavkuların kalsit dolguları ile doldurulduğu görülmüştür (Şekil 3.53,54).



Şekil 3.53 T3 numaralı örneğin ölçekli ince kesit görüntüleri. Ca : Kalsit



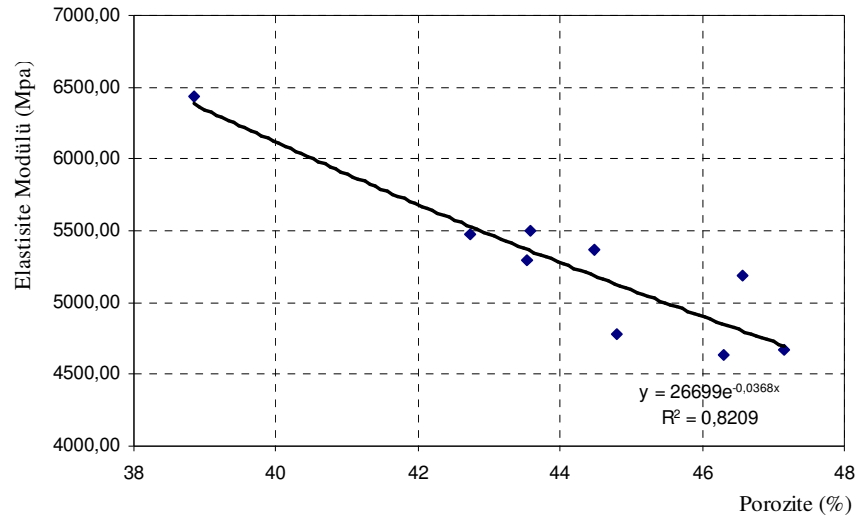
Şekil 3.54 T3 numaralı örneğin ölçeksiz ince kesit görüntüleri. c ,e çift nikol ve d,f tek nikol görüntüsü

3.1.3.2. Deneysel sonuçlarının değerlendirilmesi

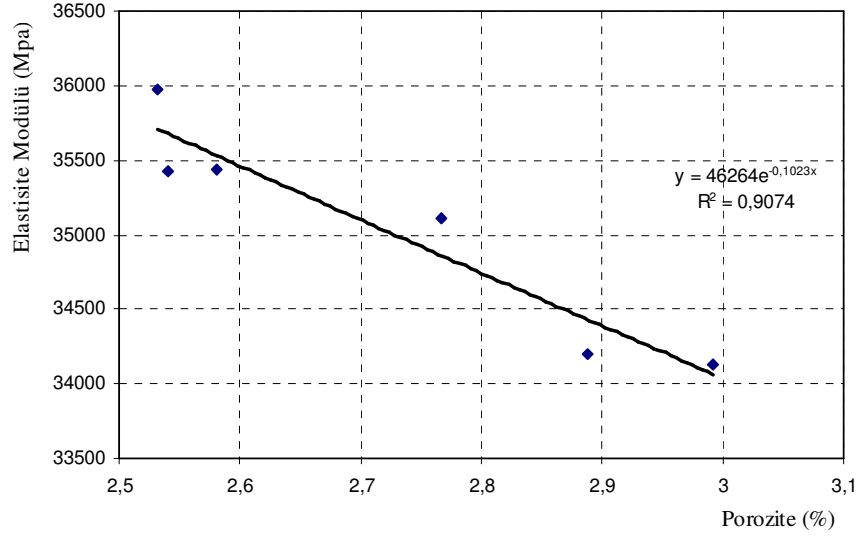
Ördekli Hamamı'ndan alınan numuneler üzerinde yapılan fiziksel ve mekanik testlerin doğruluğunu ve birbirleriyle olan ilişkisini belirlemek amacıyla testler arasındaki grafiksel ilişki incelenmiştir. Karşılaştırılan özellikler şunlardır:

- Elastisite modülü – porozite ilişkisi
- Elastisite modülü – basınç mukavemeti ilişkisi
- Elastisite modülü – ses geçiş hızı ilişkisi
- Ses geçiş hızı – porozite ilişkisi
- Çekme mukavemeti – porozite ilişkisi
- Basınç mukavemeti – porozite ilişkisi
- Basınç mukavemeti – çekme mukavemeti ilişkisi
- Elastisite modülü – porozite (boşluk oranı) ilişkisi

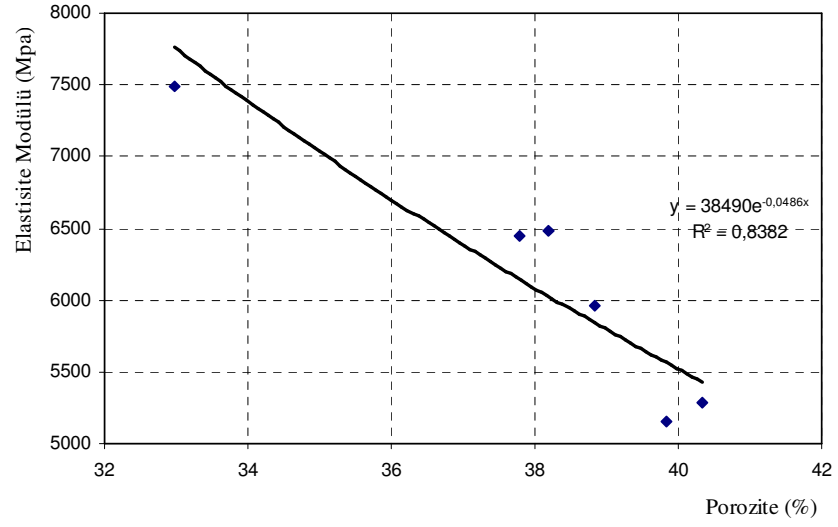
Ördekli Hamamı'nda kullanılan harç, dere taşı ve tuğla malzemeleri için yapılan deneyler sonucunda elastisite modülü ile boşluk oranları arasında ters bir orantının olduğu, boşluk oranı düşük olan malzemelerin elastisite modüllerinin yüksek olduğu görülmektedir. Deney sonuçları arasındaki ilişkide ise doğruluk oranı en yüksek olan numunenin dere taşı olduğu, bunun da taşın az boşluklu olmasından kaynaklandığı belirtilebilir. Aşağıdaki grafiklerde sırasıyla harç, dere taşı ve tuğla malzemelerinin elastisite – porozite oranları gösterilmiştir (Şekil 3.55-57).



Şekil 3.55 Harç malzemesinin elastisite mod. – porozite grafiği



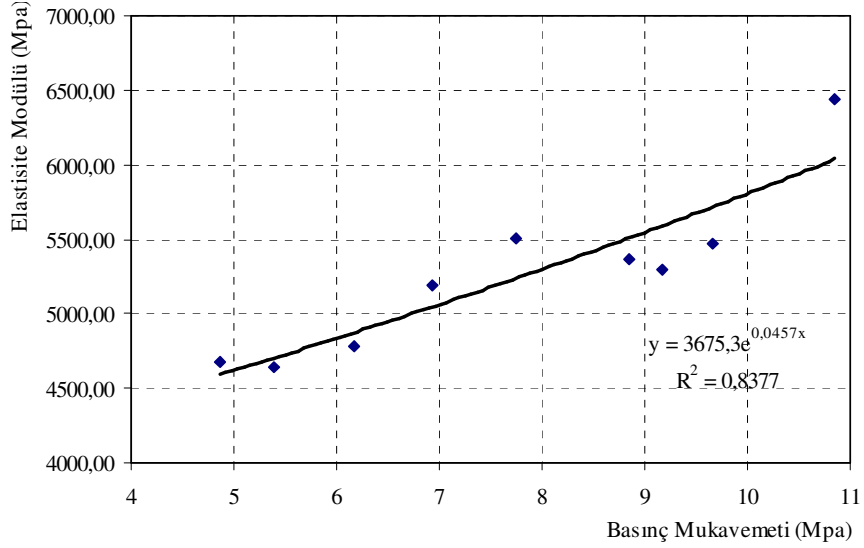
Şekil 3.56 Dere taşı malzemesinin elastisite mod. – porozite grafiği



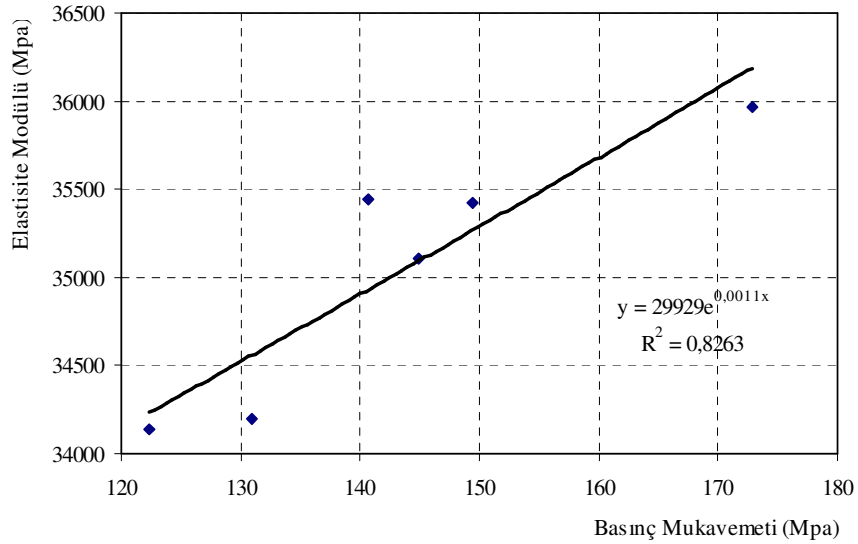
Şekil 3.57 Tuğla malzemesinin elastisite mod. – porozite grafiği

- Elastisite modülü – basınç mukavemeti ilişkisi

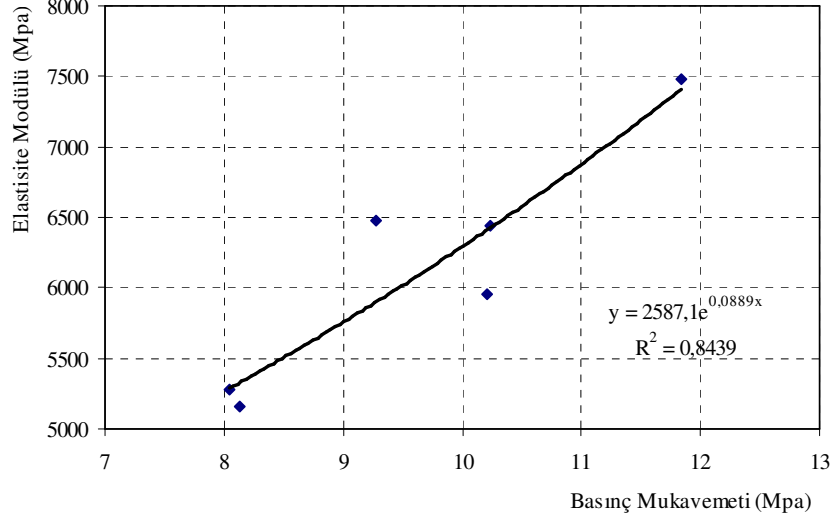
Yapılan deney çalışmaları, elastisite modülü ile basınç mukavemeti arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermiştir. aşağıdaki şekillerde (şekil 3.58-60) sırasıyla harç, dere taşı ve tuğla malzemelerinin elastisite modülü – basınç mukavemeti grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.58 Harç malzemesinin elastisite mod. – basınç mukavemeti grafiği



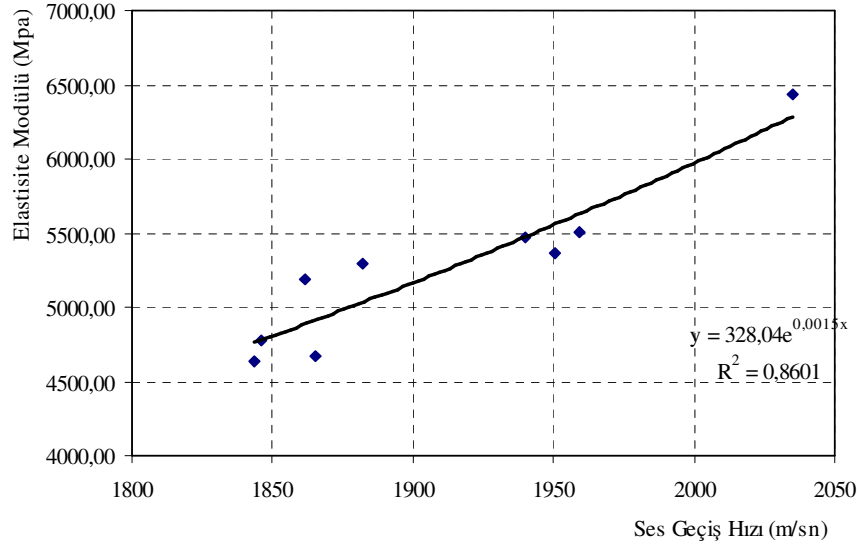
Şekil 3.59 Dere taşı malzemesinin elastisite mod. – basınç mukavemeti grafiği



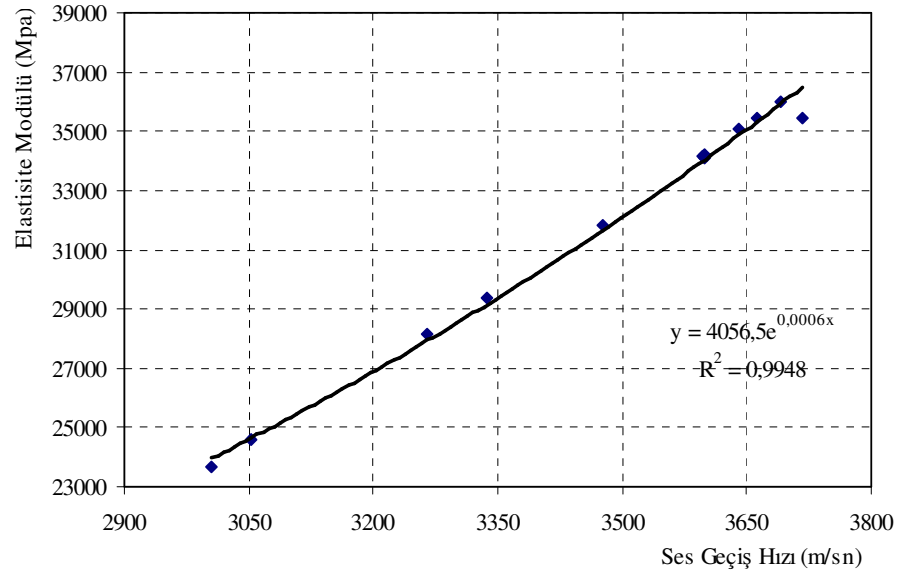
Şekil 3.60 Tuğla malzemesinin elastisite mod. – basınç mukavemeti grafiği

- Elastisite modülü – ses geçiş hızı ilişkisi

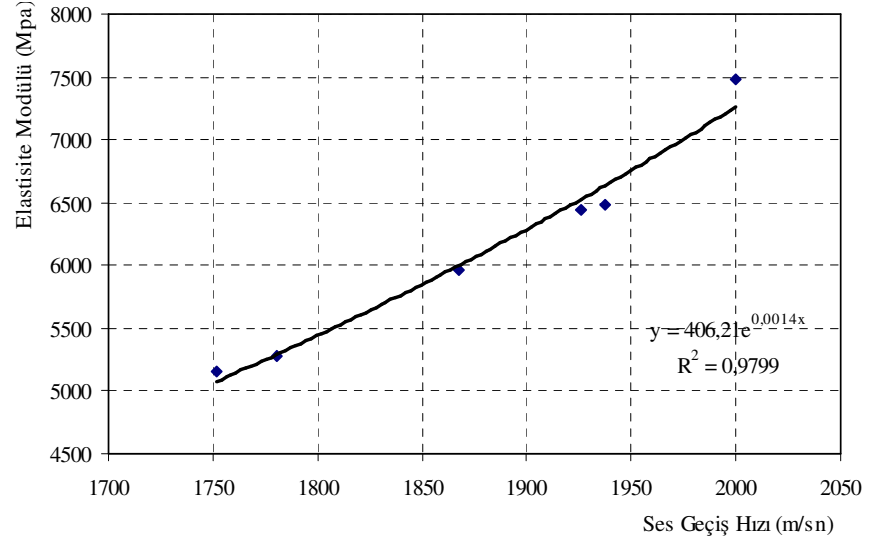
Elastisite modülü, ses geçiş hızının karesi ile orantılı olduğu Bölüm 2’de yer alan denklem 2.7’de gösterilmiştir. Deneysel çalışmalarda da ses geçiş hızı yüksek olan malzemelerinin düşük olanlara göre elastisite modüllerinin de yüksek olduğu görülmüştür. Bu oran yüksek doğruluk oranıyla taş numunesinde gözlenmiştir. Şekil 3.61-63) sırasıyla harç, dere taşı ve tuğla malzemesi için elastisite modülü – ses geçiş hızı ilişkilerini grafiksel olarak göstermektedir.



Şekil 3.61 Harç malzemesinin elastisite Mod. – ses geçiş hızı Grafiği



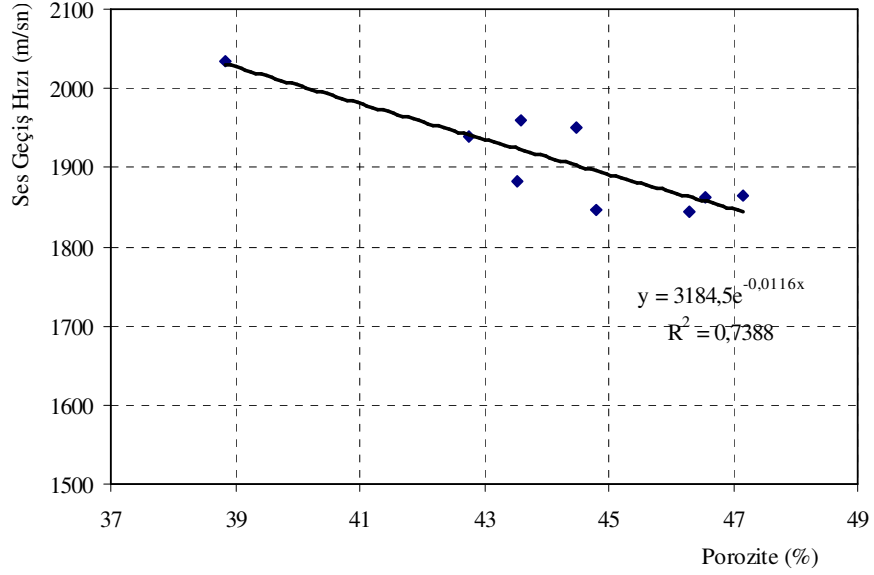
şekil 3.62 Dere taşı malzemesinin elastisite mod. – ses geçiş hızı grafiği



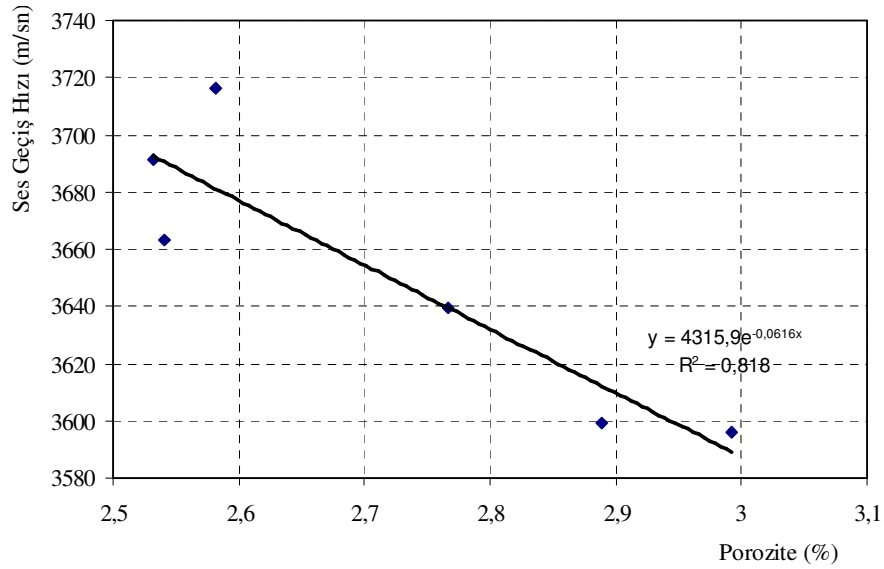
şekil 3.63 Tuğla malzemesinin elastisite mod. – ses geçiş hızı grafiği

- Ses geçiş hızı – porozite ilişkisi

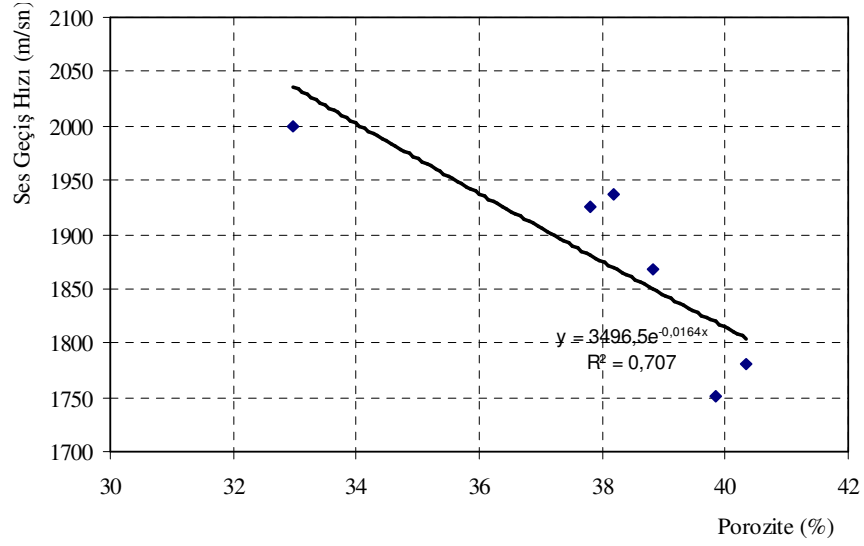
Porozitesi (boşluk oranı) yuksek olan malzemelerde ses geçiş hızının duşuk olması beklenen bir sonuçtur. Aşağıdaki şekillerde de (şekil 3.64-66) görüleceği üzere harç, dere taşı ve tuğla malzemesinin ses geçiş hızı – porozite grafikleri arasında ters bir orantı mevcuttur.



şekil 3.64 Harç malzemesinin ses geçiş hızı – porozite grafiği



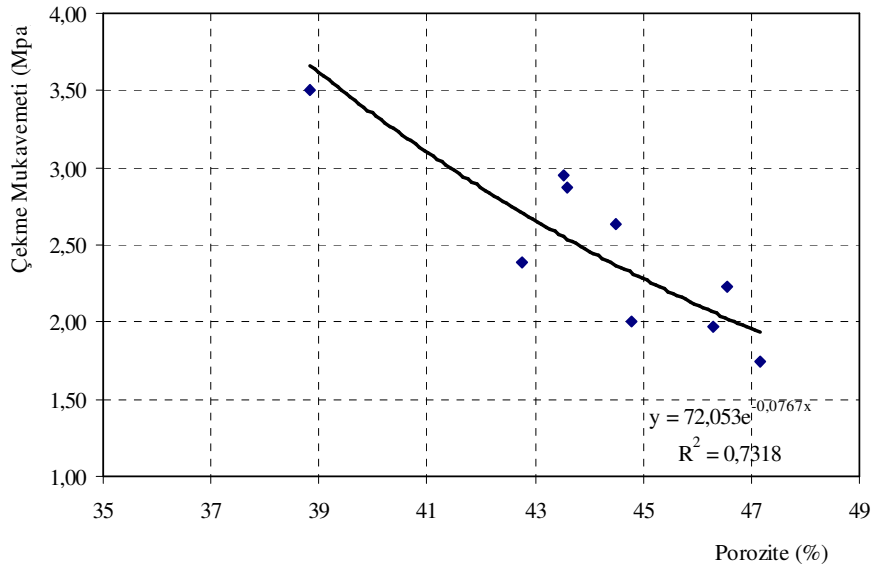
şekil 3.65 Dere taşı malzemesinin ses geçiş hızı – porozite grafiği



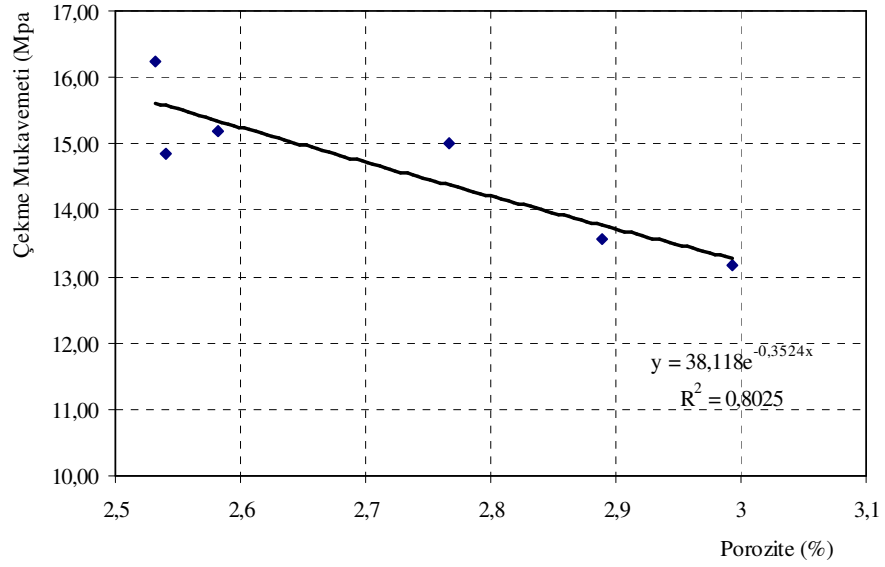
Şekil 3.66 Tuğla malzemesinin ses geçiş hızı – porozite grafiği

- Çekme mukavemeti – porozite ilişkisi

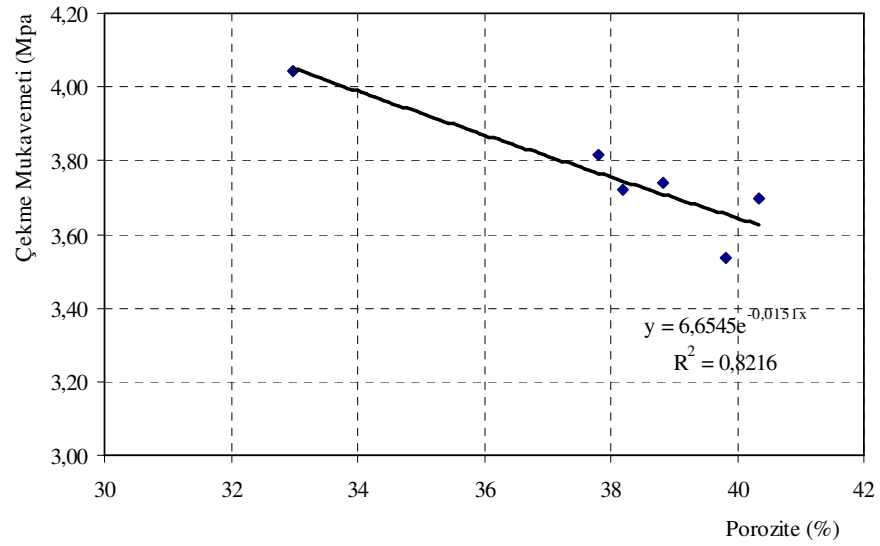
Çekme Mukavemeti ve porozite (boşluk oranı) arasında ters bir orantı bulunmaktadır. Porozitesi yüksek olan malzemelerin çekme mukavemetlerinin de düşük olduğu yapılan testlerde gözlenmiştir. Şekil 3.67-69 sırasıyla harç, dere taşı ve tuğla malzemeleri için çekme mukavemeti – porozite ilişkisini göstermektedir.



Şekil 3.67 Harç malzemesinin çekme mukavemeti – porozite grafiği



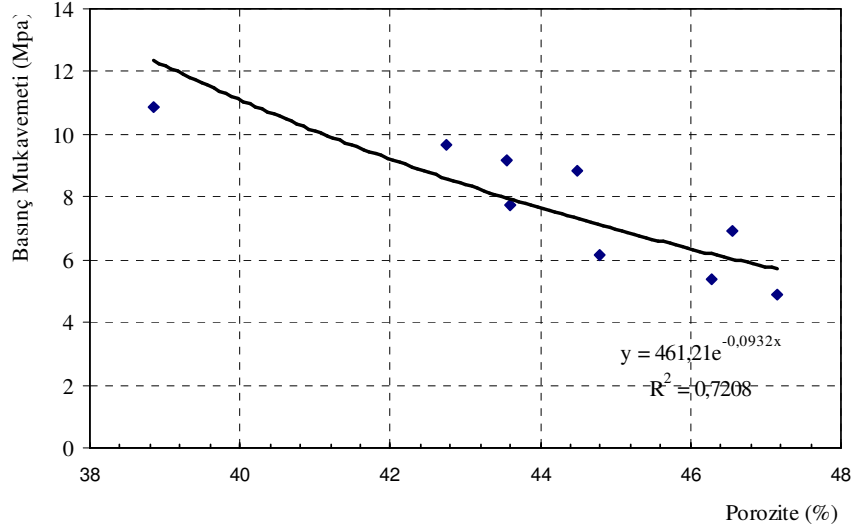
Şekil 3.68 Dere taşı malzemesinin çekme mukavemeti – porozite grafiği



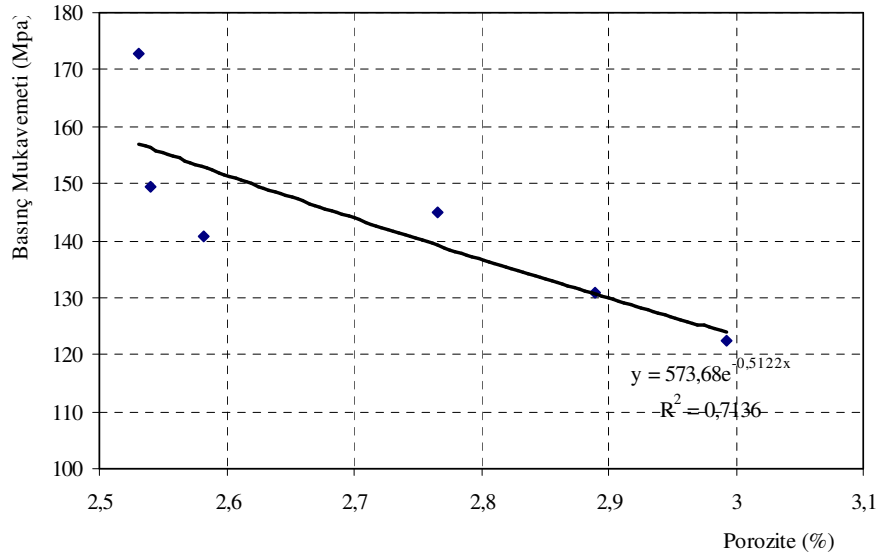
Şekil 3.69 Tuğla malzemesinin çekme mukavemeti – porozite grafiği

- Basınç mukavemeti – porozite ilişkisi

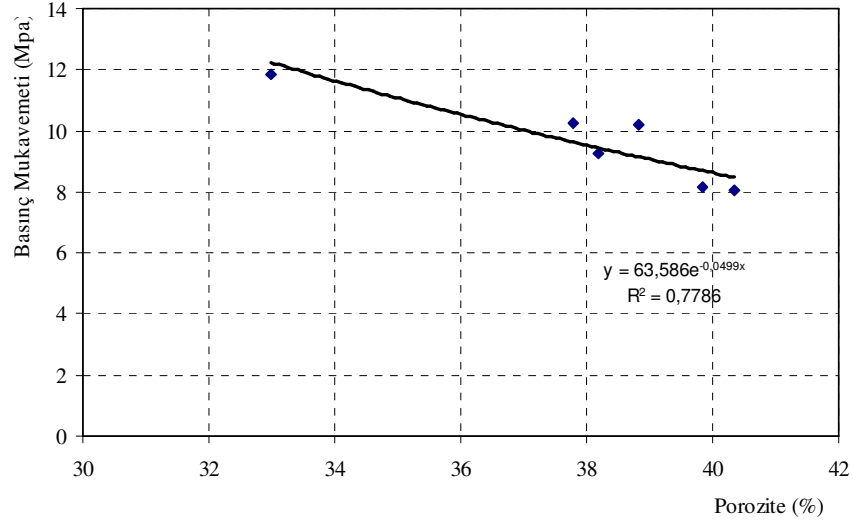
Çekme mukavemetinde olduğu gibi basınç mukavemeti düşük olan malzemelerin porozitelerinin yüksek olduğu gözlenmiştir. Aşağıdaki şekillerde (Şekil 3.70-72) harç, dere taşı ve tuğla malzemelerinin basınç mukavemeti – porozite grafikleri ve aralarındaki bağıntılar gösterilmiştir.



Şekil 3.70 Harç malzemesinin basınç mukavemeti – porozite grafiği



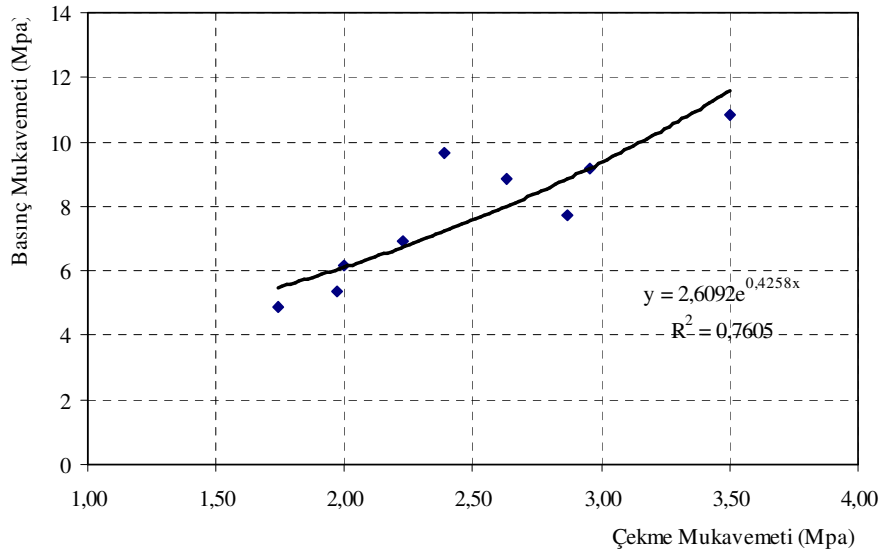
Şekil 3.71 Dere taşı malzemesinin basınç mukavemeti – porozite grafiği



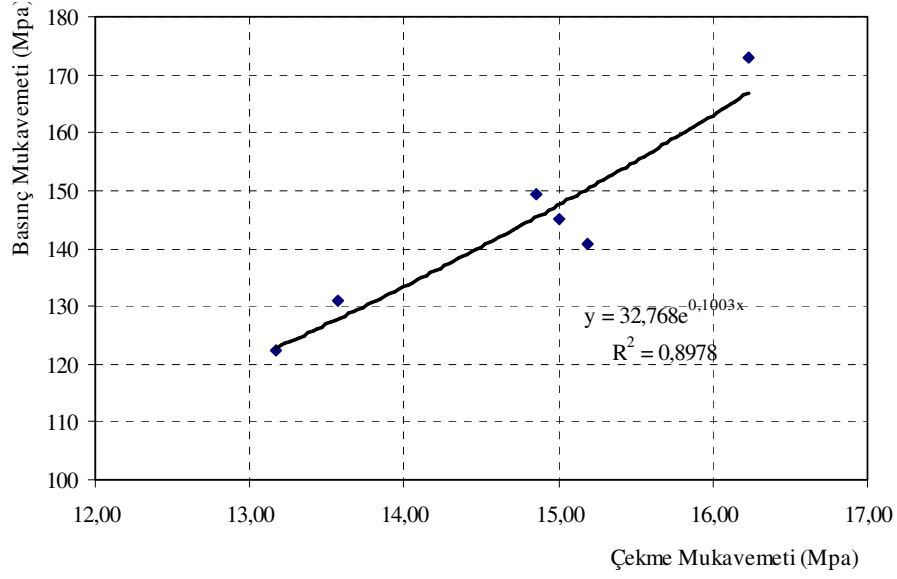
Şekil 3.72 Tuğla malzemesinin basınç mukavemeti – porozite grafiği

- Basınç mukavemeti – çekme mukavemeti ilişkisi

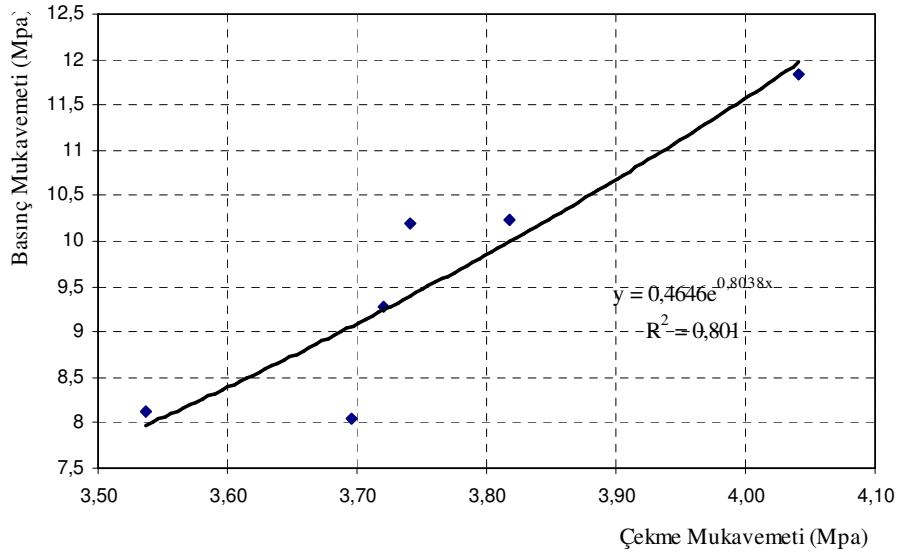
Yapılan deneysel çalışmalarla harç ve tuğla malzemesinin basınç mukavemeti ile çekme mukavemeti arasındaki oranın yaklaşık olarak 3 kat olduğu, dere taşında ise bu oranın yaklaşık 10 kat civarında olduğu tespit edilmiştir. Aşağıda Şekil 3.73-75'te harç, dere taşı ve tuğla malzemesinin basınç mukavemeti – çekme mukavemeti grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.73 Harç malzemesinin Basınç – Çekme Mukavemeti Grafiği



Şekil 3.74 Dere taşı malzemesinin basınç – çekme mukavemeti grafiği

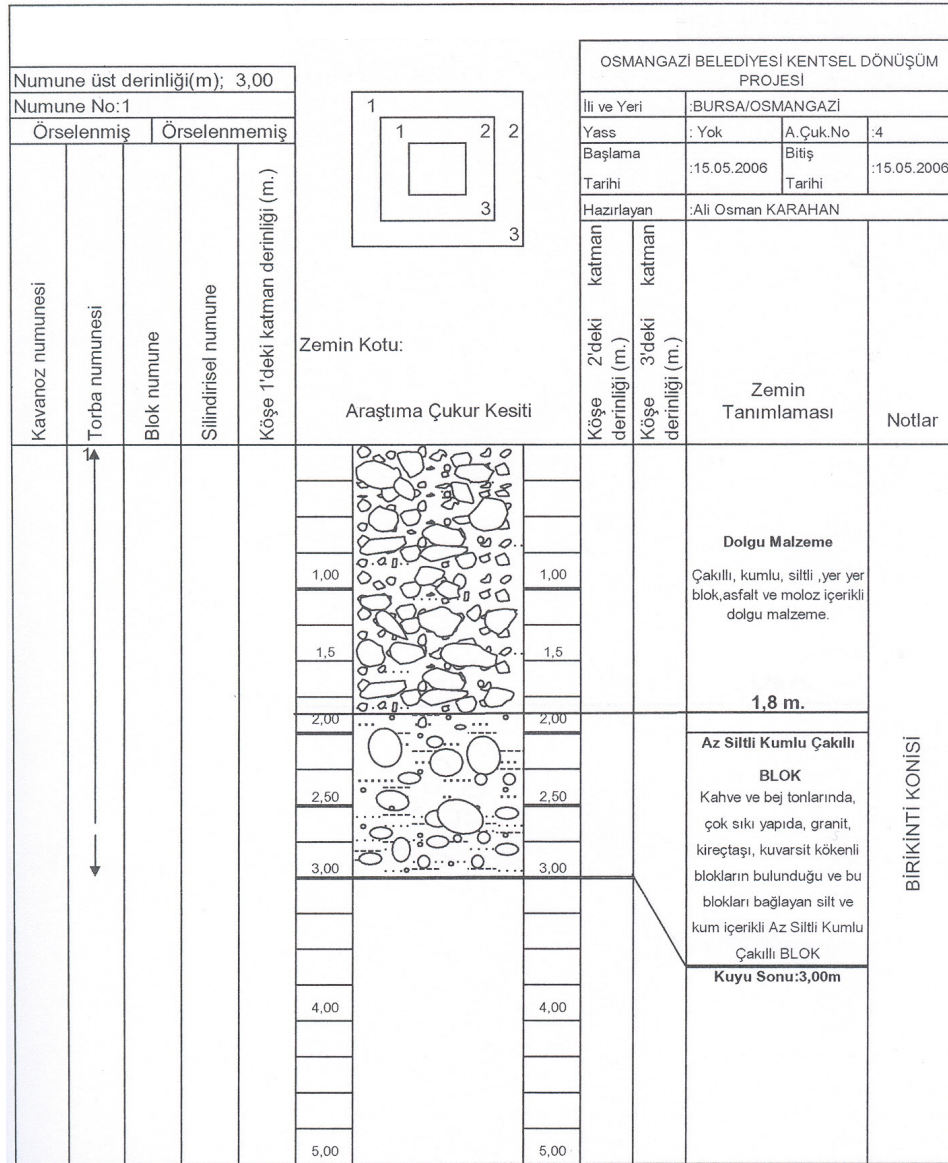


Şekil 3.75 Tuğla malzemesinin basınç – çekme mukavemeti grafiği

Horasan harcı ve tuğla malzemesinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin birbirleriyle olan benzerliği, bu iki malzemenin kompozit olarak da birbirleriyle uyumlu olmasını sağlamaktadır. Aralarındaki aderans ve kuvvetli bir bağ oluşumu da bu özelliğe eklenince tarihi yapılarda iki malzemenin birlikte kullanımının neden tercih edildiğini göstermektedir.

3.1.4.Yapının temel zemini özellikleri

Osmangazi Belediyesi Kentsel Dönüşüm Projesi kapsamında Ördekli Hamamı yakın bölgesinde zemin özelliklerinin belirlenmesi amacıyla araştırma çukurları ve zemin sondajları Crealius D-500 tipi rotary sondaj makinesi ile yapılmıştır. Sondaj sırasında her 1.50 m.de bir standart penetrasyon deneyi (SPT) yapılmış, yapılan SPT deneylerinde kohezyonlu zeminlerin kıvamı, kohezyonsuz zeminlerin relatif sıklığı belirlenmiştir Bu çalışma kapsamında hamama en yakın bölgede açılan araştırma çukuru (Şekil 3.76) ve sondaj kuyusuna ait zemin profilleri ele alınmıştır (Şekil 3.77).



Şekil 3.76 Araştırma çukuru kesiti (Bursa Büyükşehir Belediyesi,2006)

Etüt yapılan sahada kuyu bloğu, araştırma çukuru arazi çizelgesi ve deney sonuçları baz alındığında zemin yüzeyinden itibaren kalınlığı genelde 1.20-3.50 m. dolayında olan dolgu tabakası bulunmaktadır ve 3.5 m. ile 10m. derinliğe kadar çakıllı, kumlu, siltli blok yer almaktadır.

DERİNLİK / DEPTH (m)		STANDART PENETRASYON DENEYİ / STANDARD PENETRATION TEST				JEOTEKNİK TANIMLAMA / GEOTECHNICAL-DESCRIPTION		PROFİL / PROFILE	DAYANIKLILIK / STRENGTH	AYRISMA / WEATHERING	KIRILMA / FRACTURE / 50 CM.	KABOT / % / COMPRESSION / %	RPD / %
		DARBE SAYISI / NUMBER OF BLOWS				GRAFIK / GRAPH							
		0-15 CM	15-30 CM	30-45 CM	N	0 10 20 30 40 50							
SONDAJ YERİ / BORING LOCATION :		Muhafaza Borusu Derinliği / Casing Depth :											
KİLOMETRE / KILOMETER :		Baş. Ve Bitiş Tarihi / Start and Finish Date : 01.06.2006											
SONDAJ DERİNLİĞİ / BORING DEEPHT :		10.00 m.											
SONDAJ KOTU / ELEVATION :		Koordinat Coordinate (N-S) X :											
YERALTISUYU / GRANDWATER :		YOK											
		Koordinat Coordinate (E-W) Y :											
0.00								Dolgu Malzemesi					
1.00								Çakıllı, kumlu yer yer beton,asfalt ve moloz içerikli dolgu malzemesi					
2.00	SPT-1	1.50-1.68	32	50/3	>50			1.20 m.					
3.00								Kumlu Çakıllı BLOK					
3.00	SPT-2	3.00-3.04	50/4		50			Birikinti konisi birimleri içerisinde kalmaktadır.Kahve ve bej tonlarda, çok sulu yapıda, granit, kireçtaşı, kuvarsit kökenli blokların bulunduğu ve bu bloklarla bağlayan silt, kum,pakal ve çok ince kil arabahtı içerikli Kumlu Çakıllı BLOK.Çakıl boyutu max: 4 cm. olup iyi boylanmıştır. Max blok boyutu 50 cm.					
4.00								5.00 m.					
5.00	SPT-3	4.50-4.64	50/14		50			Siltli Kumlu BLOK					
6.00								Birikinti konisi birimleri içerisinde yer almaktadır. Kahve ve bej tonlarda, çok sıkı yapıda, plastik olmayan (nonplastik), yer yer 3-10 cm. kalınlıklarda köstü boylanmış kum banları ile az oranda ince daneli birimler (silt) içermektedir. Granit, kireçtaşı, kuvarsit kökenli bloklar bulunmaktadır.Bu bloklar max: 60 cm. boyutlarındadır.					
7.00													
8.00	SPT-5	7.50-7.60	41	50/5	>50								
9.00													
9.00	SPT-6	9.00-9.02	50/2		50			Kuyu Sonu: 10.00 m.					
10.00													

Şekil 3.77 Sondaj kuyusu kesiti (Bursa Büyükşehir Belediyesi, 2006)

Açılan sondaj kuyusunda yeraltısı seviyesi gözlemleri yapılmış ve sondaj kuyusu içinde yer altı suyuna rastlanılmamıştır. Zemin emniyet gerilmesi olarak 1.80 kg/cm² alınması önerilmektedir.

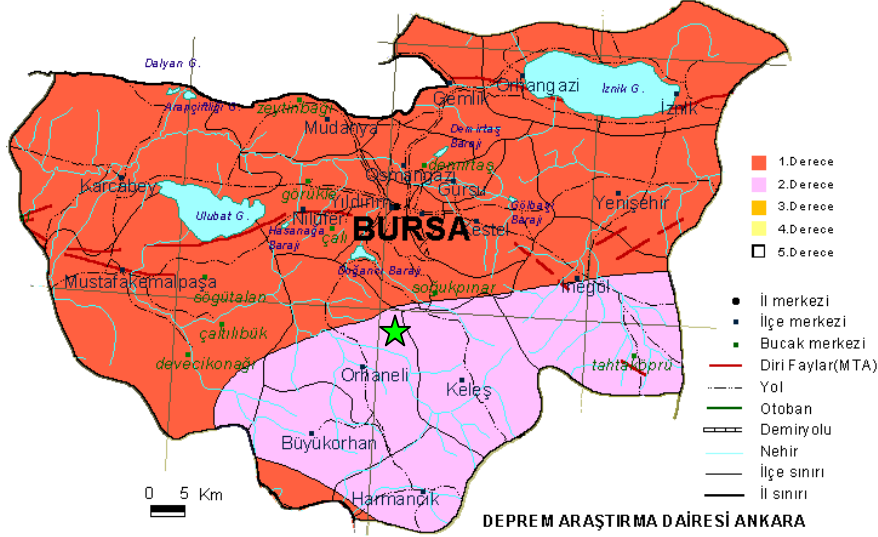
Ayrıca:

Zemin sınıfı Z/2 ve zemin grubu B/2 – C/2 olarak belirlenmiştir.

Yatak katsayısı= 2500 t/m³ ve sıvılaşıma potansiyelinin bulunmadığı tespit edilmiştir.

3.1.5. Bölgenin sismik özellikleri

Bursa İl merkezi Şekil 3.78'de görüldüğü gibi I. Derece deprem bölgesinde yer almaktadır. Bölgede tarih boyunca birçok büyük deprem meydana gelmiştir. Aşağıda Çizelge 3.9'da 1900-2008 yılları arasında Bursa civarında meydana gelen depremler gösterilmiştir.



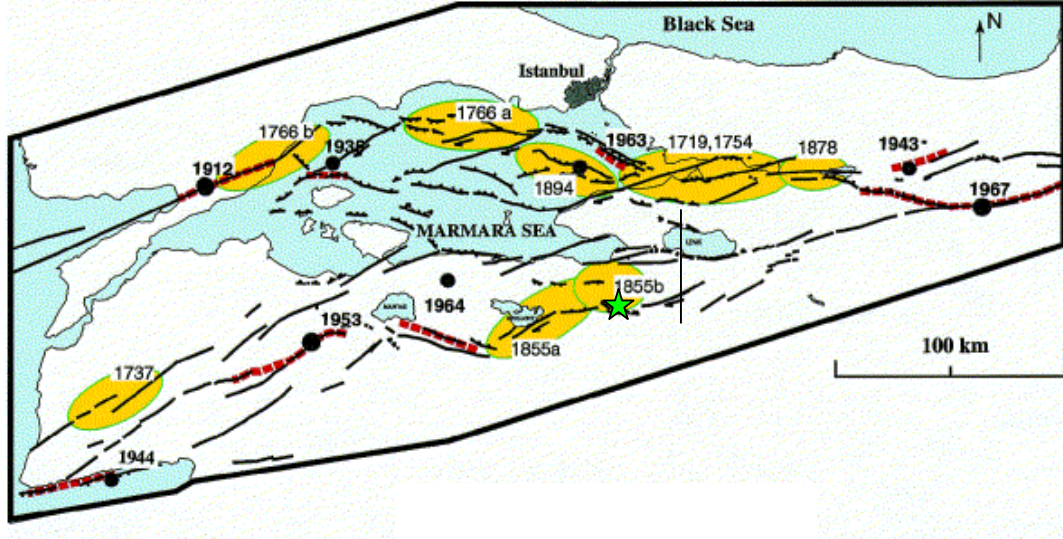
Şekil 3.78 Türkiye deprem bölgeleri haritası (illere ait haritalar)

<http://www.deprem.gov.tr/linkhart.htm>

Çizelge 3.9 Bursa civarında 1900 - 2004 Yılları Arasında Can Kaybı ve Hasara Neden Olmuş Önemli Depremler ($M_s > 5.0$) (<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo>)

Tarih	Saat (T.S.)	Yer	Şiddet	Mag M_s	Can Kaybı	Hasarlı Bina
04.01.1935	16:41	Erdek (BALIKESİR)	VIII	6.4	5	600
15.11.1942	19:01	Bigadiç (BALIKESİR)	VIII	6.1	16	2187
06.10.1944	04:34	Ayvalık (BALIKESİR)	IX	6.8	30	5500
18.09.1963	18:58	Çınarcık (İSTANBUL)	VIII	6.3	1	230
06.10.1964	16:31	Manyas (BALIKESİR)	IX	7.0	23	5398
22.07.1967	18:56	Mudurnu(ADAPAZARI)	IX	6.8	89	7116
05.07.1983	15:01	Biga (ÇANAKKALE)	VIII	6.1	3	85
17.08.1999	03:01	Gölcük (KOCAELİ)	X	7.8	17480	73342

Şekil 3.79’da Marmara Bölgesinde yaklaşık 300 yıllık bir sürede meydana gelen depremler ve fay hatları yer almaktadır.



Şekil 3.79 Marmara Bölgesi aktif fayları ve tarihi depremler (Barka, 1997 modifiye edilmiştir)

Siyah ince çizgiler: jeoloji ve jeofizikçiler tarafından oluşturulan aktif faylar.

Kırmızı çizgiler: 20. yüzyılda oluşan depremlere ait yüzey kırılmaları

Sarı çizgiler: 1700-1900 yılları arasında oluşan tarihi depremlerin tahmini kırılma alanları

Bölge tarihsel dönemde birçok hasar verici depremlerle karşı karşıya kalmıştır. Bunlardan en önemlileri 1855 yılında ard arda meydana gelen iki depremdir. İstanbul Başbakanlık Arşivi irade-i dahiliye tasnifinde 20363 numarada kayıtlı olan Bursa vali vekili ve Bursa meclisi reisi Esseyit Hafız Ömer ile Bursa kadısı ve dokuz meclis üyesinin mühürlerini bastığı 3 Şubat 1855 tarihli raporda 1855 depreminin 31 Ocak 1855 Çarşamba günü saat 12.00 civarında gök gürültülü şiddetli bir yağmur sonrasında saat 15.15’de “şiddetli ve dehşetli” bir deprem olduğu belirtilmiştir (Oğuzoğlu, 2001).

Deprem yaklaşık 50 sn. sürmüş ve 300 kişi yaşamını kaybetmiştir. Gün bitimine kadar 5 artçı şok olduğu belirtilmiştir. Bu deprem İnegöl; Yenişehir, Kütahya, Afyonkarahisar ve Akşehir, Gelibolu, Trakya, İstanbul ve Anadolu'nun önemli bir kısmında hissedilmiştir (Gündoğdu, 2007).

1855 tarihinde Bursa ve çevresinde 18 Nisan günü bir başka deprem daha olmuştur. Bu deprem yarattığı sarsıntı yapıları zarar vermekten çok sonrasında çıkan yangın nedeniyle kent merkezi ve çevresini etkilediği bilinmektedir (Oğuzoğlu, 2001).

Gece 01:10 da halkı uykusundan uyandıran depremden yaklaşık 2 saat sonra saat 03.00'te 30 saniye süren ve 5-10 kat büyük olduğu belirtilen ana şok meydana gelmiştir. Her iki depremde de kükürt kokusu Bursa'da yaygın şekilde hissedilmiştir. Deprem sırasında fırtınadaki gemi gibi sallanıldığı ifade edilmiş, birçok insan şehrin battığı hissine kapılmıştır. Depremde büyük Ölçüde panik oluşmuş, yangın ve hasardan dolayı Bursa içinde yaklaşık 1300 kişi dışında ise 300 kişi yaşamını kaybetmiştir. Sonraki 15 saat içinde 150 artçı hissedilmiştir. Diğer taraftan çok sayıda hamam, han, çarşı ile Bursa Kalesi de yıkılmıştır. Ayrıca yerlerde çatlak ve yarıkların oluştuğu, suların fışkırdığı ve Uludağ'dan yoğun bir şekilde kaya düşmelerinin olduğu belirtilmektedir. Nüfusu 35 000 olan Bursa'da 220 can kaybı olmuş, 3300 ev ve dükkan ile cami, kilise, ipek imalathanesi zarar görmüştür. Ahşap evler depreme dayanmıştır, ancak çıkan yangınlar bu konutları da yakmıştır. Deprem, Atina, Balıkesir Yozgat ve Rodos'ta hissedilmiştir (Gündoğdu, 2007).

Bunlardan $M_s = 6.4$ maximum şiddeti VIII olan 18 Eylül 1963 Çınarcık Depreminde, Bursa'da hafif hasar meydana geldiği belirtilmiştir. $M_s = 6.8$ büyüklüğündeki 6 Ekim 1964 Manyas depremi yakın çevrede etkili olmuş, ve maximum şiddeti IX olan bu depremde 30 kişi yaşamını kaybetmiştir. Büyüklüğü $M_w = 7.6$ maksimum şiddeti $I_0 = XI$ olan 17 Ağustos 1999 (Gündoğdu, 2007) Gölcük depremi Bursa ve çevresinde oldukça güçlü hissedilmiş, 68 konut ağır, 453 orta ve 1008 hafif hasara uğramış, Bursa merkezde 1, Gemlik'de 3, İnegöl'de 1 Mudanya'da 3, Orhangazi ve Kestel'de 1 kişi olmak üzere toplam 10 kişi hayatını kaybetmiştir (Özmen 2000).

Bursa ve yakın çevresi yıkıcı nitelikteki depremlerin etki alanı içindedir, eldeki tarihsel verilere bakıldığında Bursa Fayı olarak adlandırılan kırık üzerinde oluştuğu anlaşılan 1855 depremleri Bursa' yi etkileyen son büyük depremlerdir. Oluşan hasar ve etki alanlarına bakıldığında bu depremlerin 7 dolaylarında olduğu anlaşılmaktadır, özellikle 11 Nisan da öncü şokuyla oluşan depremin Bursa'ya yakın ve 7 büyüklüğünün üzerinde olduğu düşünülmektedir.

3.2. Ördekli Hamamının Yapı Güvenliğinin Belirlenmesi İçin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi

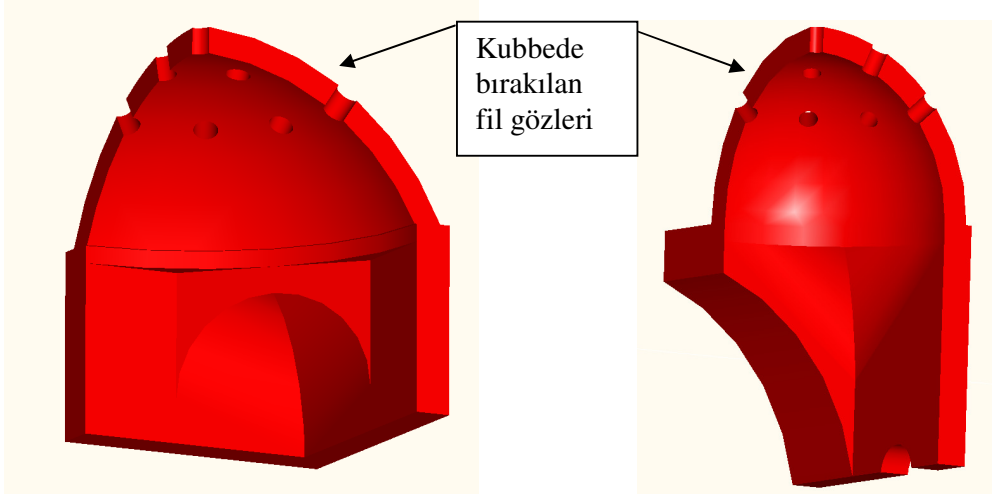
3.2.1. Tarihi yapının üç boyutlu modelinin oluşturulması

Yapının üç boyutlu modelini oluşturmak için Key Creator yazılım programından yararlanılmıştır. Üç boyutlu CAD (Computer Aided Design-Bilgisayar Destekli Tasarım) modeli oluşturulurken tarihi yapının rölöve, restitüsyon ve restorasyon projeleri kullanılmış, kesit, plan ve ölçüler birebir olarak bu projeler yardımıyla modele aktarılmıştır. Üç boyutlu model oluşturulurken yapının planı esas alınmış ve mekanlar doğu-batı yönünde sırasıyla yapılmaya başlanmıştır. Öncelikle yapının külhan bölümü, daha sonra su deposu, halvetler, sıcaklıklar, ılıkliklar ve soğukluklar tamamlanmıştır. Kadınlar ve erkeklere ait kısımlar plan ve kesitlerine göre boyutlandırılmışlardır. Yapının duvarları, tonozları, kemerleri, trompları, pandantifleri ölçülerine göre yapılarak yapının orijinali ile 3d çiziminin birebir aynı olması sağlanmıştır (Şekil 3.80-3.91). Yapılan her mekan ve yapı elemanı için ayrı bir tabaka oluşturulmuştur. Böylece yapının istenilen elemanını seçme özelliği sayesinde daha hassas çalışma olanağı sağlanmıştır.

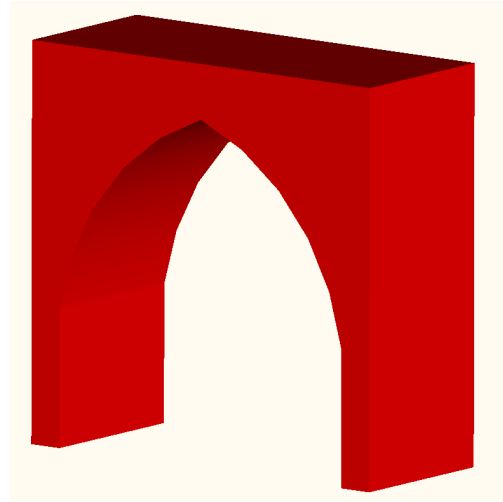
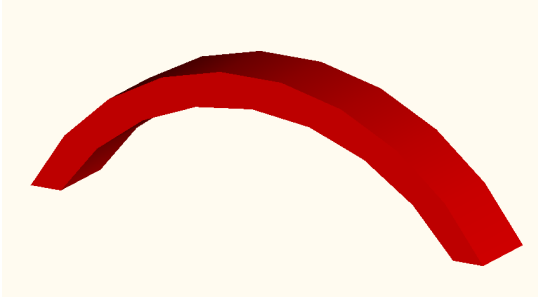
Tüm yapının kaba çizimleri bittikten sonra yine projesine uygun olarak kapılar, pencereler, kubbe delikleri, bacalar açılarak yapının 3d modeli oluşturulmuştur.

Tüm çizimler oluşturulurken ayrıca yapının değişik bölümlerinden çekilen fotoğraflarla da yapılan 3d modelin doğruluğu kontrol edilmiştir. Özellikle kesiti alınmamış yarı yıkık haldeki bölgelerin oluşturulmasında bu husus büyük kolaylık sağlamıştır.

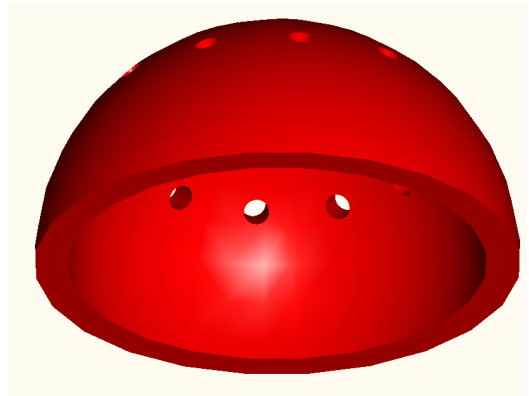
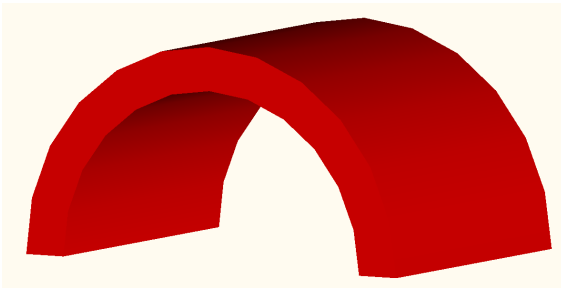
Son olarak yapının 3d modeli oluşturulduktan sonra yapıya ait restitüsyon, röleve ve restorasyon projelerindeki kesit, görünüş ve planlarla 3d CAD modelin kesit, görünüş ve planları karşılaştırılarak eksik kalan hususlar tamamlanmıştır. Yapının CAD modeli oluşturularak yapının statik ve dinamik analiz çalışmalarında kullanılacak olan model hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.92-3.98). Bu çalışmanın hassas bir şekilde yapılması analiz hesaplarında yapı davranışının birebir gözlenmesini sağlayacaktır.



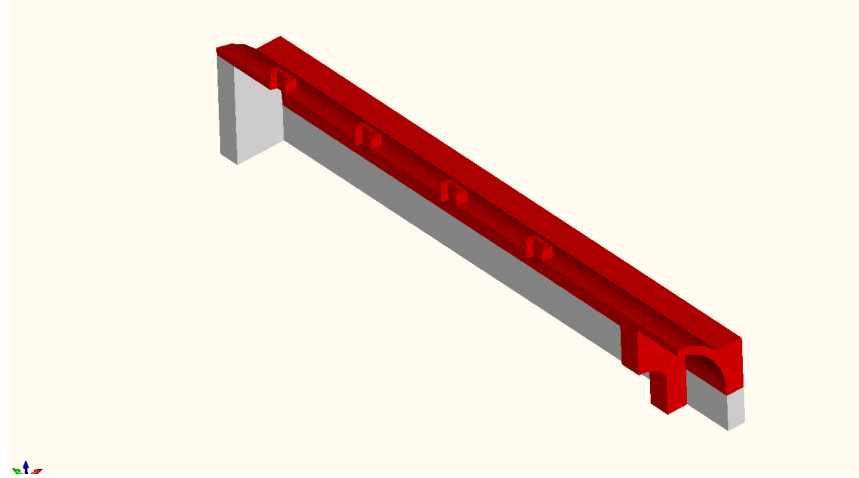
Şekil 3.80 Kubbeye geçiş elemanlarının modellenmesi tromp ve pendentif detayı



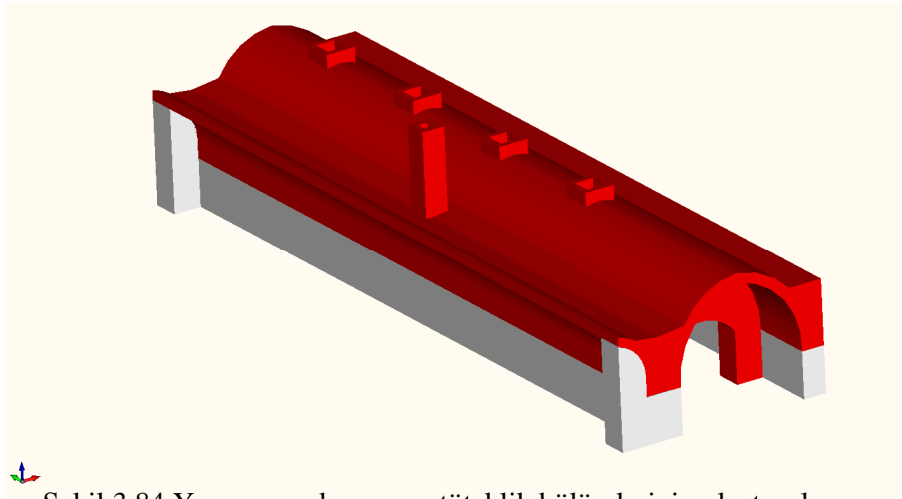
Şekil 3.81 Kemer ve tonozun modellenmesi



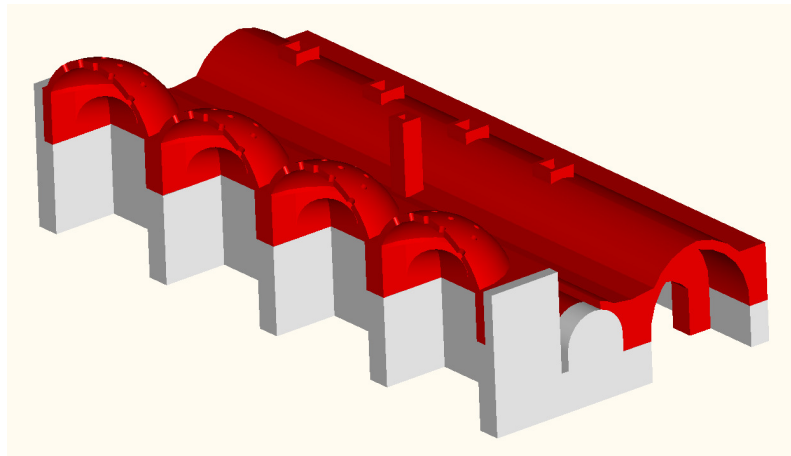
Şekil 3.82 Üst örtülerin modellenmesi tonoz ve kubbe detayı



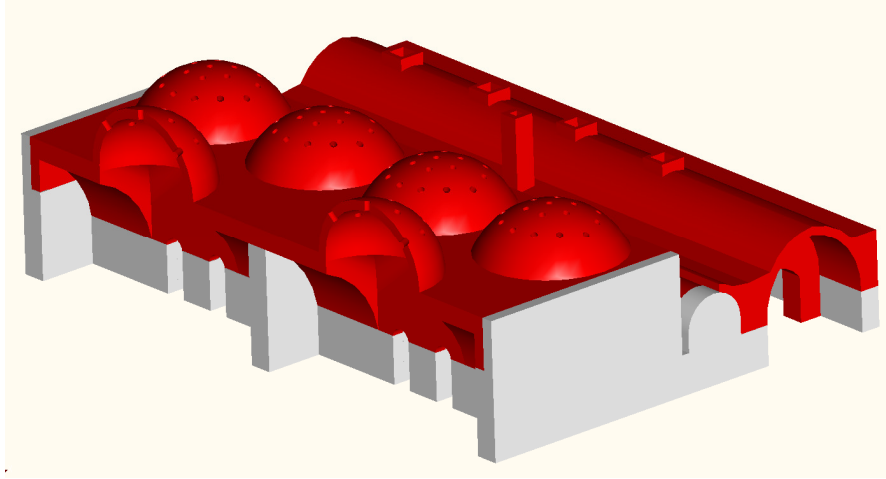
Şekil 3.83 Yapının külhan bölümünün oluşturulması



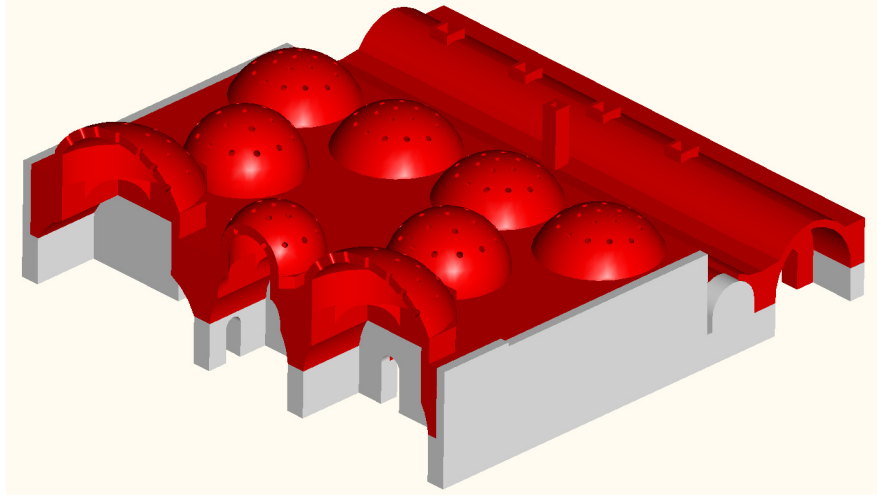
Şekil 3.84 Yapının su deposu ve tüteklük bölümlerinin oluşturulması



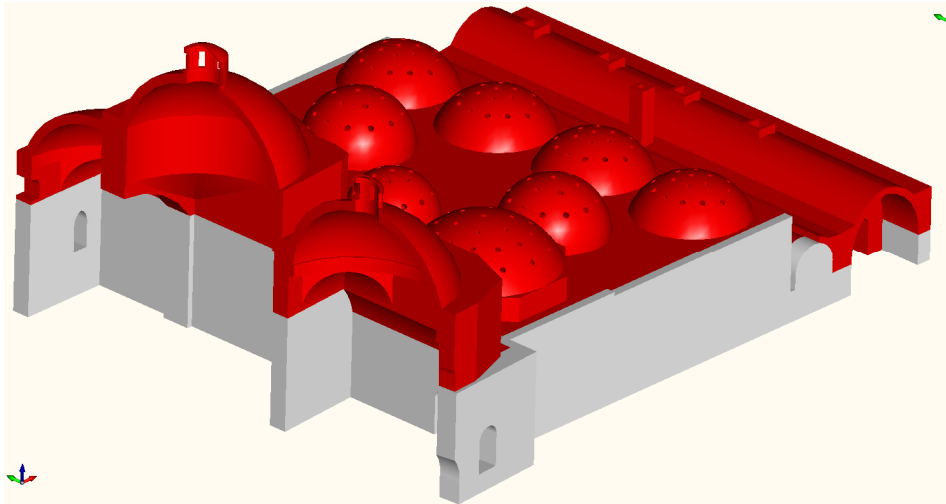
Şekil 3.85 Yapının halvet bölümlerinin oluşturulması



Şekil 3.86 Yapının sıcaklık bölümlerinin oluşturulması



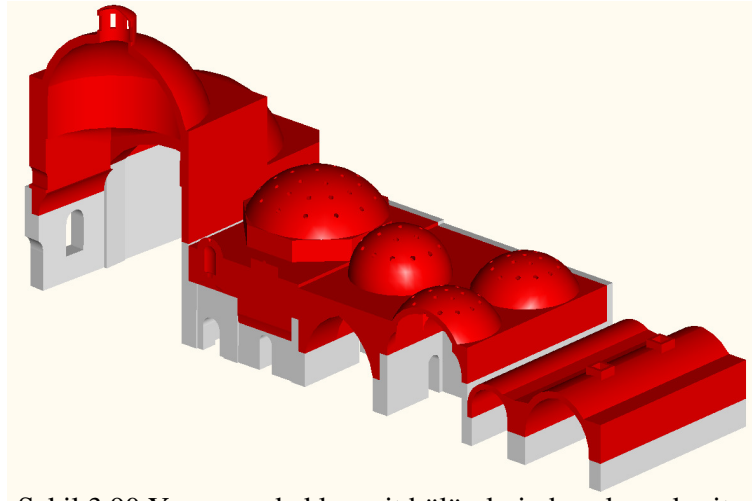
Şekil 3.87 Yapının ılık bölümlerinin oluşturulması



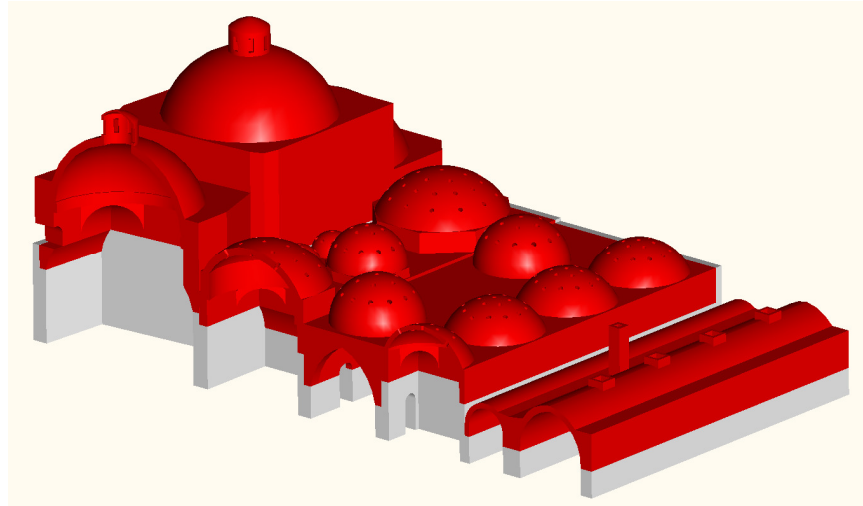
Şekil 3.88 Yapının soğukluk bölümlerinin oluşturulması



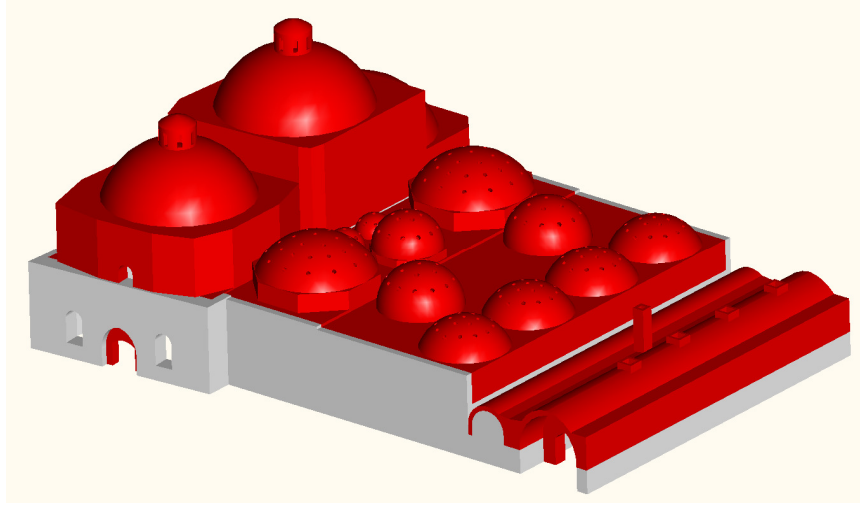
Şekil 3.89 Yapının erkeklere ait bölümlerinden alınan kesit



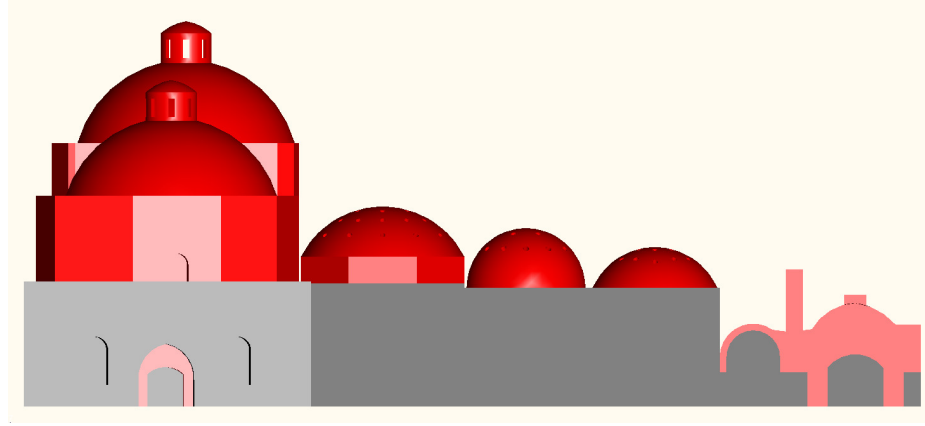
Şekil 3.90 Yapının erkeklere ait bölümlerinden alınan kesit



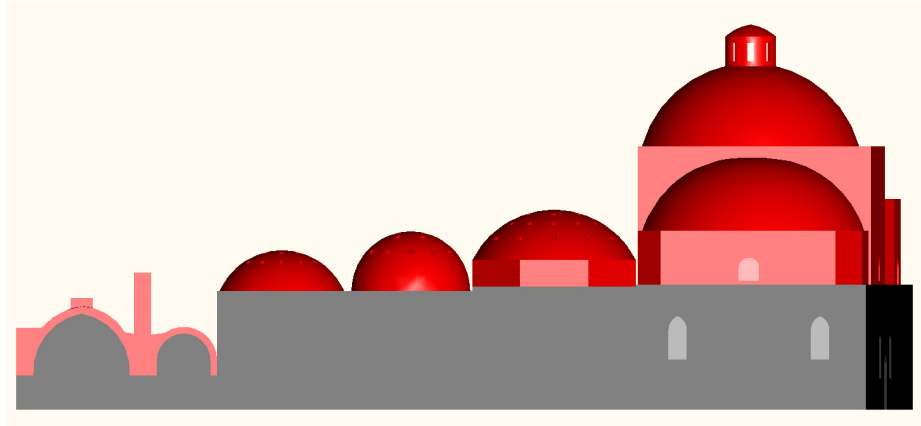
Şekil 3.91 Yapının kadınlara ait bölümlerinden alınan kesit



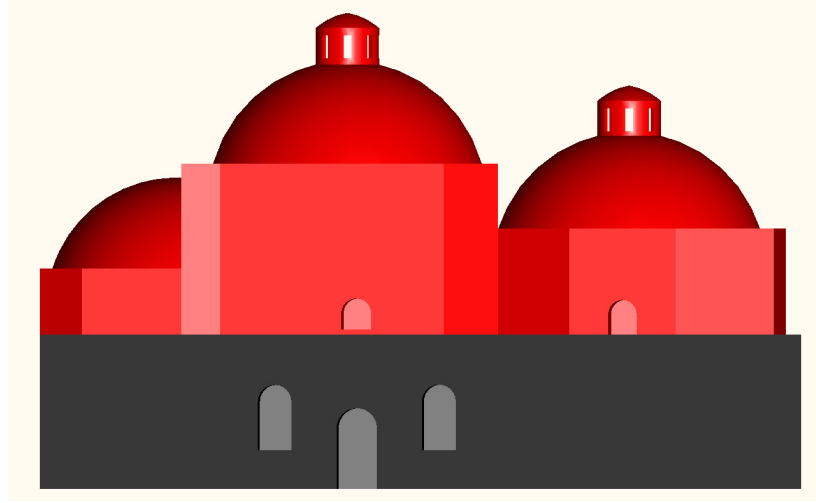
Şekil 3.92 Yapının perspektif görünüşü



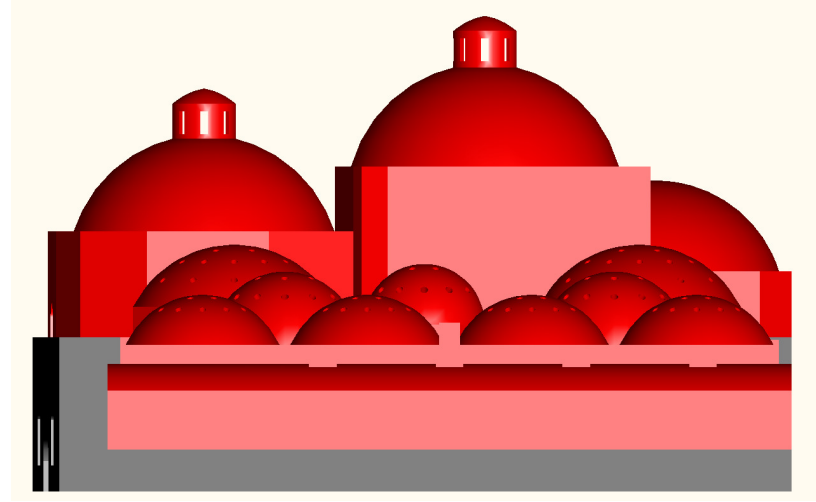
Şekil 3.93 Yapının kuzey cephe görünüşü



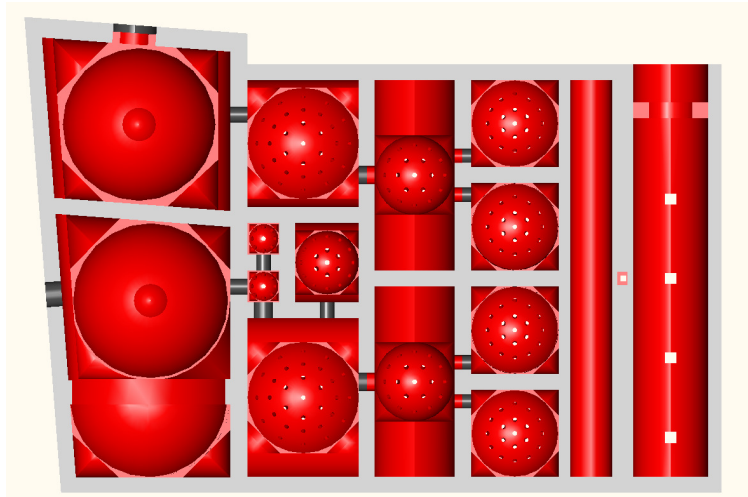
Şekil 3.94 Yapının güney cephe görünüşü



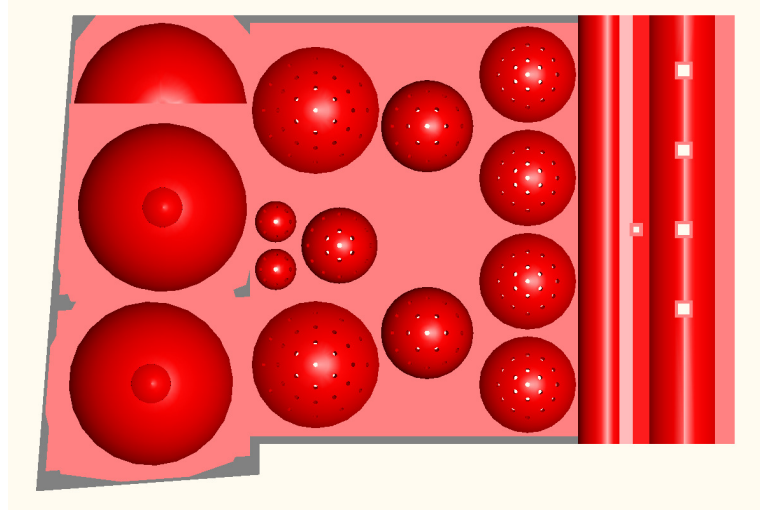
Şekil 3.95 Yapının doğu cephe görünüşü



Şekil 3.96 Yapının doğu cephe görünüşü



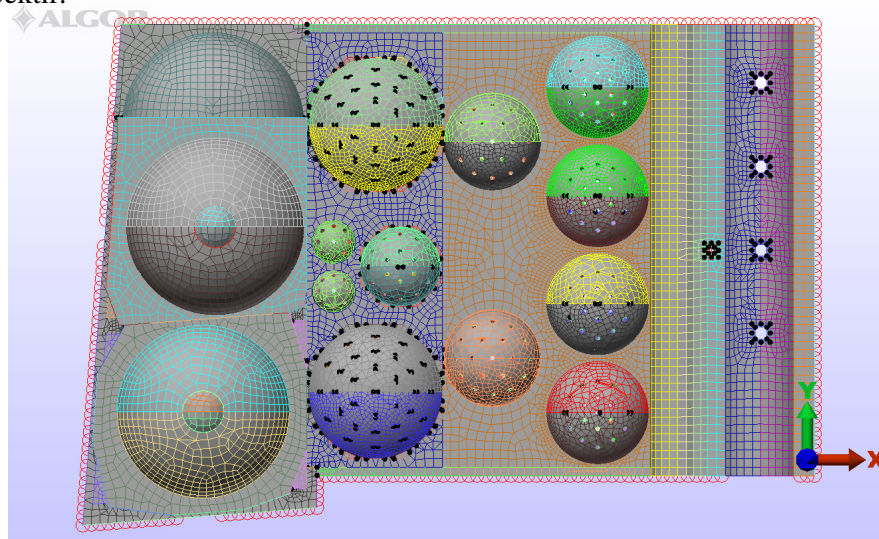
Şekil 3.97 Yapının tüm bölümlerinin alttan görünüşü



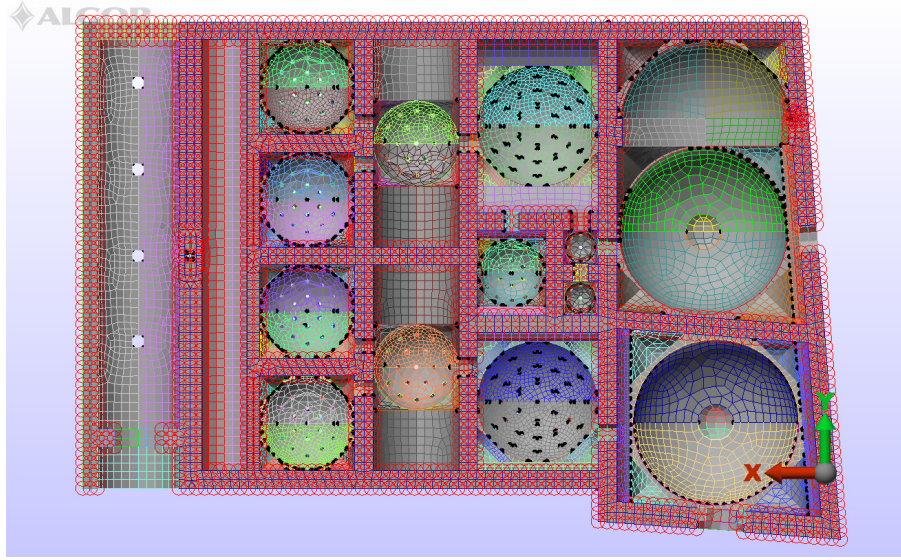
Şekil 3.98 Yapının tüm bölümlerinin üstten görünüşü

3.2.2. Yapının sonlu eleman modeli

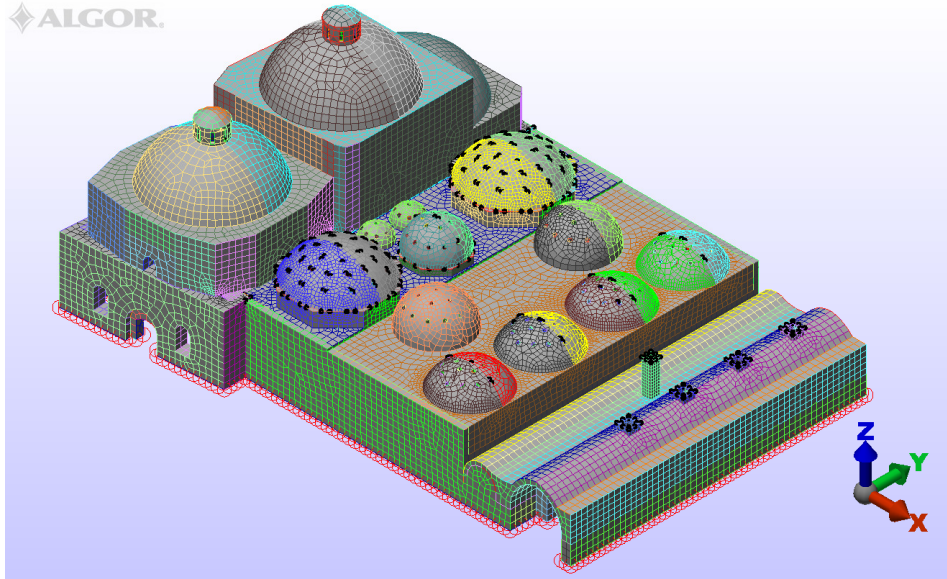
Yapının sonlu elemanlarla modellenmesi sırasında analizlerin ayrıntılı olarak incelenebilmesi amacıyla yapı dört ana parçaya ayrılmıştır. Bunlar; duvarlar, su deposu ve külhan, ılık-ılık-sıcaklık-halvetler ile soğukluklar bölümleridir (3.99-101). Modellemede seçilen aralıklar 50 cm'dir. Ancak bazı bölümlerde; fil gözleri, bacalar, tromp kenarları ve diğer küçük hacimlerde aralıklar 10 cm'ye kadar düşürülmüştür. Bu nedenle modelin eleman ve düğüm noktası sayısı oldukça artmıştır. Ancak sonlu eleman boyutlarının eleman boyutlarına göre seçilmesi analiz sonuçlarının doğruluğunu da etkileyecektir.



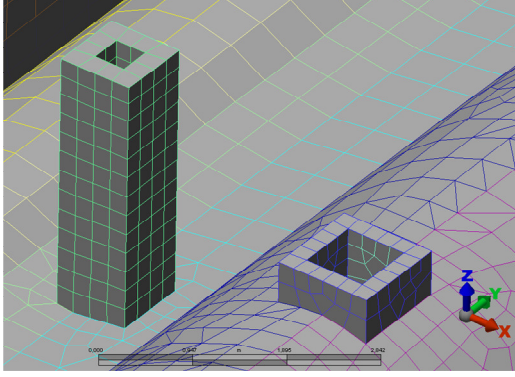
Şekil 3.99 Yapının sonlu elemanlar modelinin üstten görünüşü



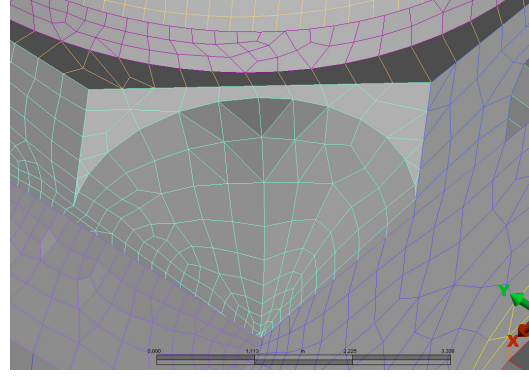
Şekil 3.100 Yapının sonlu elemanlar modelinin alttan görünüşü



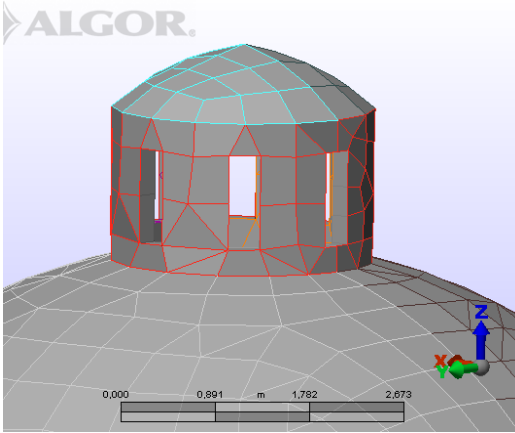
Şekil 3.101 Yapının sonlu elemanlar modelinin perspektif görünüşü



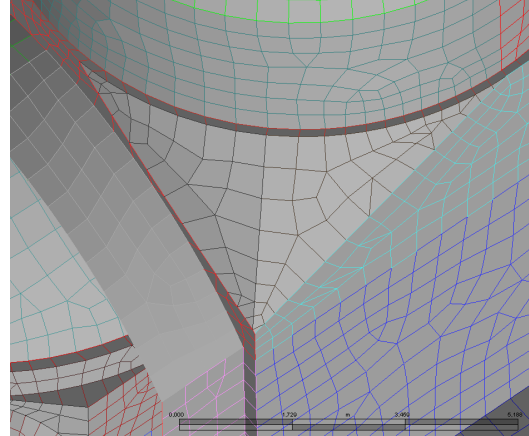
Şekil 3.102 Yapıda modellenen baca detayının sonlu elemanlara bölünmüş görüntüsü



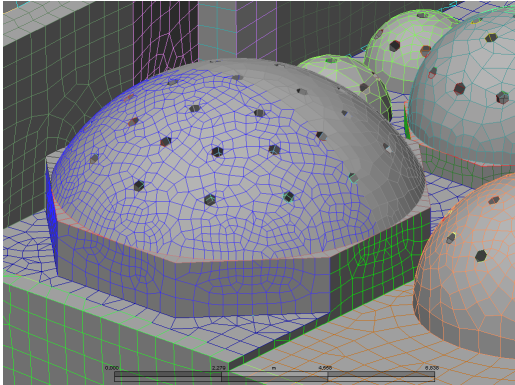
Şekil 3.103 Yapıda modellenen tromp detayının sonlu elemanlara bölünmüş görüntüsü



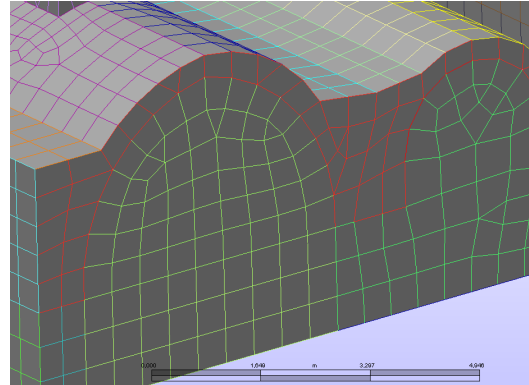
Şekil 3.104 Soğuklukta yer alan aydınlatma fenerinin sonlu elemanlara bölünmüş görüntüsü



Şekil 3.105 Yapıda modellenen pandantif detayının sonlu elemanlara bölünmüş görüntüsü



Şekil 3.106 Yapıdaki kubbeler ve fil gözlerinin sonlu elemanlara bölünmüş görüntüsü

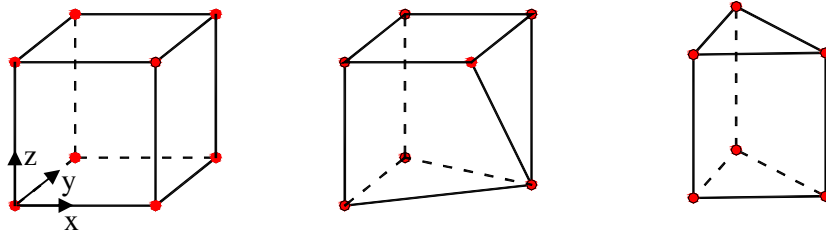


Şekil 3.107 Yapıdaki tonozların sonlu elemanlara bölünmüş görüntüsü

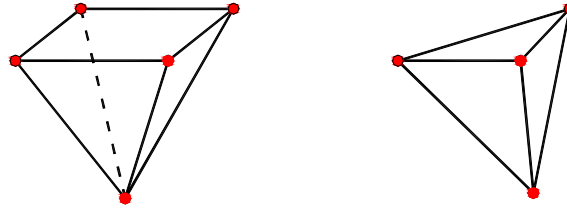
Sonlu eleman aralıklarının küçük boyutlu yapı gruplarında 10 cm'ye kadar alınması nedeniyle yapının toplam sonlu eleman sayısı 276845, düğüm noktası sayısı ise 134597 rakamlarına ulaşmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi için birçok yazılım programı kullanılmaktadır. Bu çalışmada ALGOR sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Program, Lineer, non-Linear, ısı etkileri v.b. problemler için çözüm yapabilmektedir.

Sonlu elemanlar modelinde 3-D tuğla tipi elemanlar kullanılmıştır. Bu elemanlar 4,5,6,7 ve 8 düğüm noktasına sahiptirler (Şekil 3.102,103)



Şekil 3.108 8,7 ve 6 düğüm noktalı 3d tuğla tipi elemanlar



Şekil 3.109 5 ve 4 düğüm noktalı 3d tuğla tipi elemanlar

Yapının duvarlarında genellikle 6-8 düğüm noktalı elemanlar kullanılırken, yapının tromp, pantantif ve kubbede yer alan fil gözlerinde diğer tuğla tipi elemanlar kullanılmıştır. Modelde her düğüm noktası için 3 serbestlik derecesi tanımlanmıştır.

- **Elastisite bağıntıları:**

İnşaat Mühendisliği hesaplamalarının temel problemi, belirli malzemeler kullanılarak oluşturulan yapılara etkiyen yüklerin güvenli bir şekilde taşınabildiğini göstermek ve bunu sağlamaktır. Her malzeme kendisine gelen yükler sonucunda ya kırılır ya da akarlar. Bir diğer problem ise aşırı şekil değiştirmelerdir. Aşırı şekil değiştirmeler ise yapıya etkiyen yüklerin ne derece büyük olduğunun göstergesidir. Yapılara gelen yükler ve bunların yarattığı etkiler gerilme problemi, yer değiştirme problemi ve stabilite problemi şeklinde incelenmektedir. Bir sıralama yapılacak olursa bunlardan öncelikli olanı gerilme problemleridir. Ancak özellikle narin yapılarda ani deformasyon ve yer değiştirmelere sebep olan stabilite problemi ön plana çıkmaktadır. Kullanılan inşaat malzemelerinde ise yapılan analizleri basitleştirmek için malzemenin homojen ve izotrop olduğu kabulüne gidilir (Yücefer, 2005).

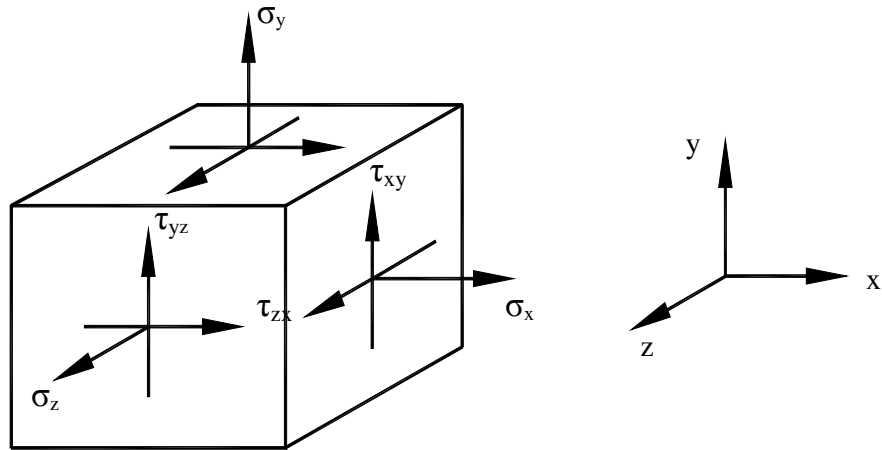
Üç boyutlu izotrop hal için elastisite bağıntıları:

Genel olarak altı gerilme ve altı şekil değiştirme bileşeni mevcuttur. Bunlar:

Gerilmeler için $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$

Şekil değiştirmeler için $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ şeklindedir.

Aşağıdaki şekilde (Şekil 3.110) gerilme bileşenleri koordinat eksen takımına göre gösterilmiştir.



Şekil 3.110 Gerilme bileşenlerinin eksen takımına göre gösterilmesi

Üç boyutlu izotrop hal için gerilmeler, şekil değiştirmeler ve bunların matris formundaki gösterimi aşağıdaki şekildedir.

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)] \quad \text{Denklem 3.1}$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_z)] \quad \text{Denklem 3.2}$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)] \quad \text{Denklem 3.3}$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \gamma_{xy} \quad \tau_{xz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \gamma_{xz} \quad \tau_{yz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \gamma_{yz} \quad \text{Denklem 3.4}$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad \text{Denklem 3.5}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad \text{Denklem 3.6}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_y + \sigma_x)] \quad \text{Denklem 3.7}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad \text{Denklem 3.8}$$

Gerilmeleri matris formunda yazarsak formül aşağıdaki şekilde olacaktır.

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix} \quad \text{Denklem 3.9}$$

τ = Kayma gerilmesi

σ = Normal gerilme

ε = Birim şekil değiştirme

ν = Poisson oranı

γ = Kayma şekil değiştirmesi

3.2.3. Ördekli Hamamı'nın malzeme özelliklerinin belirlenmesi

Kompozit malzemenin özelliklerini tespit edebilmek için homojen malzeme yaklaşımlarını kullanmak gerekir. Kompoziti oluşturan taş, harç ve tuğla malzemelerini temsil eden elastik parametrelerin bulunması gerekir. Bunun için kompozit malzeme bağıntıları ile idealleştirilmiş bağıntılar kullanılacaktır.

Ördekli Hamamında kompozit olarak duvarlarda taş-harç malzemeleri, tüm kubbeye geçiş elemanları ve kubbede tuğla-harç malzemeleri kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modelinin analizi için kompozitin elastisite modülü, kayma modülü, poisson oranı, birim hacim ağırlığı ile yapıda meydana gelecek gerilmelerin kontrolü için basınç ve çekme dayanımlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada taş-harç birleşimi izotropik olarak, tuğla-harç birleşimi ise ortotropik malzeme olarak ele alınacaktır.

Basınç mukavemetinin bulunması için "Eurocode 6: Kagir Yapıların Tasarımı- Bölüm 1-1:Donatılı ve Donatısız Kagir Yapılar İçin Genel Kurallar" standardından yararlanılacaktır. Buna göre kompozitin basınç mukavemeti:

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad \text{Denklem 3.10}$$

f_k = Kompozitin basınç mukavemeti

f_b = Taşın basınç mukavemeti

f_m = Harcın basınç mukavemeti

α, β = Sabit katsayı $\alpha=0,7$ ve $\beta=0,3$

K = 0,4~0,6 arasında değişen ve yığmanın biçimine bağlı katsayı (Bu çalışmada katsayı 0,5 olarak alınacaktır)

Çekme mukavemeti, basınç mukavemetinin %10'u oranında alınabilir. Birçok çalışmada bu oran kullanılmıştır (Koçak 1999, s:215, Teomete 2004, s:96). Bu çalışma kapsamında da bu değer kullanılacaktır.

Elastisite modülünün tayini için birçok denklem kullanılmaktadır. Bu denklemlerden bazıları sırasıyla Eurocode 6, Afet bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, 2007 ve Lourenco, 2001, s.669'da aşağıdaki formüllerle belirlenmiştir.

$$E = 1000 \cdot f_k \quad \text{Denklem 3.11}$$

$$E = 200 \cdot f_k \quad \text{Denklem 3.12}$$

f_k = Basınç mukavemeti

$$E = \frac{t_m + t_u}{\frac{t_m}{E_m} + \frac{t_u}{E_u}} \cdot \rho \quad \text{Denklem 3.13}$$

t_m : harcın kalınlığı

t_u : taşın veya tuğlanın yüksekliği

E_m : Harcın elastisite modülü

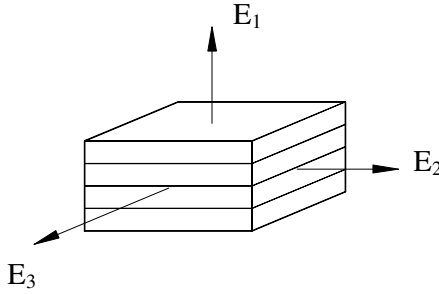
E_u : Taşın veya tuğlanın elastisite modülü

ρ : Harç ve taş-tuğla arasındaki bağlantı ile ilgili katsayı (katsayı 0,5 olarak alınmıştır.)

(Lourenco, 2001) bu formülde kompozitin elastisite modülünü, genel formül olan;

$$\frac{1}{E} = \frac{V_u}{E_u} + \frac{V_m}{E_m} \quad \text{Denklem 3.14}$$

formülünden türetmiştir. Hacimler kalınlık olarak formüle edilmiştir. Denklem 3.16 kompozit malzemeler için tabakalaşma yönüne dik olan, Şekil 3.111'de gösterilen E_1 yönündeki Elastisite Modülünün bulunması için kullanılmaktadır.



Şekil 3.111 Elastisite modülü için alınan esas yönler

Ortotropik malzeme için tabakalaşmaya dik yönde bu denklem kullanılabilir. Ancak tabakalaşmaya paralel yöndeki E_2 , E_3 Elastisite Modüllerinin bulunabilmesi için denklem 3.15 kullanılmalıdır.

$$E_{2,3} = E_u \cdot V_u + E_m \cdot V_m \quad \text{Denklem 3.15}$$

Lourenco'nun yaklaşımıyla bu formülün hacimler yerine kalınlıklarıyla ifade edilmesi mümkündür. Buna göre;

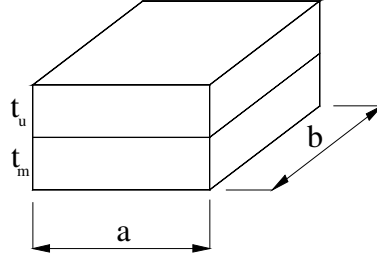
Şekil 3.112’de taş veya tuğla ile harcın oluşturduğu kompozit görülmektedir.

Şekilde;

Tuğla veya taş kalınlığı t_u ,

Harç kalınlığı t_m ,

Tuğla veya taş ile harcın eni ve boyu ise a, b olarak kabul edilmiş olsun,



Şekil 3.112 Taş veya tuğla ile harcın oluşturduğu kompozit

Denklem 3.15’de kullanılan hacimsel oranlar;

V_u = Taş veya tuğla hacminin kompozitin hacmine oranı

V_m = Harç hacminin kompozitin hacmine oranı

şeklindedir.

Bağıntıda $V_u+V_m=1$ olmalıdır. Bu bağıntıyı kalınlıklar cinsinden yazarsak ifade;

$a.b.t_u+a.b.t_m=1$ şekline dönüşür. Bu formül;

$(a.b).(t_u+t_m)=1$ şeklinde ifade edilebilir.

Denklem 3.15’de yer alan hacimler yerine kalınlıkları yazarsak formül;

$E_{2,3}= E_u.a.b.t_u+E_m.a.b.t_m$ şeklinde ifade edilebilir. (a.b) Ortak parantezine alırsak;

$E_{2,3}=(a.b).[E_u.t_u+E_m.t_m]$ şekline dönüşür. Burada a.b yerine $1/(t_u+t_m)$ yazarsak denklem kalınlıklar cinsinden ifade edilmiş olur;

$$E_{2,3} = \frac{E_u.t_u + E_m.t_m}{t_u + t_m} \quad \text{Denklem 3.16}$$

Lourenco yaklaşımıyla harç ve taş-tuğla arasındaki bağlantı ile ilgili katsayıyı ilave edersek formül;

$$E_{2,3} = \frac{E_u.t_u + E_m.t_m}{t_u + t_m} .\rho \quad \text{Denklem 3.17}$$

şeklinde olur. Bu çalışmada katsayı 0,5 olarak alınacaktır.

Poisson oranı birçok çalışma için 1/6 olarak alınmıştır. (Koçak,1999 s. 214 Teomete, 2004: s.98) Bu çalışmada da 1/6 olarak alınacaktır.

Kayma modülü ise mukavemet bağıntıları kullanılarak hesaplanacaktır.

$$G = \frac{E}{2.(1 + \nu)} \quad \text{Denklem 3.18}$$

Yapıda kullanılan malzemelerin ortalama değerleri:

Kompozit malzemenin fiziksel ve mekanik değerleri hesaplanırken Bölüm 3'te uygulanan deneyler için bulunan ortalama değerler esas alınmıştır. Ortalama değerler aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 3.10 Yapıda kullanılan malzemelerin ortalama değerleri

	Taş	Harç	Tuğla
Basınç Mukavemeti (Mpa)	144,03	7,74	9,50
Eğilmeye Çekme Mukavemeti (Mpa)	14,84	2,48	3,76
Elastisite Modülü (Gpa)	31,83	5,26	6,13
Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	2640	1420	1730

Taş-harç kompozit malzemesinin parametreleri:

Basınç mukavemeti:

$$f_k = 0,5.144,03^{0,7}.7,74^{0,3}$$

$$f_k = 29,95MPa$$

Çekme mukavemeti:

$$f_t = 0,1.29,95 = 2,995MPa$$

Elastisite modülü:

$$E = \frac{0,03 + 0,25}{\frac{0,03}{5,26} + \frac{0,25}{31,83}} \cdot 0,5$$

$$E = 10,326GPa$$

Poisson oranı:

$$\nu = 1/6 = 0,16667$$

Kayma modülü:

$$G = \frac{11,145}{2 \cdot (1 + 0,16667)}$$

$$G = 4,425 \text{ GPa}$$

Birim hacim ağırlık:

Harcın birim hacim ağırlığı 1420 kg/m³, Dere taşının ise 2640 kg/m³'tür.

Harcın kalınlığı ortalama 3 cm, dere taşının kalınlığı ise 25 cm'dir . Kompozitin birim hacim ağırlığı ise 2500 kg/m³ olarak alınmıştır.

Tuğla-harç kompozit malzemesinin parametreleri:

Basınç mukavemeti:

$$f_k = 0,5 \cdot 9,5^{0,7} \cdot 7,74^{0,3}$$

$$f_k = 4,47 \text{ MPa}$$

Çekme mukavemeti:

$$f_t = 0,1 \cdot 4,47 = 0,447 \text{ MPa}$$

Elastisite modülü:

$$E_1 = \frac{0,04 + 0,04}{\frac{0,04}{5,26} + \frac{0,04}{6,13}} \cdot 0,5$$

$$E_1 = 2,831 \text{ GPa}$$

$$E_{2,3} = \frac{5,26 \cdot 0,04 + 6,13 \cdot 0,04}{0,04 + 0,04} \cdot 0,5$$

$$E_{2,3} = 2,848 \text{ GPa}$$

Poisson oranı:

Poisson oranı tüm doğrultular için, $\nu = 1/6 = 0,167$

Kayma modülü:

$$G_1 = \frac{2,831}{2.(1 + 0,1667)}$$

$$G_{2,3} = \frac{2,848}{2.(1 + 0,1667)}$$

$$G_1 = 1,213GPa \quad G_{2,3} = 1,220GPa$$

Birim hacim ağırlık:

Harcın birim hacim ağırlığı 1420 kg/m³, tuğlanın ise 1730 kg/m³'tür.

Harcın ve tuğlanın ortalama kalınlıkları 4cm olup kompozitin birim hacim ağırlığı ise bunların ortalaması olan 1575 kg/m³ olarak alınmıştır.

Tarihi ördekli hamamında kullanılan izotrop taş-harç kompoziti ile ortotrop tuğla-harç kompozit elemanların parametreleri aşağıda Çizelge 3.11'de gösterilmiştir.

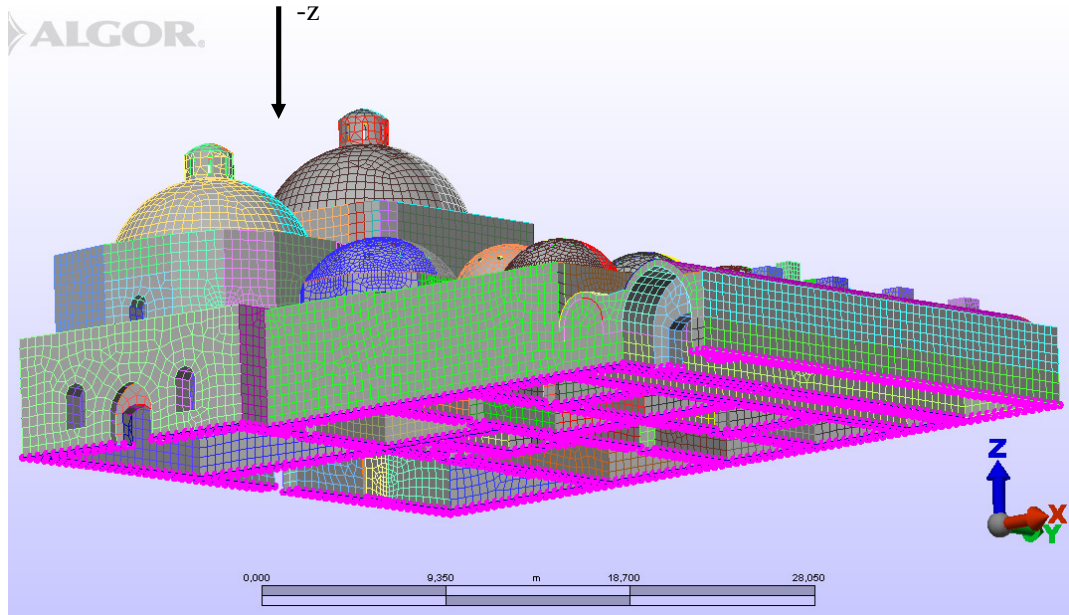
Çizelge 3.11 Yapıda kullanılan malzemelerin fiziksel ve mekanik değerleri

	Taş-harç kompoziti	Tuğla-harç kompoziti
Basınç mukavemeti (MPa)	29,95	4,47
Çekme mukavemeti (MPa)	2,995	0,447
Elastisite modülü (GPa)	10,326	E ₁ =2,831 – E _{2,3} =2,848
Kayma modülü (GPa)	4,425	G ₁ =1,213 – G _{2,3} =1,220
Poisson oranı	0,167	0,167
Birim hacim ağırlığı (kg/m ³)	2500	1575

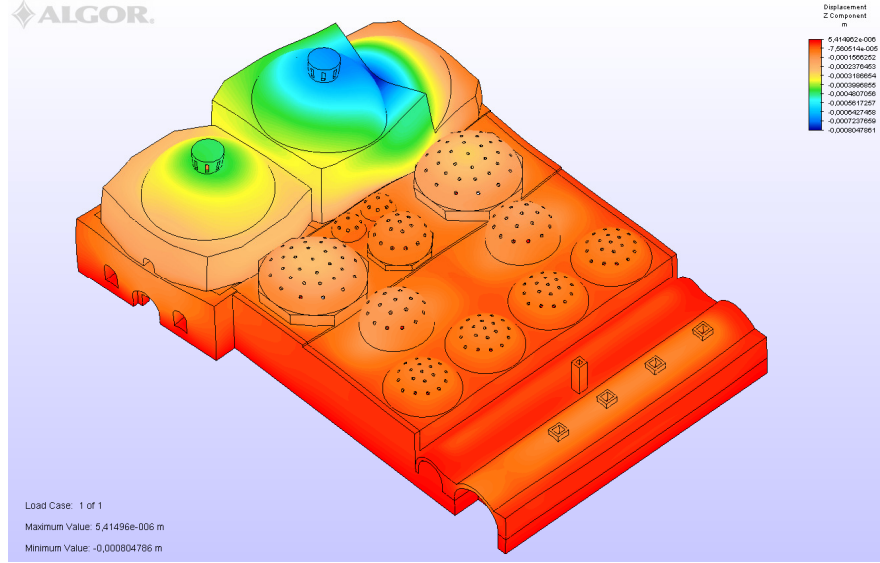
Bu değerler belirlendikten sonra yapının analiz kısmına geçilecektir. Öncelikli olarak yapının kendi ağırlığı altındaki analizleri, analizler yapıldıktan sonra yapıda burulma etkileri (A1 türü düzensizlik) araştırılacak ve sonrasında X,Y ve Z yönlerindeki deprem analizleri yapılacaktır. Analiz sonuçlarından elde edilen verilerle yapının mevcut durumu ile yerinde yapılan gözlemler karşılaştırılarak yapıdaki en büyük yıkılmanın gerçekleştiği erkekler soğukluk bölümünün yarım ve tam kubbeleri ile bunları taşıyan kemer ve doğu yönündeki duvarın yıkılmasına yol açan sebepler araştırılacaktır.

3.2.4. Yapının kendi ağırlığı altındaki analizi

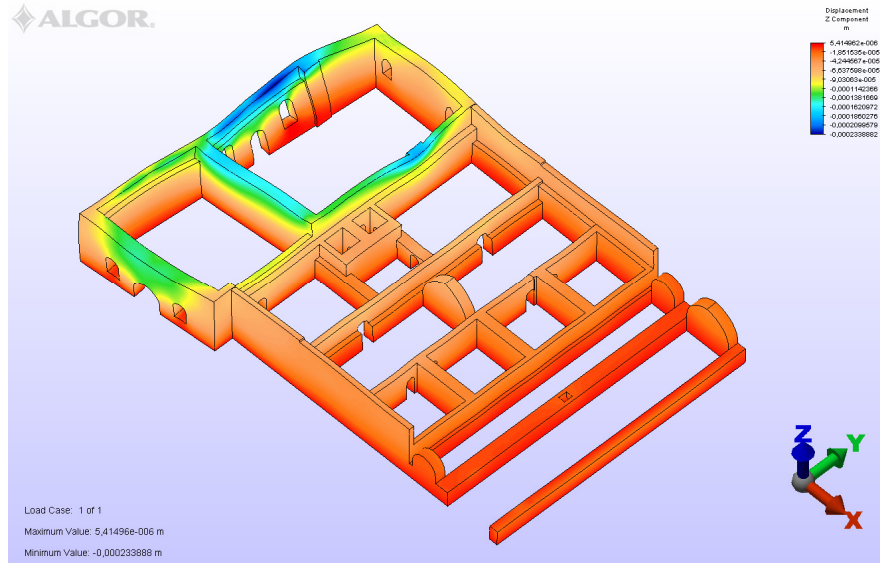
Yapının kendi ağırlığı altındaki analizi $9,81\text{m/sn}^2$ olan yerçekimi ivmesinin $-Z$ doğrultusunda yapıya etkilmesiyle oluşturulmuştur. Bu sayede kütlelerin yüke dönüştürülmesi sağlanmıştır. Analiz, Çizelge 3.11’de elde edilen malzeme değerlerinin yapıya aktarılmasıyla ve zemine oturan sonlu eleman düğüm noktalarının üç yöndeki yer değiştirmeleri engellenerek yapılmıştır (Şekil 3.113’de pembe renkle gösterilen noktalar). Analizde yapıda oluşan yer değiştirmeler ve gerilme düzeyleri belirlenerek yapıda oluşan hasarların analizle olan ilişkisi belirlenmiştir. Bu çalışmada yapılan değerlendirme yapının tümünde ve ayrıca yapının dört ayrı kısmında ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu bölümlerden ilki duvarlar, ikincisi külhan ve su deposu, üçüncüsü sıcaklık, ılık ve halvet bölümleri, sonuncusu ise erkekler ve kadınlar soğukluk bölümleridir. Aşağıdaki şekillerde yer değiştirmeler gösterilmiştir (Şekil 3.114,119).



Şekil 3.113 Yapının zemine oturduğu düğüm noktalarının gösterilmesi

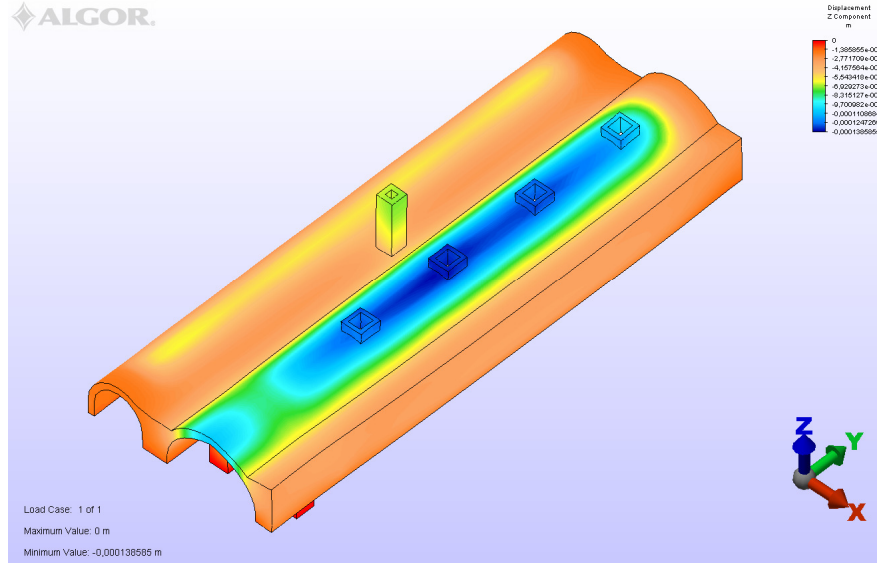


Şekil 3.114 Yapının düşey yöndeki yer değiştirmeleri

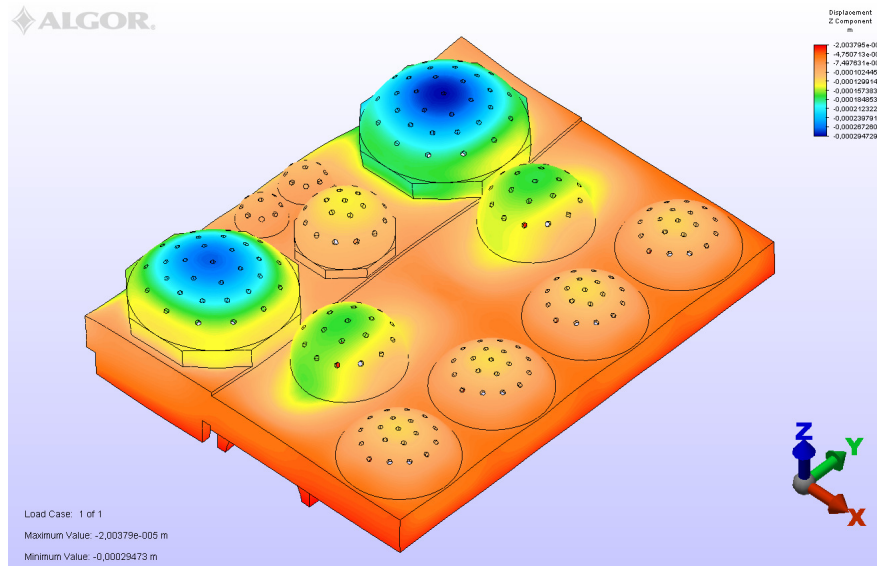


Şekil 3.115 Yapının duvarlarında oluşan düşey yöndeki yer değiştirmeler

Yapılan analiz sonucunda yapıda, kendi ağırlığı altında maksimum 0,8 mm'lik yer değiştirme olduğu belirlenmiştir. Bu yer değiştirme miktarları duvarlarda erkekler soğukluk bölümünde 0,23 mm., külhan kısmında baca deliklerinin olduğu kısımlarda 0,14 mm. (Şekil 3.116), erkekler ılıklik kubbesinde 0,39 mm. (Şekil 3.117) ve maksimum değer ise erkekler soğukluk bölümünün kubbelerini taşıyan kemerde 0,8 mm. (Şekil 3.118,119) olarak tespit edilmiştir.

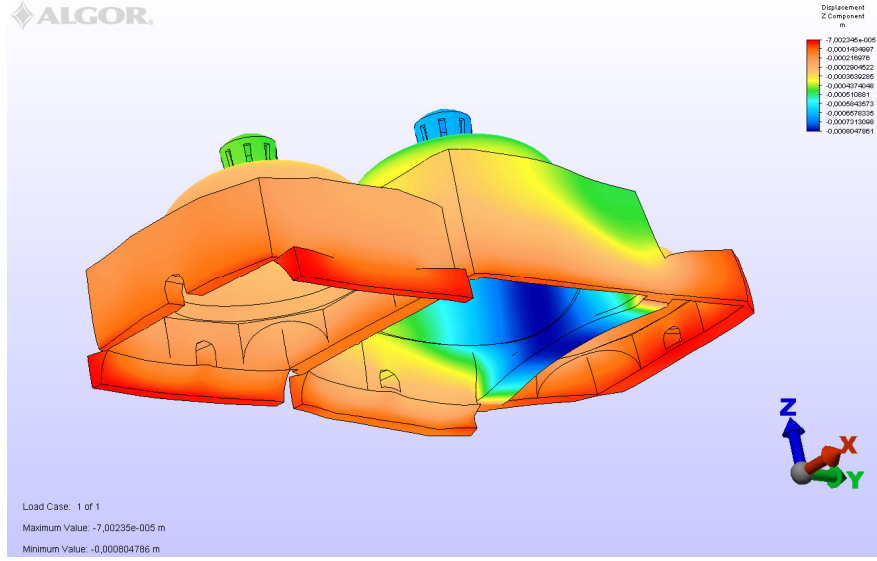


Şekil 3.116 Yapının külhan ve su deposu bölümlerinde düşey yöndeki yer değiştirmeler

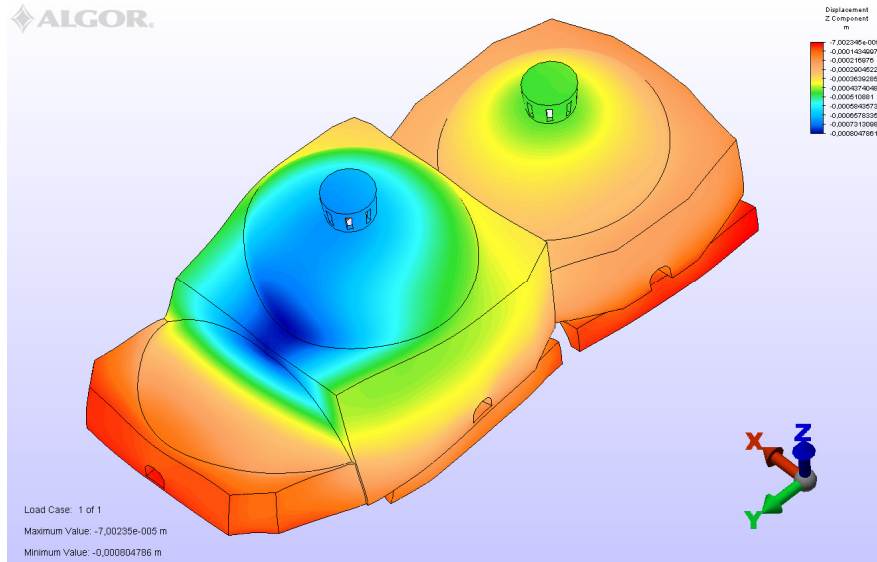


Şekil 3.117 Yapının ılıklik, sıcaklik ve halvet bölümlerinde oluşan düşey yöndeki yer değiştirmeler

Analizde koyu mavi olarak görülen kemer orta bölgesi düşey yönde en çok yer değiştiren bölgedir.

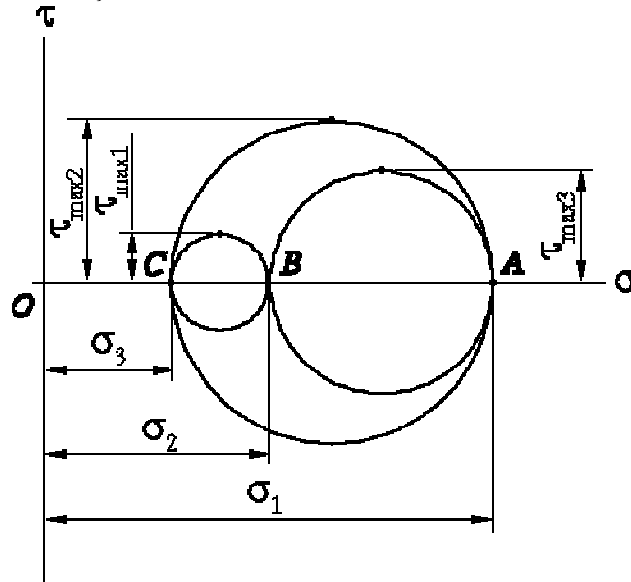


Şekil 3.118 Yapının kadınlar ve erkekler soğukluk bölümlerinde oluşan düşey yöndeki yer değiştirmeleri (maksimum yer değiştirme koyu mavi ile gösterilen kemer orta bölgesinde oluşmaktadır.)

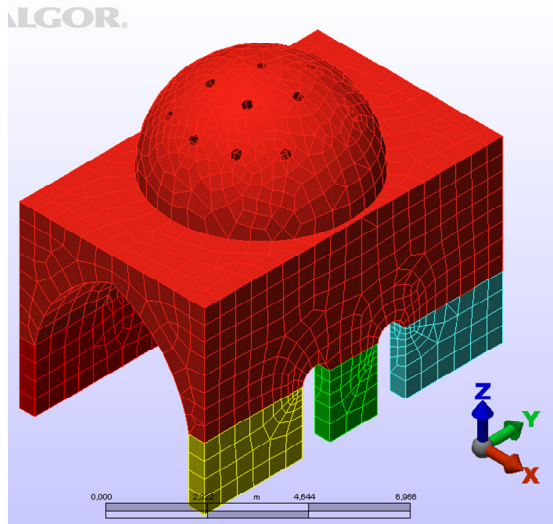


Şekil 3.119 Maksimum yer değiştirmenin olduğu erkekler soğukluk kubbelerini taşıyan kemer kısmının üstten görünüşü

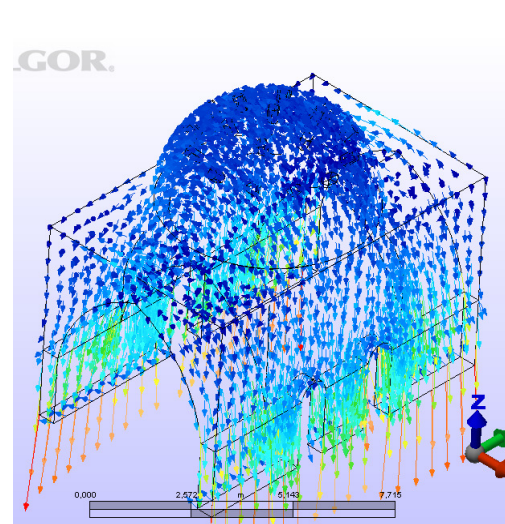
Yapının kendi ağırlığı altındaki maksimum ($S_1-\sigma_1$) ve minimum ($S_3-\sigma_3$) gerilme değerleri incelenerek en fazla zorlanan bölgeler tespit edilmiştir. Üç eksenli gerilme halinde σ_1 maksimum asal gerilmeleri, σ_3 ise minimum asal gerilmeleri göstermektedir. Şekil 3.120’de üç eksenli gerilme hali Mohr dairesi ile gösterilmiştir. Ayrıca minimum ve maksimum asal gerilmelerin vektörel gösterimi için yapının tümü yerine örnek olması açısından Ördekli Hamamının sıcaklık bölümünden alınan bir parça kullanılmıştır (Şekil 3.121). Şekil 3.122’de model olarak alınan parçaya ait minimum asal gerilme dağılımları Şekil 3.123 ve 3.124’te ise maksimum asal gerilme dağılımları vektörel olarak gösterilmiştir.



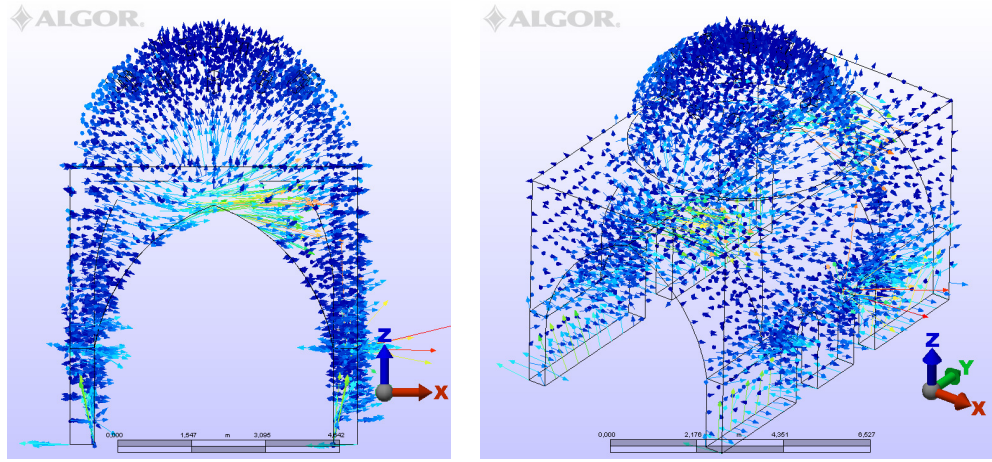
Şekil 3.120 Üç eksenli gerilme durumu için Mohr Dairesi



Şekil 3.121 Ördekli Hamamının sıcaklık bölümünden örnek olarak alınan parça

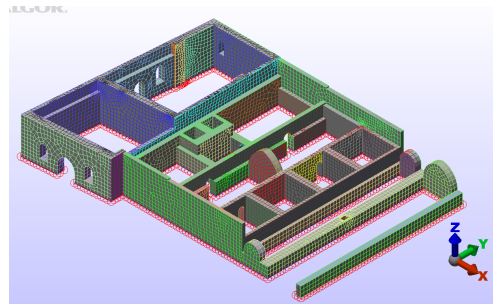


Şekil 3.122 Modelde oluşan minimum asal gerilme dağılımlarının vektörel olarak gösterilmesi

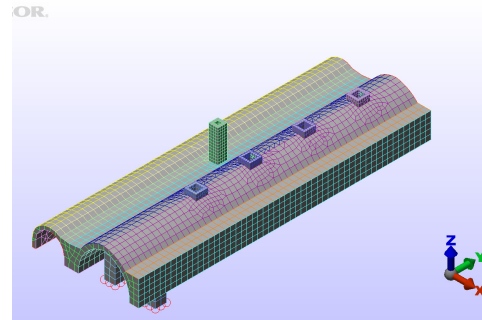


Şekil 3.123,124 Modelde oluşan maksimum asal gerilme dağılımlarının vektörel olarak gösterilmesi

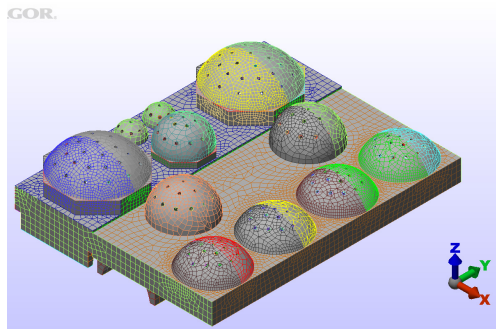
Bu bölgeler yapının tümünde ve yer değiştirmelerde olduğu gibi yapının dört ayrı parçasında incelenmiştir (Şekil 3.125-128) . Bulunan gerilme değerleri teorik olarak elde edilen kompozitin basınç ve çekme gerilmesi değerlerini aşıp aşmadığı kontrol edilmiştir. Bu karşılaştırmada kompozit için Çizelge 3.10'daki değerler esas alınmıştır.



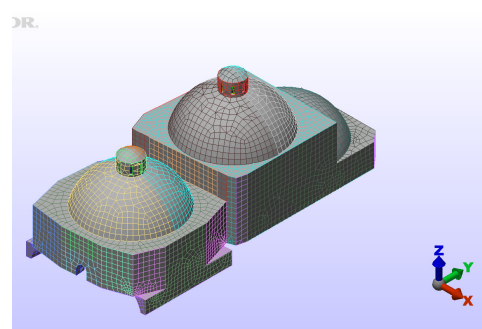
Şekil 3.125 Yapının duvarlarının sonlu elemanlar görünümü



Şekil 3.126 Yapının külhan ve su deposu bölümlerinin sonlu elemanlar görünümü

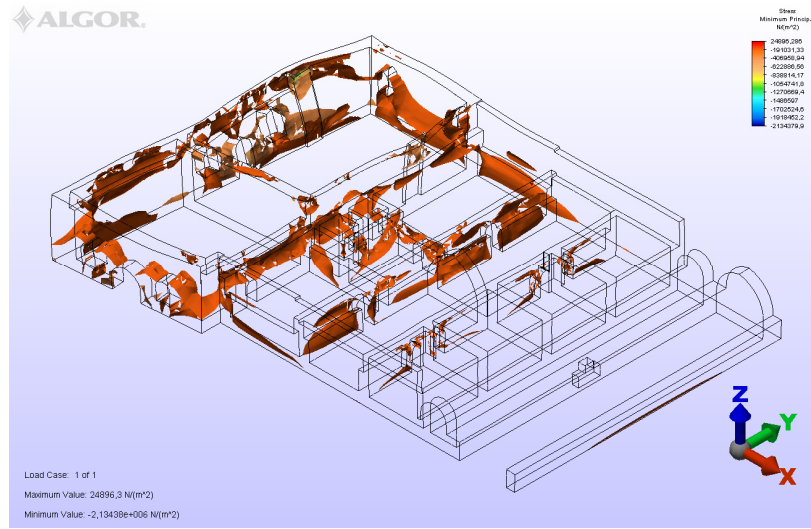


Şekil 3.127 Yapının ılıklık, sıcaklık ve halvet bölümlerinin sonlu elemanlar görünümü

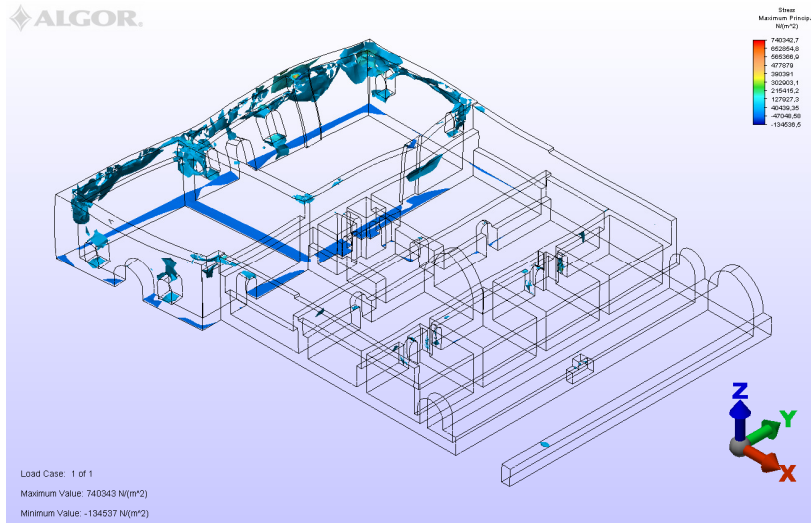


Şekil 3.128 Yapının erkekler ve kadınlar soğukluk bölümlerinin sonlu elemanlar görünümü

Yapının duvarlarında oluşan gerilmeler incelendiğinde minimum asal gerilme değerinin olduğu bölgeler erkekler ve kadınlar soğukluk duvarları ile ılıklik duvarlarıdır. Bu bölgelerde basınç gerilmesi değerleri düşük olup 0,2 MPa düzeyindedir. Maksimum asal gerilme düzeylerinin genellikle düşük olduğu (0,06Mpa), özellikle erkekler soğukluk bölümünde bulunan ve kemerin aktardığı yükleri taşıyan bölümlerde asal gerilme değerlerinin 0,22 MPa değerine ulaştığı gözlenmiştir. (Şekil 3.129,130).

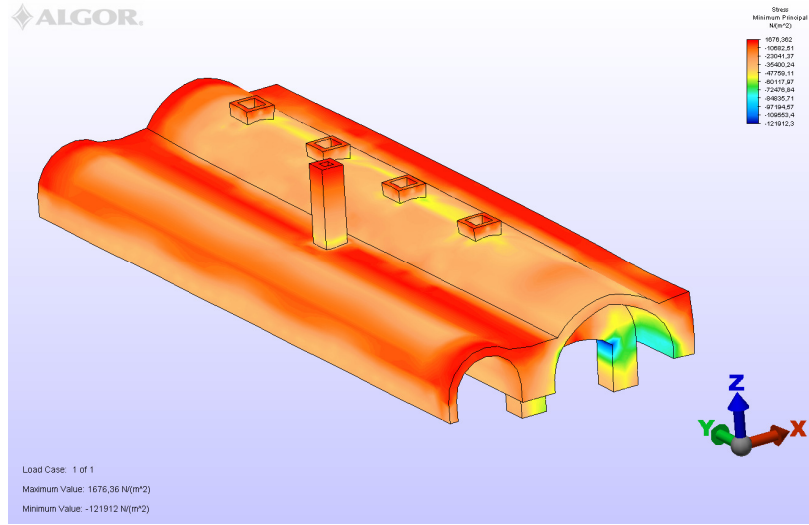


Şekil 3.129 Yapının kendi ağırlığı altında duvarlarda oluşan minimum gerilme değerleri

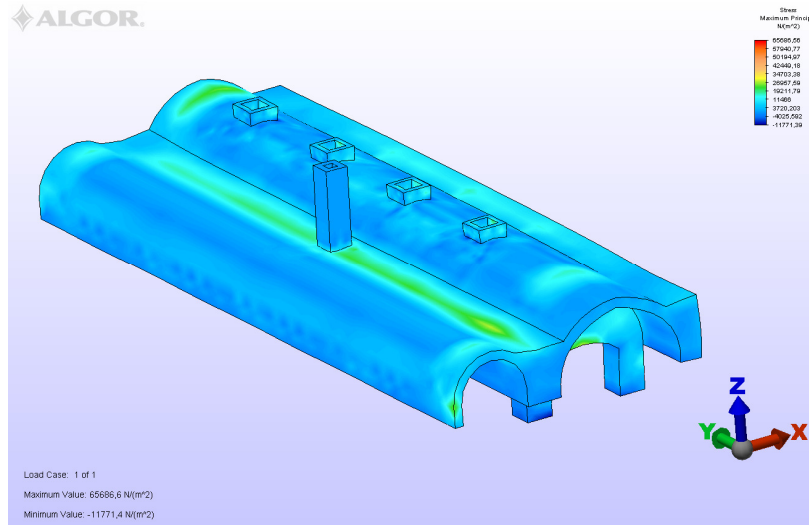


Şekil 3.130 Yapının kendi ağırlığı altında duvarlarda oluşan maksimum gerilme değerleri

Yapının külhan ve su deposu bölümlerinde oluşan gerilmeler incelendiğinde minimum asal gerilme değerlerinin külhan bölümünde havalandırma bacaları arasında, su deposu ile külhan arasındaki bacanın alt kısımlarında, tonoz kenar bölgelerinde ve maksimum asal gerilme ise külhan bölümünün giriş kapısı kemerinin alt bölgesinde (-0,06 MPa) oluşmaktadır. Maksimum asal gerilmelerin olduğu bölge (0,12 MPa) ise külhan giriş kapısı kemerinin yükünü kapı kenar bölgelerine aktardığı kısımlarda olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.131,132).

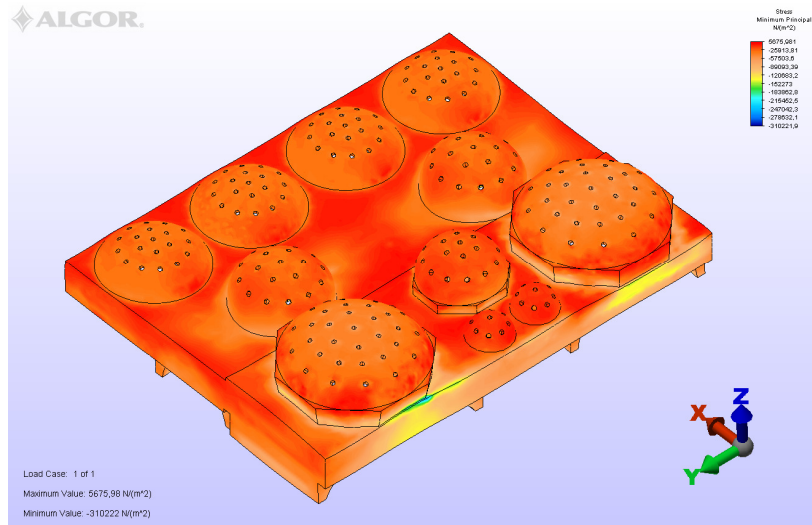


Şekil 3.131 Yapının kendi ağırlığı altında külhan ve su deposu bölümlerinde oluşan minimum gerilme değerleri

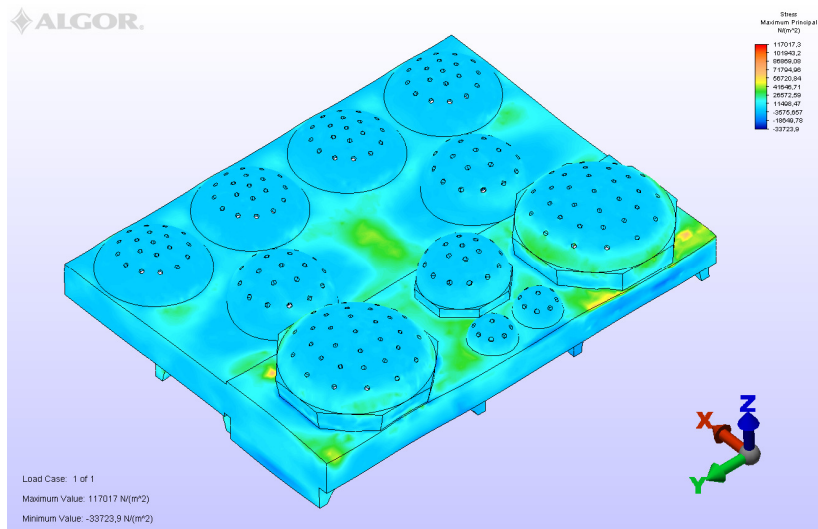


Şekil 3.132 Yapının kendi ağırlığı altında külhan ve su deposu bölümlerinde oluşan maksimum gerilme değerleri

Yapının ılıklik, sıcaklik ve halvet bölümlerinde oluşan asal gerilmelerin diğer bölgelere göre daha fazla olduğu bölümler erkekler ılıklik bölümünün erkekler soğukluk bölümüyle birleştiği bölgeler, ılıklik trompları ve sıcaklik pandantifleri ile sıcaklik bölümünün ara duvarında meydana gelmektedir. Asal gerilmelerin minimum olduğu bölge (-0,21 MPa) ise ılıklik kubbesinin sekizgen olan kubbe altı bölümlerinin yüklerini aktardıkları bölümlerdir. Maksimum asal gerilme değerlerinin olduğu yerler 0,117 MPa değerinde olup ılıklik ve soğukluk bölümlerinin birleştiği bölgelerdir (Şekil 3.133,134).

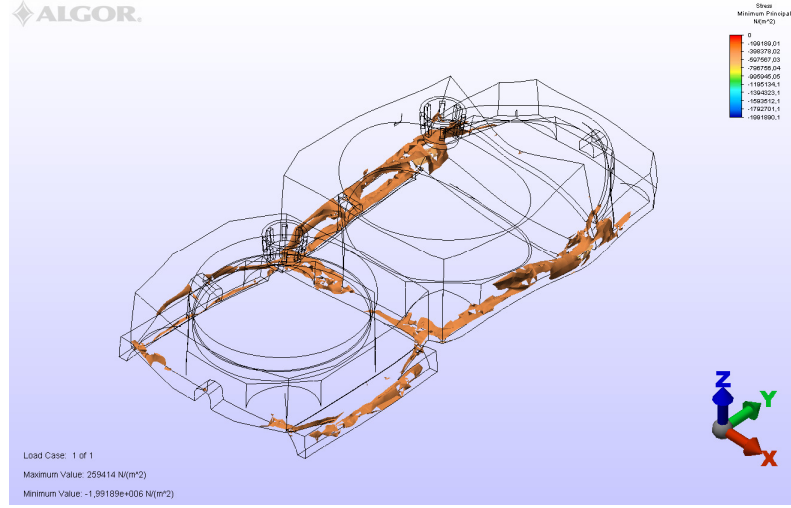


Şekil 3.133 Yapının kendi ağırlığı altında ılıklik, sıcaklik ve halvet bölümlerinde oluşan minimum gerilme değerleri

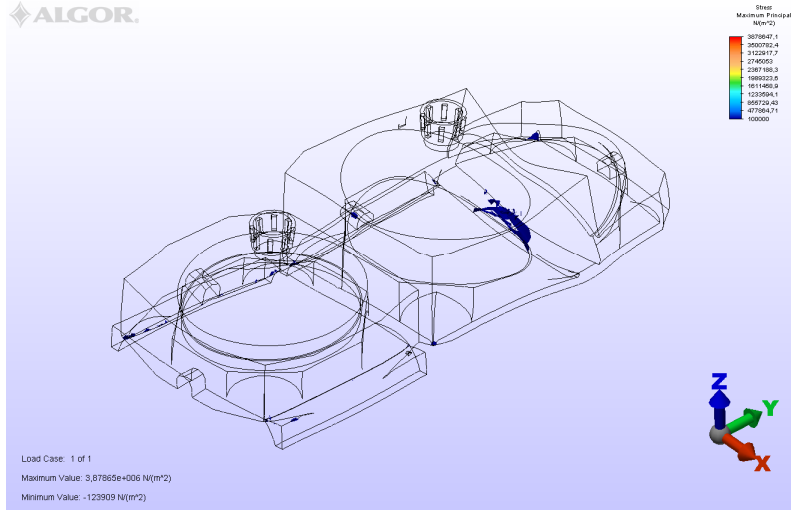


Şekil 3.134 Yapının kendi ağırlığı altında ılıklik, sıcaklik ve halvet bölümlerinde oluşan maksimum gerilme değerleri

Yapının kadınlar ve erkekler soğukluk bölümlerinde oluşan asal minimum gerilmelerinin kubbeye geçiş elemanları olan tromp ve pandantiflerin duvarlara yükü aktardığı bölgelerde $-0,6\text{MPa}$ düzeyinde, asal maksimum gerilmeler ise erkekler soğukluk kubbelerini taşıyan kemerde $0,3\text{MPa}$ düzeyinde olduğu gözlenmiştir (Şekil 3.135,136).



Şekil 3.135 Yapının kendi ağırlığı altında soğukluk bölümlerinde oluşan minimum gerilme değerleri



Şekil 3.136 Yapının kendi ağırlığı altında soğukluk bölümlerinde oluşan maksimum gerilme değerleri

Gerilme düzeylerinin daha detaylı olarak değerlendirilebilmesi için yapının deprem analizlerinin incelenmesi gerekmektedir. Analiz sonuçları bize yapının yıkık olan kısımlarının depremle olan ilişkisini gösterecektir. Öncelikle yapıda burulma etkileri araştırılacak, daha sonra deprem analizlerine geçilecektir.

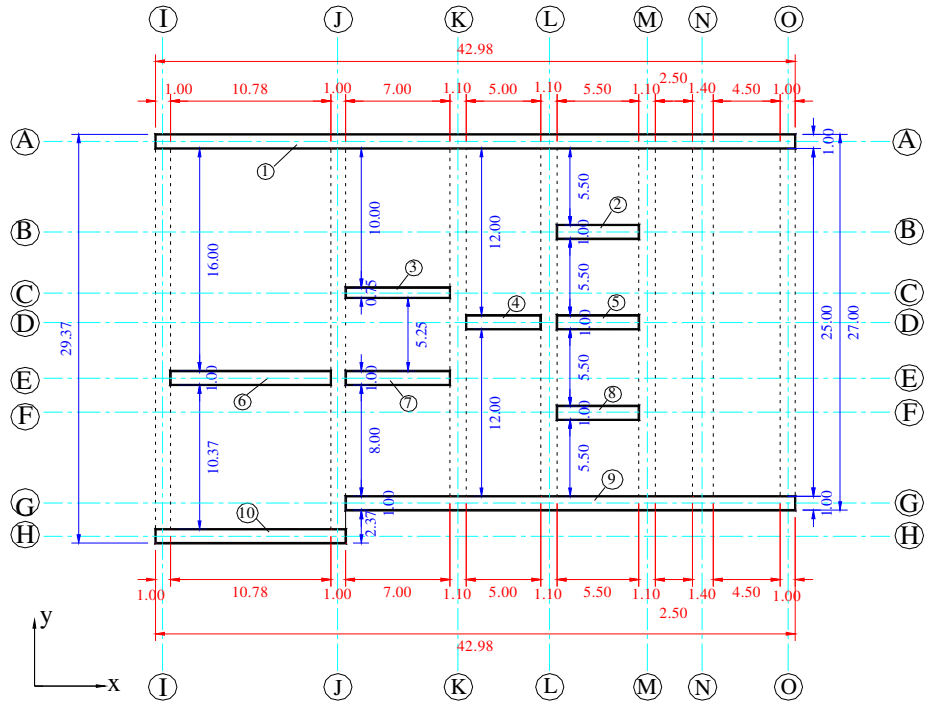
3.2.5. A1 Türü Burulma Düzensizliğinin Kontrolü

Deprem riski altında bulunan ülkemizde, 1998 yılında yürürlüğe giren ABYYHY ile birlikte yapı tasarım ve analizine, “Yapı Düzensizliği” kavramı getirilmiş ve yapının davranışını belirleyen en önemli düzensizlik olarak da “A1-Burulma Düzensizliği” tanımlanmıştır. Bilindiği üzere deprem etkisi halinde kütle ve rijitlik merkezlerinin çakışmamasından dolayı burulma etkileri meydana gelmektedir. Yönetmelikte ise yapıların, simetrik de olsalar yer hareketinin dönme bileşeni, hesap ile uygulamada hesap dışı oluşabilecek rijitlik farklılığından önceden kestirilemeyen hareketli yük dağılımı gibi sebeplerden en az %5 bir dışmerkezliğe göre irdelenmesi öngörülmektedir (Çelebi Ü. ve ark, 2006).

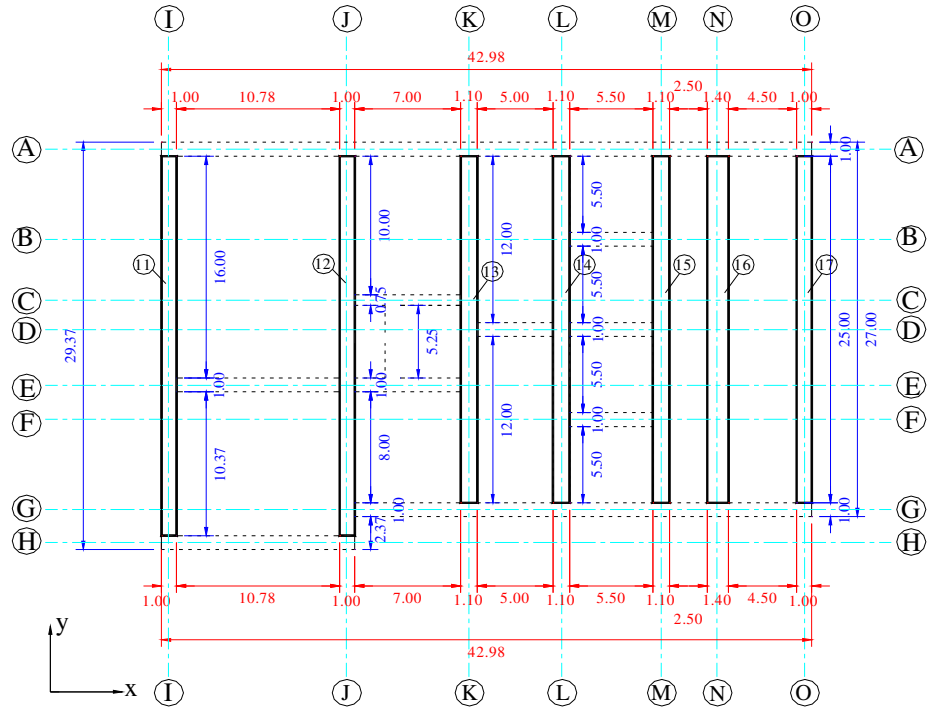
Deprem yönetmeliğinde *Burulma Düzensizliği Katsayısı* (η_{bi}); birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir katta en büyük görelî kat ötelemesinin o katta aynı doğrultudaki ortalama görelî ötelemeye oranı şeklinde tanımlanmaktadır. Burulma Düzensizliği Katsayısı $\eta_{bi}=(\Delta i)_{\max}/(\Delta i)_{\text{ort}} >1.2$ olması durumunda görelî kat ötelemelerinin hesabı, \pm %5 ek dışmerkezlik etkileri de göz önüne alınarak yapılmalıdır.

Ördekli Hamamı ile ilgili olarak da yapıda burulma etkilerinin varlığı araştırılmıştır. Öncelikle yapının x-x ve y-y yönlerindeki duvarları plan şemasında hazırlanmıştır (Şekil 3.137,138). Deprem yönünün x-x ve y-y olma durumuna göre duvarların yatay en kesitlerinin atalet momentleri, x ve y eksenlerine olan uzaklıkları bir tablo ile hesaplanarak yapının rijitlik merkezi hesaplanmıştır (Çizelge 3.12). Daha sonra yapının plan ölçüleri ile ağırlık merkezinin yeri tespit edilmiştir (Çizelge 3.13). Bu tespitlerden sonra x ve y yönündeki eksantrisite oranlarının %5'i geçip geçmediği kontrol edilmiştir.

Hesaplarda kolaylık sağlamak amacıyla yatayda ve düşeyde 4° eğim yapan erkekler ve kadınlar soğukluk duvarları yatay ve dikey olarak alınmıştır. Yapılan araştırmalar neticesinde yapının rijitlik merkezi ile ağırlık merkezinin birbirlerine yakın olduğu ve hesaplamalar neticesinde de eksantrisite oranının %5'in altında kaldığı tespit edilmiştir (Şekil 3.139).



Şekil 3.137 Yapının plan şemasında x-x yönündeki duvarlarının gösterimi



Şekil 3.138 Yapının plan şemasında y-y yönündeki duvarlarının gösterimi

Çizelge 3.12 Ördekli Hamamının planda rijitlik merkezinin tespit edilmesi

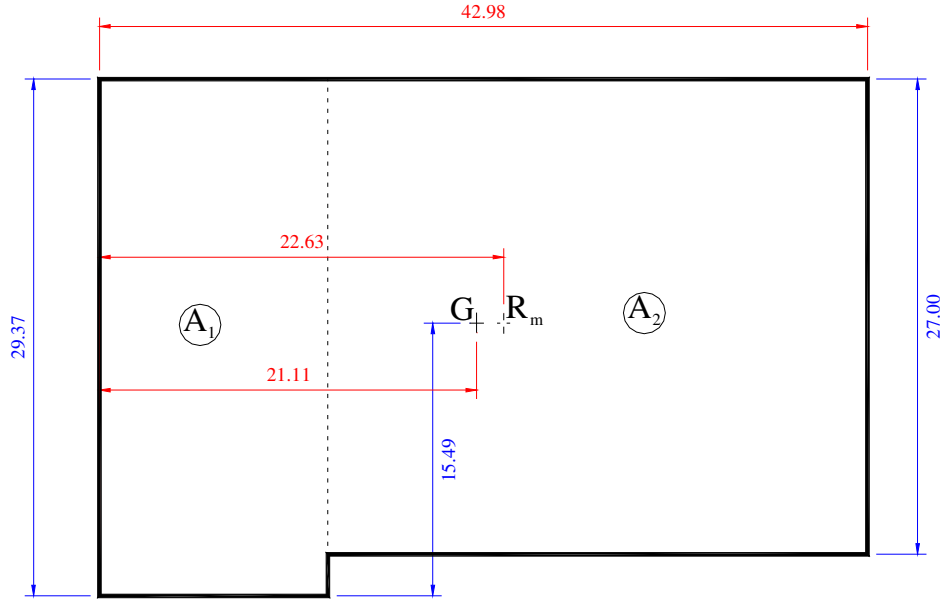
		Deprem yönü X-X			Deprem yönü Y-Y		
Aks	Duvar No	I (m ⁴)	x (m)	I.x (m ⁵)	I (m ⁴)	y (m)	I.y (m ⁵)
A-A	1	6616,34	21,49	142185,15	3,58	28,87	103,35
B-B	2	13,86	29,73	412,06	0,46	22,37	10,29
C-C	3	21,44	16,28	349,04	0,25	17,99	4,50
D-D	4	10,42	23,38	243,62	0,42	15,87	6,67
	5	13,86	29,78	412,75	0,46	15,87	7,30
E-E	6	104,39	6,39	667,05	0,90	11,87	10,68
	7	28,58	16,28	465,28	0,58	11,87	6,88
F-F	8	13,86	29,78	412,75	0,46	9,37	4,31
G-G	9	2295,30	27,88	63992,96	2,52	2,87	7,23
H-H	10	173,95	6,39	1111,54	1,13	0,50	0,57
I-I	11	2,28	0,50	1,14	1708,61	14,68	25082,39
J-J	12	2,28	12,28	28,00	1708,61	14,68	25082,39
K-K	13	2,77	20,33	56,31	1432,29	15,87	22730,44
L-L	14	2,77	26,43	73,21	1432,29	15,87	22730,44
M-M	15	2,77	33,03	91,49	1432,29	15,87	22730,44
N-N	16	5,72	36,78	210,38	1822,92	15,87	28929,74
O-O	17	0,69	42,48	29,31	1302,08	15,87	20664,01
Toplam		9311,28		210742	10849,9		168111,60
Rijitlik merkezi			22,63			15,494	

Aşağıdaki Tabloda Ördekli Hamamının koordinat eksenini sol alt köşede olmak üzere ağırlık merkezinin koordinatlarının tespiti gösterilmiştir.

Çizelge 3.13 Ördekli Hamamının planda ağırlık merkezinin tespit edilmesi

	A (m ²)	x (m)	A.x	y (m)	A.y
1	375,20	6,39	2397,53	14,68	5507,94
2	815,40	27,88	22733,35	15,87	12940,40
Toplam	1190,6		25130,88		18448,33
Ağırlık merkezi		21,11		15,495	

Aşağıda plan şeması verilen Ördekli Hamamında ağırlık merkezi ile rijitlik merkezinin koordinatları gösterilmiştir. Buna göre y doğrultusunda merkezlerin yaklaşık aynı hizada olduğu, x yönünde ise aralarında 1,52 m.'lik fark olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.139 Yapının plan şemasında ağırlık merkezi ile rijitlik merkezi koordinatlarının gösterilmesi

X yönündeki eksantrisite oranı:

$$\text{Eks. Oranı} = \frac{22,63 - 21,11}{42,98} = 0,035 < 0,05$$

Y yönündeki eksantrisite oranı:

$$\text{Eks. Oranı} = \frac{15,495 - 15,494}{29,37} = 3,4 \cdot 10^{-5} < 0,05$$

3.2.6. Yapının Deprem Analizi

Yapının doğal titreşim periyodlarının hesabı deprem hesaplarının yapılabilmesi için önemlidir. Gerçekleştirilen özdeğer analizinde doğal (serbest) titreşim hareket denklemi:

$$[m]\{\ddot{y}\} + [c]\{\dot{y}\} + [k]\{y\} = \{0\} \quad \text{Denklem 3.19}$$

şeklindedir.

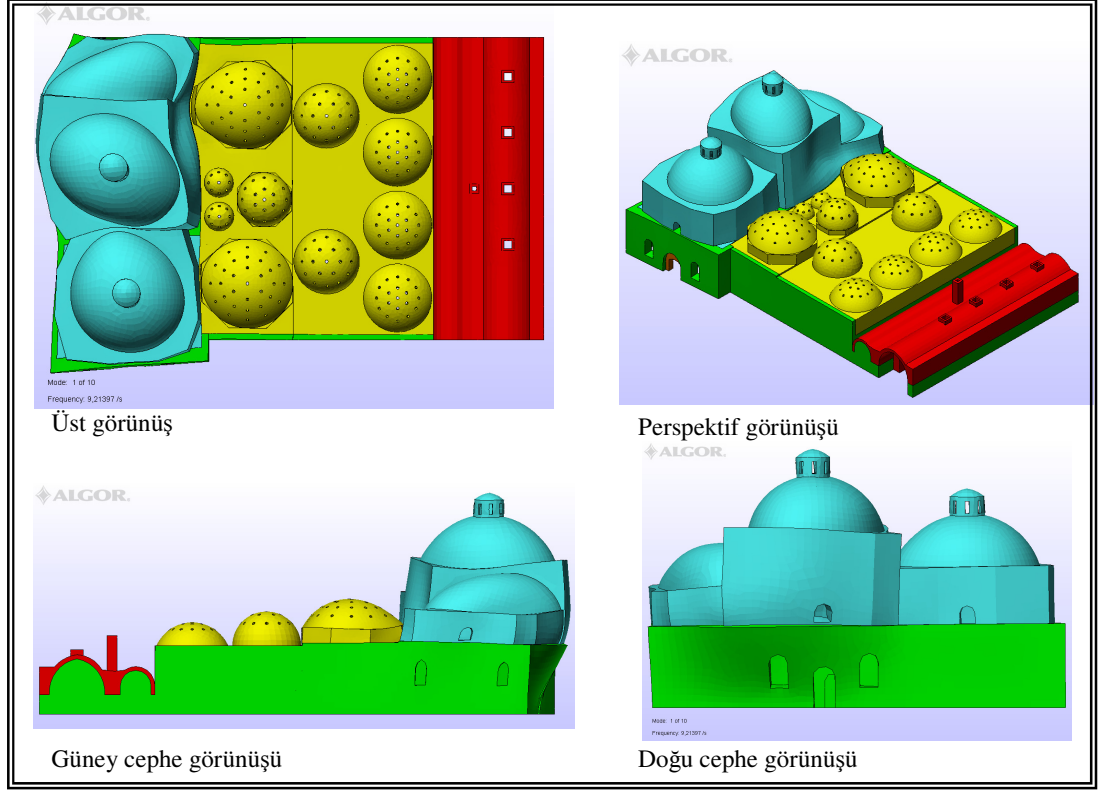
Bu denklemde sönüm terimleri ihmal edilerek, doğal titreşimin zamana bağlı ve kendini periyodik olarak tekrar eden bir vektör olduğu kabulüyle denklem sadeleştirilebilir (Polat, 2005). Buna göre denklem;

$$[[k] - w^2[m]]\{\phi\} = \{0\} \quad \text{Denklem 3.20}$$

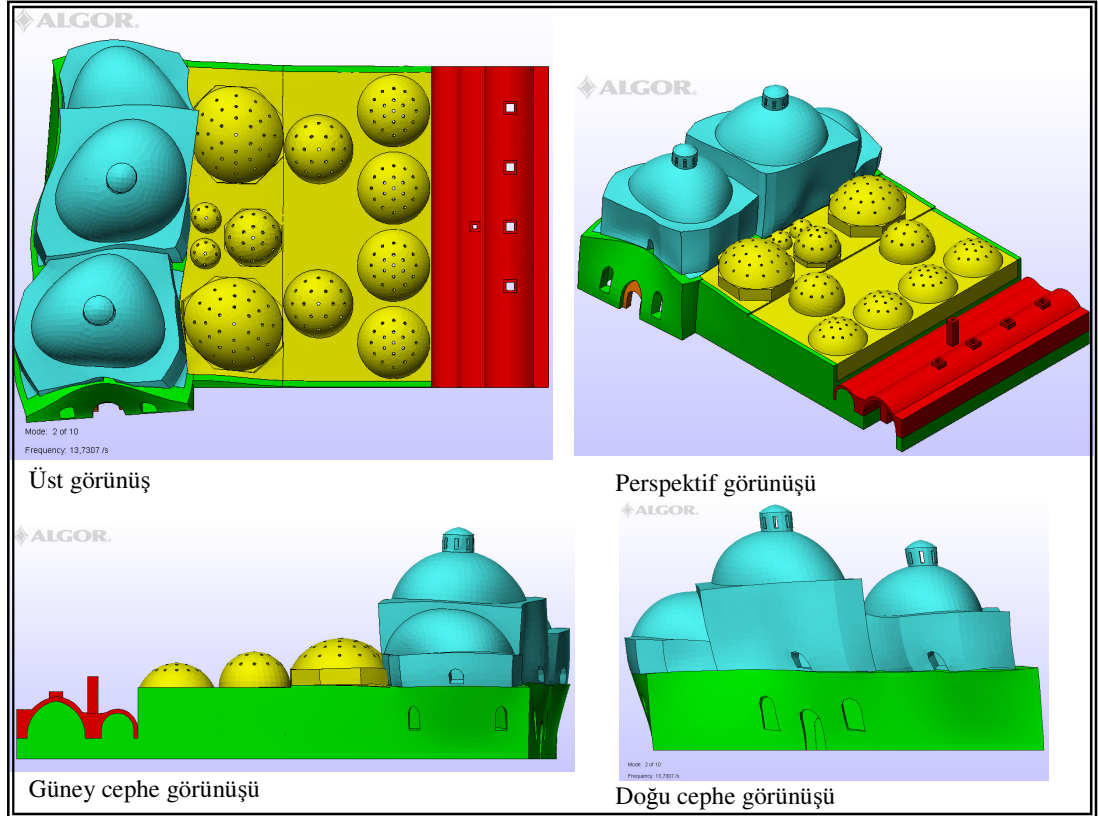
şeklinde yazılabilir.

Verilen ifadedeki denklemi sağlayacak şekilde titreşim modu şekilleri ve frekansları bulunmaktadır.

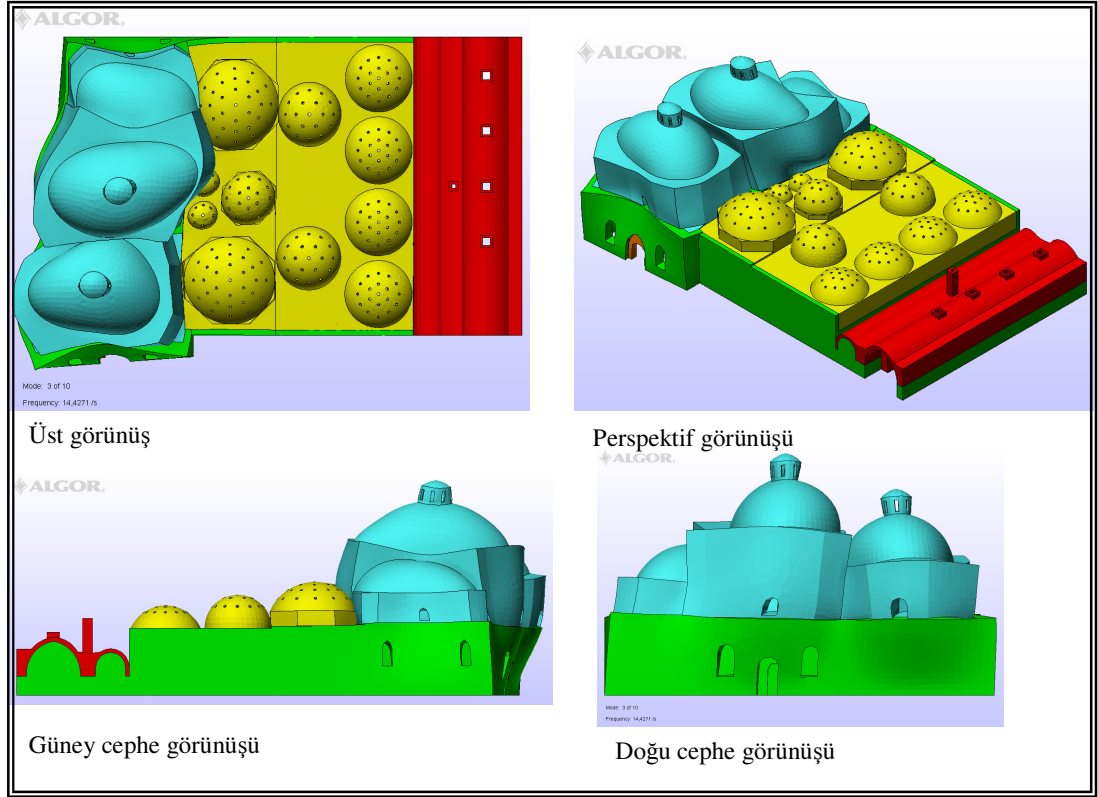
Analizler neticesinde yapının tümü birinci modda kuzey-güney doğrultusunda yanal hareket yapmaktadır. Bu moda titreşim frekansı 9,21 Hz.'dir. İkinci modda yapının tümü doğu-batı doğrultusunda yanal hareket yapmaktadır. Titreşim frekansı ise 13,73 Hz.'dir. Üçüncü modda yapı düşey ekseninde dönme hareketi yaparak titreşim frekansı 14,43 Hz. olmaktadır. Dördüncü modda yapıda açılma ve kapanmalar meydana gelmekte ve titreşim frekansı 15,37 Hz.'e ulaşmaktadır. Aşağıdaki şekillerde yapının ilk on modunun plan, kesit ve perspektif görünüşleri verilmiştir. (Şekil 3.140,149). Çizelge 3.14'te ise ilk 20 moda ait kütle katılım oranları frekans, periyot ve özdeğerler gösterilmiştir. İlk on moda ait kütle katılım oranları düşük olduğu için deprem hesaplarında mod sayısı arttırılmıştır.



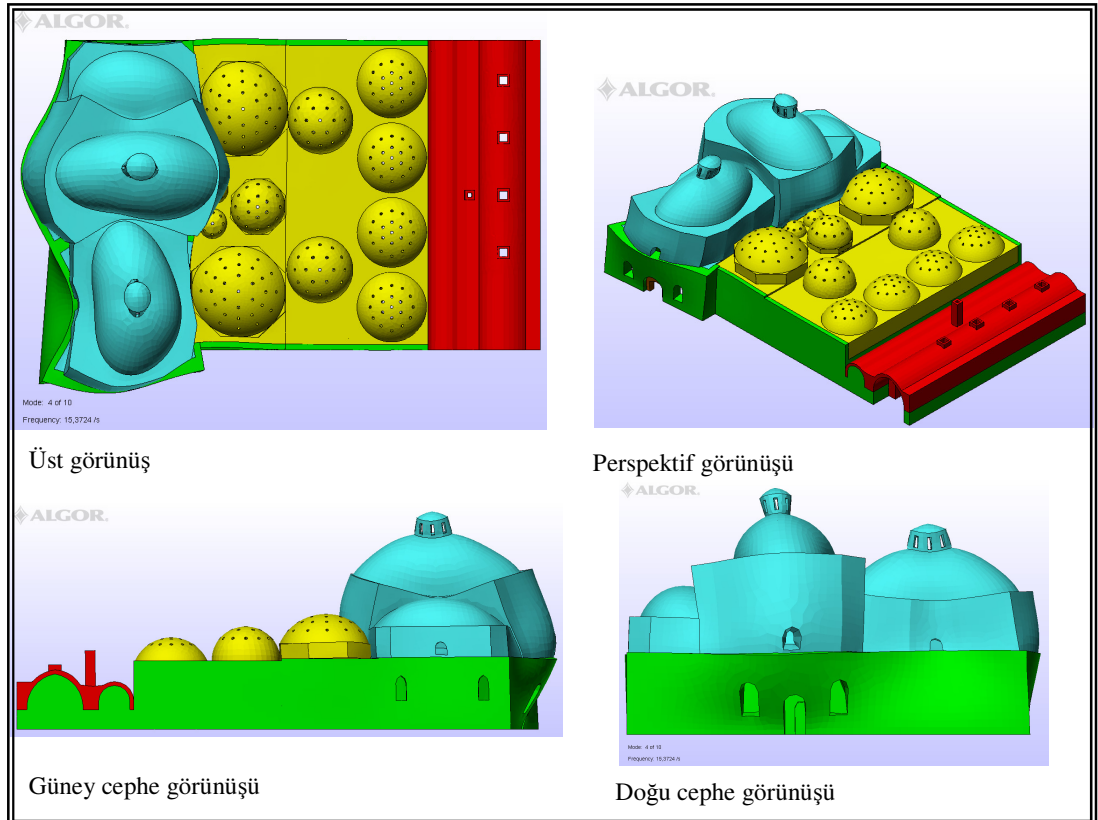
Şekil 3.140 Yapının birinci mod şekli



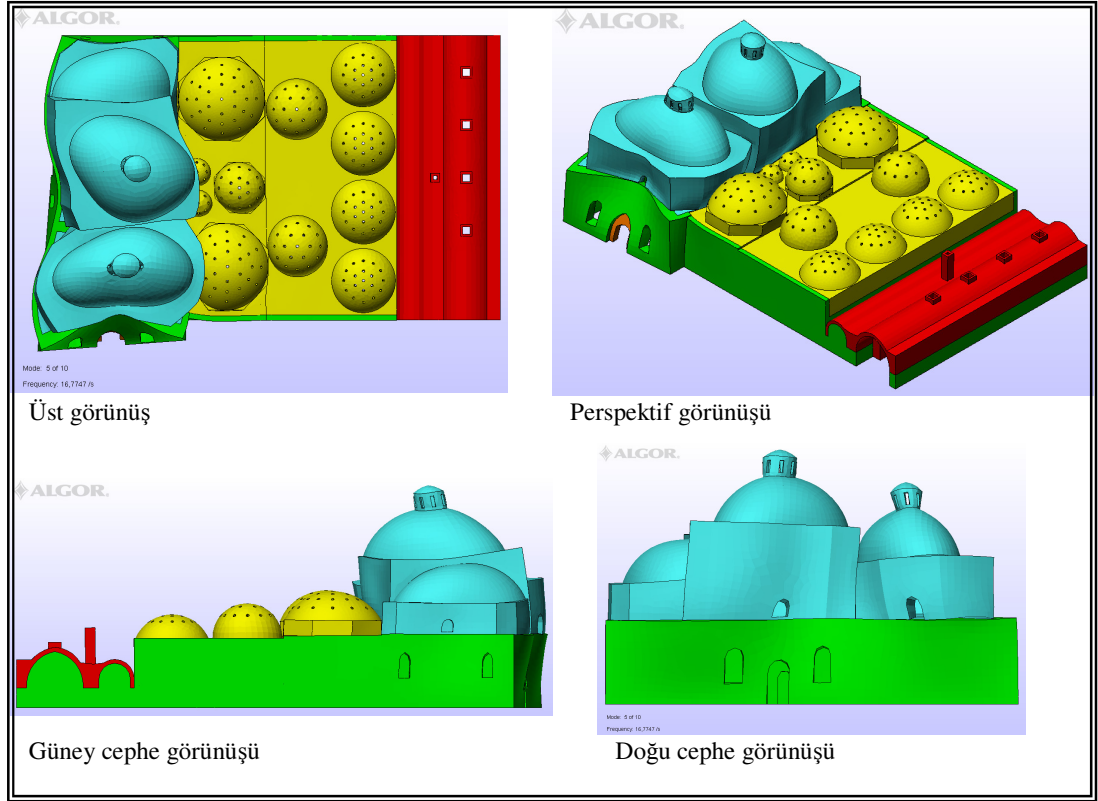
Şekil 3.141 Yapının ikinci mod şekli



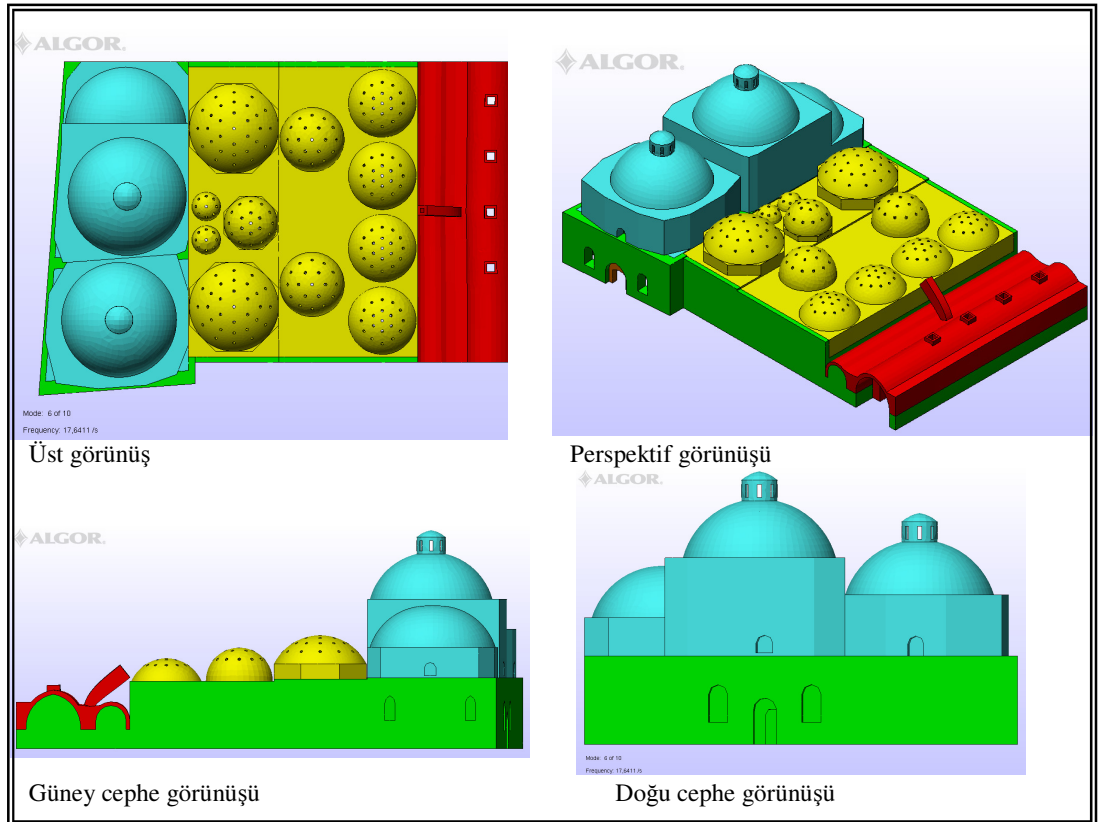
Şekil 3.142 Yapının üçüncü mod şekli



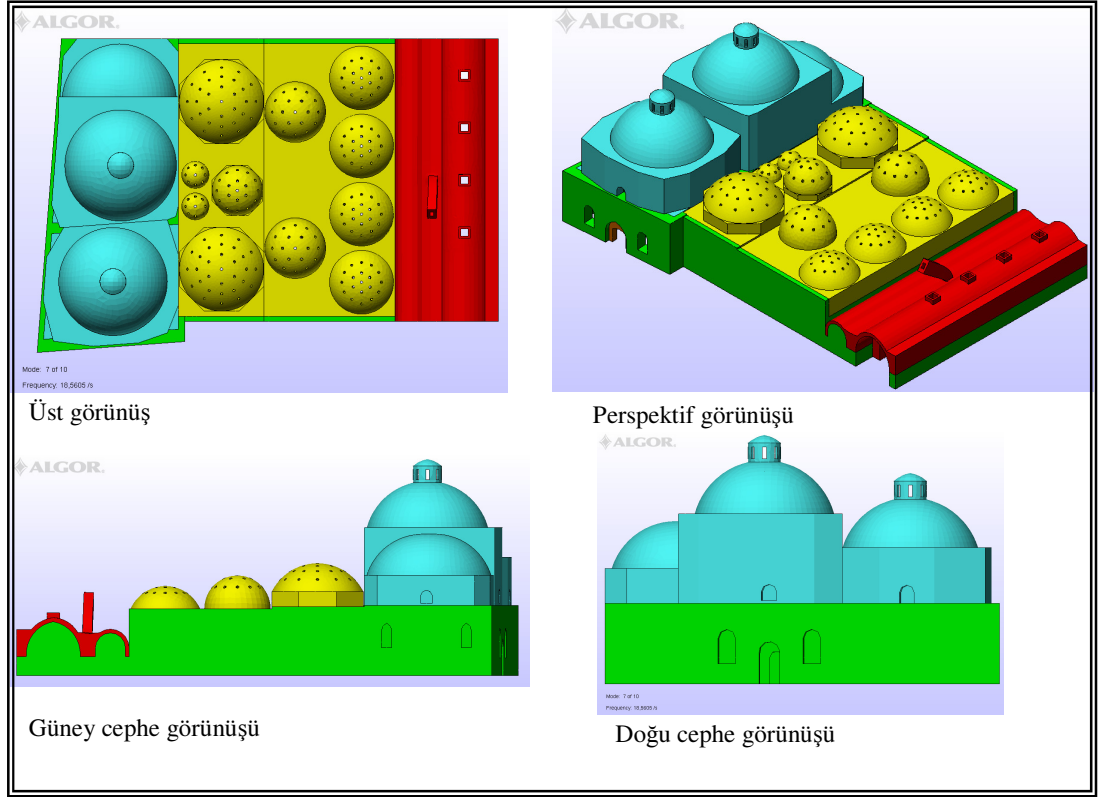
Şekil 3.143 Yapının dördüncü mod şekli



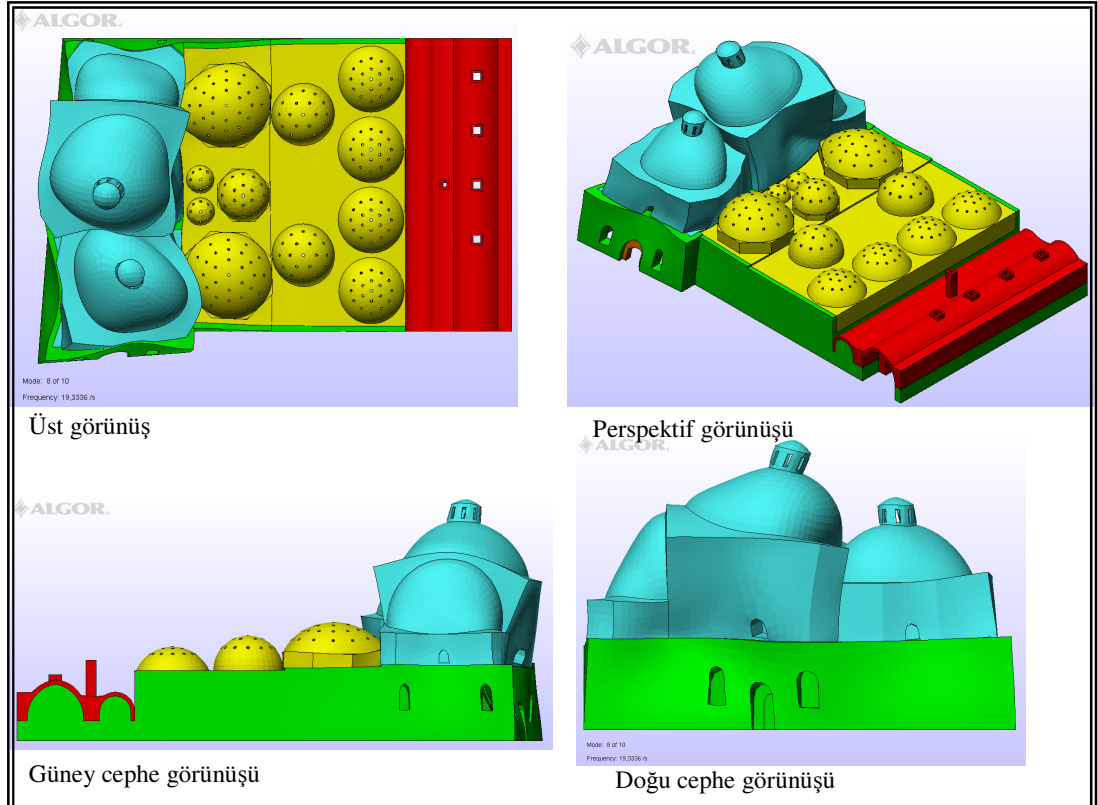
Şekil 3.144 Yapının beşinci mod şekli



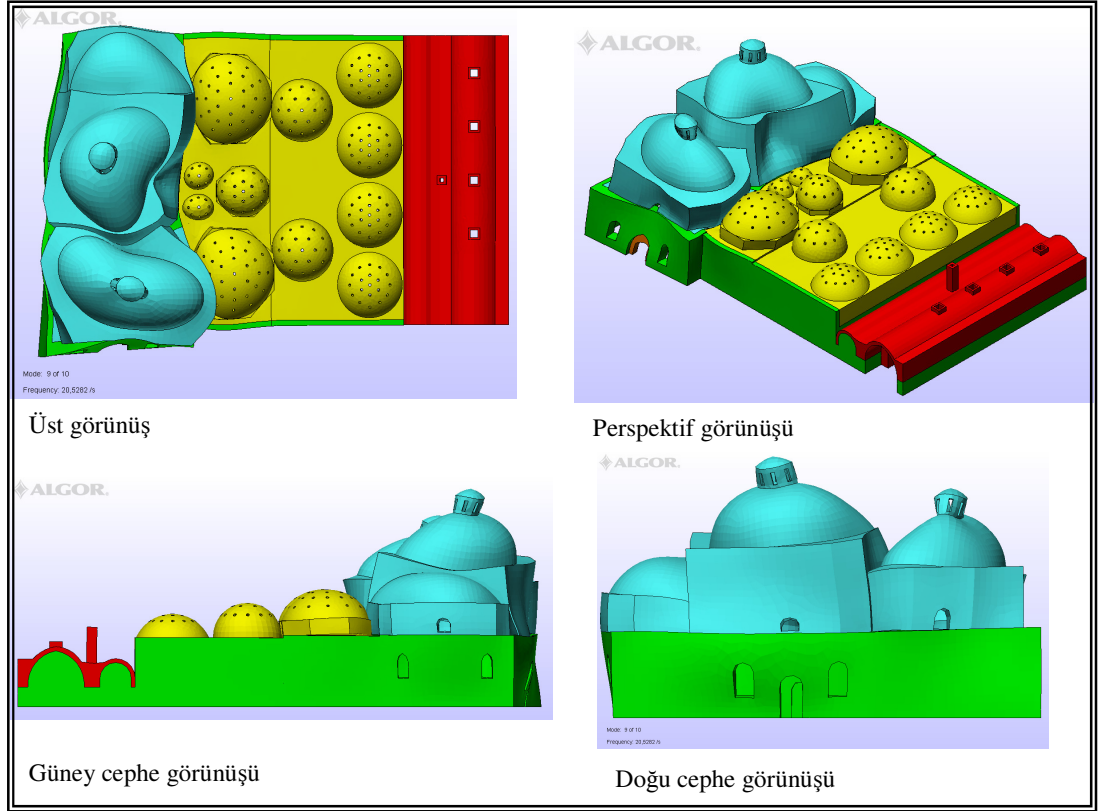
Şekil 3.145 Yapının altıncı mod şekli



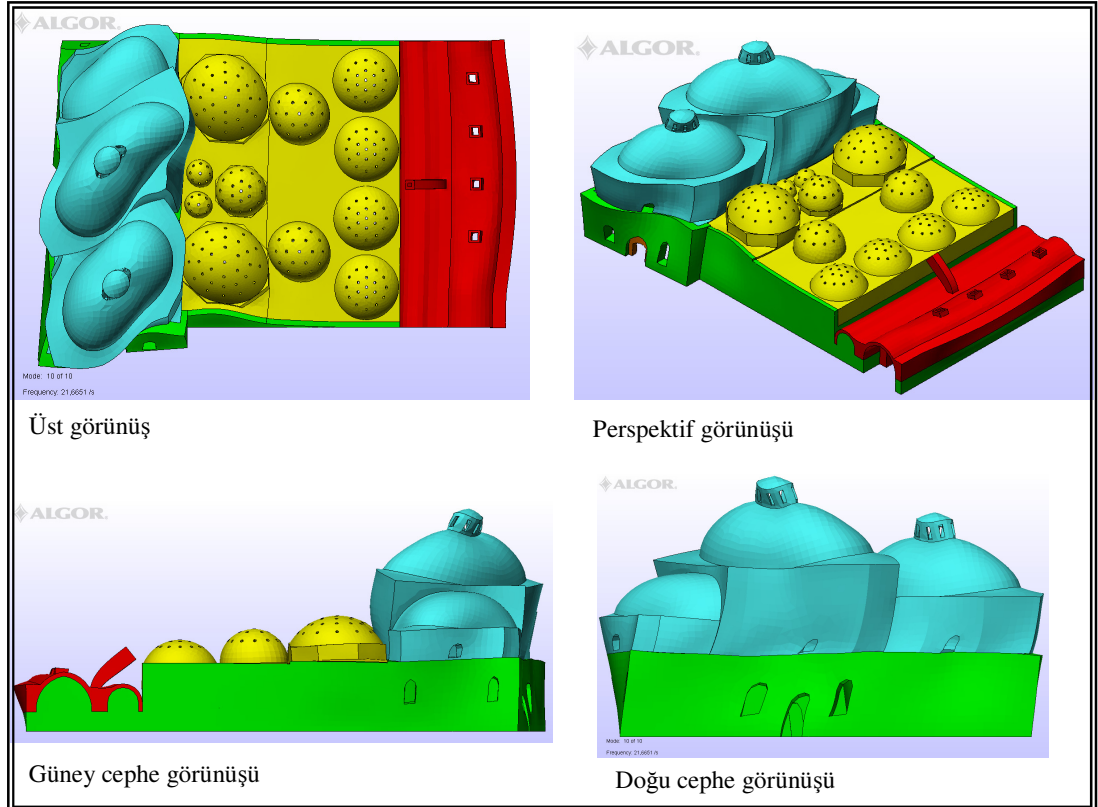
Şekil 3.146 Yapının yedinci mod şekli



Şekil 3.147 Yapının sekizinci mod şekli



Şekil 3.148 Yapının dokuzuncu mod



Şekil 3.149 Yapının onuncu mod şekli

Çizelge 3.14 Yapının modal frekansları ve kütle katılımları

Mod	Özdeğer (w ²)	Frekans (Hz)	Periyot (sn)	Kütle katılımı -X- (%)	Kütle katılımı -Y- (%)	Kütle katılımı -Z- (%)
1	3348,72	9.21	0,108578	17.87	0.44	0.03
2	7442,19	13.73	0,072833	0.34	26.85	6.38E-06
3	8220,39	14.43	0,0693	3.82	2.55	0.04
4	9326,26	15.37	0,065062	3.34	0.43	0.32
5	11102,63	16.77	0,05963	2.45	0.38	0.01
6	12284,48	17.64	0,056689	0.62	1.35E-06	9.94E-06
7	13599,27	18.56	0,053879	2.29E-05	0.04	1.53E-08
8	14751,07	19.33	0,051733	1.05	0.18	2.62
9	16639,40	20.53	0,048709	1.43	1.32E-05	0.77
10	18538,63	21.67	0,046147	0.10	0.58	1.13E-05
11	18538,63	21.67	0,046147	3.92	0.01	0.02
12	20684,80	22.89	0,043687	0.61	0.08	0.05
13	22081,17	23.65	0,042283	1.56	0.02	0.91
14	24065,89	24.69	0,040502	3.73	0.44	2.92
15	25469,90	25.40	0,03937	5.38	0.22	0.01
16	25791,79	25.56	0,039124	0.97	1.40	1.38
17	27203,10	26.25	0,038095	0.55	1.91	1.71
18	28080,56	26.67	0,037495	2.33	9.35E-07	0.42
19	28249,28	26.75	0,037383	0.68	11.74	0.21
20	28312,67	26.78	0,037341	0.27	1.76	0.06

Deprem analizlerinde 2007 yılına ait “Deprem Bölgelerindeki Yapılar Hakkında Yönetmeliğin” ikinci bölümünde yer alan hesap kuralları dikkate alınarak davranış spektrumu analizleri yapılmıştır. Davranış spektrumu hesaplarında Tam Karesel Birleştirme CQC (Complete Quadratic Combination) yöntemi kullanılmıştır.

Analizler için kullanılacak ivme spektrumu grafiği denklem 3.21 ve 3.22 kullanılarak oluşturulmuştur (ABYYHY, 2007, s:10).

$$A(T) = A_0 \cdot I \cdot S(T) \quad \text{Denklem 3.21}$$

$$S_{ae}(T) = A(T) \cdot g \quad \text{Denklem 3.22}$$

%5 sönüm oranı için tanımlanan Elastik İvme Spektrumu'nun ordinatı olan elastik spektral ivme, $S_{ae}(T)$, spektral ivme katsayısı ile yerçekimi ivmesi, g 'nin

çarpımına karşı gelmektedir. Yapı önem katsayısı $I=1$ olarak alınmıştır (ABYYHY, 2007, s:10).

Yapının bulunduğu Bursa il merkezinin 1. derece deprem bölgesinde yer alması nedeniyle etkin yer ivme katsayısı $A_0=0,4$ olarak alınmıştır (ABYYHY, 2007, s:10). Spektrum katsayıları $S(T)$ ise denklem 3.23a, 3.23b ve 3.23c kullanılarak hesaplanmıştır (ABYYHY, 2007, s:11).

$$S(T) = 1 + 1,5 \cdot \frac{T}{T_A} \quad (0 \leq T \leq T_A) \quad \text{Denklem 3.23a}$$

$$S(T) = 2,5 \quad (T_A < T \leq T_B) \quad \text{Denklem 3.23b}$$

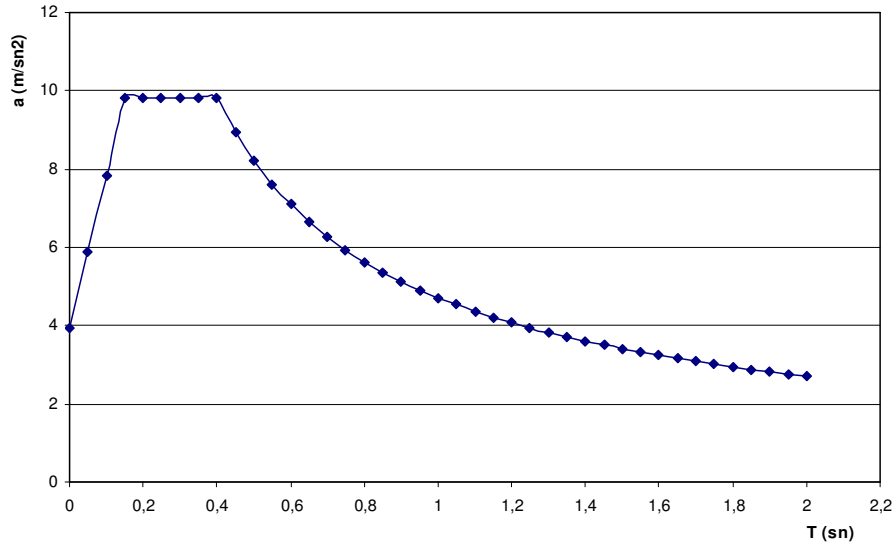
$$S(T) = 2,5 \cdot \left(\frac{T_B}{T} \right)^{0,8} \quad (T > T_B) \quad \text{Denklem 3.23c}$$

T , T_A ve T_B yapının doğal titreşim periyodları olup yerel zemin sınıflarıyla ilişkilidir. Yerel zemin sınıfları Çizelge 3.15'te gösterilmiştir (ABYYHY, 2007, s:11).

Çizelge 3.15 Yerel zemin sınıfına bağlı spektrum karakteristik periyodları

Yerel Zemin Sınıfı	T_A (saniye)	T_B (saniye)
Z1	0,10	0,30
Z2	0,15	0,40
Z3	0,15	0,60
Z4	0,20	0,90

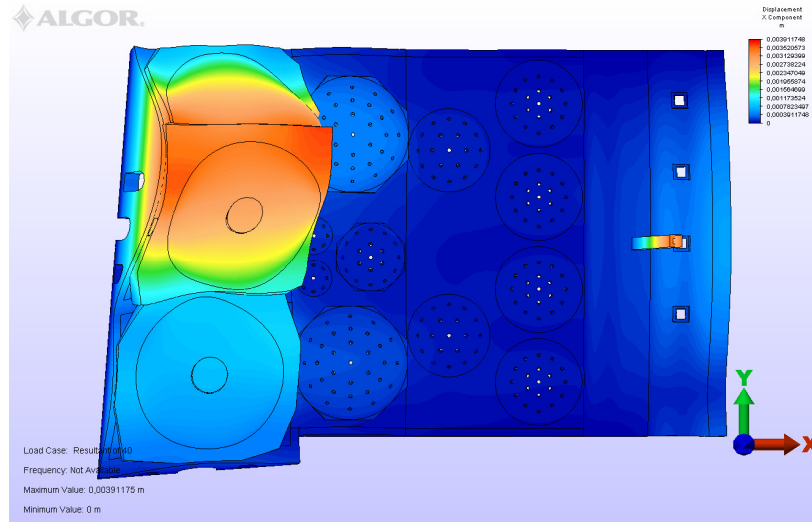
Yapının yerel zemin sınıfı Z2 olup $T_A=0,15$, $T_B=0,40$ olarak alınmıştır. İvme spektrumu grafiği Şekil 3.150'de gösterilmiştir.



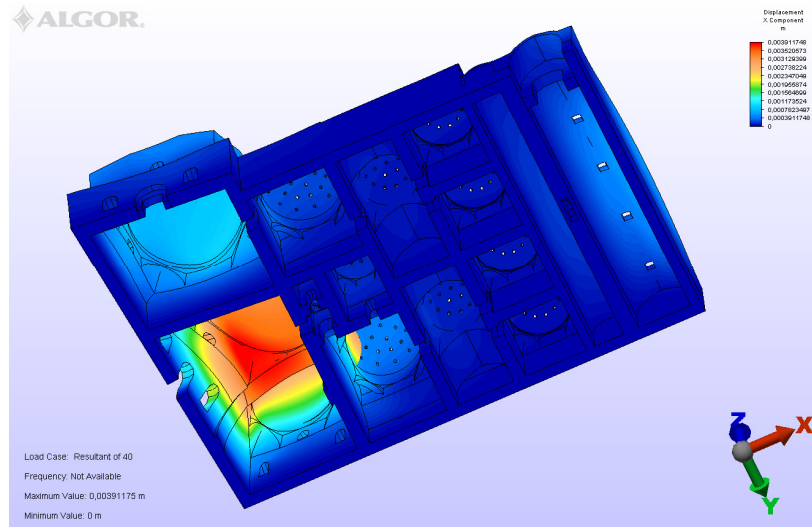
Şekil 3.150 İvme spektrumu grafiği

3.2.6.1.Yapının X yönündeki deprem analizi

Yapının X yönündeki deprem analizlerinde soğukluk kubbe kısmının yapının diğer bölgelerine göre daha fazla yer değiştirdiği gözlenmiştir (Şekil 3.151,152). Yapının X yönündeki yer değiştirmesi maksimum 3,9 mm olup, erkekler soğukluk kısmında yarım ve tam kubbeyi taşıyan kemerin yükü tromplarla birlikte duvara aktardığı kısımlarda oluşmaktadır. Ayrıca yapının su deposu ile külhan arasında bulunan bacanın da 3,4mm'lik yer değiştirme yaptığı belirlenmiştir.

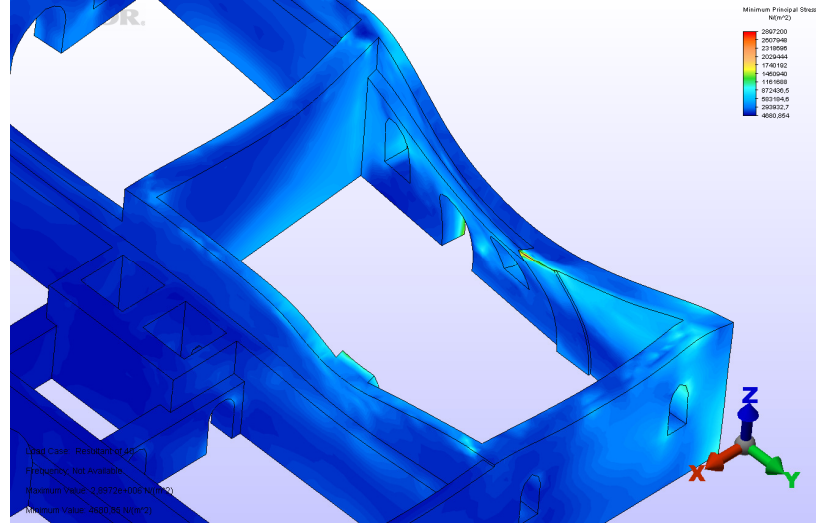


Şekil 3.151 Yapının x yönündeki yer değiştirmeleri

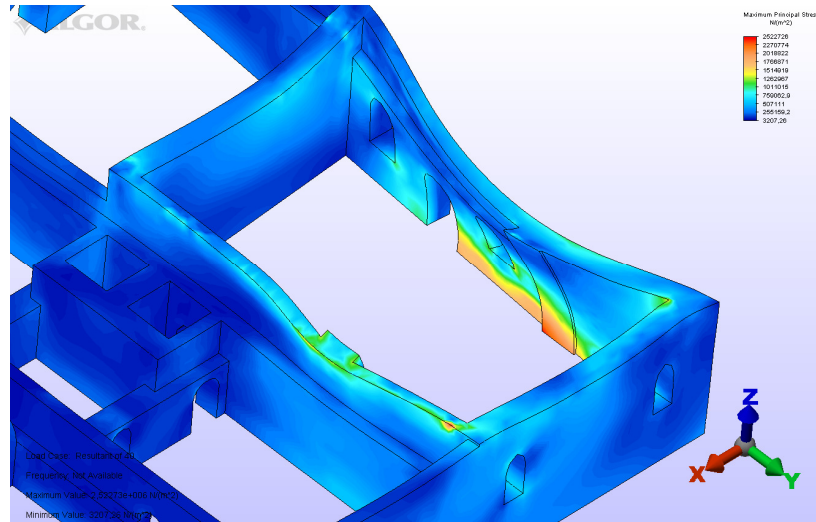


Şekil 3.152 Maksimum yer değiştirmenin olduğu erkekler soğukluk tromp geçişi

Yapının duvarlar bölümünde oluşan asal gerilmeler erkekler soğukluk bölümünün yarım ve tam kubbelerini taşıyan kemerler, trompların oturduğu bölgeler ile kemere yakın olan pencere ve kapı kenar bölgelerinde meydana gelmiştir. Bu bölgelerde bölgesel olarak oluşan maksimum asal gerilmeler 2,5 MPa ile 2,9 MPa arasında değişmektedir. Doğu yönündeki duvarda ise minimum asal gerilme 0,8~0,9Mpa civarındadır (Şekil 3.153,154).

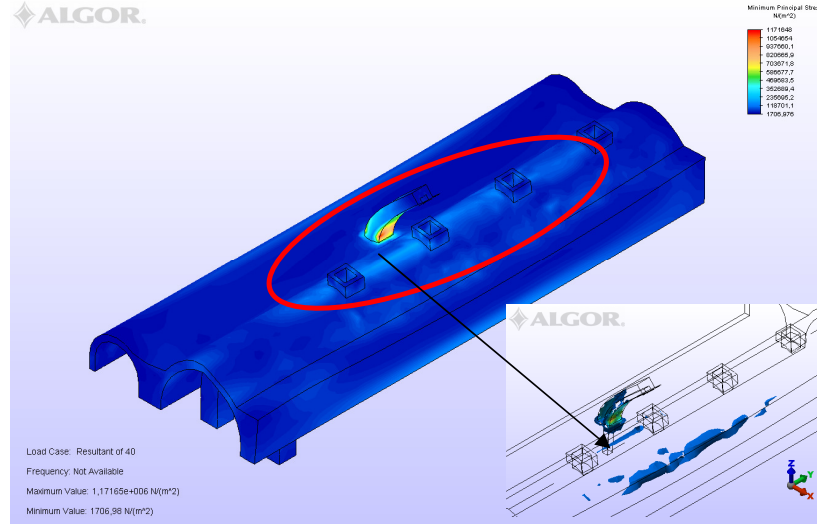


Şekil 3.153 Yapının duvarlarında kemerin oturduğu bölgede oluşan maksimum gerilmeler

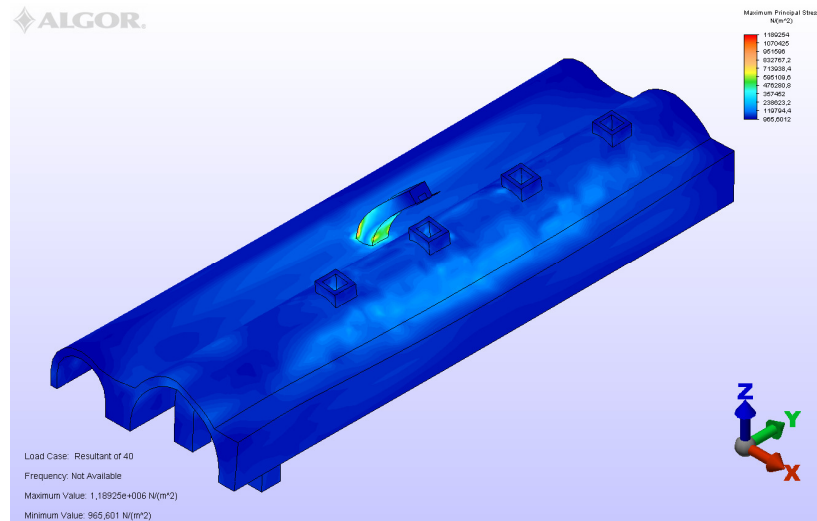


Şekil 3.154 Erkekler soğukluk bölümünde trompun yükünü duvarlara aktardığı kısımlarda oluşan gerilmeler

Yapının külhan ve su deposu arasındaki bacanın alt kısmında oluşan asal gerilmeler 1,1MPa ila 1,2MPa arasında değişmektedir (Şekil 3.155,156). Ayrıca su deposunun tonoz olan üst örtüsünde havalandırma bacaları arasındaki bölgeler ile tonozun yükünü ağırlık duvarına aktardığı bölümlerde gerilmelerin (0,4 MPa) diğer bölgelere göre daha fazla olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.155).

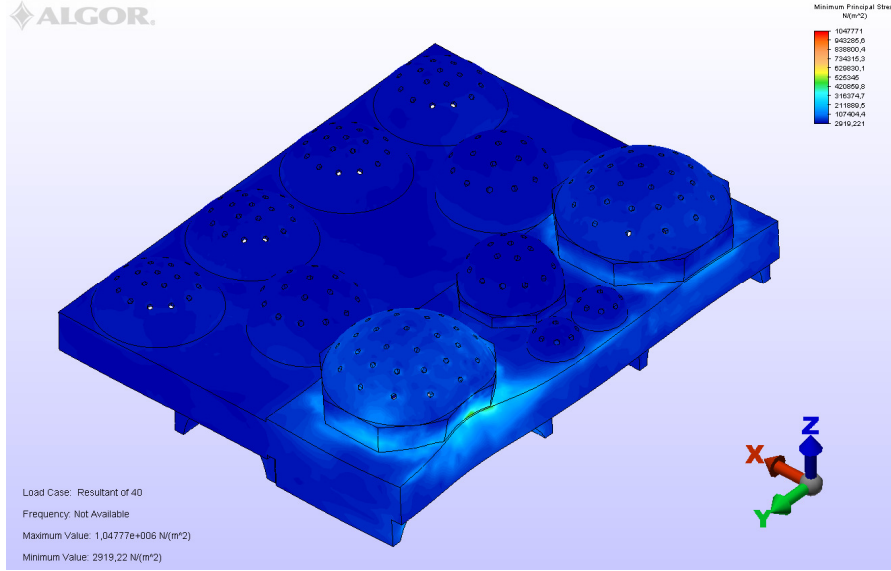


Şekil 3.155 Yapının duvarlarında kemerin oturduğu bölgede oluşan maksimum gerilmeler

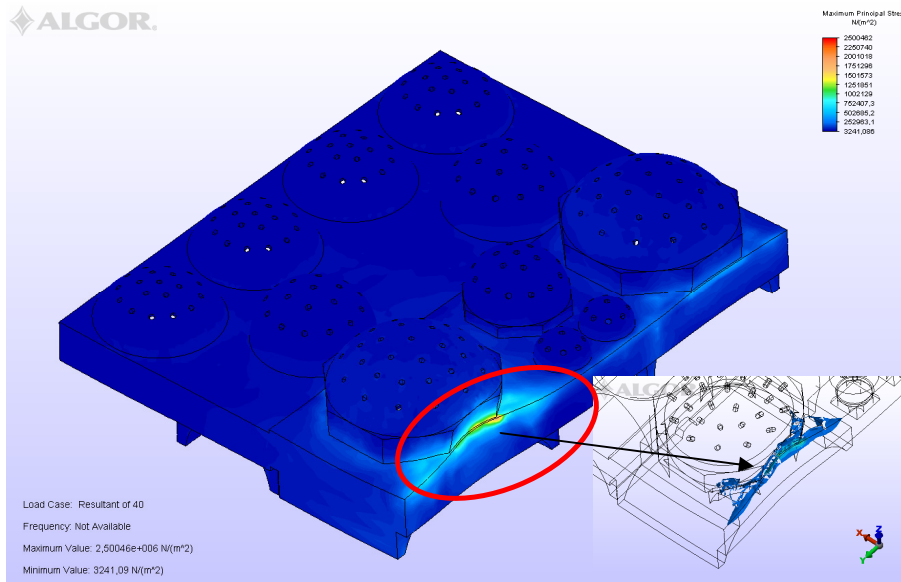


Şekil 3.156 Erkekler soğukluk bölümünde trompun yükünü duvarlara aktardığı kısımlarda oluşan gerilmeler

Yapının ılıklik, sıcaklik ve halvet kısımlarında oluşanı asal gerilmeler genellikle düşük değerklerdedir. Ancak bölgesel olarak ılıklik ve soğukluk bölümünün arasındaki bölgede asal maksimum değerkler 1,25 MPa ile 1,5 MPa değerklerine ulaşmaktadır. (Şekil 3.157,158). Şekil 3.148’de görüldüğü üzere asal gerilmelerin maksimum olduğu bölge erkekler ılıklik kubbesinin yükünü tromplara aktardığı yerlerdir.

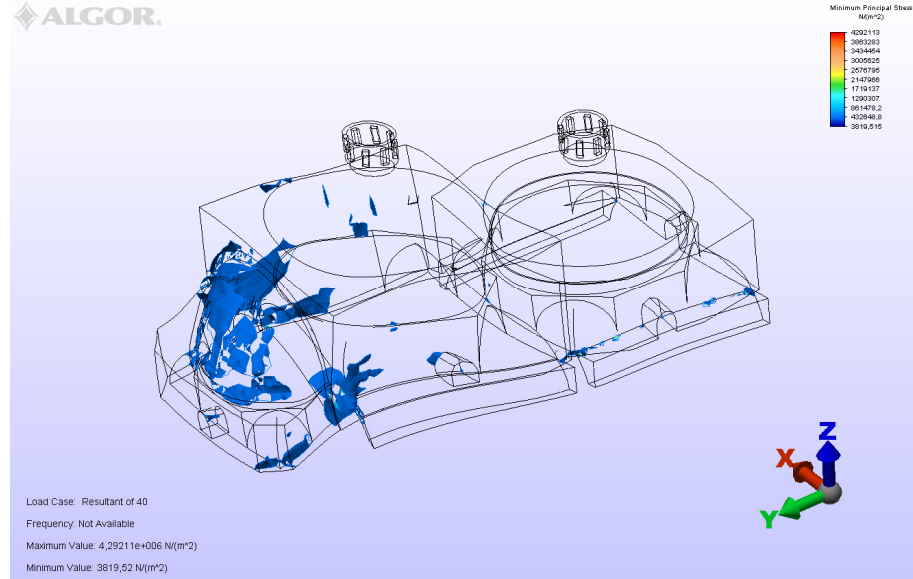


Şekil 3.157 Yapının duvarlarında kemerin oturduğu bölgede oluşın maksimum gerilmeler

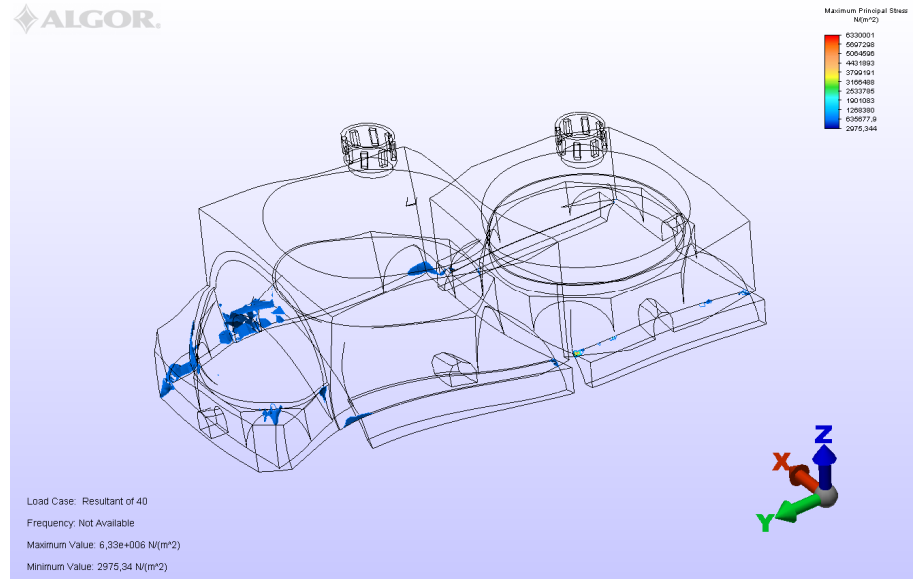


Şekil 3.158 Erkekler soğukluk bölümünde trompun yükünü duvarlara aktardığı kısımlarda oluşın gerilmeler

Yapının erkekler ve kadınlar soğukluk kısımlarında oluşan asal gerilmelerin 0,8 MPa ile 1 MPa arasında olduğu bölgeler şekil 3.159 ve şekil 3.160'de gösterilmiştir. Gerilmeler erkekler ve kadınlar tromp kenarlarında, erkekler soğukluk bölümünde yarım kubbe ile tam kubbeyi taşıyan kemerin duvara oturduğu bölgelerde, yarım kubbede, ılıklik bölümünün soğukluk bölümüyle birleştiği kısımlarda oluşmaktadır.



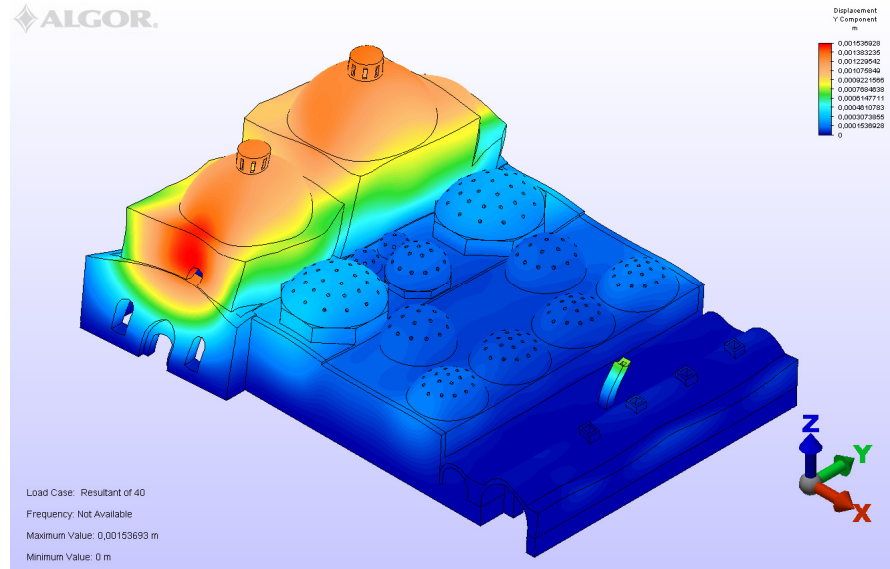
Şekil 3.159 Yapının duvarlarında kemerin oturduğu bölgede oluşan minimum gerilmeler



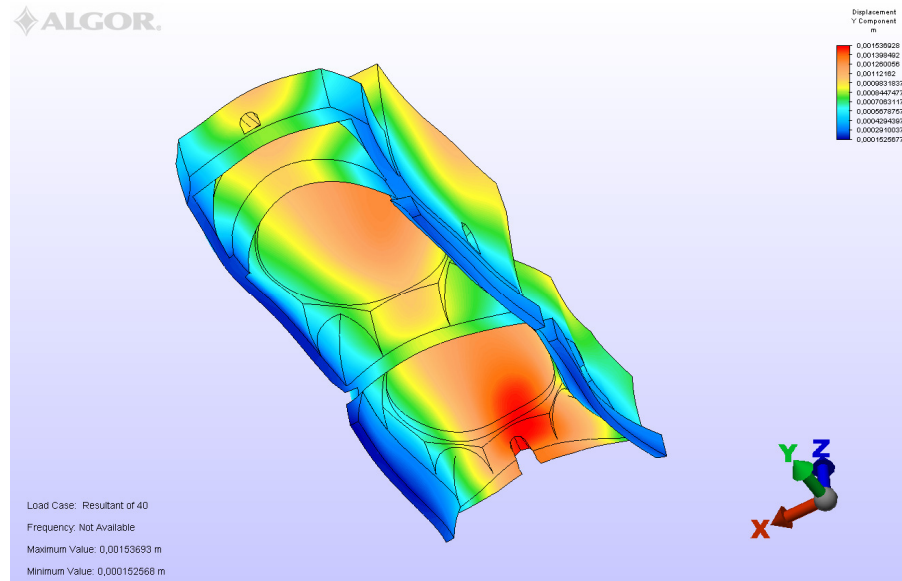
Şekil 3.160 Erkekler soğukluk bölümünde trompun yükünü duvarlara aktardığı kısımlarda oluşan maksimum gerilmeler

3.2.6.2.Yapının Y yönündeki deprem analizi

Yapının Y yönündeki deprem analizlerinde kadınlar ve erkekler soğukluk kubbe kısımlarının yapının diğer bölgelerine göre daha fazla yer değiştirdiği gözlenmiştir (Şekil 3.161,162). Yapının Y yönündeki yer değiştirmesi maksimum 1,5 mm olup, kadınlar soğukluk kubbesinin eteklerinde, duvara geçiş elemanlarına aktardığı bölgelerde oluşmaktadır. Ayrıca yapının su deposu ile külhan arasında bulunan bacanın da 0,75 mm'lik yer değiştirme yaptığı belirlenmiştir.

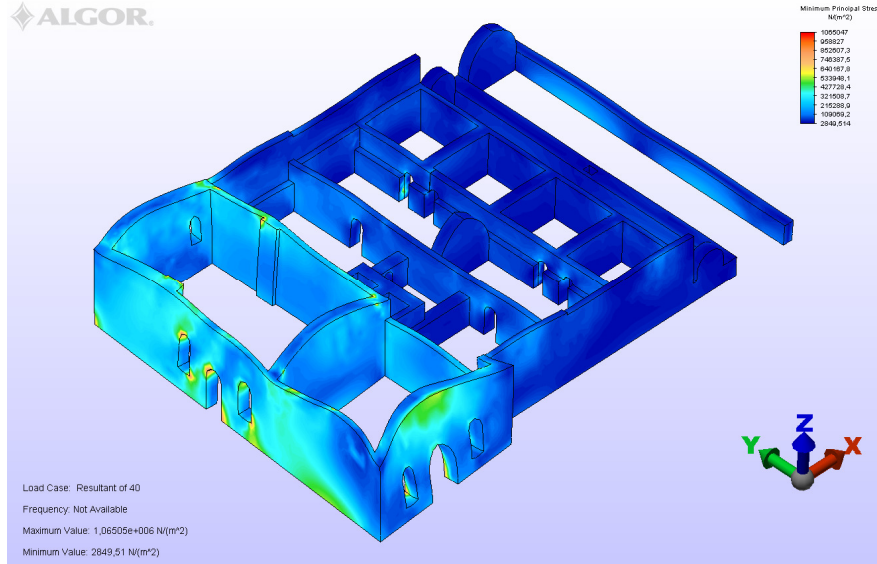


Şekil 3.161 Yapının soğukluk bölümlerinde oluşan Y yönündeki yer değiştirmeler

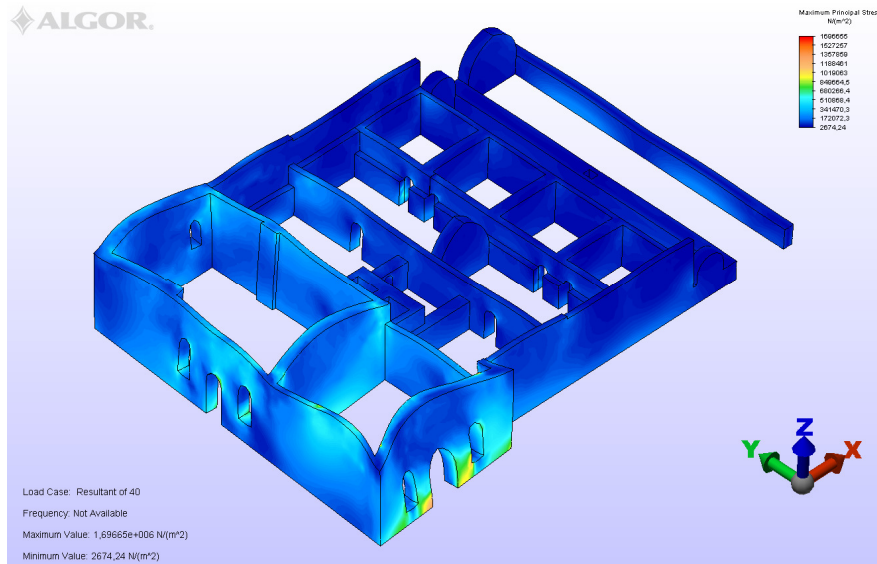


Şekil 3.162 Maksimum yer değiştirmenin olduğu kadınlar soğukluk kısmı

Yapının duvarlarında oluşan asal gerilmeler genel olarak sınır gerilme (duvar çatlama emniyet gerilmesi) değerinden düşük düzeylerde dir. Ancak yapının soğukluk bölümlerinde maksimum değerlere ulaşmaktadır. Maksimum değerler 1,06 MPa ila 1,69 MPa olup erkekler ve kadınlar soğukluk duvarlarının köşe birleşiminde oluşmaktadır. Ayrıca pencere ve kapı köşe bölgelerinde, kubbeyi taşıyan kemerlerde ve kadınlar soğukluk kuzey cephe duvarında gerilmeler yüksek değerlerdedir (Şekil 3.163,164).

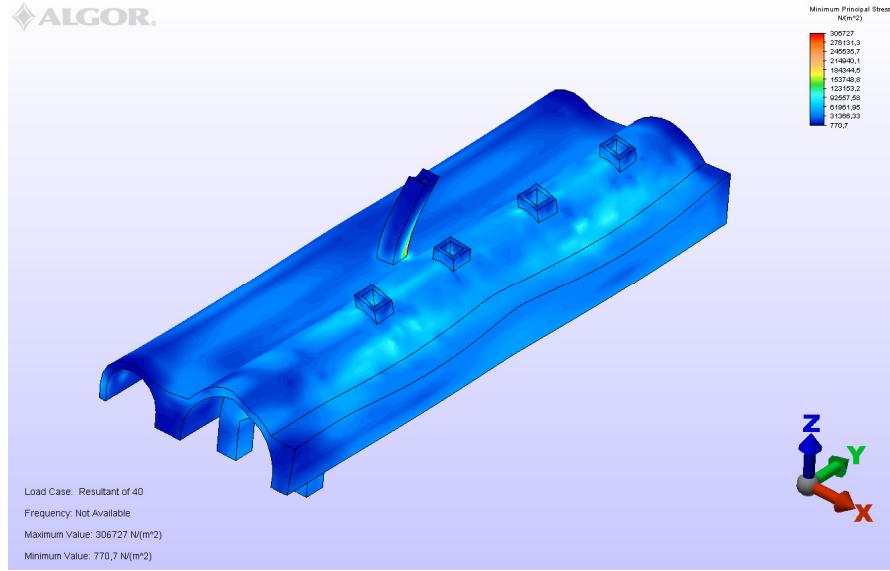


Şekil 3.163 Yapının duvarlarında pencere ve kapı köşeleri, duvar birleşim bölgeleri ve kadınlar soğukluk kuzey duvarında oluşan gerilmeler

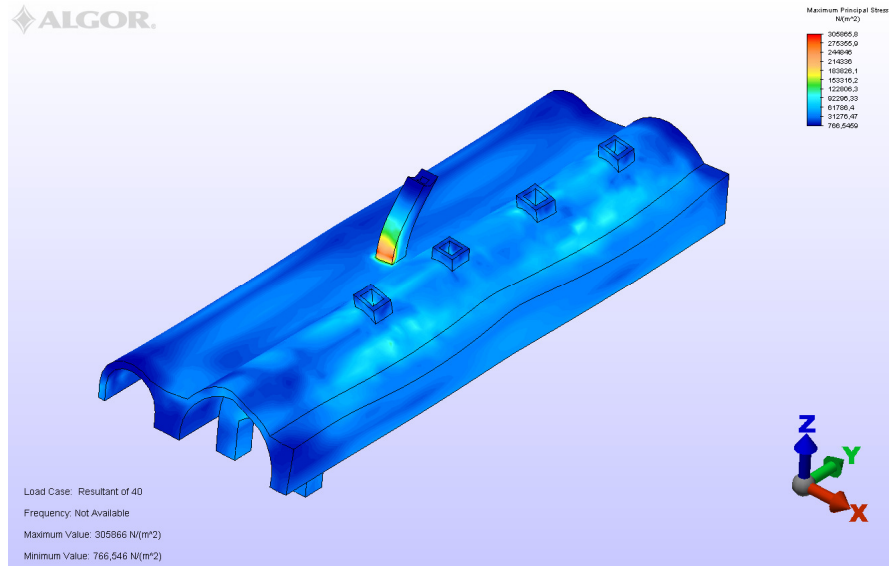


Şekil 3.164 Kadınlar soğukluk bölümünde kapı ve pencere köşelerinde oluşan gerilmeler

Yapının su deposu ve külhan bölümlerinde gerilmeler bacanın alt bölgesinde maksimum değerlerine (0,31MPa) ulaşmaktadır. Diğer bölgelerde gerilme değerleri düşüktür. Bu değerler maksimum gerilme dayanımı olan 0,447 MPa değerinden daha düşüktür. Tonoz kenarlarında, tonoz örtüsünde yer alan havalandırma bacalarında 0,1 MPa değerlerinde gerilmeler oluşmaktadır (Şekil 3.165,166).

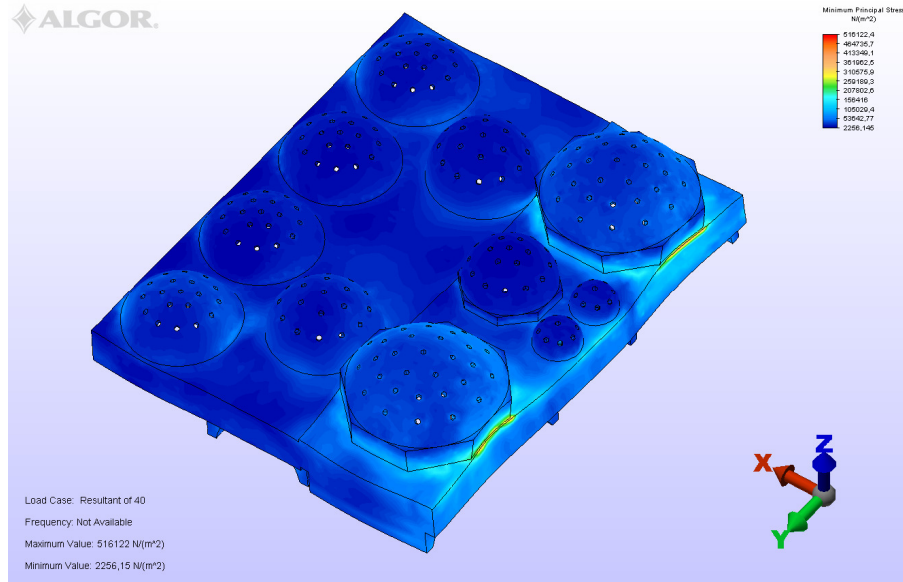


Şekil 3.165 Yapının su deposu ve külhan bölümlerinde oluşan minimum gerilmeler

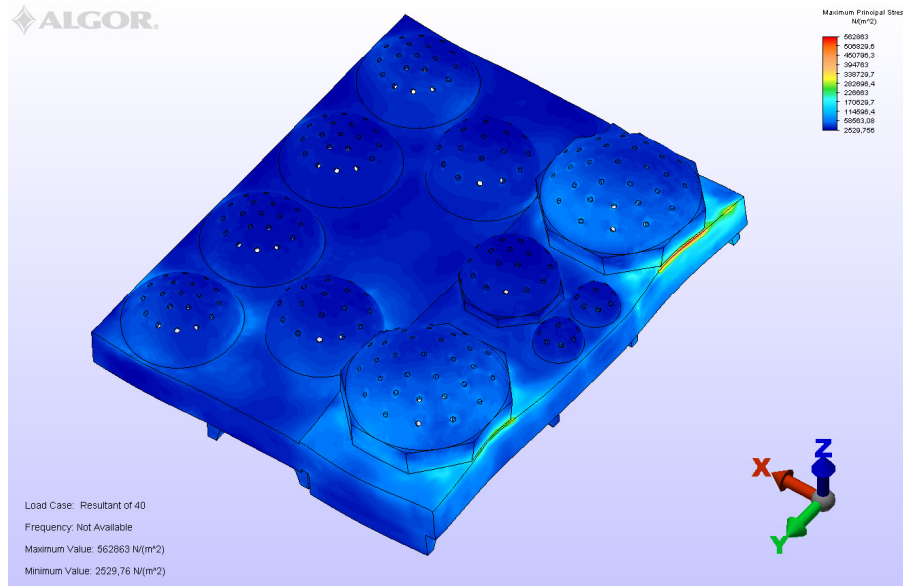


Şekil 3.166 Yapının su deposu ve külhan bölümlerinde oluşan maksimum gerilmeler

Yapının ılıklik, sıcaklik ve halvet bölümlerinde asal gerilmeler genellikle düşük değerlerde olup ılıklik kubbe duvarlarının soğukluk kubbe duvarlarıyla birleştiği kısımlarda 0,51 MPa ila 0,56 MPa değerinde oluşmaktadır. Ayrıca gerilmeler 0,20~0,25 MPa düzeylerinde ılıklik kubbe kenarlarında ve tromplarda meydana gelmektedir. Diğer bölgelerde herhangi bir zorlanma meydana gelmemektedir (Şekil 3.167,168).

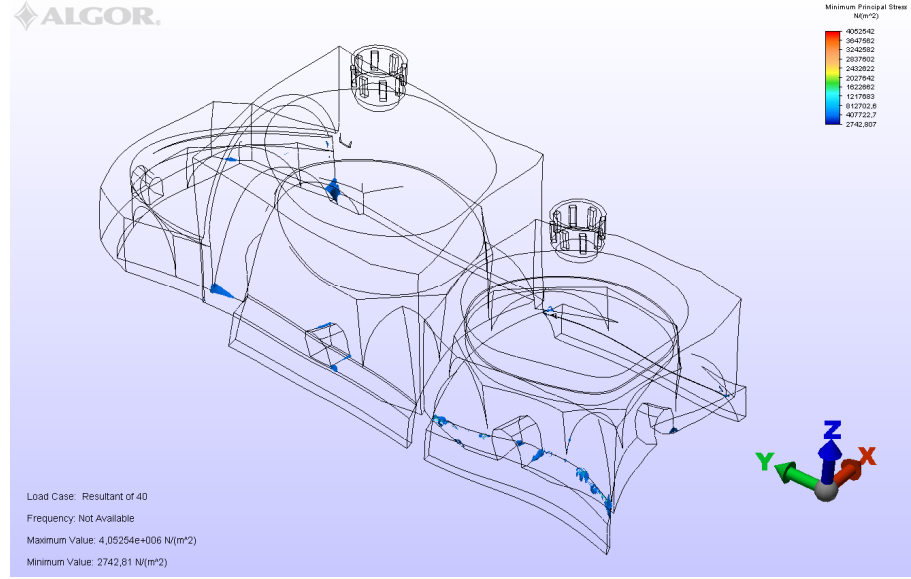


Şekil 3.167 Yapının ılıklik, sıcaklik ve halvet bölümlerinde oluşan minimum gerilmeler

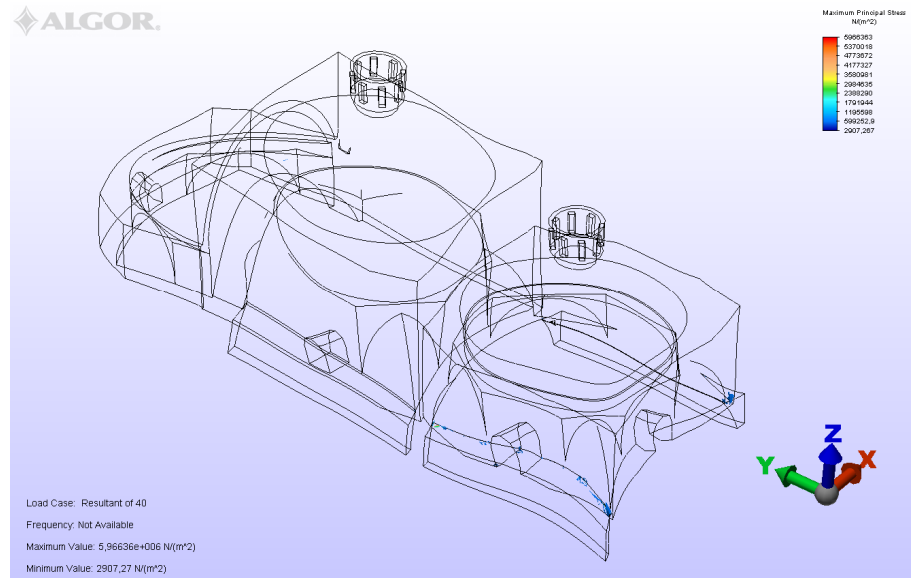


Şekil 3.168 Yapının ılıklik, sıcaklik ve halvet bölümlerinde oluşan maksimum gerilmeler

Yapının soğukluk bölümlerinde ise maksimum gerilmeler kadınlar ve erkekler soğukluk bölümünün tromplarında oluşmaktadır. Bu kısımlarda gerilme değerleri 1,2~1,6 MPa değerleri arasındadır. (Şekil 3.169,170).



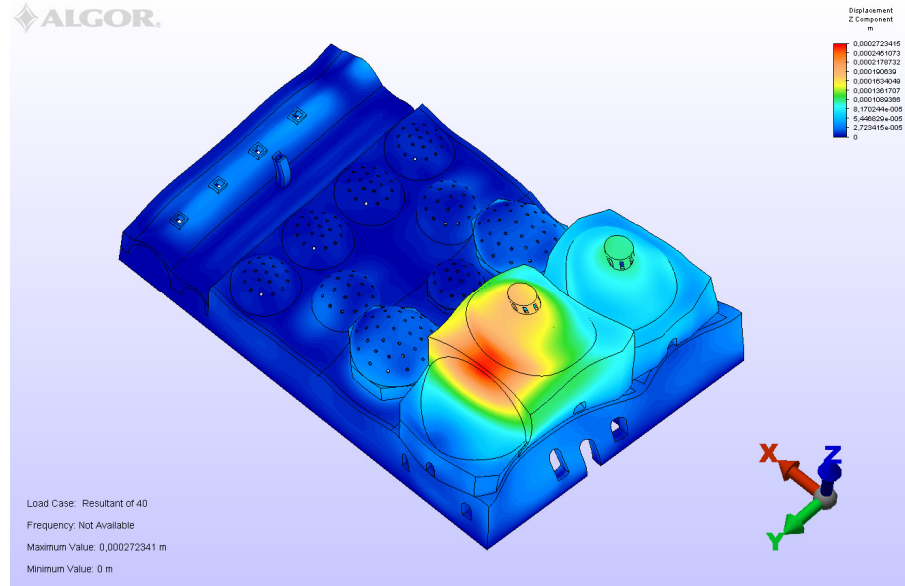
Şekil 3.169 Yapının soğukluk bölümlerinde oluşan minimum gerilmeler



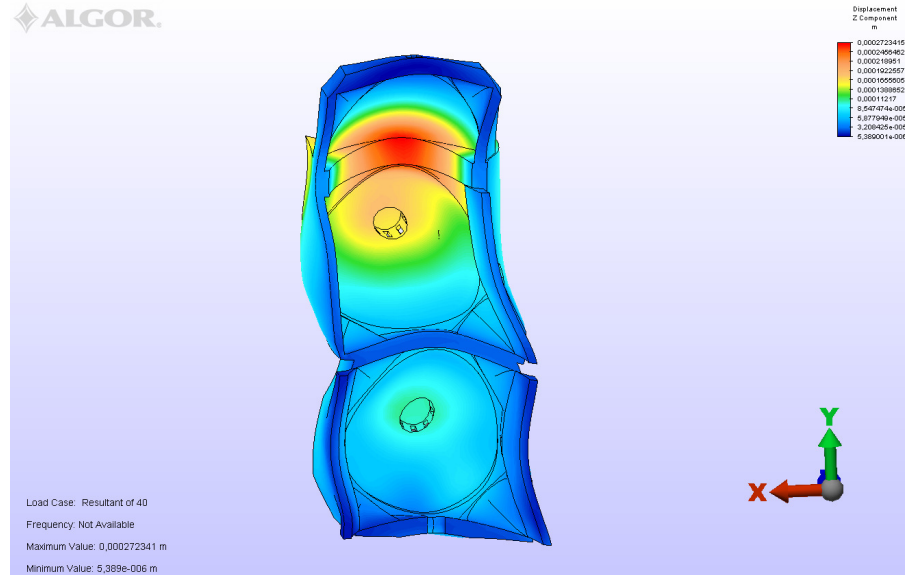
Şekil 3.170 Yapının soğukluk bölümlerinde oluşan maksimum gerilmeler

3.2.6.3.Yapının Z yönündeki deprem analizi

Yapının Z yönündeki deprem analizlerinde kadınlar ve erkekler soğukluk kubbe kısımlarının yapının diğer bölgelerine göre daha fazla yer değiştirdiği gözlenmiştir (Şekil 3.171,172). Yapının Z yönündeki yer değiştirmesi maksimum 0,27 mm olup, erkekler soğukluk kubbelerini taşıyan kemerin orta bölgesinde oluşmaktadır.

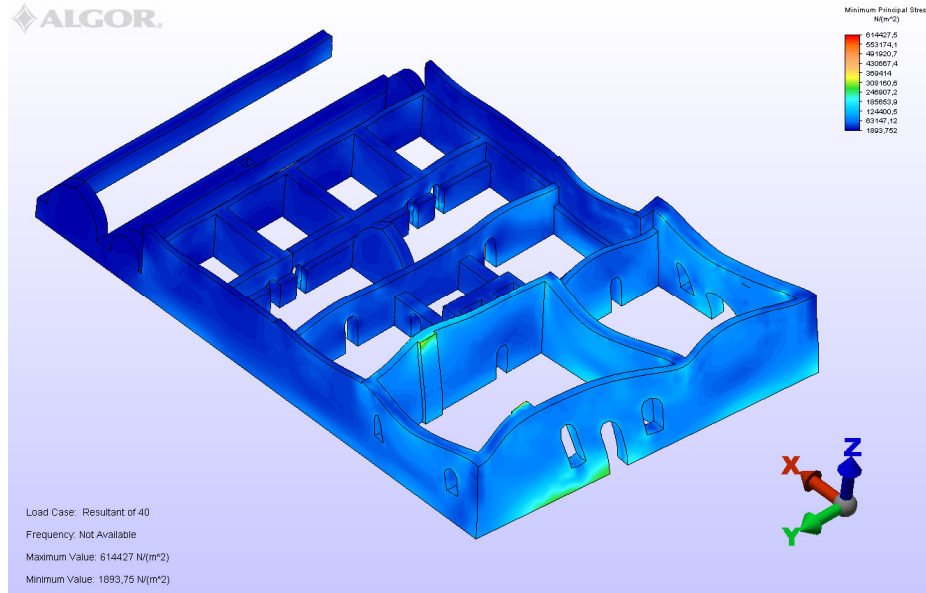


Şekil 3.171 Yapının soğukluk bölümlerinde oluşan düşey yer değiştirmeler

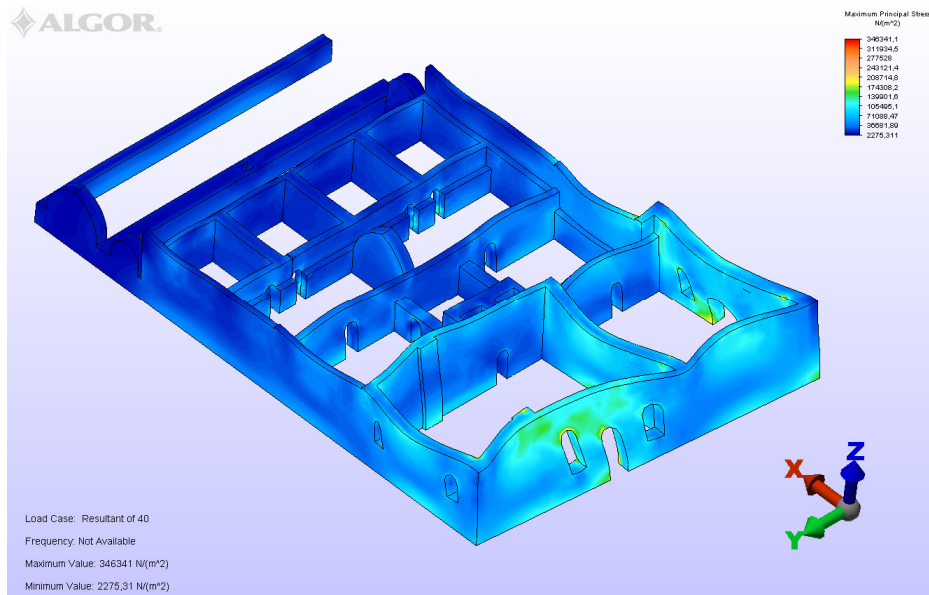


Şekil 3.172 Yapının soğukluk kubbelerini taşıyan kemerde oluşan maksimum yer değiştirme

Yapının duvarlarında bölgesel olarak oluşan maksimum gerilmeler soğukluk kubbelerini taşıyan kemerlerin duvara oturduğu bölümler, soğukluk ve sıcaklık köşe birleşimleri, soğukluk duvarlarının orta bölgeleri olup 0,3 MPa ila 0,6 MPa arasında değişmektedir. Ayrıca pencere ve kapı kenarlarında da gerilmelerin yükseldiği gözlenmektedir (Şekil 3.173,174).

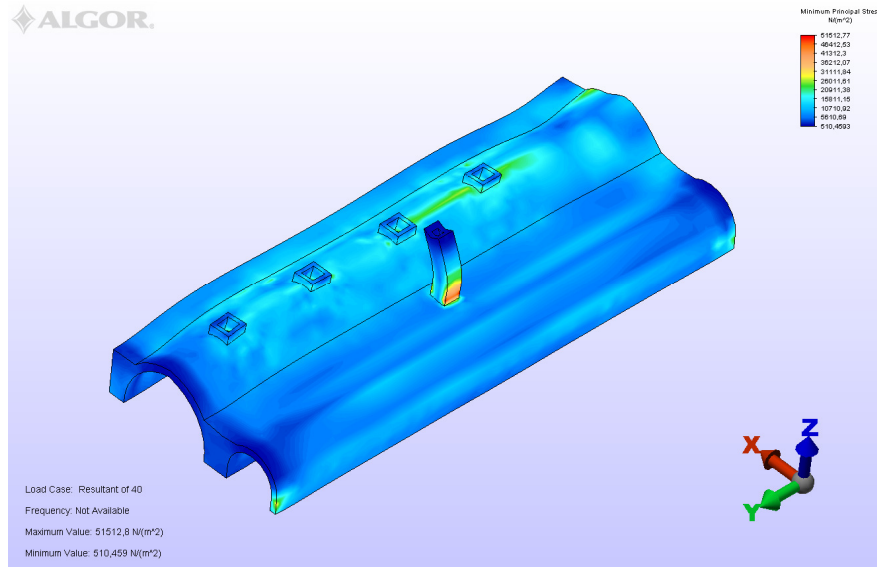


Şekil 3.173 Yapının duvarlarında oluşan minimum gerilmeler

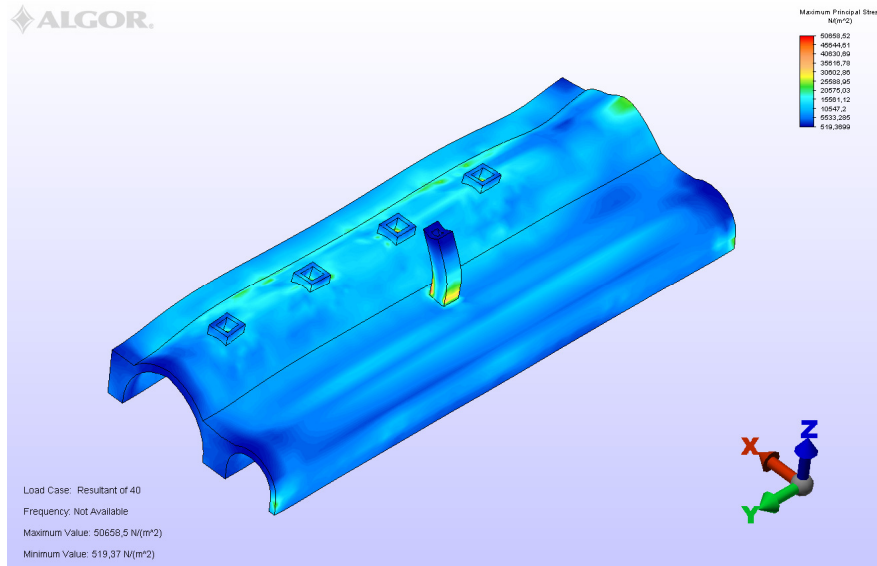


Şekil 3.174 Yapının duvarlarında oluşan maksimum gerilmeler

Yapının su deposu ve külhan bölümlerinde asal gerilmeler baca alt kısımlarında, tonoz kenar bölgelerinde ve havalandırma bacalarının olduğu kısımlarda meydana gelmektedir. Gerilme değerleri düşük olup 0,05 MPa değerine yakındır (Şekil 3.175,176). Yapının külhan bölümünde mevcut halde sadece duvarları yerinde olup tonoz kısmı tamamen yıkılmış vaziyettedir.

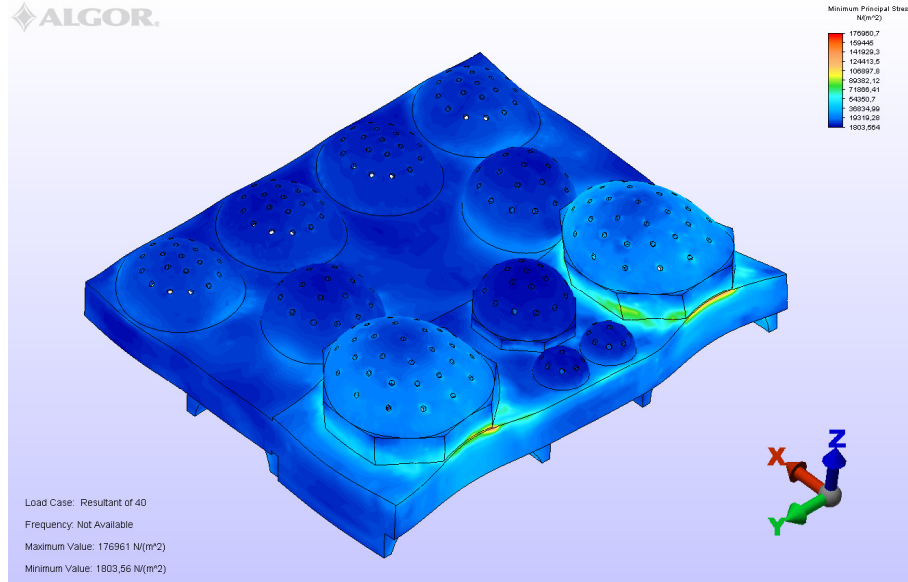


Şekil 3.175 Yapının su deposu ve külhan bölümlerinde oluşan minimum gerilmeler

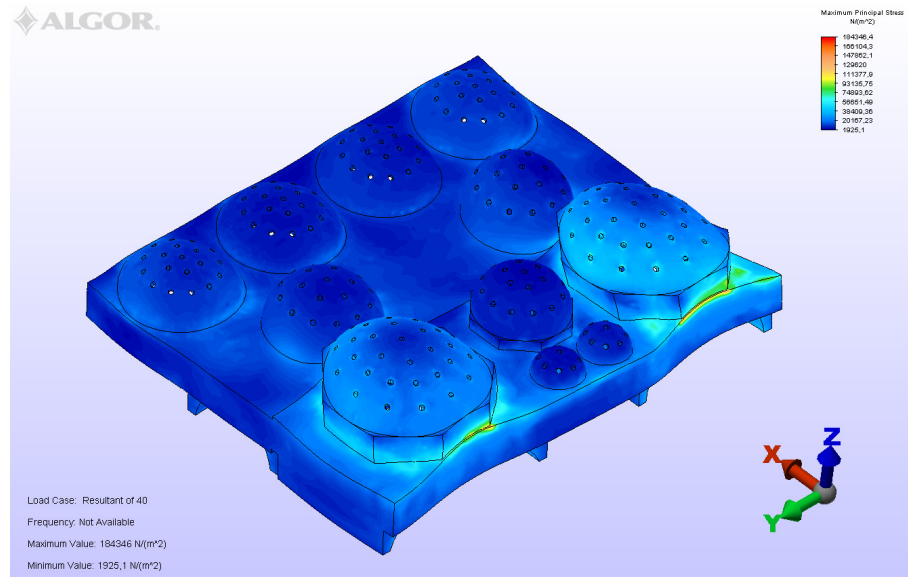


Şekil 3.176 Yapının su deposu ve külhan bölümlerinde oluşan maksimum gerilmeler

Yapının ılıklik, sıcaklik ve halvet bölümlerinde oluşan maksimum gerilmeler bölgesel olarak ılıklik ve soğukluk kısımlarının birleştiği kısımlarda 0,17 MPa ila 0,18 MPa değerleri arasında oluşmaktadır. Kubbe kenarları ve tromplarda da gerilme değerleri 0,08 MPa düzeyindedir (Şekil 3.177,178).

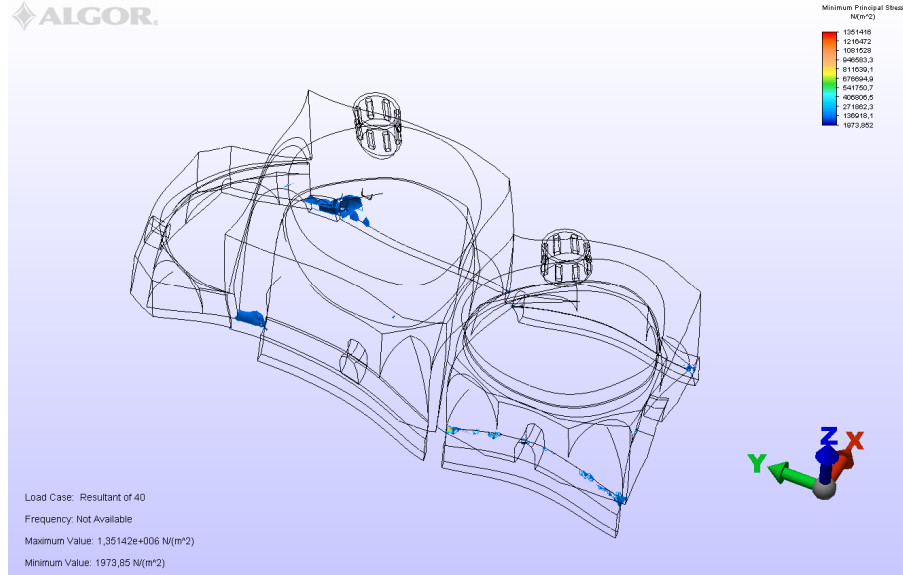


Şekil 3.177 Yapının su deposu ve külhan bölümlerinde oluşan minimum gerilmeler

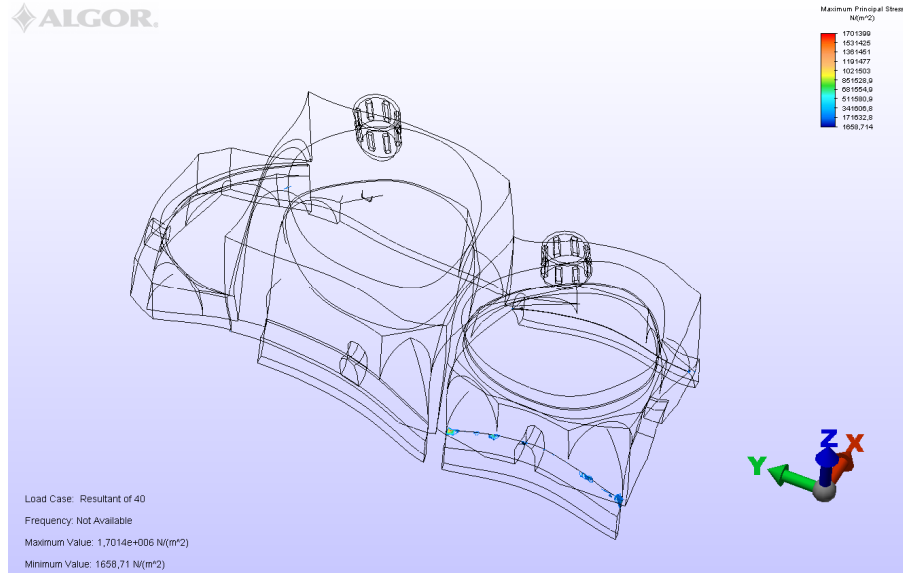


Şekil 3.178 Yapının su deposu ve külhan bölümlerinde oluşan maksimum gerilmeler

Son olarak yapının soğukluk bölümlerinde maksimum gerilme değerlerinin 0,27 MPa ila 0,40 MPa arasında olup trompların kenar bölgelerinde oluştuğu belirlenmiştir. Ayrıca erkekler soğukluk kubbelerini taşıyan kemerin yüklerini duvarlara aktardığı bölgelerde gerilmelerin 0,3 MPa değerlerine ulaştığı gözlenmiştir (Şekil 3.179,180).



Şekil 3.179 Yapının soğukluk bölümlerinde oluşan minimum gerilmeler



Şekil 3.180 Yapının soğukluk bölümlerinde oluşan maksimum gerilmeler

3.2.7. Deprem Kuvvetleri Altında Duvarlarda Oluşan Kayma Gerilmelerinin Kontrolü

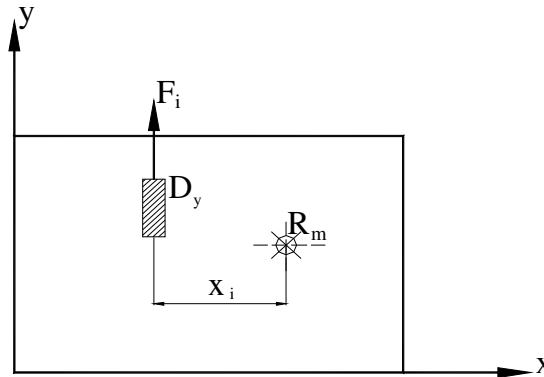
Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analiz sonuçlarına ek olarak deprem hesapları yapının duvarlarında 2007 yılına ait Deprem Yönetmeliği esasları kullanılarak kontrol edilmiştir.

Yapıya etki eden deprem yükü, ilgili yönetmeliğin 5.2 maddesi kullanılarak tespit edilmiştir. Buna göre; $S(T_1) = 2.5$ ve $Ra(T_1) = 2.0$ olarak ve hamamın bulunduğu yer 1.derece deprem bölgesinde olduğu için etkin yer ivme katsayısı $A_0=0,4$ olarak, yapı önem katsayısı da 1 olarak alınmıştır. Yönetmeliğe göre yapılan hesaplamalar sonucunda yapıya etki eden eşdeğer deprem yükü, yapı ağırlığının 0,50'si olarak tespit edilmiştir. Yapının toplam ağırlığı 56949,44KN olarak hesaplanmıştır. Buna göre deprem yükü bu oranın yarısı kadar (28474,22KN) alınmıştır.

- **Kayma Gerilmesinin Hesabı**

Deprem hesap yükünün duvarların yatay derzlerine paralel olarak oluşturduğu kayma gerilmelerinin hesabı Deprem Yönetmeliği'nin 5.3.3 maddesine göre hesaplanacaktır. Bu maddeye göre öncelikle yığma binanın her duvar eksenindeki kapı veya pencere boşlukları arasında kalan dolu duvar parçalarının görelî kayma rijitliği hesaplanacaktır. Daha sonra duvar ekseninin kayma rijitliği, o eksenindeki duvar parçalarının kayma rijitliklerinin toplamı ile bulunacaktır. Duvar eksenlerinin kayma rijitliğinden gidilerek binanın kayma rijitlik merkezi hesaplanacaktır.

Duvarlara gelen kesme kuvveti, kat kesme kuvveti yanında kat burulma momenti de göz önüne alınarak binanın birbirine dik her iki eksenini doğrultusunda hesaplanacaktır. Şekil 3.181'de örnek olarak burulma momenti etkisi ile duvara etkiyen F yatay kuvveti, Denklem 3.24'te ise duvara etkiyen kuvvetin hesaplanması gösterilmiştir.



Şekil 3.181 Burulma momenti etkisiyle duvara etkiyen yatay kuvvet (Uyanık H.,1994 s.37)

$$F_i = \frac{M_r}{I_o} \cdot D_y \cdot x_i \quad \text{Denklem 3.24}$$

Denklemdede;

F_i = Duvara gelen yatay kuvvet

M_r = Burulma momenti

I_o = Polar Atalet momenti

D_y = Duvar rijitliği

X_i = Duvarın rijitlik merkezine olan uzaklığıdır.

Duvara gelen deprem kuvveti duvar yatay en kesit alanına bölünerek duvarda oluşan kayma gerilmesi hesaplanacak ve Denk.(3.25)'den bulunacak duvar kayma emniyet gerilmesi τ_{em} ile karşılaştırılacaktır.

$$\tau_{em} = \tau_o + \mu\sigma \quad \text{Denklem 3.25}$$

Bu denklemde;

τ_{em} = duvar kayma emniyet gerilmesi (MPa),

τ_o = duvar çatlama emniyet gerilmesi (MPa),

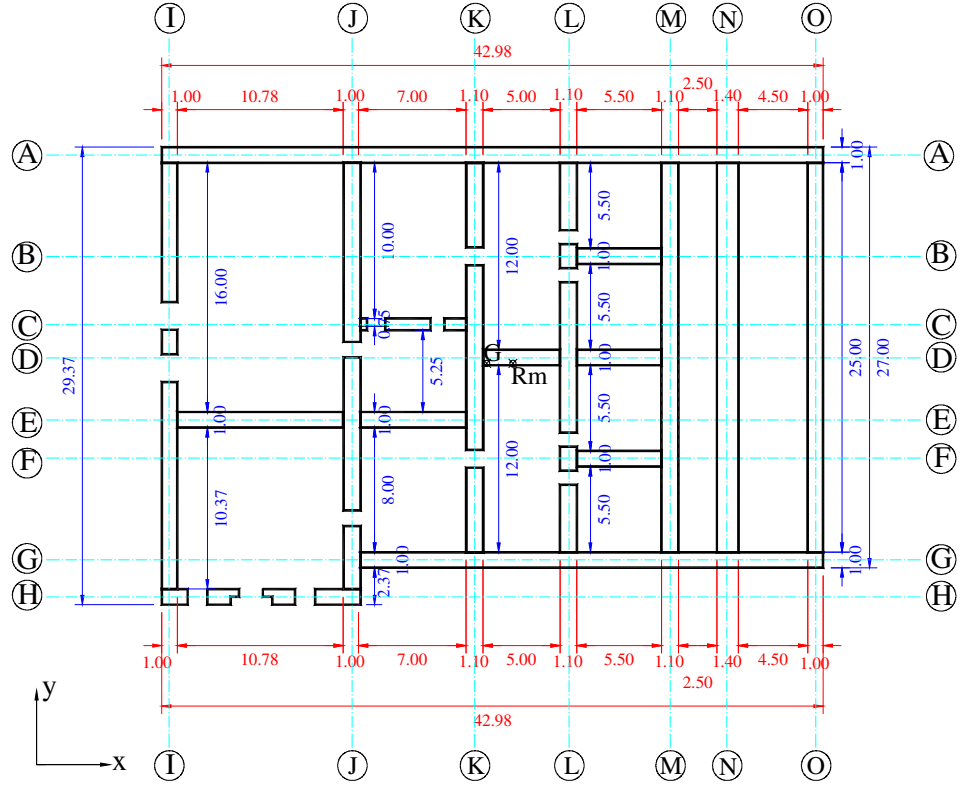
μ = sürtünme katsayısı (bu çalışmada Yönetmelikte önerilen 0.5 katsayısı alınmıştır),

σ = duvar düşey gerilmesi (MPa)

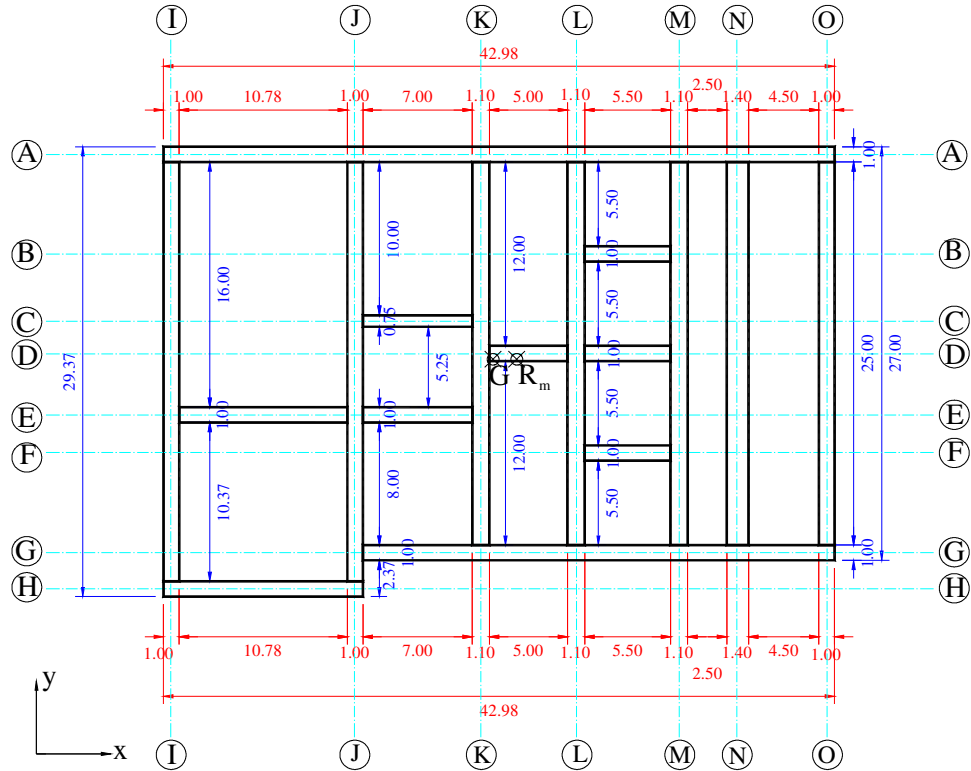
Duvar düşey gerilmesi (σ) duvarlarda oluşan basınç gerilmelerinin yığma duvar cinsine göre izin verilen gerilmelerle karşılaştırılması yapılacaktır. Bu hesapta duvarlarda ve döşemelerden gelen yükler göz önüne alınacaktır. Duvardaki kapı ve pencere boşluk en kesitleri kadar azaltılmış duvar en kesit alanına bölünerek bulunacak gerilme, duvar cinsine göre izin verilen basınç gerilmesinden büyük olmayacaktır.

Duvar çatlama emniyet gerilmesi (τ_o) Deprem Yönetmeliği'nde yer alan Tablo 5.5'den alınabilir. Bu çalışmada deneysel yolla hesaplanan ve Bölüm 3.2.3'te bulunan değer kullanılacaktır.

Yukarıda anlatılan hesaplamalar Ördekli Hamamının duvarlarında Şekil 3.182,183'te verilen pencere boşluklarına rastlayan +1,671 kotu ile duvar üst kotu olan +6,10 kotunda yapılarak duvarda oluşan kayma gerilmesi duvar kayma emniyet gerilmeleri ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 3.16).



Şekil 3.182 Hamamın +1,671 kotundan alınan plan görünüşü



Şekil 3.183 Hamamın +6.10 kotundan alınan plan görünüşü

Çizelge 3.16. +1,671 kotu ile +6,10 kotunda duvarlarda oluşan kayma gerilmesinin duvar kayma emniyet gerilmesi ile karşılaştırılması

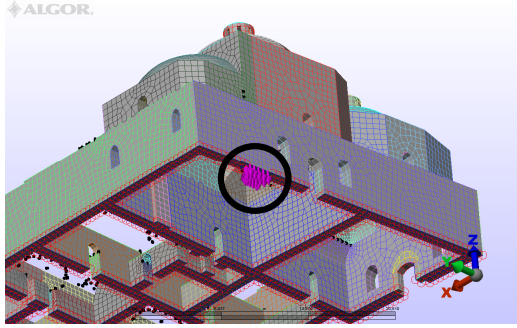
Deprem Yönü	Kot ve Akslar	Deprem Kuvveti	Dışmerkezliğin Göz önüne Alındığı Deprem Kuvveti	Duvarda Oluşan Kayma Gerilmesi (N/mm ²)	Duvar Kayma Emniyet Gerilmesi (N/mm ²)
X-X Yönü	+1,671 Kotu, A-A Aksı	0,327 F _{deprem}	0,0002 F _{deprem}	0,218	3,029
	+1,671 Kotu, B-B Aksı	0,065 F _{deprem}	0,0112 F _{deprem}	0,362	3,004
	+1,671 Kotu, C-C Aksı	0,038 F _{deprem}	0,0165 F _{deprem}	0,317	3,075
	+1,671 Kotu, D-D Aksı	0,089 F _{deprem}	0,0031 F _{deprem}	0,227	3,071
	+1,671 Kotu, E-E Aksı	0,145 F _{deprem}	0,0012 F _{deprem}	0,220	3,107
	+1,671 Kotu, F-F Aksı	0,066 F _{deprem}	0,0094 F _{deprem}	0,328	3,018
	+1,671 Kotu, G-G Aksı	0,186 F _{deprem}	0,0007 F _{deprem}	0,219	3,030
	+1,671 Kotu, H-H Aksı	0,076 F _{deprem}	0,0053 F _{deprem}	0,264	3,122
Y-Y Yönü	+1,671 Kotu, I-I Aksı	0,140 F _{deprem}	0,0370 F _{deprem}	0,211	3,117
	+1,671 Kotu, J-J Aksı	0,160 F _{deprem}	0,0353 F _{deprem}	0,228	3,139
	+1,671 Kotu, K-K Aksı	0,133 F _{deprem}	0,0407 F _{deprem}	0,218	3,092
	+1,671 Kotu, L-L Aksı	0,107 F _{deprem}	0,0698 F _{deprem}	0,290	3,118
	+1,671 Kotu, M-M Aksı	0,108 F _{deprem}	0,0335 F _{deprem}	0,161	3,041
	+1,671 Kotu, N-N Aksı	0,194 F _{deprem}	0,0335 F _{deprem}	0,259	3,017
	+1,671 Kotu, O-O Aksı	0,129 F _{deprem}	0,0310 F _{deprem}	0,176	3,010
X-X Yönü	+6,10 Kotu, A-A Aksı	0,323 F _{deprem}	1,1E-09 F _{deprem}	0,171	3,023
	+6,10 Kotu, B-B Aksı	0,050 F _{deprem}	6,3E-08 F _{deprem}	0,206	3,008
	+6,10 Kotu, C-C Aksı	0,053 F _{deprem}	3,9E-08 F _{deprem}	0,171	3,036
	+6,10 Kotu, D-D Aksı	0,079 F _{deprem}	1,8E-08 F _{deprem}	0,171	3,060
	+6,10 Kotu, E-E Aksı	0,015 F _{deprem}	3,9E-07 F _{deprem}	0,171	3,081
	+6,10 Kotu, F-F Aksı	0,134 F _{deprem}	6,2E-09 F _{deprem}	0,206	3,008
	+6,10 Kotu, G-G Aksı	0,050 F _{deprem}	6,3E-08 F _{deprem}	0,171	3,016
	+6,10 Kotu, H-H Aksı	0,182 F _{deprem}	3,3E-09 F _{deprem}	0,206	3,036
Y-Y Yönü	+6,10 Kotu, I-I Aksı	0,148 F _{deprem}	0,0061 F _{deprem}	0,132	3,054
	+6,10 Kotu, J-J Aksı	0,148 F _{deprem}	0,0061 F _{deprem}	0,132	3,080
	+6,10 Kotu, K-K Aksı	0,028 F _{deprem}	0,1591 F _{deprem}	0,133	3,075
	+6,10 Kotu, L-L Aksı	0,135 F _{deprem}	0,0073 F _{deprem}	0,133	3,062
	+6,10 Kotu, M-M Aksı	0,135 F _{deprem}	0,0073 F _{deprem}	0,133	3,006

3.2.8 Zamana Bağlı Oturma Analizleri

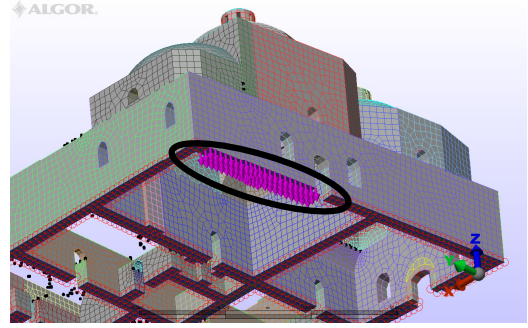
Yapının erkekler soğukluk bölümünde yapılan incelemelerde doğu, güney ve kuzey yönündeki duvar altı temellerinin oldukça sağlam olduğu, zeminde oturmanın olmadığı tespit edilmiştir. Yeraltı su seviyesinin bölgede çok derinlerde olması, yapının zemin özelliklerinin iyi olması ve yapının 15. yüzyıldan günümüze geldiği düşünüldüğünde yapının oturmasını büyük oranda tamamladığı düşünülmektedir. Ancak analiz sonuçları erkekler soğukluk kubbelerinin ortasında yer alan ve kubbeyi taşıyan kemerlerin kubbe ağırlıkları altında zorlandığını ve kemerin oturduğu bölgelerde büyük gerilmelerin oluştuğunu göstermektedir. Özellikle yapının doğu cephesinin tamamen yıkık olması kemeri taşıyan duvarların zemine baskısı sonucu oturma yaratabileceği olasılığını göstermektedir. Ayrıca yapının kendi ağırlığı altındaki analizlerinde kemerin yükünü duvarlara aktardığı bölümlerde gerilme miktarlarının arttığı tespit edilmiştir. Bu nedenle öncelikli olarak oturmanın kemerin yükünü duvara aktardığı doğu cephesinde oluştuğu varsayımıyla hareket edilerek, oturma miktarları yapının sınır gerilme değerlerini aşmıyacağı zamana bağlı olarak arttırılarak gerilme değerleri tespit edilecektir. Daha sonra oturma alanı kuzey güney doğrultusunda arttırılarak yapının mevcut halinde yıkık olan duvarların tümünde oturma olana kadar analizler sürdürülecektir (Şekil 3.184-186).

Erkekler soğukluk bölümünde yer alan, mevcut halde yıkık olan ve oturma analizleri yapılacak duvara dik doğrultudaki diğer iki duvar için de oturma analizleri yapılarak her durum için değerlendirme yapılacaktır. Bu duvarlar yapının erkekler soğukluk bölümünün güney yönündeki duvarı (Şekil 3.187) ve yapının erkekler soğukluk bölümü ile kadınlar soğukluk bölümü arasındaki duvardır (Şekil 3.188). Karşılaştırma yapılabilmesi için yapının yıkık olan erkekler soğukluk kubbesi de Şekil 3.189'da gösterilmiştir. Yukarıda anlatılan tüm oturma varsayımları uygulanmıştır. Ancak yer darlığı nedeniyle bu çalışmada en kötü durum olan duvarların uzunluğu boyunca oturma olma olasılığı sonuçları gösterilmiştir.

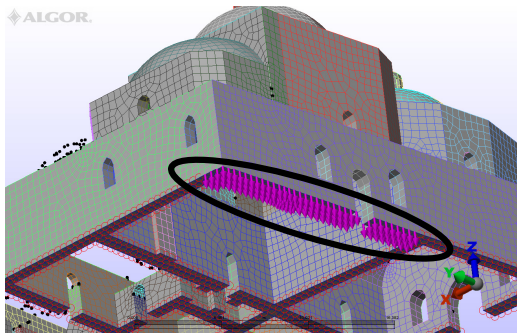
Şekil 3.190'dan 3.211'e kadar doğu yönündeki duvarın 2 mm'lik artışlarla oturma sırasında meydana gelen düzlem içi ve dışı gerilmeler gösterilmiştir. Şekil 3.212'dan 3.219'a kadar önce güney yönündeki duvarın daha sonra soğukluklar arasındaki duvarın 2 mm ila 20 mm'lik oturması sırasındaki minimum ve maksimum gerilmeler gösterilmiştir.



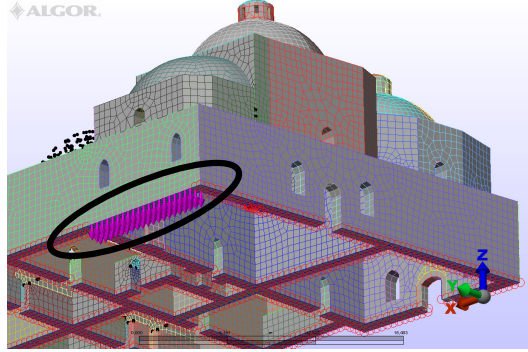
Şekil 3.184 Yapının erkekler soğukluk bölümünün kemer altındaki duvarı



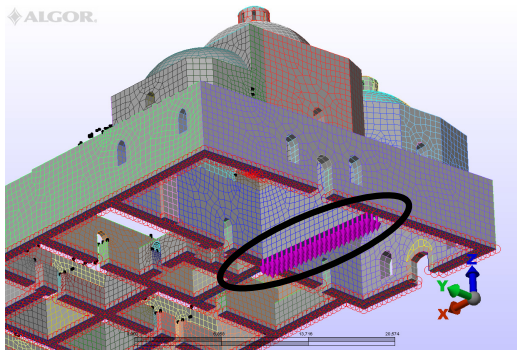
Şekil 3.185 Duvarlardaki oturmaın kuzey-güney doğrultusunda artırılması



Şekil 3.186 Duvarlardaki oturmaın kuzey-güney doğrultusunda artırılarak yıkık bölgenin tamamına ulaştırılması



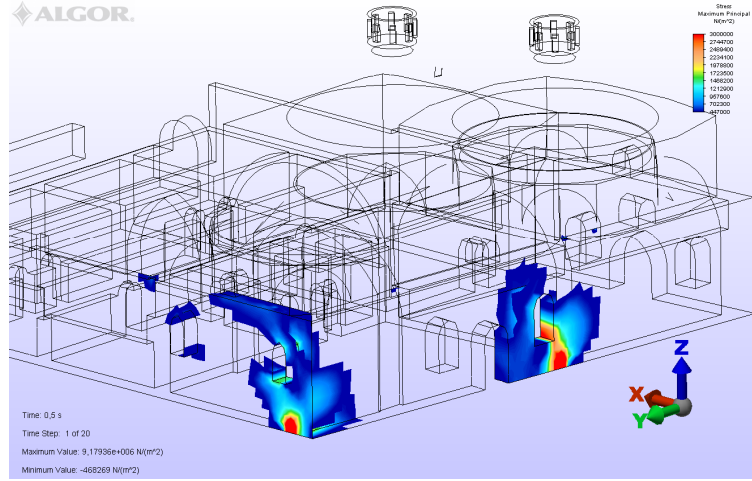
Şekil 3.187 Yapının erkekler soğukluk bölümünün güney duvarı



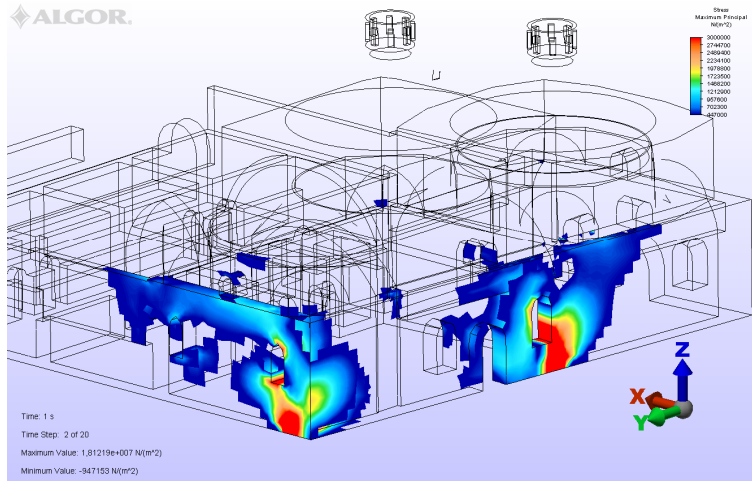
Şekil 3.188 Yapının erkekler soğukluk ile kadınlar soğukluk arasındaki duvarı



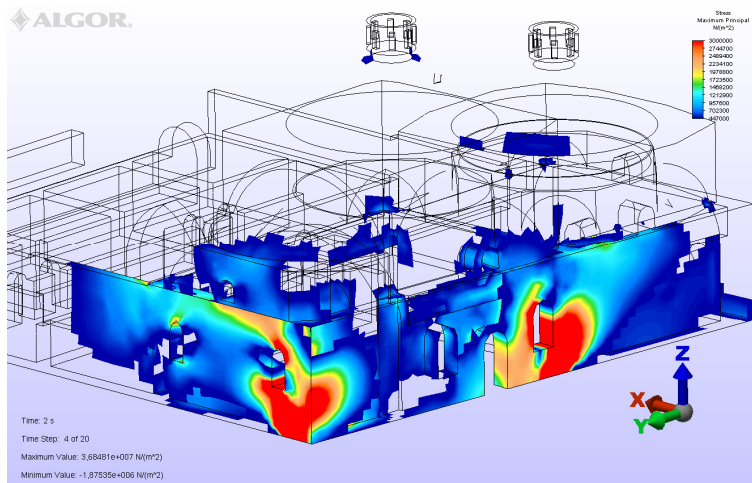
Şekil 3.189 Yapının erkekler soğukluk bölümünün mevcut halde yıkık olan bölgeleri



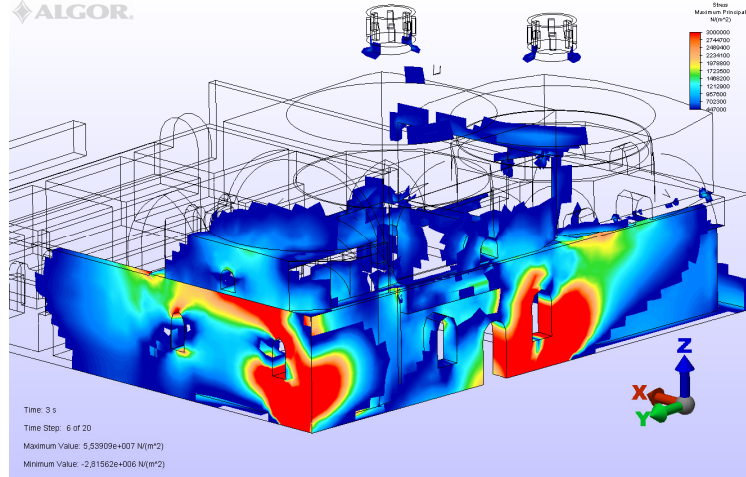
Şekil 3.190 Doğu yönündeki duvarın 1 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları



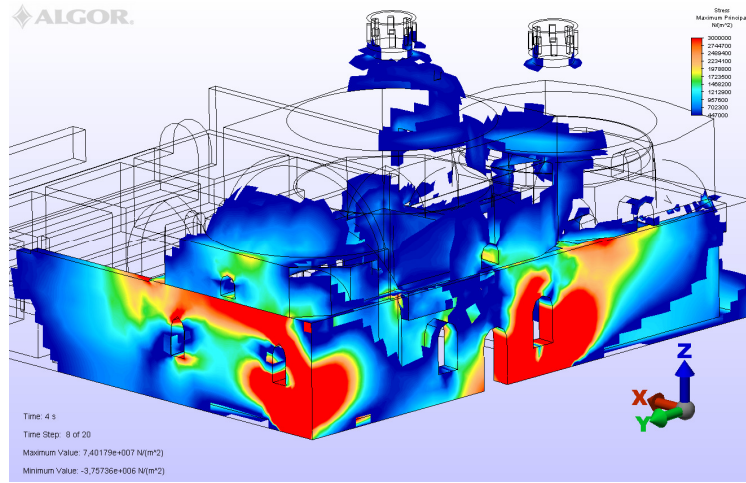
Şekil 3.191 Doğu yönündeki duvarın 2 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları



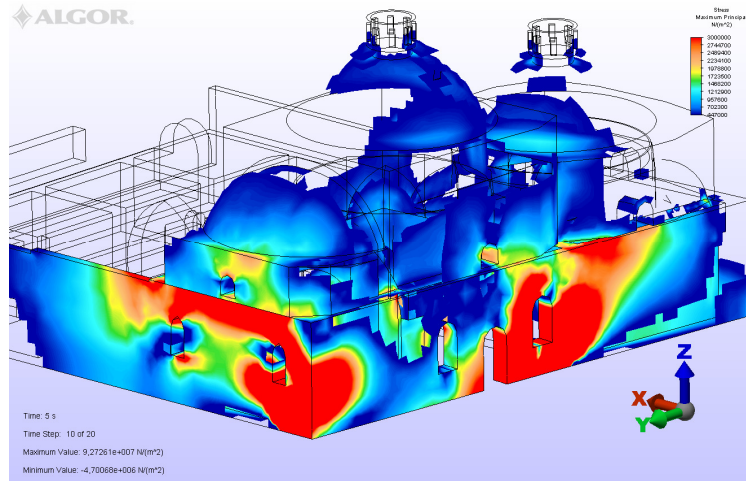
Şekil 3.192 Doğu yönündeki duvarın 4 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları



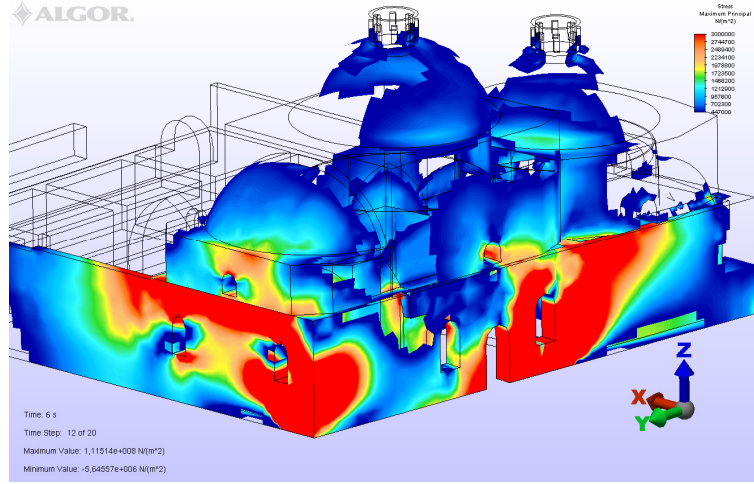
Şekil 3.193 Doğu yönündeki duvarın 6 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları



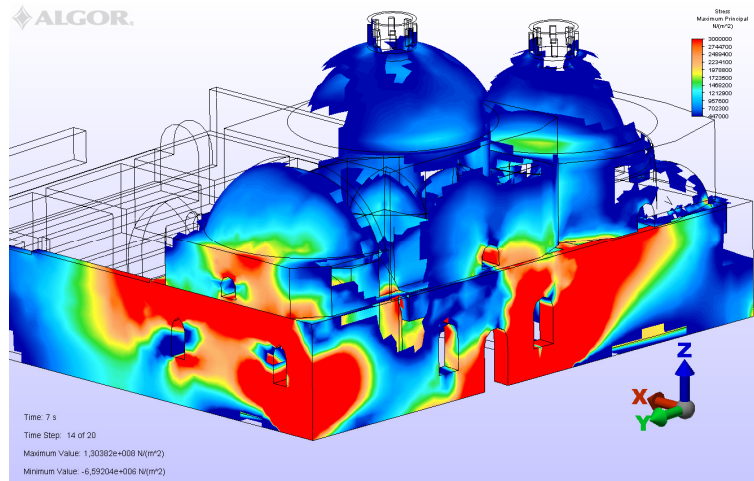
Şekil 3.194 Doğu yönündeki duvarın 8 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları



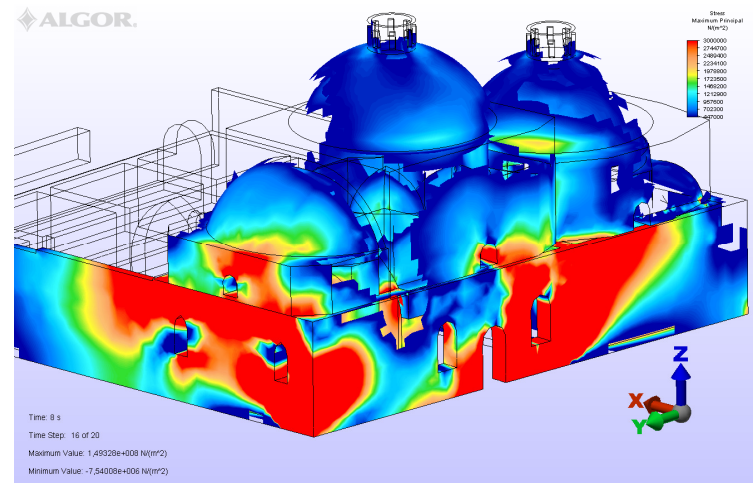
Şekil 3.195 Doğu yönündeki duvarın 10 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları



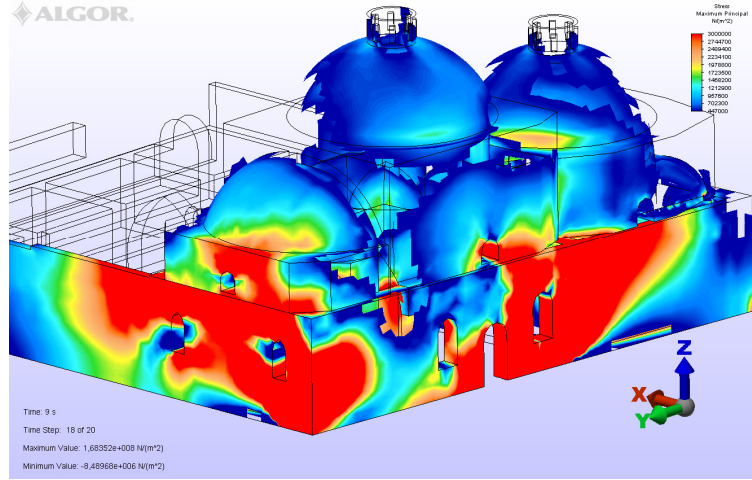
Şekil 3.196 Doğu yönündeki duvarın 12 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları



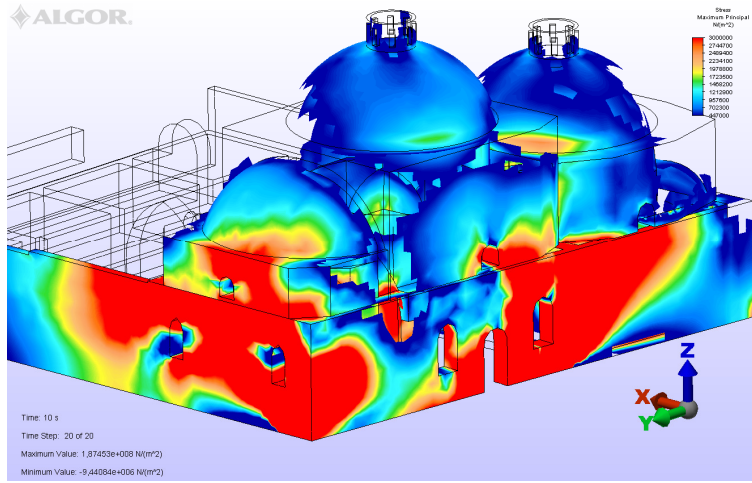
Şekil 3.197 Doğu yönündeki duvarın 14 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları



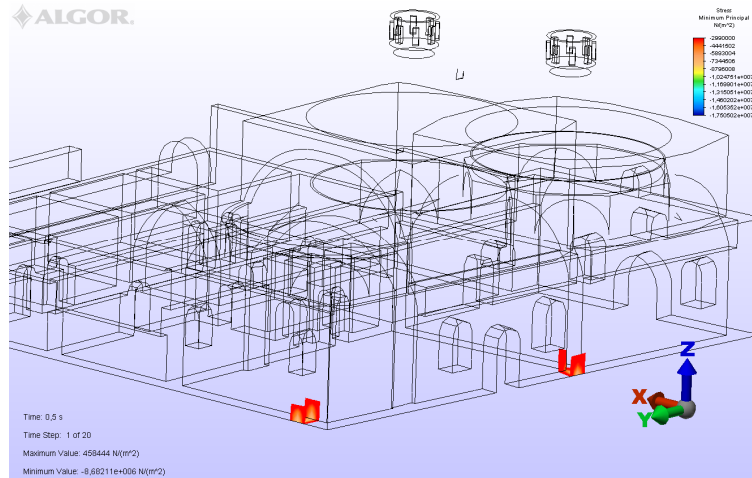
Şekil 3.198 Doğu yönündeki duvarın 16 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları



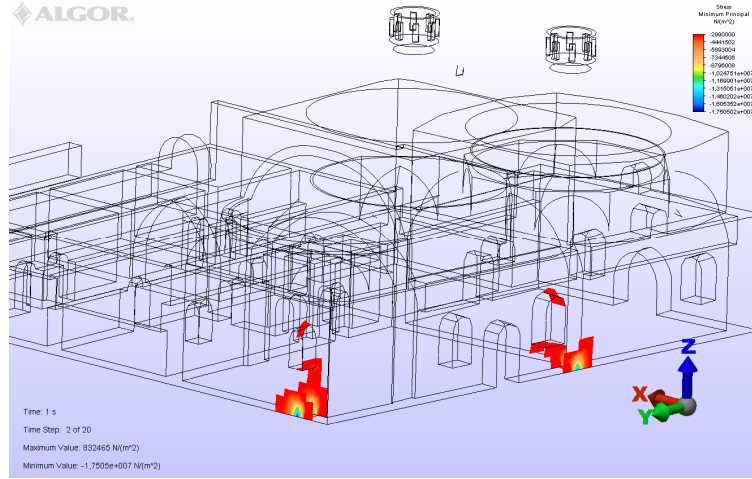
Şekil 3.199 Doğu yönündeki duvarın 18 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları



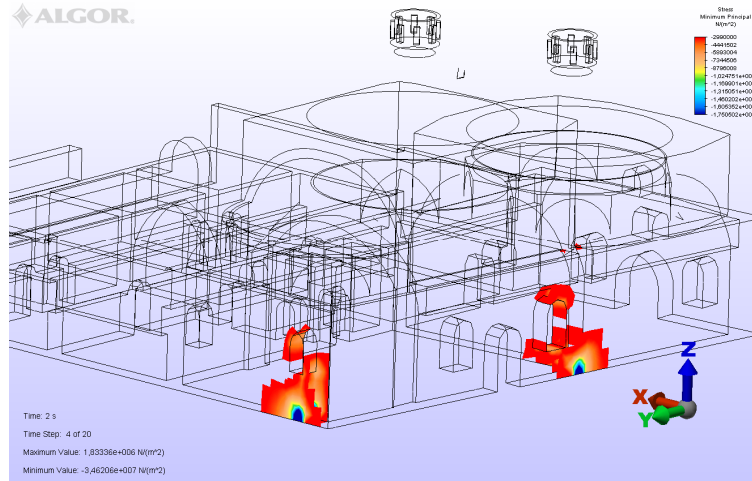
Şekil 3.200 Doğu yönündeki duvarın 20 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları



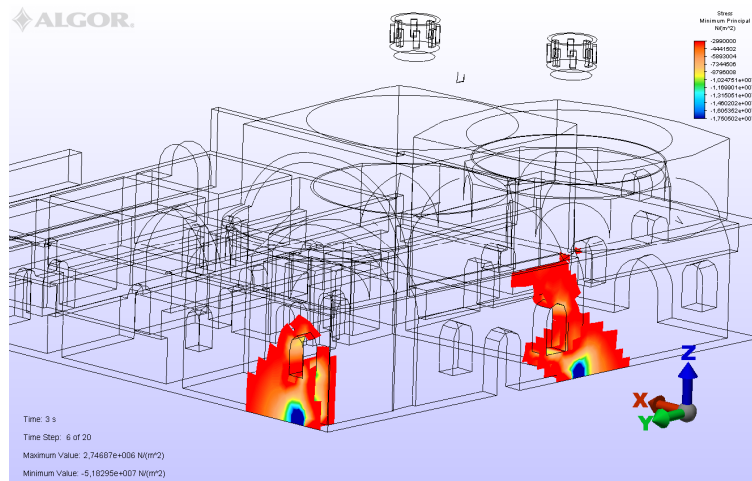
Şekil 3.201 Doğu yönündeki duvarın 1 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları



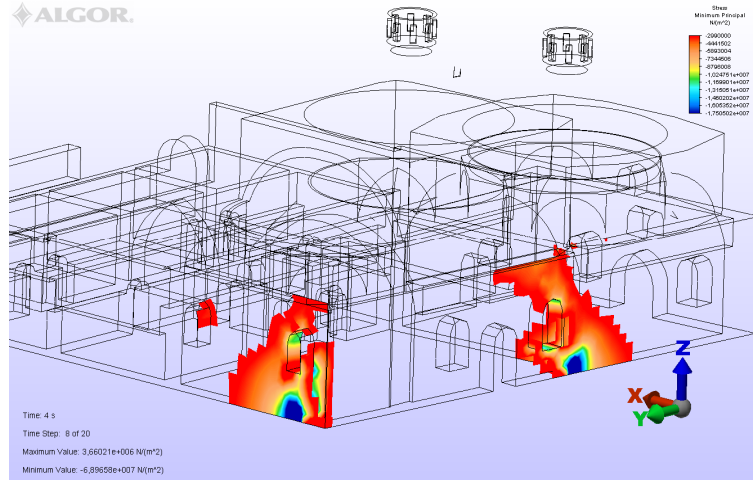
Şekil 3.202 Doğu yönündeki duvarın 2 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları



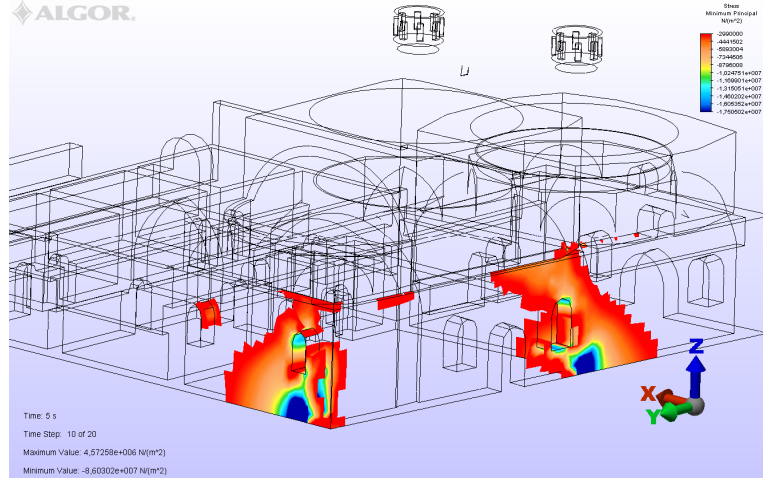
Şekil 3.203 Doğu yönündeki duvarın 4 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları



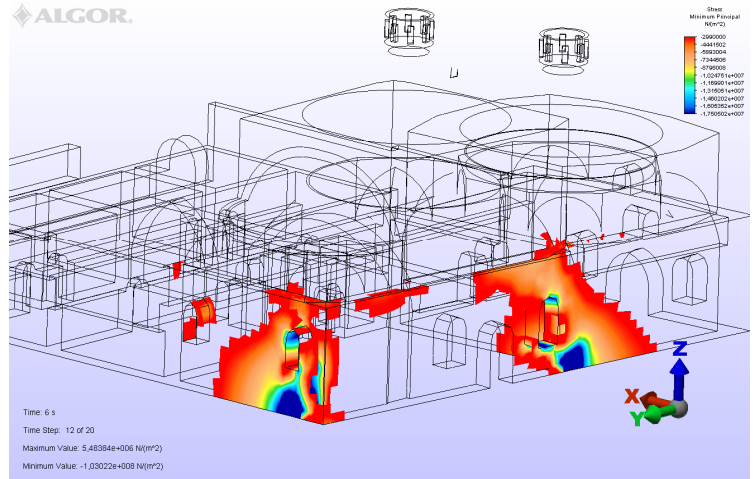
Şekil 3.204 Doğu yönündeki duvarın 6 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları



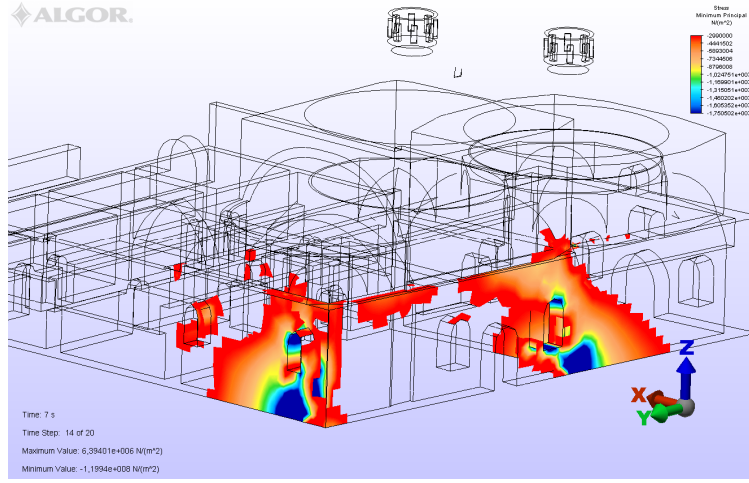
Şekil 3.205 Doğu yönündeki duvarın 8 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları



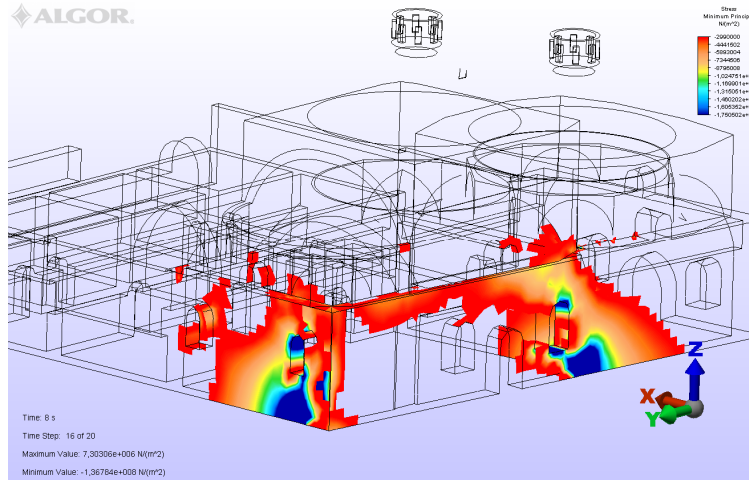
Şekil 3.206 Doğu yönündeki duvarın 10 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları



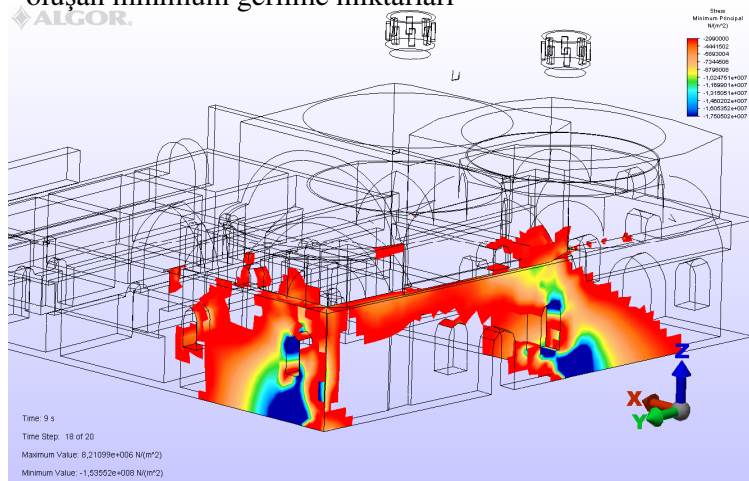
Şekil 3.207 Doğu yönündeki duvarın 12 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları



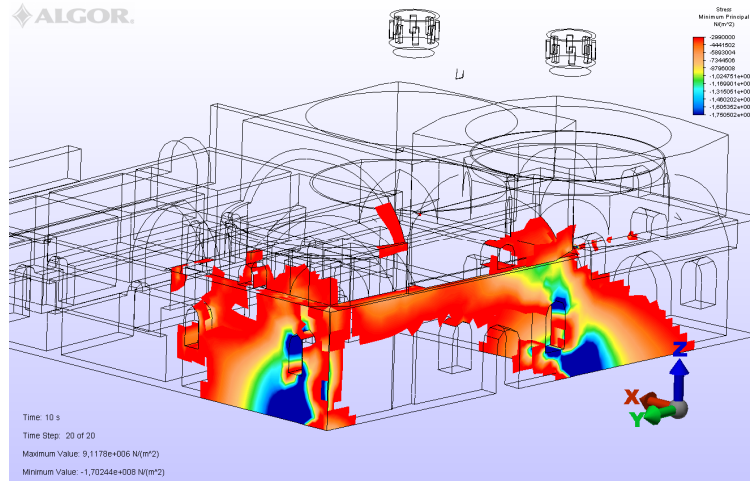
Şekil 3.208 Doğu yönündeki duvarın 14 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları



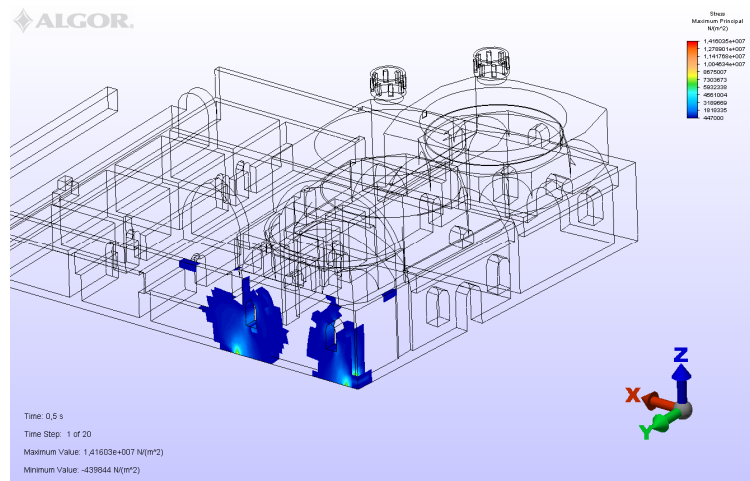
Şekil 3.209 Doğu yönündeki duvarın 16 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları



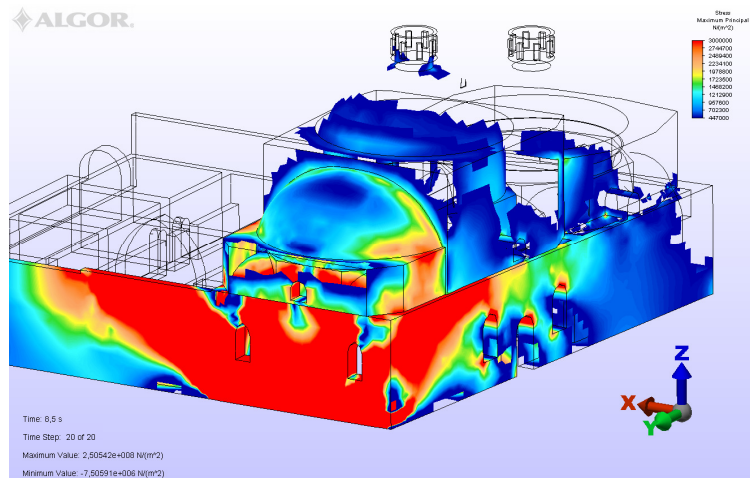
Şekil 3.210 Doğu yönündeki duvarın 18 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları



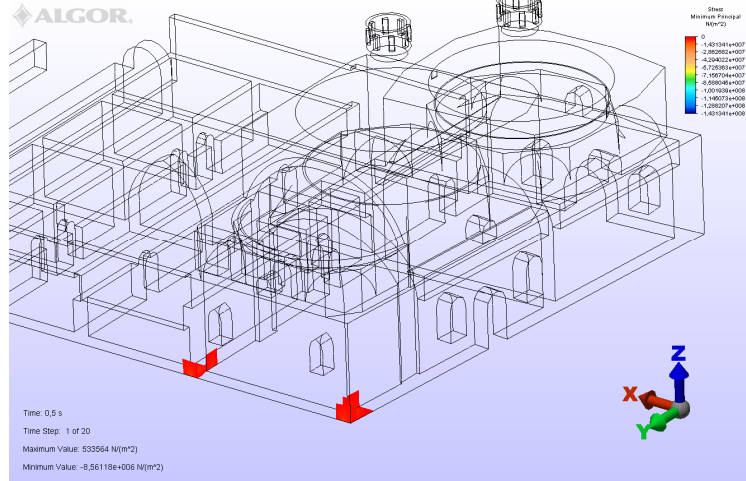
Şekil 3.211 Doğu yönündeki duvarın 20 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları



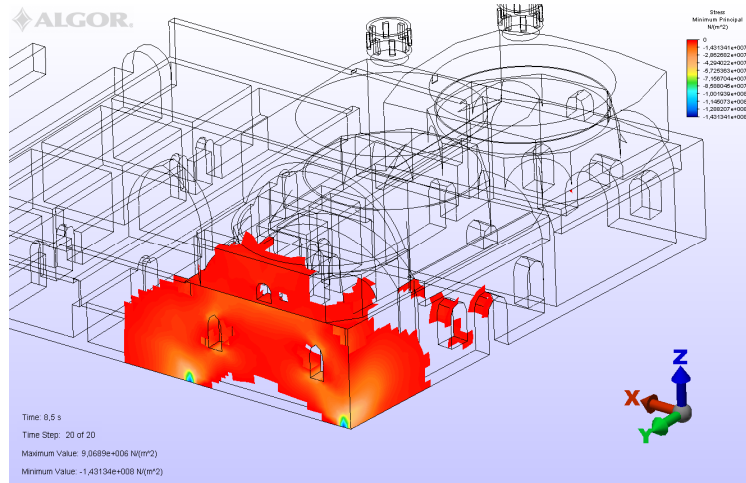
Şekil 3.212 Güney yönündeki duvarın 1 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları



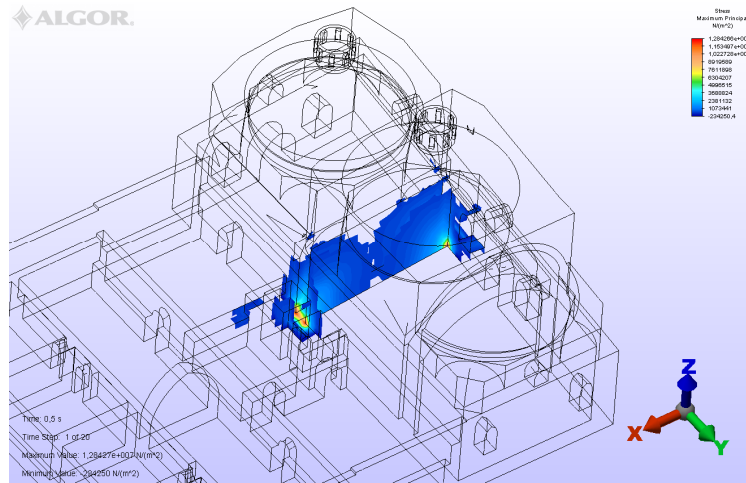
Şekil 3.213 Güney yönündeki duvarın 20 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları



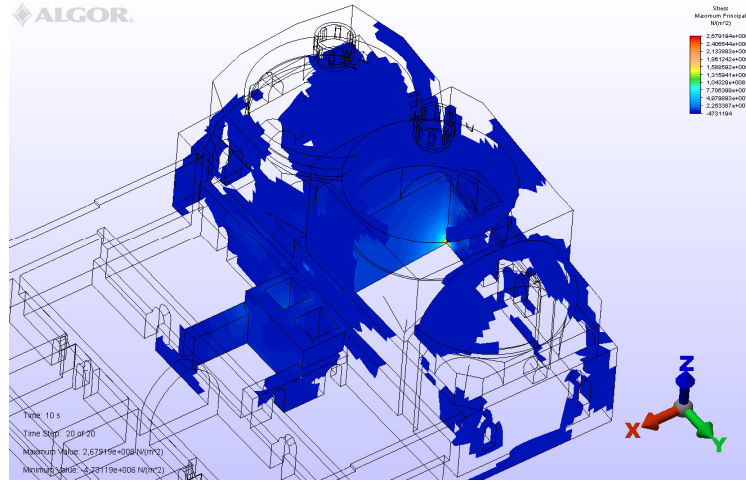
Şekil 3.214 Güney yönündeki duvarın 1 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları



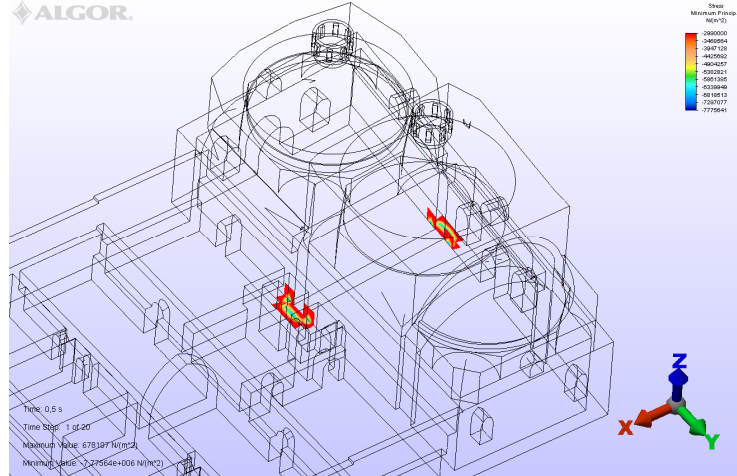
Şekil 3.215 Güney yönündeki duvarın 20 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları



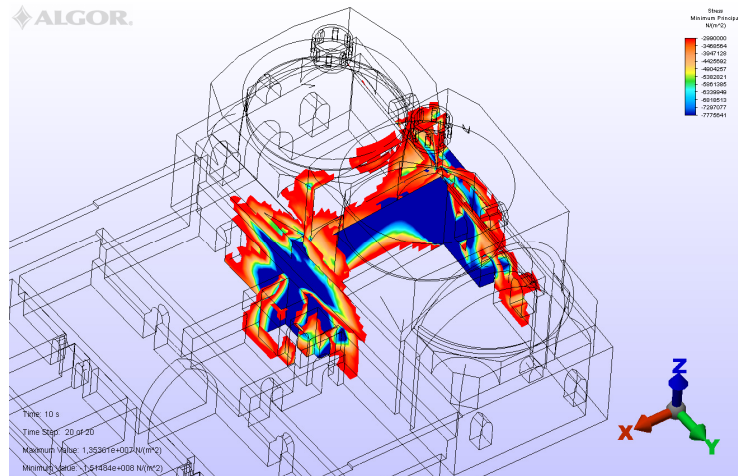
Şekil 3.216 Kadınlar soğukluk ile erkekler soğukluk arasındaki duvarın 1 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları



Şekil 3.217 Kadınlar soğukluk ile erkekler soğukluk arasındaki duvarın 20 mm çökmesi halinde oluşan maksimum gerilme miktarları



Şekil 3.218 Kadınlar soğukluk ile erkekler soğukluk arasındaki duvarın 1 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları



Şekil 3.219 Kadınlar soğukluk ile erkekler soğukluk arasındaki duvarın 20 mm çökmesi halinde oluşan minimum gerilme miktarları

3.2.9. Araştırma Sonuçlarının Tartışılması:

Tarihi Bursa Ördekli Hamamı ile ilgili olarak yapılan bu çalışmada; tarihi yapının tarihçesi, mimari özellikleri, hasar durumu, yapıda kullanılan malzemelerin özellikleri, yapının statik ve dinamik analizleri ile yıkık olan bölgelerin neden yıkıldıklarının ortaya çıkarılması hedeflenerek, tarihi yapıların restorasyonuna yönelik katkı sağlanmaya çalışılmıştır.

Bu araştırma kapsamında elde edilen sonuçlar şunlardır:

3.2.9.1. Yapının Mevcut Durumunun Belirlenmesi

Yapının tarihi, mimari, taşıyıcı sistem özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yapılan araştırma sonuçları şu şekildedir.

- Ördekli Hamamı (Eski-Yeni Hamam) inşaatına 15. yüzyıl sonlarında başlanıp, 16. yüzyıl başlarında bitirilmiştir.
- Yapıda erkekler ve kadınlar bölümleri ayrı ayrı düzenlendiği için çifte hamam özelliği göstermektedir.
- Yapılan incelemelerde yapının erkekler soğukluk bölümünün üst örtüsü ile külhan bölümünün üst örtüleri yıkık durumdadır. Ayrıca erkekler soğukluk bölümünün kubbe altında ve geçiş elemanlarında malzeme boşalmaları ve çatlaklar mevcuttur.
- Yapının ana taşıyıcı malzemesi; duvarlarda taş-harç kompoziti, kubbelerde ve kubbeye geçiş elemanlarında yada kısaca eğrisel üst örtülerde tuğla-harç kompoziti kullanılmıştır.
- Yapıda kullanılan küfeki taş kaplama malzemesi olarak kullanılmış, kapı ve pencere boşluklarında da söve işlevli olarak kullanılmıştır.
- Yapılan temel araştırma kazılarında yapının temellerinde sudan kaynaklanan nem problemleri görülmemiştir.
- Yapıda kullanılan ahşap hatılların tamamen yok olduğu ve bunların yerlerinde boşluklar oluştuğu tespit edilmiştir.

3.2.9.2. Yapıda Kullanılan Malzeme Özellikleri

Yapıda kullanılan malzemelerin özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yapının temellerinden, duvarlarından ve üst örtülerinden tuğla, harç ve taş numuneleri alınmıştır. Numunelerin malzeme özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yapılan laboratuvar çalışmalarında aşağıdaki tespitler elde edilmiştir.

- Yapılan deneylerde doluluk oranı en yüksek malzemenin taş olduğu, en düşük malzemelerin ise tuğla ve harç olduğu,
- Yapının duvar ve kubbelerinde kullanılan harçların hem gözlemsel hem de harçla ilgili olarak yapılan granülometrik analizler sonucunda aynı özellikte olduğu,
- Yapının temel ve duvarlarında kullanılan taşların çoğunun yapılan petrografik analizler sonucunda granit olduğu,
- Yapıda kullanılan harcın yapılan kimyasal deneyler sırasında puzolonik malzemelerle agrega arasında hidrolik bir reaksiyonunun oluşması sonucunda horasan harcı olduğu,
- Yapılan deneysel çalışmalarda tuğla ve harç malzemesinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin birbirlerine yakın sonuçlar verdiği,
- Bursa Büyükşehir Belediyesi tarafından yaptırılan bölgedeki zemin etüdlerine göre zemin sınıfının Z2 olduğu belirlenmiştir.

3.2.9.3. Yapının Üç Boyutlu Modellenmesi

Analiz çalışmaları öncesinde yapı, Key Creator Yazılım programı kullanılarak 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Modelleme sırasında elde edilen sonuçlar şunlardır.

- Yapının üç boyutlu olarak modellenmesi sırasında yapı 4 ana bölüme ayrılmıştır. Bunlar; duvarlar, külhan ve su deposu, ılık-ılık ve halvetler ile soğukluk bölümlerinden oluşmaktadır. Bölümlere ayrılan model büyük bir çalışma kolaylığı sağlamıştır. Ayrıca modelin sonlu elemanlar programına aktarılması sırasında oluşan hatalar hangi bölümdeyse sadece bu bölüme müdahale edilmiştir. Böylece oluşan hataların hızlı ve pratik bir şekilde giderilmesi sağlanmıştır.

- Yapıda bulunan tromp, pandantif, kubbedeki fil gözleri, bacalar, v.b. detay gerektiren yapı elemanları modellenirken özgün haline en yakın model kurulmaya çalışılmıştır. Oluşturulan modelle gerçeğe yakın sonuçlarının elde edilmesi sağlanmıştır.

3.2.9.4. Yapının Sonlu Eleman Seçimi ve Analizleri

Yapı üç boyutlu olarak modellendikten sonra yapının sonlu elemanlar analizlerinin yapılabilmesi için model ALGOR sonlu elemanlar yazılım programına aktarılmıştır. Modelleme ve analiz safhalarında elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Yapıda sonlu eleman maksimum boyutları 50 cm olarak alınmıştır. Eleman boyutlarının küçüldüğü bölgelerde ise hassas bir çalışma olabilmesi için eleman boyutları 10 cm'ye kadar düşürülmüştür.
- Modelleme yapılırken hassas bir sonlu eleman seçimi olabilmesi için 3,4,5,6,7 ve 8 düğüm nokta sayısına sahip tuğla tipi elemanlar kullanılmıştır. Her düğüm noktası 3 serbestlik derecesine sahiptir.
- Yapı simetrik olmayan ve uzun bir yapım tarzına sahiptir. Yapının başında ve sonunda bulunan soğukluk ve külhan bölümlerinin mod şekillerinde en fazla yer değiştirme, dönme, açılma ve kapanma yapan bölgeler olduğu bulunmuştur. Bu durum yapının mevcut halde yıkık olan hali ile özdeşleşmektedir.
- Yapının kendi ağırlığı altındaki analizinde düşey yöndeki maksimum yer değiştirmesi erkekler soğukluk bölümünün yarım ve tam kubbesini taşıyan orta bölgesinde olduğu tespit edilmiştir. Yapılan gerilme analizlerinde erkekler ve kadınlar soğukluk bölümlerinde yer alan trompların duvarlara yükü aktardığı bölgelerde gerilmeler sınır gerilme değerlerine yaklaşmaktadır. Bu bölgelerde oluşacak ek gerilmeler nedeniyle sınır gerilme değerlerinin aşılabacağı, dolayısıyla bu bölümlerin riskli olduğu belirlenmiştir.
- Yapının deprem analizleri öncesinde A₁ türü burulma düzensizliğinin var olup olmadığı araştırılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda eksantrisitenin %5 oranının altında kaldığı tespit edilmiştir. Bu hesaplama sonucunda yapıda burulma düzensizliğinin olmadığı anlaşılmıştır.

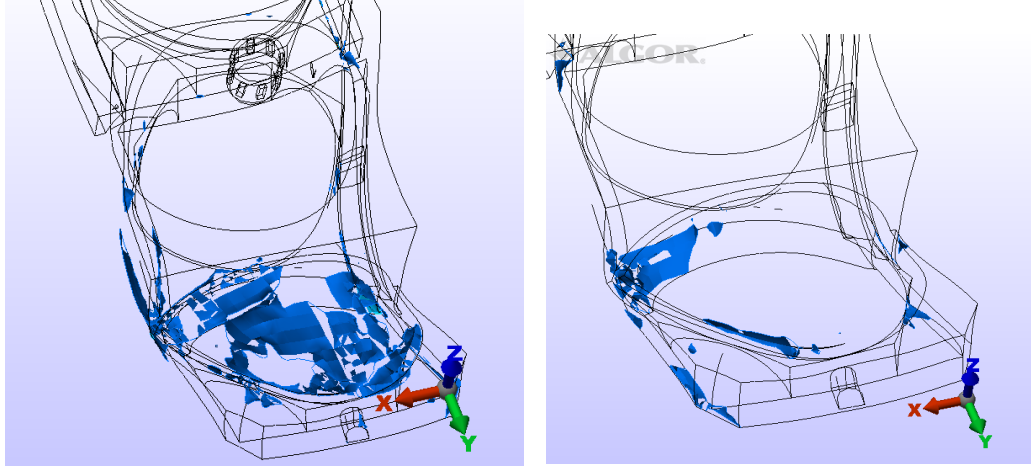
- Yapının deprem analizlerinde davranış spektrum analizi kullanılmıştır. Yapının x yönündeki deprem analizinde duvarlarda oluşan maksimum gerilmelerin erkekler soğukluk kubbe geçiş elemanlarının duvarlara yüklerini aktardığı bölgelerde, külhan bölümünün tonoz üst örtüsünde havalandırma bacaları arasında, ılıklik bölümünün doğu cephesindeki tromplarında, erkekler soğukluk bölümünün kemerlerinde ve yarım kubbenin trompları ile kubbe ve trompları arasında oluştuğu belirlenmiştir. Tespit edilen bölgelerdeki gerilme değerleri ortalama 1MPa düzeyinde olup malzemenin maksimum çekme gerilmesi dayanımını (0,447MPa) aşmaktadır. Bu bölgelerin çok açık bir şekilde yıkılma riski taşıdığı tespit edilmiştir. Tespit edilen bölgeler mevcut halde yıkık olan bölgelerle eşleşmektedir.
- Yapının y ve z yönündeki deprem analizlerinde sadece erkekler ve kadınlar soğukluk bölümlerinde tromp kenarları ile kemer uç bölgelerinde gerilme değerlerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Ancak yıkılmanın bu bölgelerde oluşmamış olması yıkılmaya sebep olan deprem doğrultularının bu yönlerde olmadığını göstermektedir.
- Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan deprem analizlerinin teyit edilmesi amacıyla 2007 Türk Deprem Yönetmeliğinin 5. Bölümünden “Yığılma Binalar için Depreme Dayanıklı Tasarım Kuralları” yararlanılmıştır. Yapının duvarları x ve y yönünde akslara ayrılarak Yapılan hesaplamalar neticesinde yapının duvarlarında oluşan kayma gerilmelerinin duvar kayma emniyet gerilmesinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
- Yapının yıkılan bölümlerinin zemin oturması sonucu yıkılıp yıkılmadığının araştırılması için oturma öngörülmüştür. Bu nedenle soğukluk bölümünün yıkık olan doğu duvarında oturma oluşturulmuş, gerilme düzeyleri 2mm’lik oturma artışlarıyla tespit edilmiştir. Zeminde 2 cm’lik oturma olmasına rağmen gerilmelerin duvarlarda ve kubbede artmayıp oturmanın bittiği bölgelerde yoğunlaştığı belirlenmiştir. Ayrıca erkekler soğukluk bölümünün güney duvarı ve erkekler soğukluk bölümü ile kadınlar soğukluk bölümü arasındaki duvarda da oturma hesapları yapılmıştır. Erkekler soğukluk bölümünün güney duvarında yapılan oturma analizleri sonucunda gerilmelerin özellikle düzlem içi etkilerle arttığı ve ılıklik bölümü duvarları ile erkekler soğukluk bölümü duvarlarında

sınır gerilmelerin aşıldığı tespit edilmiştir. Erkekler soğukluk bölümü ile kadınlar soğukluk bölümü arasında kalan duvarın oturma yapması durumunda ise bu duvara dik yönde olan kadınlar soğukluk ve erkekler soğukluk bölümlerindeki duvarlarda düzlem içi etkiler sonucunda gerilmelerin arttığı tespit edilmiştir. Ancak yapılan oturma analizlerinin tümünde oluşan gerilmeler yapının yıkık olan bölgeleriyle eşleşmediği için yıkılmanın oturma nedeniyle olmadığı tespit edilmiştir.

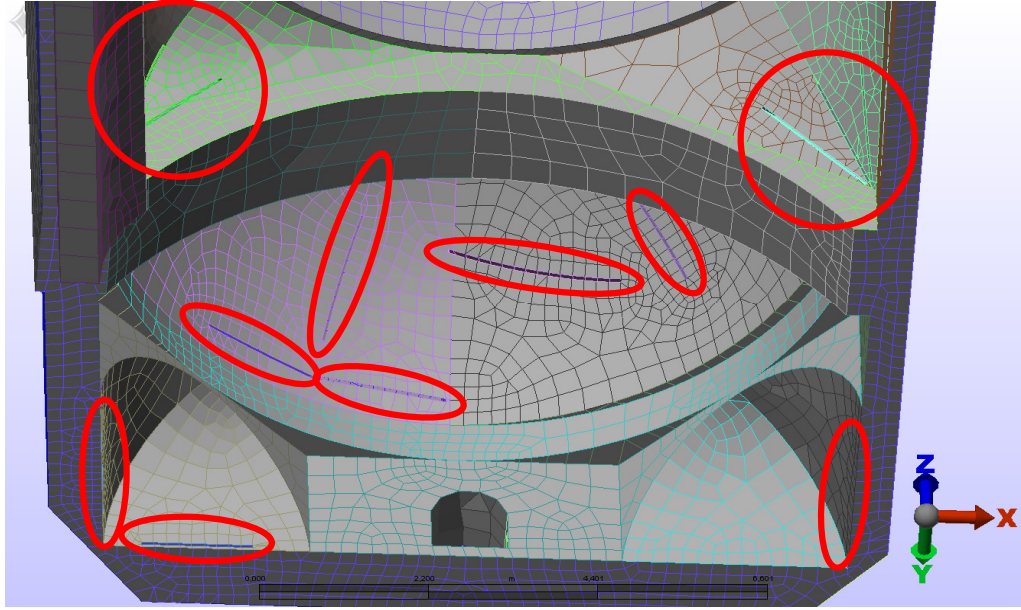
3.2.9.5. Yapının Yıkık olan Bölgelerinin Yıkılma Sebeplerinin Araştırılması

Yukarıdaki tespitler ışığında; x yönündeki deprem analizlerinde yapının yıkık olan bölgeleriyle, analiz sonuçlarında tespit edilen maksimum gerilme bölgelerinin örtüştüğü gözlenmiştir. Depremin x yönünde etkimesi durumu incelendiğinde gerilmelerin en fazla olduğu bölgelerin kemer başlangıçları ve ana kubbe ile kemerin arasında kalan pandantifler ve yarım kubbenin birçok bölgesinde olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3.220,221’de sınır gerilmesi olan 0,447MPa değerlerini aşan bölgeler gösterilmiştir. Deprem anında bu bölgelerde çatlakların olduğu düşünülen modelde sınır gerilmelerin aşıldığı bölgelerde çatlaklar oluşturulmuştur (Şekil 3.222). Yapı çatlak oluşturulmuş hali ile x yönünde tekrar deprem etkisine tabi tutulmuştur. Yapıda deprem sırasında çatlakların oluşumu ile parça kopmaları ve malzeme eksilmelerinin oluşacağı düşünülen modelin çatlak oluşan bölgeleri ile sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerinde malzeme eksiltiyle yapı tekrar x yönünde deprem analizine tabi tutulmuştur. Bursa’da 1855 yılında meydana gelen ve ardından yüzlerce artçı gerilme yaşanan iki büyük depremin yapıda oluşturabileceği durum bu anlamda yaratılmaya çalışılmıştır.

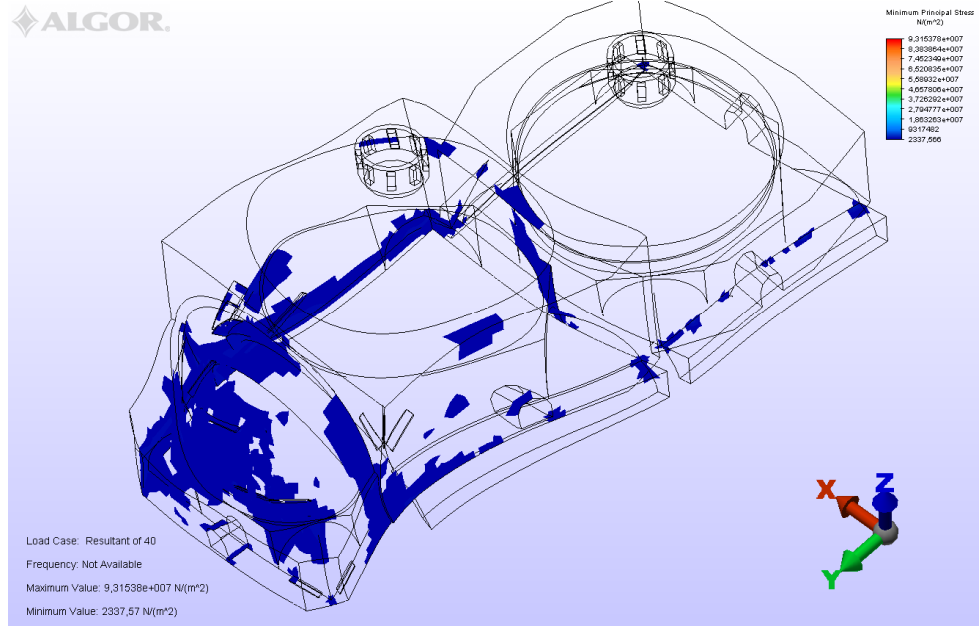
Yapılan analiz sonuçlarına göre sınır gerilme değerlerinin aşıldığı bölgeler; kemer başlangıçlarından kemerin orta bölgelerine doğru arttığı, yarım ve tam kubbe pandantif ve trompların tamamına yayıldığı, erkekler soğukluk ile kadınlar soğukluk arasındaki kubbe duvarları ile erkekler soğukluk ana kubbesi kenarlarında sınır gerilme değerlerini aşan yeni bölgelerin olduğu gözlenmiştir (Şekil 3.223, 224, 225, 226).



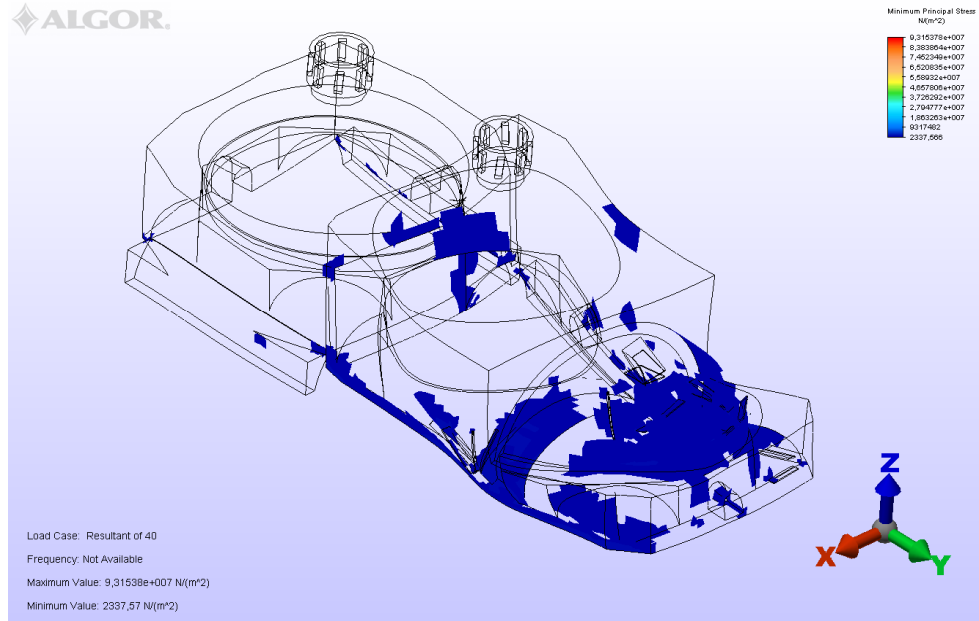
Şekil 3.220,221 Yapının x yönündeki deprem analizinde erkekler soğukluk bölümünde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerin minimum ve maksimum gerilmeler üzerinde gösterilmesi



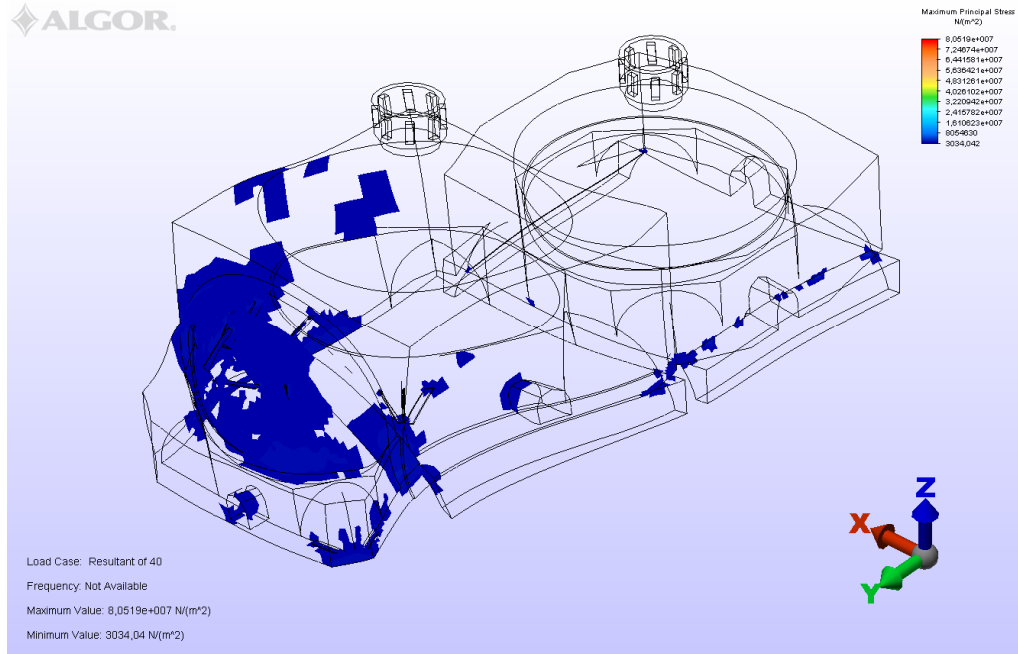
Şekil 3.222 Erkekler soğukluk bölümünde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerde çatlak oluşturulması



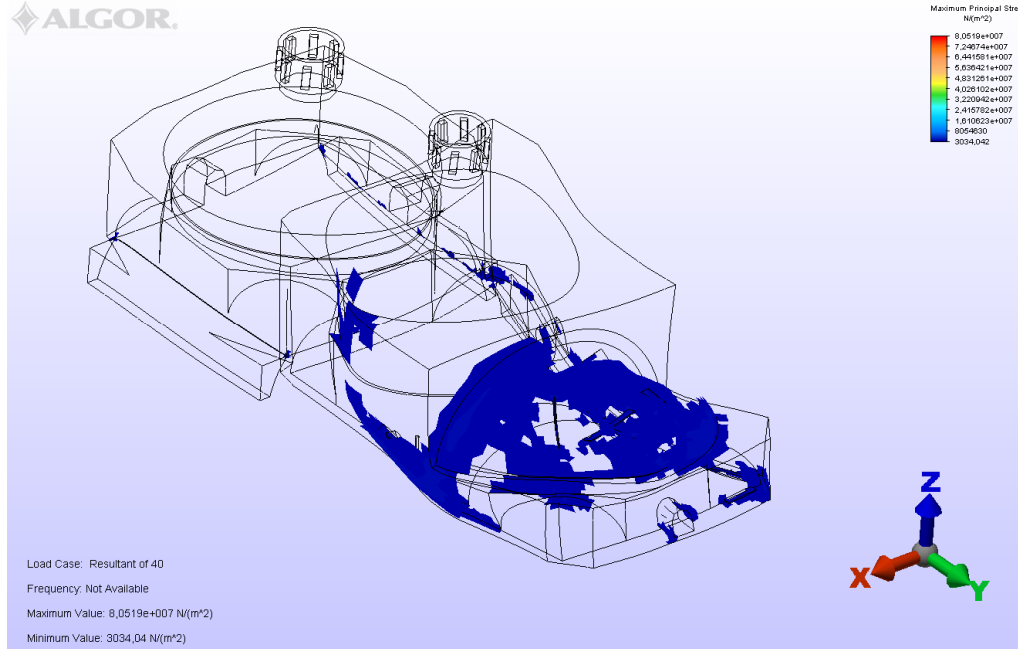
Şekil 3.223 Soğukluk bölümünde oluşan minimum gerilmelerde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerin gösterilmesi



Şekil 3.224 Soğukluk bölümünde oluşan minimum gerilmelerde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerin bir başka açıdan gösterilmesi

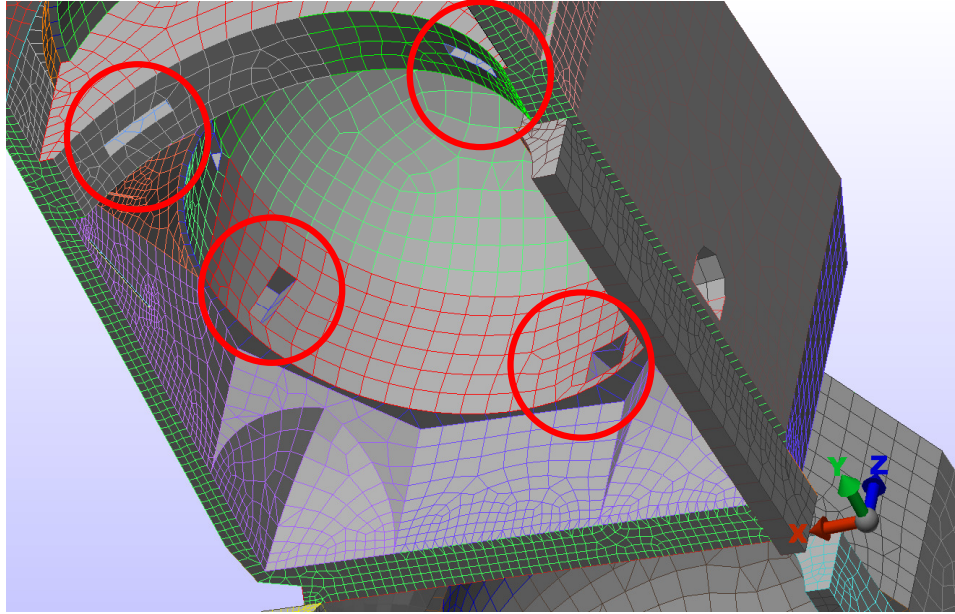


Şekil 3.225 Soğukluk bölümünde oluşan maksimum gerilmelerde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerin gösterilmesi

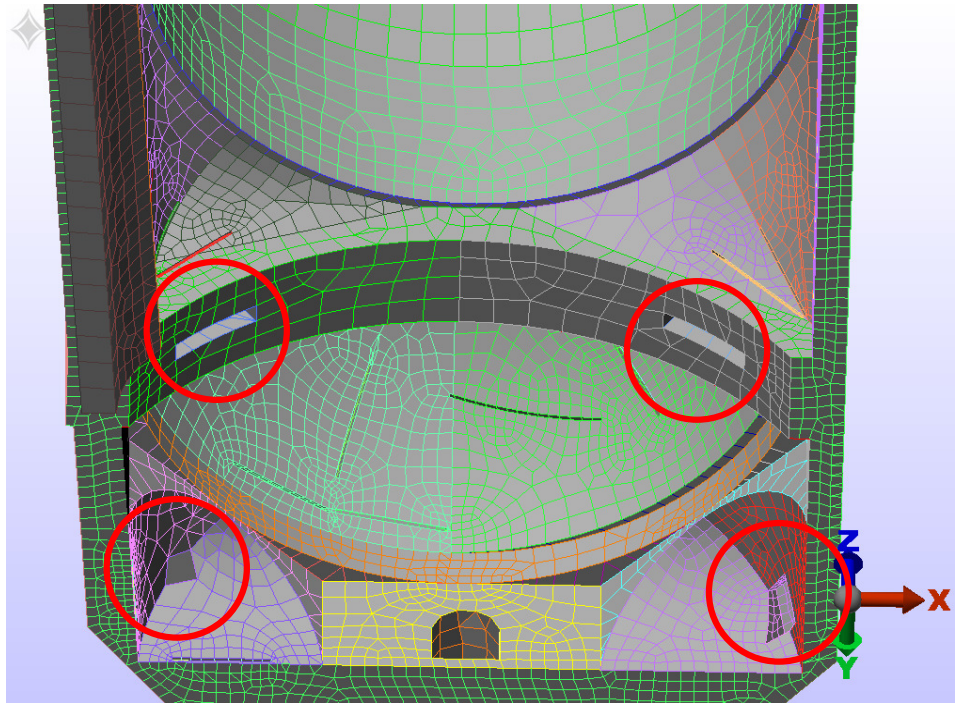


Şekil 3.226 Soğukluk bölümünde oluşan maksimum gerilmelerde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerin bir başka açıdan gösterilmesi

Yapıda çatlak oluşturularak yapılan analizde sınır gerilme değerlerinin artarak erkekler soğukluk kubbesine doğru yayıldığı gözlenmiştir. Çatlaklı olan yapıya ek olarak sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerde çatlak ve malzeme eksilmeleri yaratılarak yapı tekrar x yönünde deprem kuvvetine tabi tutulmuştur (Şekil 3.227,228).

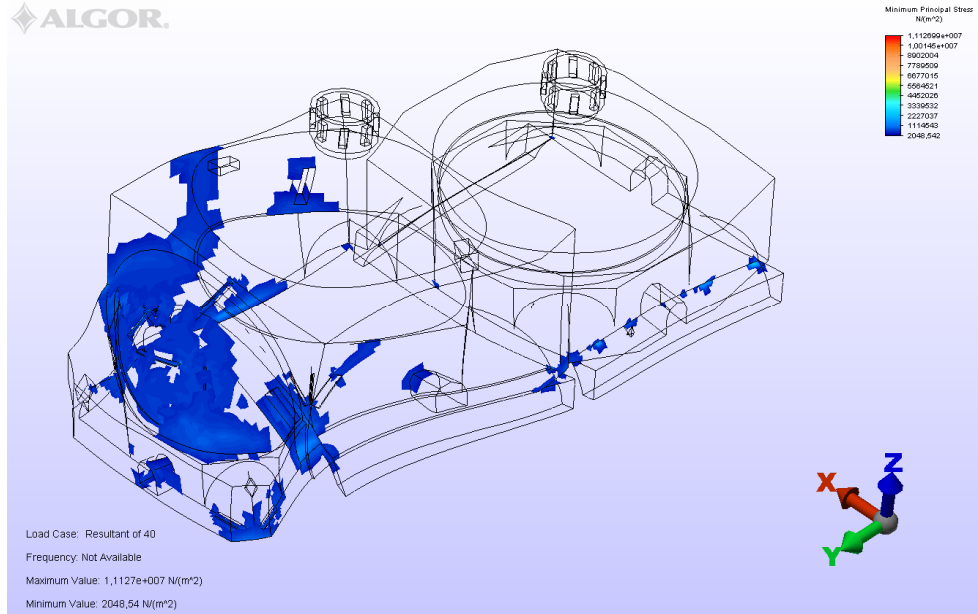


Şekil 3.227 Soğukluk bölümünde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerde malzeme eksilmesi yapılan kısımlar

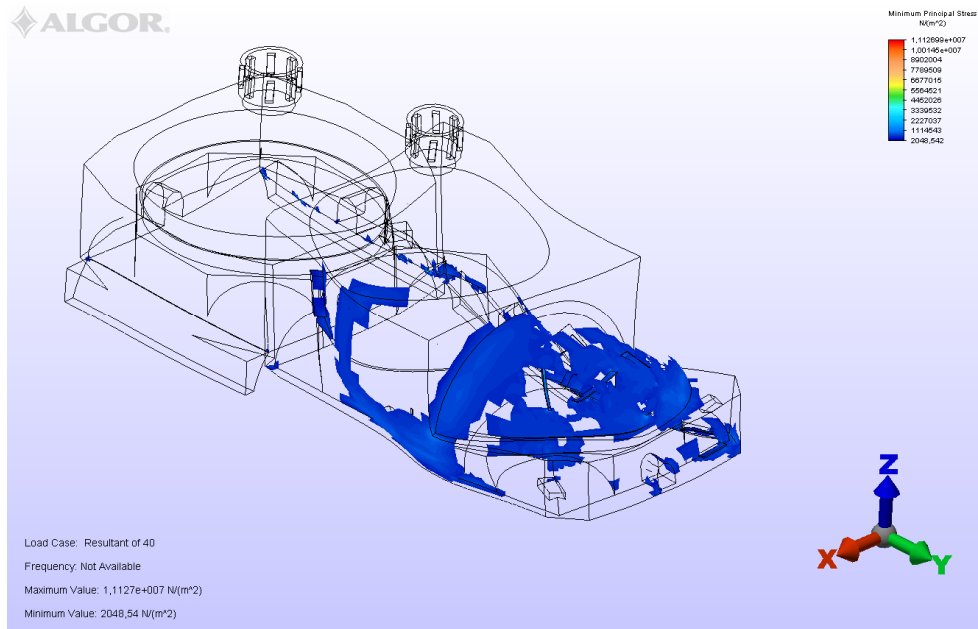


Şekil 3.228 Soğukluk bölümünde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerde malzeme eksilmesi yapılan kısımlar

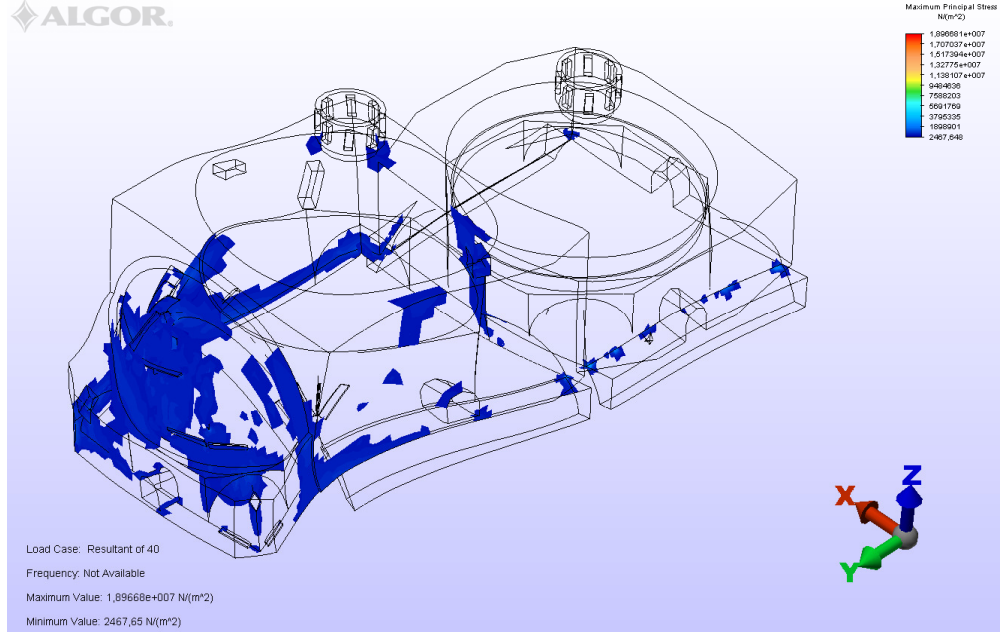
Yapılan analiz sonuçlarına göre sınır gerilme değerleri; yarım kubbe ile tam kubbe arasındaki kemerin tümünde, yarım ve tam kubbenin pantantif ve tromplarında, ılıklik yönündeki kubbe altı duvarında, kubbe altı duvarlarının kenar bölgelerinde ve kubbenin fener kısmında aşılmıştır (Şekil 3.229,230,231,232).



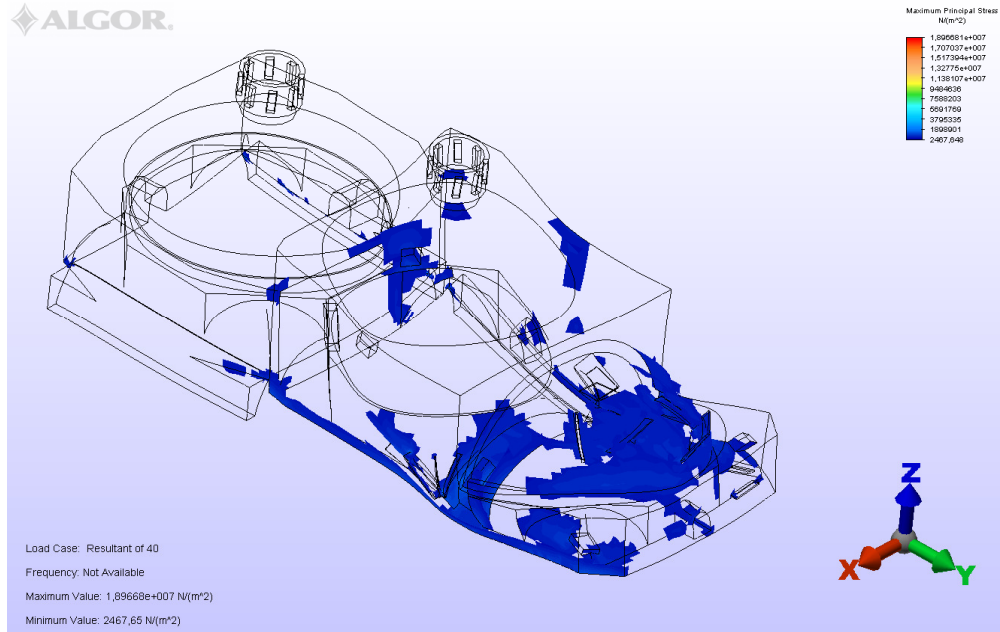
Şekil 3.229 Soğukluk bölümünde oluşan minimum gerilmelerde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerin gösterilmesi



Şekil 3.230 Soğukluk bölümünde oluşan minimum gerilmelerde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerin bir başka açıdan gösterilmesi



Şekil 3.231 Soğukluk bölümünde oluşan maksimum gerilmelerde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerin gösterilmesi



Şekil 3.232 Soğukluk bölümünde oluşan maksimum gerilmelerde sınır gerilme değerlerini aşan bölgelerin bir başka açıdan gösterilmesi

Yapılan analizler depremin x doğrultusunda etkimesi durumunda yapıda oluşacak çatlak ve malzeme boşalmaları sonucunda gerilme düzeylerinin yapının mevcut haldeki yıkık olan bölgelerinde arttığını göstermiştir.

Yapılan son analiz yıkımın nasıl gerçekleştiği hakkında somut bilgiler vermiştir. Buna göre; yıkılmanın x yönünde (doğu-batı) etkiyen deprem sırasında meydana geldiği, yıkılmanın soğukluk kemer uçları ile pandantiflerde başlayarak önce yarım kubbe ile kemerin ardından da tam kubbenin yıkılmasıyla gerçekleştiği görülmüştür. Bu yıkılmadan duvarlarında etkilenecek özellikle kapı ve pencere boşlukları bulunan doğu cephenin yıkıldığı anlaşılmaktadır. Bu nedenle daha fazla çatlak yaratılarak analizlere devam etmeye gerek duyulmamıştır.

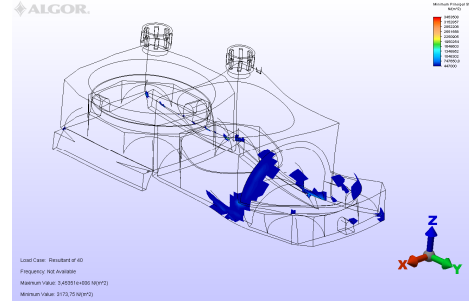
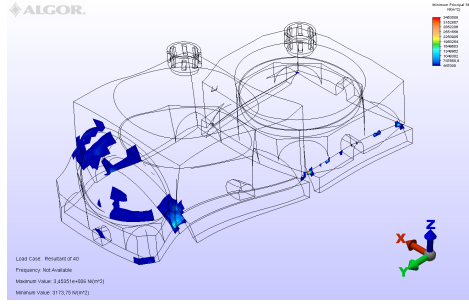
Tartışılması gereken bir konu ise sönüm oranları ile ilgilidir. Genel olarak yapıların deprem sırasındaki elastik olmayan davranışlarının deprem kuvvetlerini sönümlemede etkili olduğu bilinmektedir. Yığma yapılarda da bu durum söz konusu olacağı için deprem analizleri sırasında uygulanan %5'lik sönüm oranının %10, %20 oranlarında olabileceği de düşünülmelidir. Bu çalışmada ayrıca sönüm oranının %10 ve %20 olması durumunda X yönünde etkiyecek olan depremde soğukluk kubbesinde oluşacak gerilmelerin ne düzeyde değişeceği de araştırılmıştır. Asal maksimum ve minimum gerilme miktarlarında %5 sönüm oranına göre oluşan azalma oranları Çizelge 3.17'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.17. %5 sönüme göre oluşan azalma oranları

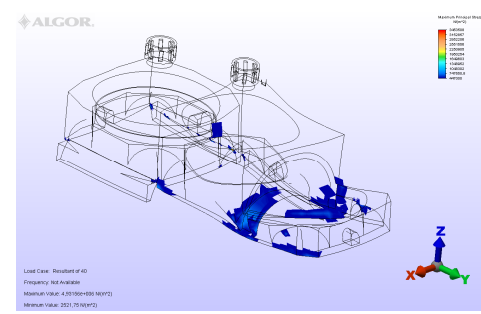
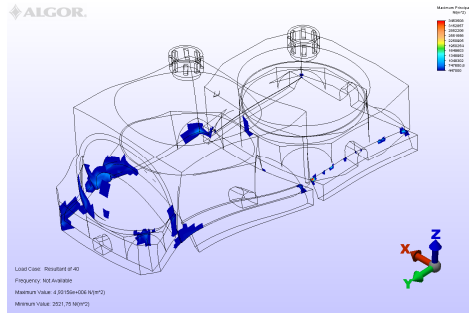
Sönüm Oranı	Maksimum Asal gerilmeler (değişim oranları %)	Minimum Asal gerilmeler (değişim oranları %)
10%	22	19
20%	31	27

Yukarıdaki tablodan anlaşılacağı üzere sönüm oranlarının artışı ile meydana gelen gerilme düzeylerinde azımsanmayacak oranlarda azalmaların meydana geldiği görülmüştür. Bu çalışmada %5 sönüm oranına göre yapılan analizlerde çekme gerilmesinin 0,447 MPa'yı geçen bölgeleri Şekil 220,221'de gösterilmiştir. Karşılaştırma yapılabilmesi açısından çekme gerilmelerini aşan bölgeler %10 sönüm oranı ile %20 sönüm oranı için Şekil 3.233'ten 3.240'a kadar sunulmuştur.

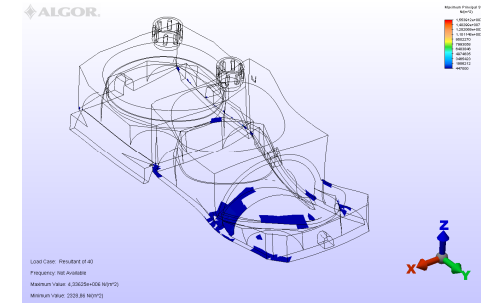
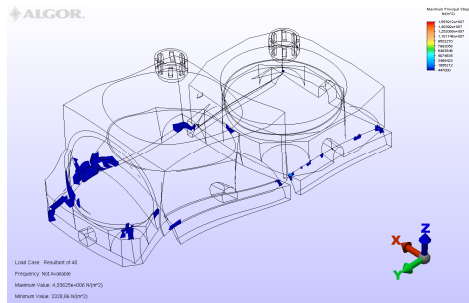
Bu konunun daha sonraki dönemlerde yapılacak olan araştırmalarda da ayrıntılı bir şekilde ele alınması gerektiği düşünülmektedir.



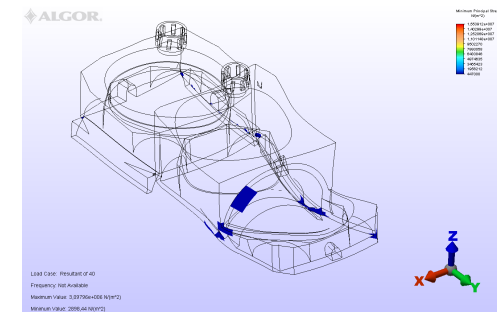
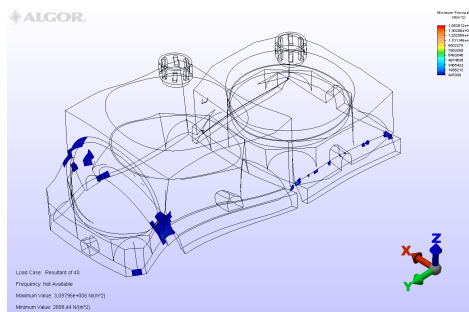
Şekil 3.233,234 %10 sönüm oranına göre x yönünde yapılan deprem analizlerinde Soğukluk Kubbelerinde oluşan maksimum asal gerilmelerin gösterilmesi



Şekil 3.235,236 %10 sönüm oranına göre x yönünde yapılan deprem analizlerinde Soğukluk Kubbelerinde oluşan minimum asal gerilmelerin gösterilmesi



Şekil 3.237,238 %20 sönüm oranına göre x yönünde yapılan deprem analizlerinde Soğukluk Kubbelerinde oluşan maksimum asal gerilmelerin gösterilmesi



Şekil 3.239,240 %20 sönüm oranına göre x yönünde yapılan deprem analizlerinde Soğukluk Kubbelerinde oluşan minimum asal gerilmelerin gösterilmesi

4. SONUÇ

Bursa'da neredeyse tüm tarihi yapıların yıkılmasına neden olan 1855 yılı depreminin büyük olasılıkla Ördekli Hamamı'nın soğukluk bölümünün de yıkılmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Bölüm 3.1.5'te anlatılan ve Şekil 3.79'la gösterilen Marmara Bölgesi aktif fayları ve tarihi depremlerinde Bursa'da meydana gelen 1855 depreminin olduğu bölgenin fay hatları gösterilmiştir. Özellikle her iki depremin oluşturduğu fay çizgilerinin yapının x-x (doğu-batı) yönlerinde oluşması depremin yapıda x-x yönünde etkimiş olabileceği ihtimalini güçlendirmektedir.

15. yüzyılda yapıda kullanılmış olan horasan harcının, yüzyılların yarattığı yıpratmalara rağmen günümüzde bile mukavemetinin yüksek oluşu belki de yapının ayakta kalmasının en büyük sebeplerinden biridir. Yapının mimarisi incelendiğinde ise soğukluk bölümlerinin diğer bölümlere göre daha yüksek oluşu, daha büyük açıklık geçilmesi, kubbeye geçiş elemanlarının düzensiz oluşu (tromp, pandantif kullanımı), erkekler soğukluk tam ve yarım kubbelerinin kemer elemanı ile taşınması ve bu bölgelerin yapının kenar kısımlarında düzenlenmiş olması da deprem sırasında daha fazla yer değiştirmesine ve dolayısıyla daha fazla gerilmeye maruz kalmasına neden olmuştur.

Yakın tarihte restorasyonu tamamlanan Ördekli Hamamı'nın yıkık olan bölümleri özgün tasarımına göre bütünlükle, yapının yeniden soğukluk kubbesi ve yarım kubbesi tamamlanarak yapının görsel bütünlüğü sağlanmıştır. Oysa bu yapıya ait analiz sonuçlarında yapının tamamlanan bölümlerinin x-x (doğu-batı) doğrultusunda deprem kuvvetleri altında yıkıldığı görülmüştür. Bu sebeplerden ötürü yapının restorasyonunda bu analiz sonuçları göz önünde bulundurularak bir restorasyon yönteminin seçilmesi gerekirdi. Bu yöntem soğukluk bölümünün dış ve iç duvar kesitlerinin arttırılması, çelik veya ahşap konstrüksiyon yapım sisteminin kullanılmasıyla tam ve yarım kubbenin görsel olarak bütünlüğüne olabildi. Bu yöntemle yapının deprem kuvvetleri altında yıkılması engellenecekti. Korkarız ki, bu yapının doğu-batı yönünde etkiyecek olan umulmadık bir deprem etkisiyle yıkılması muhtemeldir.

Söz konusu restorasyon çalışmalarının bilimsel bir tabana oturtulması hiç kuşkusuz tarihi kültür mirasımız olan bu yapıların daha uzun süre güvenli bir şekilde gelecek kuşaklara aktarılmasını sağlayacaktır.

Genel olarak restorasyonu yapılacak olan anıtsal yapılara yönelik önerileri sıralayacak olursak,

- Tarihi yapılarda onarım ve güçlendirmenin yapılabilmesi için sorunların teşhis edilmesi ve sorunlara yönelik doğru yöntemlerin belirlenmesi,
- Tarihi yapılar için yönetmeliklerimizde yeterli düzenlemelerin olmaması çözüm ve analiz aşamasında uluslar arası yönetmelik ve bilimsel makalelerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu konuda yasal düzenlemelerin tekrar gözden geçirilmesi ve daha fazla ayrıntıya yer verilmesi,
- Tarihi yapıların koruma, güçlendirme ve restorasyon çalışmaları farklı disiplinleri içeren bir yaklaşımla ele alınmalı ve yapılara minimum müdahale yöntemleri belirlenmelidir. Uygulamalarda tek ölçüt var olan deprem tehlikesi nedeniyle sadece yapı güvenliğinin ele alınması değildir. Yapılara yönelik yapılacak olan müdahalelerin geri dönüştürülebilir olmasına dikkat edilmeli, geri dönüştürülemez yöntemlerden kaçınılmalı, yapılan müdahale bütünüyle geri dönüştürülemeyecekse de gelecekte yapılacak olan müdahaleleri engellememesi,
- Yapıya en az zarar veren müdahale kararı verilmeden önce yapının mevcut güvenlik düzeyinin belirlenmesi,
- Yapıda kullanılacak olan malzeme özellikleri mevcut malzemelerle uyumlu olması,
- Yapının restorasyonu öncesi mutlaka yapısal analizlerinin yapılması,
- Uygulamaya yönelik herhangi bir müdahale öncesinde yapılacak olan tüm müdahaleler için proje hazırlanmalı ve açıklayıcı rapor ile birlikte Kültür ve Tabiat Varlıkları Koruma Bölge Kurulları'na başvurularak izin alınması, gerekmektedir.

“Tarihi Yapıların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizinin Bursa Ördekli Hamamı Örneğinde İncelenmesi” adlı çalışma ile anıtsal tarihi yapıların farklı disiplinleri içeren bir yaklaşımla ele alınması gerektiği, her yapının kendine özgü özelliklere sahip olduğu, yapıların restorasyonları öncesinde yapılması gereken çalışmalara katkı sağlayarak yapıların gelecek kuşaklara güvenli bir şekilde aktarılmasına çalışılmıştır.

KAYNAKLAR

- Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, ABYYHY 2007, s.159
- AHUNBAY, Z. 1996. Tarihi Çevre Koruma ve Restorasyon. YEM Yayını, İstanbul. s. 60.
- AKÖZ, F., N. YÜZER., Ö. ÇAKIR., N. KABAY., A.B. KIZILKANAT., N. ÖZÇİFTÇİ. 2005. Temel Yapı Malzemeleri Deneyleri. Y.T.Ü. Basım Yayın Merkezi, İstanbul.
- ALGOR V20.00, 2007, Autodesk Inc.,U.S.A.
- ARIOĞLU, N., E. ARIOĞLU. 2005. Engineering Mystery of Master Architect Sinan's "Küfeki" Shell Limestone. Architectural Science Review, 48 (2):163-172.
- ARU, K. 1949. Türk Hamamları Etüdü. İstanbul Matbaası, İstanbul.s.
- ASTM C50-00. 2006. Standart Practice for Sampling, Sample Preparation, Packaging and Marking of Lime and Limestone Products" American Standarts.
- BARONİO, G., L.BİNDA, C.TEDESCHİ, C. TİRABOSCHİ. Characterisation of the Materials Used in the Construction of the Noto Cathedral. Construction and Building Materials, 2003, 17:557-571.
- BAYRAKTAR A., KEYPOUR H., FAHJAN Y., ARUN G., 2007 "Historical monuments and their foundations" International Symposium Studies on Historical Heritage, Antalya, s.19-26
- BERTO, L., A. SAETTA., R. SCOTTA., R. VİTALİANİ. 2002. An Orthotropic Damage Model For Masonry Structures", International Journal for Numerical Methods in Engineering, 55:127-157.
- BİNDA, L. 2007. Investigation and Diagnosis of Historic Materials. International Symposium Studies on Historical Heritage, Antalya.p.295-304
- BİNDA L., MODENA C., BARONIAL G., ABBANEOL S., 1997 "Repair and investigation techniques for stone masonry walls", Construction and Building Materials, Vol. 11, No. 3, pp. 133-142, 1997
- BURSA BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ. 2006. T.C. Başbakanlık Toplu Konut İdaresi Osmangazi Belediyesi Kentsel Dönüşüm Projesi Zemin ve Temel Etüdü Değerlendirme Raporu,Bursa.
- CELEP, Z., N.KUMBASAR. 2001. Yapı Dinamiği. Beta Dağıtım, İstanbul.
- ÇELEBİ, Ü., BOZDOĞAN, K. B., 2006 "Rijitlik merkezi kavramı üzerine", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Bülten, 21-130
- Dİ PASQUALE, S. 1979. The Dome of Santa Maria del Fiore : An Opportunity to State A Theory of Masonry Structures. Proceedings of IASS Symposium, Madrid, p. 843-866
- ERDİK, M., E. DURUKAL. 1993, Ayasofya'nın Deprem Davranışı, 2. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 10-13 Mart 1993, İstanbul, s.198-207.
- ERSOY, H.Y. 2001. Kompozit Malzeme. Literatür Yayınları, İstanbul.s.66.

- FANNING, PJ, BOOTHBY, TE. 2001. Three-dimensional Modelling and Full-scale Testing of Stone Arch Bridges. *Computers & structures*, 79 (29-30):2645-2662.
- GIAMBANCO, G., S. RIZZO., R. SPALLINO. 2001. Numerical Analyses of Masonry Structures Via Interface Models, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190:6493-6511.
- GIORDANO, A., E. MELE., A. DE LUCA. 2002. Modelling of Historical Masonry Structures: Comparison of Different Approaches Through a Case Study” *Engineering Structures*. 24:1057-1069.
- GURBUZ C., M. AKTAR, H. EYİDOĞAN, A. CİSTERNAS, H. HAESSLER, A. BARKA, M. ERGİN, N. TÜRKELLİ, O. POLAT, S. B. ÜÇER, S. KULELİ, S. BARİS, B. KAYPAK, T. BEKLER, E. ZOR, F. BİCMEN AND A. YORUK. 2000. “The Seismotectonics of the Marmara Region (Turkey): Results From a Microseismic Experiment”, *Tectonophysics*, 316: 1–17
- GÜLEÇ, A., S. ACUN., A. ERSEN. 2005. A Characterization Method for the Fifth-Century Traditional Mortars in the Land Walls of Constantinople, Yedikule. *Studies in Conservation*. 50:295-306.
- GÜNDOĞDU, O. 2007. Bursa'nın Depremselliği. Afet-Yangın-Güvenlik Sempozyumu, Nisan 2007, Bursa. s.114-118.
- ICOMOS ISCARSAH.2007. Icomos International Scientific Committee For Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage, Mimari Mirasın Analiz, Koruma ve Yapısal Restorasyonu İçin Tavsiyeler, Türkçe Çeviri: Prof.Dr. Görün Arun, YTÜ, Maya Basın Yayın, İstanbul.
- İNAN, M. 2001. Cisimlerin Mukavemeti. İ.T.Ü. Vakfı Yayınları No:25. s.560.
- KARAESMEN, E., ÜNAY, A.İ., (1988), "A Study of Structural Aspects of Domed Buildings with Emphasis on Sinan's Mosques", *Proceedings of IASS-MSÜInt. Symposium*, İstanbul, s. 93-104
- KARAESMEN, E., C. ERKAY, N. BOYACI, E.ŞENKAYA, A.YAKUT, 1992. Evolution of Domed Building in Seismic Zones with Emphasis on Sinan's Major Works, METU-Pariar Education and'Research Foundation. Ankara.
- KEY CREATOR V4.0.0, 2004 Cubotek Corporation, U.S.A.
- KOÇAK, A. 1999. Tarihi Yapıların Statik ve Dinamik Yükler Altında Lineer ve Non-Linear Analizi:Küçük Ayasofya Camii Örneği. Doktora Tezi(yayınlanmamış), Y.T.Ü. Fen Bilimleri, İstanbul,s.328.
- KUBAN, D. 2000. Tarihi Çevre Korumanın Mimarlık Boyutu Kuram ve Uygulama. YEM Yayın, İstanbul, s.145.
- LOURENCO, P.B. 1996. Computational Strategies for Masonry Structures. Delft University Press, Stevinweg 1, 2628 CN Delft, The Netherlands.
- LOURENCO, P.B. 2001. Assessment of the Stability Conditions of a Cistercian Cloister. 2nd International Congress on Studies in Ancient Structures, İstanbul. P. 669-678.

- LOURENCO, P.B., D.V. OLVIERA, S. MOURAO. 2001. Numerical Analysis as a Tool to Understand Historical Structures. The Example of the Church of Outeiro”, 2nd International Congress on Studies in Ancient Structures, Antalya. P:355-364.
- MADRAN, E., ÖZGÖNÜL N., 2005 “Kültürel ve Doğal Değerlerin Korunması”, Yalçın Mat., Ankara.
- MELE, E., A. DE LUCA, A. GIORDANO. 2003. Modelling and Analysis of a Basilica Under Earthquake Loading. Journal of Cultural Heritage. 4:355-367.
- MOROPOULOU, A., K. POLIKRETİ, A. BAKOLAS, MICHAİLİDİS, P. 2003 Correlation of Physicochemical and Mechanical Properties of Historical Mortars and Classification by Multivariate Statistics” Cement and Concrete Research, 33:891-898.
- OĞUZOĞLU, Y. 2001. Osmanlı Arşivi Kayıtlarına Göre 1855 Bursa Depremi. Bursa Yöresinin Depremselliği ve Deprem Tarihi. Ed. N. Abacı. Uludağ Üniversitesi Basımevi. Bursa. s.96
- OSMANGAZİ BELEDİYESİ, 2005 Ördekli Hamamı Rölöve ve Restitüsyon Raporu, Bursa.s.
- ÖZKUL, T.A., M. KARAGÜLER., O.İ ERGÜNEŞ, Y. KAYA., C.F. PAVLATOS. 2007 Static and Dynamic Analysis of Panagia ton Isodion Church. International Symposium Studies on Historical Heritage, p: 535-542.
- ÖZMEN, B. 2000. 17 Ağustos 1999 İzmit Körfezi Depremi’nin Hasar Durumu (Rakamsal Verilerle) Deprem Raporu, TDV / DR 010-53. Ankara.
- PEYNİRCİOĞLU, H., TOĞRUL, E., AKSOY İ. H., 1981, “İstanbul’da Osmanlı Döneminde İnşa Edilen Camilerin Temelleri”, 1.Uluslararası Türk İslam Bilim ve Teknoloji Tarihi Kongresi”, İ.T.Ü. İstanbul, s.37-46
- POLAT, Z., 2005 “Deprem Yükleri Altında Çözümleme Modal Spektral Hesap” 8-22 Ocak 2005 – İMO İstanbul Şubesi Kadıköy Temsilciliği
- PSYCHARIS, I., H. MAUZAKIS, E.PAVLOPOULOU, A.MILTİADO. 2007, “Investigation of the Seismic Response of a Byzantine Church-comparison with the Existing Damage”, International Symposium Studies on Historical Heritage, Antalya.s. 559-566
- REYHAN, K. 2004. Construction Techniques and Materials of Ottoman Period Baths in Urla-Seferihisar Region, M.Sc. Thesis, İzmir Institute of Technology, İzmir
- ROCA P., MOLINS C., 1997 “In Situ Experimental tests performed on masonry constructions” Studies in Ancient Structures, Y.T.Ü. Mimarlık Fak.Basımevi, İstanbul, s.187-196
- ROSSI, P.P., 1996. “Possibilities of the Experimental Techniques For the Structural Analysis of Historical Constructions” P. Roca., J.L.González, A.R. Mari and E.Oñate(Editors.), International Congress of Structural Analysis of Historical Constructions. CIMNE, Barcelona, p.24-46.
- SALVADOR, I., F. J. PALLARES. 2006. Dynamic Investigations on a Masonry Bell Tower Engineering Structures, Volume 28, Issue 5, April 2006, p. 660-667
- SESİĞÜR, H., O.C. ÇELİK., F. ÇILI. 2007. Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Bileşenler, Hasar Biçimleri, Onarım ve Güçlendirme. Yapı Dergisi, 303:10-21.

- SVALDI, A.Dei., MAZZUCATO, A., 2007 “Foundation analysis of the Rialto Bridge in Venice” International Symposium Studies on Historical Heritage, Antalya, s.495-502
- ŞAHİN, Y. 2006. Kompozit Malzemelere Giriş. Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- TASSIOS, T.P., A. MILTIADOU-FEZANS, E. VINTZILEOU. 2007. Evaluation, Experimental Methods and Tests. International Symposium Studies on Historical Heritage, Antalya, p.459-468.
- TEOMETE, E. 2004. Finite Element Modelling of Historical Masonry Structures; Case Study: Urla Kamanlı Mosque. İ.Y.T.E. (basılmamış)Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- TS 699. 1987. Tabii Yapı Taşları-Muayene ve Deney Metotları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara. s.84
- TSEN 1996-1-1 Eurocode 6: Kagir Yapıların Tasarımı- Bölüm 1-1: Donatılı ve Donatısız Kagir Yapılar için Genel Kurallar, Ankara, s.125
- ULUENGİN, F., ULUENGİN, F., ULUENGİN, B., 2001, “Osmanlı Anıt Mimarisinde Kullanılan Yapı Detayları” YEM, İstanbul.
- ULUENGİN,M.B. 2002. Rölöve. YEM Yayını, İstanbul.s.27.
- ULUSAY, R., C. GÖKÇEÖĞLU., A. BİNAL. 2005. Kaya Mekaniği Laboratuar Deneyleri. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara. s.167
- UYANIK, H.,1994, “İstanbul’daki Türk Hamam Yapılarının Depreme Karşı Dayanıklılığının Analitik İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üni.,İstanbul
- ÜNAY, A.İ. 2002. Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı. ODTÜ Mimarlık Fakültesi Basım İşliği, Ankara. s.172
- XU. Z. 1992. Applied Elasticity. Higher Education Press, Beijing.p.373.
- YÜCEFER, N.,2005 “Elastisite Ders Notları”
- ZUCCHINI, A., P.B. LOURENÇO. 2009. A Micro-mechanical Homogenisation Model for Masonry: Application to Shear Walls. International Journal of Solids and Structures, 46 (3-4):871-886.
- ZUCCHINI, A., P.B. LOURENÇO. 2002. A Micromechanical Model for the Homogenisation of Masonry”, Int. J. Solids and Structures, 39(12):3233-3255.
- ZUCCHINI, A., P.B. LOURENÇO. 2004. A Coupled Homogenisation-damage Model for Masonry Cracking. Computers & Structures, 82: 917-929.
- ZUCCHINI, A., P.B. LOURENÇO. 2007. Mechanics of Masonry in Compression: Results From a Homogenisation Approach, Computers & Structures, 85(3-4):193-204.
- <http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/11142.pdf>, Erişim Tarihi: 01.01.2009.Konu: AKÖZ, F., N. YÜZER. 2005. Tarihi Yapılarda Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesinde Uygulanan Yöntemler.s. 11.
- <http://www.deprem.gov.tr/linkhart.htm> Erişim tarihi:03.04.2008 Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası
- <http://www.deprem.gov.tr/linkhart.htm> Erişim tarihi:03.04.2008. Konu: Bursa deprem haritası.

<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo> Erişim Tarihi:03.04.2008. Konu: Türkiye'deki son deprem etkinlikleri.

<http://www.ym.com.tr/formdata/PDF/kufeki1.pdf> Erişim Tarihi: 03.04.2008
ARIOĞLU N., A. TUĞRUL., İ.H, ZARİF., C. GİRGIN., ARIOĞLU, E. "Küfeki Taşının Dayanıklılık Analizi : Şehzade Camii rneği Yapı Merkezi, İstanbul.

TEŞEKKÜR

Tezimin tüm aşamalarında değerli bilgileri ile beni yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Reşat ÖZCAN'a ve çalışmamın gelişiminde yapıcı eleştirilerinden çok faydalandığım Sayın Prof. Dr. Sedat ÜLKÜ, Sayın Prof. Dr. Nilüfer AKINCITÜRK, Sayın Doç. Dr. Alper İLKİ ve Sayın Yrd. Doç. Dr.Mizan DOĞAN'a çok teşekkür ederim.

Bu konuda çalışma yapmam konusunda beni yüreklendiren, bilimsel ve manevi destek veren eşim Restoratör Mimar Dr. Özlem KÖPRÜLÜ BAĞBANCI'ya çok teşekkür ederim.

Ayrıca malzeme deneylerimi yapmam konusunda gerekli iletişimi sağlayan Sayın Dr. Rengin BECEREN ÖZTÜRK'e, deneylerimi yapmış olduğum İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü Malzeme Laboratuvarı sorumlusu Sayın Doç. Dr. Leyla TANAÇAN'a, değerli bilgilerini ve deneyimlerini paylaşan Sayın Prof. Dr. Erol GÜRDAL, Sayın Dr. Seden ACUN ve Sayın Serkan YATAĞAN'a çok teşekkür ederim.

Son olarak bilgi ve dökümanlarını paylaşan Bursa Büyükşehir Belediyesi ve Osmangazi Belediyesi'ne çok teşekkür ederim.

Mart 2009

ÖZGEÇMİŞ

12 Mart 1973 tarihinde Diyarbakır'da doğmuştur. İlkokulu Diyarbakır İnönü İlkokulu, Ortaokul ve Liseyi Diyarbakır Anadolu Lisesinde bitirmiştir. Aynı tarih olan 1991 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazanmıştır. 1995 yılında mezun olarak İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Müh. Bölümünde Yüksek Lisansını yapmaya başlamıştır. Hem yüksek lisans hem de çalışma hayatını birlikte sürdürmüştür. Haliç Köprüsü İlave İnşaatı İşinde Tek-Yen Firmasında 1997-1999 yıllarında, Kazakistan Irtysh River Suspended Bridge Construction Projesinde Semey Şehrinde Japon I-H-I firmasıyla, askerlik dönüşünde kısa bir süre İzmit Gölcük toplu konut inşaatı işinde Ekinciler ve Ortakları A.Ş.'de ve sonra FEMA inşaatıta hakediş hazırlama, planlama, şantiye şefliği görevlerinde çalışmıştır. Daha sonra BursaRay A Etabı Projesinde GÜRİŞ İnşaat A.Ş.'de çalışarak Eylül 2002 tarihinden itibaren Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü Yapı Bilgisi Anabilim Dalında Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.