

Tarihi Yapıların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizinin İznik Yeşil Camii Örneğinde
İncelenmesi

Aykut Uray

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2018

Analysis of Historical Structures by Using Finite Element Analysis in İznik Yeşil Camii

Aykut Uray

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

May 2018

Tarihi Yapıların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizinin İznik Yeşil Camii Örneğinde
İncelenmesi

Aykut URAY

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekanik Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi H. Selim ŞENGEL

Mayıs 2018

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Aykut URAY'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak “ Tarihi Yapıların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizinin İznik Yeşil Camii Örneğinde İncelenmesi ” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğretim Üyesi H. Selim ŞENGEL

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Dr. Öğretim Üyesi H. Selim ŞENGEL

Üye : Prof. Dr. Mizan DOĞAN

Üye : Dr. Öğretim Üyesi Murat HİÇYILMAZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğretim Üyesi H.Selim Şengel danışmanlığında hazırlamış olduğum “Tarihi Yapıların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizinin İznik Yeşil Camii Örneğinde İncelenmesi” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik, ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 25/05/2018

Aykut URAY

ÖZET

Tüm tarihimiz boyunca kültürel mirasımız olarak inşaa ettiğimiz yapıların, zamanla oluşan doğal afetler, yangınlar ve dış etkiler sonrasında yaşadıkları kayıplar sonucunda, bu yapılara yapılması düşünülen restorasyon, onarım ve güçlendirme çalışmalarından önce yapıların dizayn biçimlerinin ve strüktürel özelliklerinin, malzeme tiplerinin ve özelliklerinin ile statik ve dinamik analizlerinin bilinmesi yapıyı doğru yorumlamak için önemlidir. Yapılması düşünülen işlemlerin de bu bilgilerden toplanacak sonuçlara dikkat edilecek şekilde uygulamalar yapılması gerekmektedir. Yapılacak müdahalelerin biçimi ve önemi, yapının geleceğe güvenle devredilmesine ışık tutacak nitelikte olmalıdır.

Bu tez çalışmasında, Bursa İli, İznik İlçesi, İznik Yeşil Camii içinde malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacı ile yapıda tahribatsız testler ve laboratuvar ortamında da test çalışmaları yapılmıştır. Yapının zemin özelliklerinin belirlenmesi amacı ile İznik Yeşil Cami bölgesinde yapılan zemin etüt çalışmaları incelenmiştir. Yapının üç boyutlu model çalışması yapılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modeli ile beraber yapıda düşey yükler altında statik analiz, modal analiz ve davranış spektrum analizleri yapılarak yapının hasarlı bölgeleri için veriler toplanılmasına çalışılmıştır.

Tarihi önemi büyük bu yapılar için özellikle güçlendirme yöntemleri belirlenmeden önce sayısal analizlerinin itinalı bir şekilde yapılması doğru yöntemlerin seçilmesi açısından önem taşımaktadır.

Anahtar kelimeler: Tarihi yapılar, Sonlu elemanlar yöntemi, Statik ve dinamik analizler.

SUMMARY

It is important to interpret the structure correctly that knowing the structural properties, material types and properties, static and dynamic analyses of the building before the restoration, repair and strengthening studies that are planned to be done to the structures we built as our cultural heritage throughout our history, as a result of the natural disasters, fires and external effects. It is also necessary to make the interventions that are thought to be done should consider the results to be collected from these informations. The form and the importance of the interventions must be shed light on the safe transfer of the structure to the future.

In this thesis, in order to determine the material properties within the Iznik Yeşil Cami, Iznik, Bursa, non-destructive tests were carried out in the building and some other test works were carried out in the laboratory. In order to determine the soil properties of the building, soil survey studies in the Iznik Yesil Cami area were investigated. Three-dimensional model study of the structure was made and a finite element model was created. By means of finite element model, static analysis, modal analysis and behavioral spectrum analysis were performed under vertical loads in the structure to collect data for damaged zones.

Making the numerical analyses correctly, especially before strengthening methods are determined for important structures from the historical point of view is important to choose the right methods.

Keywords: Historical structures, Finite element method, Static and dynamic analyses.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca bilgi ve deneyimleri ile bana destek olan ve uzun süre ara verdikten sonra tezimi yazmama olanak tanıyan danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi H. Selim Şengel'e en derin teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin gelişmesi için değerli eleştirilerde bulunan Prof. Dr. Mizan DOĞAN'a ve Dr. Öğretim Üyesi Murat HİÇYILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım. Değerli katkılarından dolayı Dr. Öğretim Üyesi Hakan Erol hocama şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmamın tüm bölümlerinde bana her türlü yardım ve değerlendirmede bulunan çok değerli abim, hocam Doç. Dr. M. Bilal Bağbancı'ya en derin teşekkürlerimi sunarım. Çalışmakta olduğum kurum olan Bursa Büyükşehir Belediyesinde müdirem Mimar Mümine Güdü'ye bu dönemde bana her türlü kolaylığı sağladığı için, oda arkadaşlarım olan Mimar Bora Akın ve Peyzaj Mimarı Neşe Yücesoy'a da destekleri için teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans çalışmamı bitirmem için beni sürekli teşvik eden değerli meslektaşım ve arkadaşım Dr. Öğretim Üyesi Selen Aktan'a şükranlarımı sunarım.

Son olarak bu dönemde bana destek olan değerli eşim Esin Uray ve sevgili oğlum Kaan Uray ile yüksek lisansı bitirmemi büyük bir arzu ile isteyen, bugüne kadar bana ellerinden gelen her desteği ve gücü veren sevgili annem Ayla Uray ve babam Kutsal Uray'a, akademik ve iş hayatımda çok başarılı olmamı hep arzuladığını bildiğim fakat yakın bir dönemde ani bir şekilde kaybetmiş olduğum sevgili dayım Ümit Gökalp'e tüm kalbimle teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Aykut URAY

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
1.GİRİŞ VE AMAÇ	1
2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
3.YIĞMA YAPI ELEMANLARININ MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DAYANIMI7	
3.1. Tarihi Yapıların Malzeme Tipleri ve Özellikleri	7
3.1.1. Harç	7
3.1.1.1 <u>Kireç harcı</u>	8
3.1.1.2. <u>Horasan harcı</u>	9
3.1.2. Tuğla	9
3.1.3. Taş (Doğal taş)	11
3.1.4 Ahşap.....	13
3.2. Yığma Yapı Elemanlarının Mekanik Özellikleri	14
3.2.1. Basınç dayanımı	14
3.2.2. Kayma dayanımı	16
3.2.3 Çekme dayanımı.....	17
3.2.4 Elastisite modülü	17
3.3. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi için Kullanılan Deneyler.....	18
3.3.2. Laboratuvar deneyleri	20
3.3.3. Tahribatsız deneyler	22
3.3.3.1. <u>Ultra ses test yöntemi</u>	22
4. TARİHİ YAPIYI OLUŞTURAN YAPI ELEMANLARI.....	23
4.1. Kemer.....	23

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.2. Kubbe	26
4.3. Tonoza.....	28
4.4. Duvarlar.....	29
4.5. Sütun ve Ayaklar.....	30
5. YAPILARIN DEPREM YÜKLERİ ALTINDA DAVRANIŞI	32
5.1. Tarihi Yığma Yapıların Dinamik Özellikleri	34
6. MATERYAL VE YÖNTEM	38
6.1 Tarihi Yapıların Modellenmesi ve Analiz Yöntemleri.....	38
6.2. Detaylı Mikro Modelleme	39
6.3. Basitleştirilmiş Mikro Modelleme	40
6.4. Makro Modelleme	40
6.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi	41
6.5.1. Sonlu elemanlar yöntemi ile kemerin el ve bilgisayar ortamında analizlerinin karşılaştırılması.	43
6.6. Katı (Solid) Eleman Tanımı	48
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	50
7.1. Genel Bilgiler İznik Yeşil Camii.....	50
7.1.1. Mimari ve geometrik özellikleri.....	51
7.1.2. Taşıyıcı sistem ve malzeme özellikleri	53
7.1.3. Yapının genel durumu	54
7.2. Yerinde ve Laboratuvar Yapılan Testler	55
7.2.1. Yerinde yapılan ultrases testleri	55
7.2.2. Zemin analizleri.....	58
7.2.3. Birim hacim ağırlık deneyi.....	59
7.2.4. Yapı elemanlarının elastisite modülü tayini.....	60
7.3. Yapının Sonlu Elemanlar Modeli ve Analiz Çalışmaları.....	62
7.3.1. İznik Yeşil Caminin üç boyutlu modelinin oluşturulması.....	62
7.3.2. İznik Yeşil Caminin sonlu elemanlar modelinin oluşturulması	64
7.3.3. İznik Yeşil Caminin düşey yükler altında statik analizi	66
7.3.4. İznik Yeşil Caminin deprem analizi	75
7.3.5. İznik Yeşil Caminin X yönündeki deprem analizi	80
7.3.6. İznik Yeşil Caminin Y yönündeki deprem analizi	83

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
7.4. Güçlendirme Önerisi	86
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	87
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	90



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

1.1. Dini yapılara örnekler. a) Bursa Ulu Camii, b) İspanya Santiago Kilisesi.....	2
1.2. Kültür ve Savunma Yapılarına Örnekler, a) Antalya Aspendos Tiyatrosu, b) Bursa Surları.....	2
1.3. İdari Binalara Örnekler, a) Dolmabahçe Sarayı, b) Türkiye Büyük Millet Meclisi	2
1.4. Türbelere ve Özel Yapılara Örnekler, a) Mısır Piramitleri, b) Erzurum Üç Kümbetler	3
1.5. İznik Yeşil Camii Kitabesi (1378 – 1379).....	3
1.6. İznik Yeşil Camii güncel durumu	4
3.1. Silindirik tuğlanın çevrimli basınç deneyi ve tipik gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	10
3.2. Taşlarda aranan özellikler	12
3.3. a) Çekme dayanımı b) Basınç dayanımı.....	14
3.4. Yapının strüktürel analizleri için yapılan deneysel araştırmalar	19
3.5. Flat Jack ekipmanı ile yerinde basınç deneyi ($d=d_i$ iken $p=p_f$)	20
3.6. Kayma gerilmelerinin belirlenmesi için deneyler	21
3.7. Sonik Ölçümlere örnekler	22
4.1. Kemerli oluşturan elemanlar	24
4.2. İznik Yeşil Camii kemer örnekleri	24
4.3. Kemer yapım şekilleri	25
4.4. Kemerlerde gerginin etkisi	26
4.5. Türk Üçgenine Örnek (İznik Yeşil Camisi)	27
4.6. Kubbe de çekme ve basınç bölgeleri.....	28
4.7. Kâgir tonoz biçimleri örnekler	29
4.8. Farklı tip taş ve tuğla duvarlar.....	30
4.9. Sütunlar, (a) tek parça sütunlar (Roma tipi), (b) Çok parçalı sütunlar	31
5.1. Yığma yapılarda yatay kuvvetlerin dağılımı.	35
5.2. Yığma yapı duvarda çatlak oluşumu (Bursa Yenişehir Sinanpaşa İmaret).....	36
6.1. Yığma yapıların modellenmesi, a) Yığma yapı, b) Detaylı mikro modelleme, c) Basitleştirilmiş mikro modelleme, d) Makro modelleme.....	39
6.2. Yığma duvarın makro model analizi a) Kuvvet-Yer değiştirme diyagramı b) Nihai yükte deformasyon şekli	41
6.3. Sonlu Eleman Sayısı İle Yaklaşık Sonuçların Yakınsama İlişkisi	42
6.4. Örnek kemer eleman modeli	43
6.5. Sap 2000 programı ile kemerin analiz çalışması.....	44
6.6. Sistemin lokal rijitlik matrisi.....	44

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.7. Sistemin transformasyon matrisi.....	45
6.8. Örnek olarak yapılan kemerin lokal rijitlik matrisi.....	45
6.9. Örnek olarak yapılan kemerin transformasyon matrisi	46
6.10. Örnek olarak yapılan kemerin global rijitlik matrisleri.....	47
6.11. Örnek kemerin yer değiştirme hesabı.....	48
6.12. Solid elemana örnek.....	49
7.1. Günümüz İznik haritası (1-İstanbul Kapı surları, 2- Lefke Kapı surları, 3-Yeşil Camii ve çevresi).....	50
7.2. İznik Yeşil Cami zemin kat ve tavan planı.....	52
7.3. İznik Yeşil Camii günümüz ve 1960'lı yıllar.....	53
7.4. Cami giriş kısmı batı cephesi – deformasyon oluşmuş sütun ve alan	54
7.5. Camii içerisinde yapılan test bölümleri.....	56
7.6. Yapının üç boyutlu modeli – Sütun ile beden duvarlarının modellenmesi	62
7.7. a) Yapının beden duvarı- Sütun ve kemer elemanların modellenmesi b) Yapının pencere ve kapı boşluklarının açılması ve tüm kemer elemanların modellenmesi	63
7.8. a) Son cemaat kubbe, tonoz ile ana mahfil kubbe modellenmesi b) Yapının tüm elemanlarının modellenmesi	63
7.9. Yapının alttan görünüşü, yapı elemanlarının modelleri	64
7.10. a) Yapının doğu cephesinden görünüşü b) Yapının batı cephesinden görünüşü.....	64
7.11. Yapının sonlu elemanlar modelinin perspektif görünüşü.....	65
7.12. Sonlu elemanlar eğrisi, yapıya etkiyen düşey yükler ve mesnetlenme şekilleri	68
7.13. Yapının Çizelge 7.6'da verilen değerlere göre Z (düşey) yöndeki yer değiştirmeleri	68
7.14. Yapının Çizelge 7.6'da verilen değerlere göre düşey yükler altında sütunlarda oluşan minimum gerilmeleri.....	69
7.15. Yapının Çizelge 7.6'da verilen değerlere göre düşey yükler altında oluşan minimum gerilmeleri	70
7.16. Yapının Çizelge 7.6'da verilen değerlere göre düşey yükler altında oluşan maksimum gerilmeleri	70
7.17. Yapının Çizelge 7.6'da verilen değerlere göre düşey yükler altında oluşan cami giriş kısmı batı sütunu ve son cemaat batı sütunu bölgesi maksimum gerilmeler	71

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

7.18. Yapının Çizelge 7.6'da verilen değerlere göre düşey yükler altında oluşan cami giriş kısmı batı sütunu ve son cemaat batı sütunu bölgesi minimum ve maksimum gerilmelerin olduğu bölgeler ve değerleri.....	71
7.19. Yapının Çizelge 7.7'de verilen değerlere göre Z (düşey) yöndeki yer değiştirmeleri	72
7.20. Yapının çizelge 7.7'de verilen değerlere göre düşey yükler altında oluşan minimum gerilmeleri.	73
7.21. Yapının Çizelge 7.7'de verilen değerlere göre düşey yükler altında oluşan yapı sütunları ve köşe taşıyıcılarda oluşan minimum gerilmeleri.....	74
7.22. Yapının çizelge 7.7'da verilen değerlere göre düşey yükler altında oluşan maksimum gerilmeleri	74
7.23. Yapının Çizelge 7.7'da verilen değerlere göre düşey yükler altında oluşan cami giriş kısmı batı sütunu ve son cemaat batı sütunu bölgesi minimum ve maksimum gerilmelerin olduğu bölgeler ve değerleri.....	75
7.24. Yapının birinci modunda oluşan şekli (Üstten ve izometrik görünüş).....	77
7.25. Yapının üçüncü modunda oluşan şekli (Üstten ve batı cephesinde görünüş).....	78
7.26. Yapının altıncı modunda oluşan şekli (Üstten ve izometrik görünüş)	78
7.27. İvme spektrum grafiği	80
7.28. Yapının X yönünde deprem analizi sonucunda X yönünde oluşan maksimum yer değiştirme değerleri.....	81
7.29. Yapının X yönünde deprem analizi sonucunda X yönünde oluşan ve son cemaat üst örtü kısmı ve duvarlarında oluşan yer değiştirme değerleri.....	81
7.30. Yapının X yönünde deprem analizi sonucunda oluşan gerilme değerleri	82
7.31. Yapının X yönünde deprem analizi sonucunda oluşan gerilme değerleri	82
7.32. a) Yapının X yönünde deprem analizi sonucunda oluşan yapının alttan görünüşü ve gerilme yığılmalarının bölgeleri b) Yapının X yönünde deprem analizi sonucunda oluşan yapının batı cephe görünüşü ve gerilme yığılmalarının bölgeleri	83
7.33. Yapının X yönünde deprem analizi sonucunda Y yönünde oluşan maksimum yer değiştirme değerleri.....	84
7.34. Yapının X yönünde deprem analizi sonucunda Y yönünde oluşan maksimum dördüncü ve altıncı modların yer değiştirme değerleri	84
7.35. Yapının Y yönünde deprem analizi sonucunda oluşan gerilme değerleri	85

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**Sekil****Sayfa**

- 7.36. Yapının Y yönünde deprem analizi sonucunda oluşan gerilme değerleri 85
- 7.37. Yapının güncel durumu ve cami giriş kısmında bulunan sütuna yapılan güçlendirme örneği 86



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Tuğlaların ortalama fiziksel özellikleri	10
3.2. Doğal yapı taşlarının ortalama fiziksel özellikleri	11
3.3. Ahşap malzemenin fiziksel özellikleri	13
3.4. Ahşap yapı elemanları için emniyet gerilmeleri (Esas yükler için)	14
7.1. Yerinde yapılan ultrases metoduna göre ses geçiş süresi	57
7.2. Zemin etüt çalışmalarına göre zemin profili	58
7.3. Kıvam indisi değeri	58
7.4. Ortalama birim hacim ağırlığı tespiti	59
7.5. Elastisite modüllerinin belirlenmesi	61
7.6. Düşey yükler altında analiz parametreleri (Birinci analiz).....	66
7.7. Düşey yükler altındaki analiz parametreleri (İkinci analiz)	67
7.8. Yapının Serbest Titreşim Periyotları, Modal Frekansı ve Kütle Katılım Oranları.....	76

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$A(T)$	Spektral İvme Katsayısı
A_0	Etkin ivmesi katsayısı
B_h	Birim hacim ağırlığı
C_l	Ses Geçiş Hızı
E	Elastisite modülü
E_m	Yığma yapı elemanı elastisite modülü
f'_b	Birim eleman (taş veya tuğla) basınç dayanımı
f_b	Birim elemanın basınç dayanımını
f_k	Yığma yapı elemanın karakteristik basınç dayanımı
f_m	Harcın ortalama basınç dayanımı
f_n	Basınç dayanımı
G	Kayma Modülü
g	Yer Çekimi İvmesi
G_k	Etüv kurusu ağırlık
G_d	Suya doymuş ağırlık
G_{ds}	Su içindeki ağırlık
k	Global rijitlik matrisi
$k^{\wedge}$	Lokal rijitlik matrisi
$\underline{K}$	Rijitlik matrisi
I	Bina önem katsayısı
I_c	Kıvam indisi
L	Ses geçiş süresi hesabında problemlerin arasındaki mesafe
Q_{em}	Taşıma gücü (Terzaghi taşıma gücü)
S_k	Kütlece su emme oranı
S_h	Hacimce su emme oranı
T	Transformasyon matrisi
T	Ses Geçiş Süresi
T	Bina doğal titreşim periyodu
T^T	Transformasyon matrisinin transpozu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
T_A	Spektrum karakteristik periyotları
T_B	Spektrum karakteristik periyotları
$\underline{U}$	Global düğüm noktaları yer değiştirmeleri
$W(n)$	Su içeriği
$S(T)$	Spektral İvme Katsayısı
δ_m	Birim elemanın nem oranını gösteren faktörü
δ_s	Birim elemanın biçim ve boyuta bağlı olan şekil faktörü
τ_o	Kohezyon değeri
μ	İç sürtünme katsayısı
τ	Kayma dayanımı
ρ	Ortalama Birim Hacim Ağırlığı
γ	Poisson Oranı

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Tarihi yapılar yüzyıllar boyunca, depremler, yangınlar, savaşlar, olumsuz çevre şartlarının oluşması ile beraber, dönemsel olarak oluşan ilgisizlikler sonucunda, bu önemli ve değerli yapıların bir bölümü kaybedilmiş, bir bölümünde yapısal kayıplar oluşmuş ve bir kısımda günümüze ulaşmayı başarmıştır. Günümüzde tarihi mirasın korunması konusu üzerinde birçok bilim insanının çalışmaları devam etmektedir. Tarihi yapıların korunması konusu disiplinler arası çalışmaların yapılması koruma anlayışının gelişmesi ve sürdürülebilir olması yönünden oldukça önemlidir.

Ülkemizde yer alan mimarlık ve mühendislik açısından bu değerli ve günümüze ulaşmış eserlerin geleceğe güvenle ulaştırılması çok önemlidir. Tarihi yapıların incelenmesi, değerlendirilmesi, restorasyon ve güçlendirme uygulamalarının belli standartlara dayandırılarak yapılması amacı ile ülkemizde “Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu” hazırlanmıştır. Kılavuz çalışması ile beraber İnşaat Mühendislik Biliminin tarihi yapılar üzerinde yorum ve modelleme yapmasına, gerekli onarım-güçlendirme yöntemlerinin kararlarını vermesine olanak sağlaması açısından büyük önem arz etmektedir. Teknolojik gelişmelerin artmasıyla beraber kullanılan yöntemler ile malzemelerin gelişmesi, yapılacak analizlerin, deneylerin ve modellemelerin anlaşılabilir ve daha doğru sonuçlara yol açacağı aşîkârdır.

Dünyada ve ülkemizde yer alan tarihi yapılar için özel bir sınıflandırma sistemi yapılmamış olmakla birlikte yıllar içinde kullanıldıkları biçimlere, inşa edilirken kullanılan malzeme özelliklerine ve inşa edilirken seçilen taşıyıcı sistemlerine göre sınıflandırılma yapılabilmektedir. Tüm uygarlıklar boyunca değişik mimari formlarda yapılar inşa edilmiş ve tüm yaşam alanlarında hizmet sunmuş bu yapılara çeşitli örnekler aşağıda verilmiştir. (Şekil 1.1, ...Şekil 1.4);



(a)



(b)

Şekil 1.1. Dini yapılara örnekler. a) Bursa Ulu Camii, b) İspanya Santiago Kilisesi



(a)



(b)

Şekil 1.2. Kültür ve Savunma Yapılarına Örnekler, a) Antalya Aspendos Tiyatrosu, b) Bursa Surları (Saltanat Kapı)



(a)



(b)

Şekil 1.3. İdari Binalara Örnekler, a) Dolmabahçe Sarayı, b) Türkiye Büyük Millet Meclisi



(a)



(b)

Şekil 1.4. Türbelere ve Özel Yapılara Örnekler, a) Mısır Piramitleri, b) Erzurum Üç Kumbetler

Tarihi yığma yapıların eleman ve malzeme özelliklerini incelemek, tarihi yığma yapılara uygulanabilen güçlendirme tekniklerini araştırmak, yapı modeli oluşturmak ve model üzerinde statik ve dinamik analizleri yapmak; tezin temel amacıdır. Bu hedefe varabilmek için, Osmanlı İmparatorluğunun kuruluş tarihine göre ayakta kalan ilk camisi olan ve kitabesine göre yapım başlangıcı 1378 tarihine uzanan, Bursa İli, İznik İlçesinde yer alan İznik Yeşil Camii'nin yerinde ultra ses yöntemi kullanılarak alınan veriler sonucunda elemanların elastisite modülleri belirlenmiş ve sonlu elemanlar modeli oluşturularak analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak yapıya zayıf kesitleri ve bölgeleri belirlenerek güçlendirmesi önerisi yapılmıştır.



Şekil 1.5. İznik Yeşil Camii Kitabesi (1378 – 1379)



Şekil 1.6. İznik Yeşil Camii güncel durumu

Tezin birinci bölümünde amacına değinilerek, yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. İkinci bölümünde tarihi yapılar için yapılan benzer çalışmaların literatür araştırma çalışmaları yapılmıştır. Üçüncü bölümde tarihi yapıyı oluşturan malzeme tipleri ile bu malzeme tiplerinin özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde tarihi yığma yapıları oluşturan eleman tipleri ve özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Beşinci ve altıncı bölümde yığma yapıların depren yükleri altında davranışı ve modelleme tekniklerinden bahsedilmiştir. Yedinci bölümde teze konu olan İznik Yeşil Camii örneğinde yapılan deneyler, modelleme yöntemi ile analiz yöntemleri sonucunda veriler oluşturulmuştur. Sekizinci bölümde sonuç ve öneri kısmı olarak değerlendirilmiş ve yedinci bölümde yapılan sonuçların değerlendirilmesi yapılarak tez çalışması tamamlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tarihi yapıların sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan üç boyutlu modellerin doğrusal yöntemler ile yapılan statik ve dinamik analiz çalışmalarının bir kısmı incelenerek özet halinde aşağıda sunulmuştur.

Timur (2001) tarihi yığma hasar türleri, onarım ve güçlendirme yöntemleri hakkında bilgi vermiş. Edirnekapı Mihrimah Sultan Cami'nin tarihçesi ile taşıyıcı sistem özellikleri hakkında bilgiler vermiş, yapı özelinde hasarları tespit etmiştir. Yapının sonlu eleman modeli oluşturularak dinamik analizlerini gerçekleştirmiş ve sonucunda sismik yalıtım sisteminin uygulanması önerisinde bulunulmuştur.

Dabanlı (2008) tarihi yığma yapıların malzemeleri, elemanları, yapılan testler hakkında bilgiler vermiş, Hırka-i Şerif Camisinin üçboyutlu modelini oluşturarak Sap2000 programını kullanarak statik ve dinamik analizlerini gerçekleştirmiştir. Analiz çalışmalarının sonunda da güçlendirme önerisinde bulunulmuştur.

Bağbancı (2009) tarihi yığma yapıların sonlu elemanları yöntemi ile analiz çalışmasını Bursa Ördekli Hamamı örneğinde incelemiş, örneğin üç boyutlu modeli oluşturularak yapılan analizler sonucunda elde edilen verilere göre statik ve dinamik analizlerini gerçekleştirmiştir.

Kara (2009) tarihi yığma yapıların taşıyıcı sistemleri, kullanılan malzeme tipleri, deprem güvenliğinin irdelenmesi hakkında çalışma yapmıştır. Ayrıca yığma yapılarda oluşan hasar nedenleri, hasarların onarım ve güçlendirme yöntemleri hakkında bilgiler vermiş ve örnek yapılan uygulamalar üzerinden örnekler vererek güncel kullanılabilecek onarım-güçlendirme yöntemleri hakkında çalışma yapmıştır.

Türker (2010) tarihi yığma yapıların yapısal davranışının belirlenmesi için kullanılan yığma yapı elemanları hakkında genel bilgiler vermiş, oluşan hasarların nedenleri üzerine araştırmalarda bulunmuş, malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacı yapılan deneysel

yöntemlerden bilgiler vermiştir. İstanbul Üniversitesi Eczacılık Fakültesi binasının analizleri için Excel tabanlı bir program oluşturulmuş ve deprem analiz çalışmaları yapılmıştır.

Almaç (2011) İstanbul ve yakın çevresinde olan tarihi yapıların malzeme özellikleri hakkında bilgiler vermiştir. Teze konu olan Zeyrek Camii'nin genel bilgileri verilmiş, yapının zemin özellikleri, deprem bölgesi özellikleri ve yapının güncel durumunda olan yapısal hasarları tespit etmiştir. Üç boyutlu modeli oluşturarak yapının statik ve dinamik analizini gerçekleştirmiştir. Güçlendirme önerisi için yasa ve yönetmeliklere uygun olacak şekilde güçlendirme önerileri verilmiştir. Güçlendirme önerilerinin etkisini araştırmak için yapının tekrar statik ve dinamik analizleri gerçekleştirerek yapılan öneriler irdelemiştir.

Hökelekli (2015) tarihi yığma yapıların malzeme özelliklerini belirlemek için uygulanan yöntemler, dinamik izleme ve zemin araştırmasında kullanılan yöntemler hakkında bilgi verilmiştir. Tarihi yapılarda oluşan hasar biçimleri hakkında bilgi verilmiştir. Manisa Hafsa Sultan Cami'nin üç boyutlu modeli oluşturarak doğrusal ve doğrusal olmayan analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Tetik (2015) tarihi yığma yapıların korunması için oluşturulan tüzükler hakkında bilgiler vermiş, yığma yapı elemanları ve kullanılan malzemeler ile oluşabilecek hasar tipleri hakkında çalışmalar yapmıştır. Oluşan hasarlara göre güçlendirme tekniklerini irdelemiştir. Tarihi yığma yapılar için kullanılan analiz yöntemleri hakkında araştırmalar gerçekleştirerek, Şeyh Süleyman Cami örneğinde yapının üç boyutlu modelini oluşturarak statik ve dinamik analiz çalışmaları sonucunda oluşan verilere göre güçlendirme önerisinde bulunmuştur.

3. YIĞMA YAPI ELEMANLARININ MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DAYANIMI

3.1. Tarihi Yapıların Malzeme Tipleri ve Özellikleri

Yapı malzemeleri, kullanıldıkları yapıların yük altındaki davranışlarında belirleyici bir rol oynarlar. Tarihi yığma yapılarda kullanılan harç, tuğla, taş ve ahşap gibi malzemelerin fiziki ve mekanik özelliklerinin anlaşılması, bu yapıların davranışlarını değerlendirmek üzere yapılacak çalışmaların vazgeçilmez bir parçasıdır (Dabanlı, 2008). Yığma yapı elemanları, çamurdan yapılmış kerpiçten doğal taş kadar geniş bir yelpazededir ve metalik özellik taşımayan inorganik malzemelerin çoğunu içinde barındırır. Yığma yapılarda en çok kullanılan malzemeler doğal taş ve tuğlalardır (Ünay, 2002). Tarihte bilinen eski zamanlardan günümüze kadar, doğada ulaşılabilen taş malzemelere çeşitli şekiller verilerek, birleştirilmiş ve yığma yapılar oluşturulmuştur.

Yığma yapıların karmaşık mekanik davranışları, büyük ölçüde yapı malzemelerinin kompozit niteliğine bağlıdır. Yığma yapıların karmaşık yapısından dolayı dayanım ve deformasyon özelliklerinin analitik yöntemlerle belirlenmesi çok zordur. Ayrıca laboratuvar ortamları yapılan deneylerde ise yapının belli bir noktasından alınan numunelerin yapının tüm davranışını tam anlamıyla doğru olarak verdiği sonucu doğru değildir.

Yapı elemanlarının basınç dayanımı yığma yapıların yük taşıma kapasiteleri açısından çok büyük önem taşımaktadır. Yığma yapı elemanları, çekme dayanımları çok düşük olan, beton gibi kırılgan malzeme özelliğine sahiptir (Ünay, 2002). Bu bölümde, yapı elemanlarında kullanılan malzemelerin genel özellikleri incelenmiştir.

3.1.1. Harç

Harç, bağlayıcı özelliği olan malzemelerin, kum vb. malzemeler ile suyun karışımından oluşur, zamanla sertleşir, içinde kullanılan malzemenin mekanik özelliklerine göre dayanım kazanır. Tarihte bağlayıcı malzeme anlamında ilk olarak çamur kullanılması harcın doğmasını sağlamıştır. Çamurun, mevsim koşulları sert olan bölgelerde güçlü bir duvar yapısı için elverişli olmadığı açıktır. Toprakten ve saman vb. bağlayıcı malzemelerin birleştirilmesi ile elde edilen kerpiç ve tuğlanın yapı malzemesi olarak kullanılmaya

başlanılması ile beraber, yapı malzemelerini birleştirmek için yapılarda harcın kullanılması ihtiyacı oluşmuştur. Tarihte dönemsel olarak farklı zamanlarda kireç kaymağı, sönmüş kireç ve portland çimentosu yapı elemanlarını bağlamak için üretilen bağlayıcı özelliği olan malzemeler olarak kullanılmıştır ve kullanılmaya devam etmektedir.

3.1.1.1 Kireç harcı

Kireç kullanılarak sıva ve harçlar elde edilmiş ve bunlar eski dönemlerde, çimentonun bulunmasına kadar geçen sürede, yapıların inşalarında kullanılmıştır. Kirecin bağlayıcı madde olarak, agregaların da dolgu malzemesi olarak kullanılmasıyla kireç harcı ve sıvaları elde edilir. Kireç harçları hazırlanırken kirecin veya harcın özelliklerini geliştirmek amacıyla kirece veya harca organik ve inorganik maddelerin eklendiği de bilinmektedir (Böke ve diğ. 2004).

Kirecin kalitesine etkiyen birçok faktör bulunmaktadır. Kireç taşlarının yumru büyüklüğü, gözenekliliği, kalsiyum karbonat kristallerinin büyüklüğü sönmemiş kirecin reaktifliğine etki eden en temel etkenlerdir. Bu etkenlerin yanı sıra, su/kireç oranları, sönmemiş kirecin saflığı, parçacık büyüklüğü, karıştırma ve söndürmede kullanılan suyun saflığı da kirecin özelliğini etkilemektedir (McClellan ve Eades, 1970).

Söndürülen kirecin hava ile uzun süre temasının önlemesi, yıllar boyunca bekletilmesi ile su tutma kapasitesi ve plastik özelliğinin artması ile birlikte elde edilen harcın kalitesinin artmış olduğu gözlenmiştir.

Agregalar, kireç harcı ve sıvalarının yapımında dolgu malzemesi olarak kullanılırlar, kireç ile reaksiyona girmeyen (etkisiz) ve reaksiyona giren (puzolan) agregalar olarak sınıflandırılırlar. Etkisiz agregalar, taş ocağı, dere yatağı ve denizlerden elde edilen agregalardır. Puzolanik agregalar kireç ile reaksiyona girerek harç ve sıvaların nemli ortamlarda, hatta su altında da sertleşmesini sağlayan amorf silikatlar ve alüminatlardan oluşan agregalardır. Puzolanlar doğal ve yapay olarak iki grupta incelenebilir. Doğal puzolanlar (tüf, tras, opal vb.) genelde volkanik küllerden oluşmaktadır. Tuğla ve kiremit gibi pişirilmiş malzemeler ise yapay puzolan olarak birçok tarihi yapının harç ve sıvalarında kullanılmıştır (Lea, 1940).

Günümüzde yapılan tarihi yığma yapı restorasyon, onarım ve güçlendirme çalışmalarında yapıların karakteristiklerine ve özelliklerine göre sönmüş kireç, puzolan katkılı kireç ve hidrolik kireç bazlı harçlar kullanılmaktadır.

3.1.1.2. Horasan harcı

Horasan; kırılmış, öğütülmüş kiremit ve tuğla benzeri pişmiş kildir. Horasan harcı ise horasan ve kireç kullanılarak üretilen harca denir. Horasan deyimini İran'ın doğusundaki Horasan bölgesinden gelmektedir. Horasan harcının, tuğla yapıların, çömlekçiliğin çok ileri olduğu Ortadoğu ve Anadolu uygarlıklarında kullanılmış olduğu görülür. Bizans, Selçuklu ve Osmanlı yapılarında geniş ölçüde horasan harcına rastlanır. 15. yy Osmanlı yapılarında ve daha sonraki devirlerde Sinan yapılarında horasan harcı kullanılmıştır (Çamlıbel, 1998). Horasan harcı üzerinde yapılan deneylerden basınç dayanımının 6 - 8 MPa seviyesinde olduğu bulunmuştur (Güldal ve diğerleri, 2012).

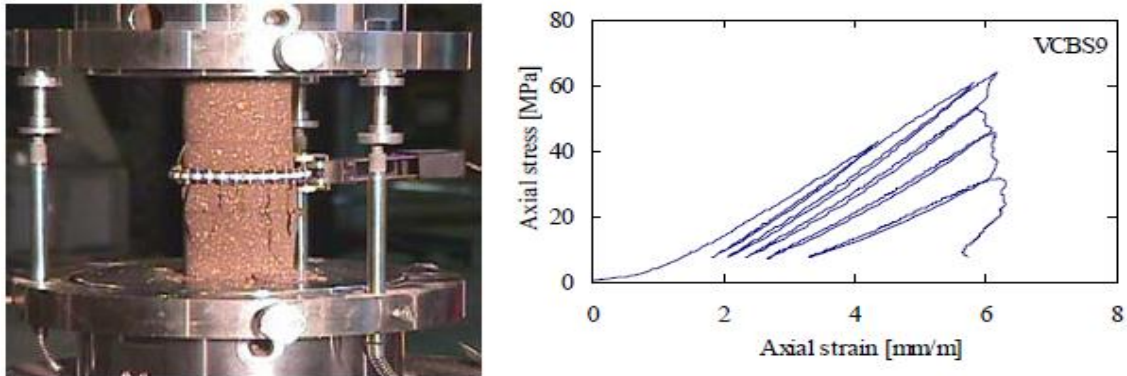
Tarihi yığma yapılarda taş ve tuğla gibi elemanların bağlanması ve bunların sıva ile örtülmesinde horasan harcının kullanıldığı görülmektedir. Horasan harcı içerisinde, laboratuvar testlerinde numunenin alındığı bölgelere göre farklı malzeme ekleri olarak kil, tuğla parçaları, taş tozu ve kırıntıları, mermer tozu, keçi kılı ve yumurta akı bulunduğu görülmüştür. Kireç harcında da olduğu gibi horasan harcının da dayanımını uzun zamanlar içerisinde kazanmasından dolayı tarihi kâgir yapıların inşa edilmesi uzun zamanlar almıştır.

3.1.2. Tuğla

Kilin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesiyle elde edilen bir yapı malzemesi olan tuğla, Roma döneminden çok öncelerinden itibaren kullanılmaktadır. Tuğlayı oluşturan malzemeler genellikle dere yataklarında yüzeysel olarak biriken kum taşlarının kalıntılarından elde edilirdi. Pişmiş kilden yapılan tuğlaların görünümüne ve işlevlerine göre sınıflandırıldığı; fırınlarda yüksek ısılarla pişirilerek, fırın teknolojisinin bulunmadığı yerlerde ise güneş ısısından yararlanılarak üretildiği bilinmektedir. (Yılmaz, 2006, Ünay, 2002)

Tuğla, ahşap ve taşın zor elde edildiği bölgelerde yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. İnsan tarafından üretilen ve istenilen şekli alabilen yapı malzemeleridir.

Kerpiç ise pişirilmemiş tuğla eleman olarak tanımlanabilir. Tuğlanın pişirilme sıcaklığı önemlidir. Tuğlanın ne kadar iyi pişirildiği, mukavemeti ve çevre şartlarına karşı direncini de arttırmaktadır. Tuğlanın elastisite modülü düşüktür. Tekrarlı yükleme ve boşaltma etkisindeki şekil değiştirmelerin elastik olduğu görülmektedir (Şekil 3.1). En büyük gerilme değerinden sonra elastisite modülünde azalmalar görülürken çatlakların ilerlemesiyle mukavemet düşmeye başlar (Dabanlı, 2008).



Şekil 3.1. Silindirik tuğlanın çevrimli basınç deneyi ve tipik gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Lourenço, 2000).

Tuğlanın dayanımı, tuğlayı oluşturan malzemenin kalitesi, kullanılan harç ve tuğlanın örülme desenine bağlıdır. Tuğlanın basınç dayanımı malzemelerin özelliklerine göre 10 MPa'dan 30 MPa'a kadar değişir (Çizelge 3.1). Fırınlanmış tuğlaların kalitesi iyi olmasıyla beraber üç katına kadar çıkabilir. Genel olarak tuğlanın çekme dayanımı basınç dayanımının %10'u, kayma dayanımı ise basınç dayanımının %30'u kadardır. Tuğlanın yalnız basınca dayanıklı bir malzeme olması ile yapı taşıyıcı sistemi basınç alacak şekilde biçimlendirilmiştir (Ünay, 2002).

Çizelge 3.1 Tuğlaların ortalama fiziksel özellikleri (Ünay, 2002).

Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)
10-30	2,7-5,0	10-20

3.1.3. Taş (Doğal taş)

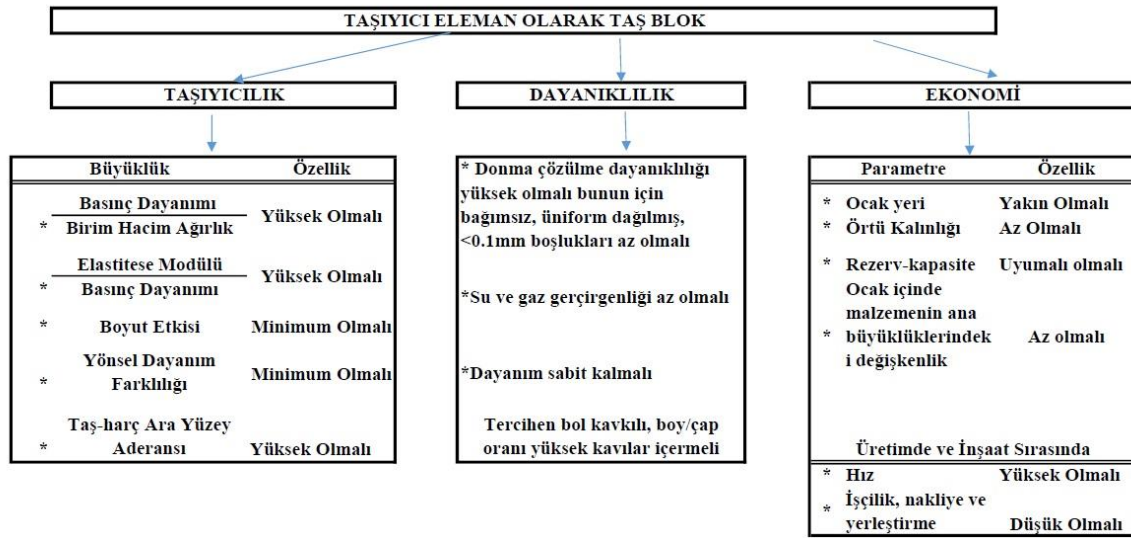
Taş, tarihi yapılarda kullanılan en eski yapı malzemelerinden biridir. Bunun en önemli sebebi eski eser yapılmış bölgelerin jeolojik özelliklerine göre hemen hemen her yerde rahatça bulunabilmesinden gelmektedir.

Doğal taş, basınç dayanımı ve taşıma gücü yüksek, çekme dayanımı ise zayıf olan bir malzemedir. Bu özelliğinden dolayı, yalnız basınç kuvveti alan kemerler, tonozlar ve kubbelerde kullanılması uygundur. Basınç yüklerini alan duvarlar ve ayaklar da taş malzemeden yapılabilir. Basınç altında bazı taşların deformasyonu, betonla benzer özellikler gösterir. Betonun elastisite modülü $E = (14\sim30) \times 10^3$ MPa civarında iken, granitin elastisite modülü $E = (15\sim70) \times 10^3$ MPa mertebesinde. Elastisite modülünün bilinmesi, taşıyıcı elemanın yüklenmesi sonucu yapacağı şekil değiştirmenin hesabı için gereklidir (Çamlıbel, 2000a). Bununla beraber yapıda çekme gerilmeleri oluşmasa bile, olumsuz çevre şartları ve depremler etkisiyle oluşan çekme gerilmeleri, çatlaklara ve kırılmalara yol açabilmektedir. Tarihi yapılarda kullanılan taş elemanların dayanım değerleri çok geniş bir aralıktadır ve Çizelge 3.1’de verilmiştir (Ünay, 2002).

Çizelge 3.2. Doğal yapı taşlarının ortalama fiziksel özellikleri (Ünay, 2002)

Taşın Cinsi	Basınç Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Granit	30-70	14-33	4-7	30000-55000
Mermer	25-65	9-45	1-15	25000-70000
Kireç Taşı	18-35	6-20	2-6	10000-55000
Kumtaşı	5-30	2-10	2-4	13000-50000
Kuvars	10-30	3-10	2-4	15000-55000
Serpantin	7-30	2-10	6-11	23000-45000

Uzun süreli mukavemet ve dayanıklılığın (durabilite) arandığı tarihi yığma yapılarda kullanılacak taşların taşınması gereken bazı özellikler aşağıdaki şekilde toplu halde sunulmuştur (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Taşlarda aranan özellikler (Dabanlı, 2008)

Bu şekilden aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Taşların basınç dayanımının birim hacim ağırlığına oranı mümkün mertebe yüksek olmalıdır. Kullanılan taş malzemesi, yükler altında şekil değıştirme kapasitesini ifade eden sünek davranış da göstermelidir. Sünekliği karakterize etmek açısından taşın temel büyüklüklerinden olan Elastite Modülü “E” ve basınç mukavemeti “fb” oranı (E/fb) mümkün olduğu kadar yüksek olmalıdır. Gevrek taşlarda bu oran yaklaşık 100-200 aralığında değışmektedir.

- Taşın içyapısı, donma-çözölme, sıcaklık farklılıkları, ıslanma-kuruma gibi dış etkilere minimum düzeyde etkilenmelidir.

- Taşın dayanıklılığını (fiziksel, kimyasal ve mekanik büyüklüklerin zaman içindeki değışimini) kontrol eden en önemli özelliklerden biri de taşın “boşluklu” fakat “geçirimsiz” bir içyapıya sahip olmasıdır. Üniform dağılmış, birbirinden bağımsız ve 0.1 µm’den daha büyük çaplı boşluklara sahip bir taşta, dış etkilere dolaylı içyapıda oluşacak üniform gerilme yayılımı, belirli kesitlerdeki gerilme yoğunluklarını ve bu nedenle oluşacak mikro çatlakları minimize ederek yapının dayanıklılığı üzerinde olumlu etki yapar.

- Mukavemet ve dayanıklılık üzerinde etkin bir diğer parametre de taşın mikro yapısı içinde bütünleşmiş, lif gibi çalışan boy/çap oranı ve elastisite modülü yüksek kavkaların varlığıdır. Söz konusu kavkılar yapıya "süneklik" ve dış etkilere "dayanıklılık" sağlamaktadır.

- Tarihi yapılarda kullanılan yapı taşlarında aranan önemli özelliklerden biri de ekonomiktir. Ocak işletmeciliği açısından bakıldığında örtü tabakası kalınlığı az ve rezerv kapasite büyüklükleri uyumlu olmalıdır. Ocaktan çıkarma işlemi, inşaat alanına nakliyenin kolaylığı, işçilik ücretleri, hız gibi faktörler üzerinde en etkin faktör ise taşın birim ağırlığıdır. Hafif, ancak sağlam ve dayanıklılığı yüksek taşlar tarih boyunca anıtsal yapıların inşaatında her zaman tercih edilmiştir (Dabanlı, 2008).

3.1.4 Ahşap

İşlenebilme, kolay elde edilebilme ve rahatça taşınabilme gibi özelliklerinden dolayı, ahşap, tarihi yapılarda en çok kullanılan malzemedir. Taşa oranla ömrü daha kısa olmasına rağmen, hem basınç dayanıma hem de çekme ve eğilme dayanımına karşı taşa göre daha üstün olmasından dolayı, tarihi yapılarda büyük açıkların geçilmesinde kullanılmıştır. Çekmeye karşı dayanıklı olmasından dolayı duvar hatıllarında, eğilmeye karşı dayanıklı olmasından dolayı çıkmalarda kullanılmıştır. Tarihi yapılarda en fazla döşeme ve tavan sistemlerinde kullanılmıştır (Yılmaz, 2006).

Ahşabın emniyet gerilmeleri ve elastisite modülü; yüklemenin karakteri ve süresi, ahşabın kusurları, içindeki su miktarı diğer bilgiler hakkında kesin bilgiler bulunmadığından ahşabın emniyet gerilmeleri 5 ila 10 arasında emniyet katsayıları alınarak ifade edilmiştir. Kalite sınıfı ne olursa olsun, muhtelif cins ahşaba ait elastisite modülü değerleri Çizelge 3.3.' te emniyet gerilmeleri ise Çizelge 3.4.' te gösterilmiştir (Deren, 1980).

Çizelge 3.3. Ahşap malzemenin fiziksel özellikleri (Deren, 1980)

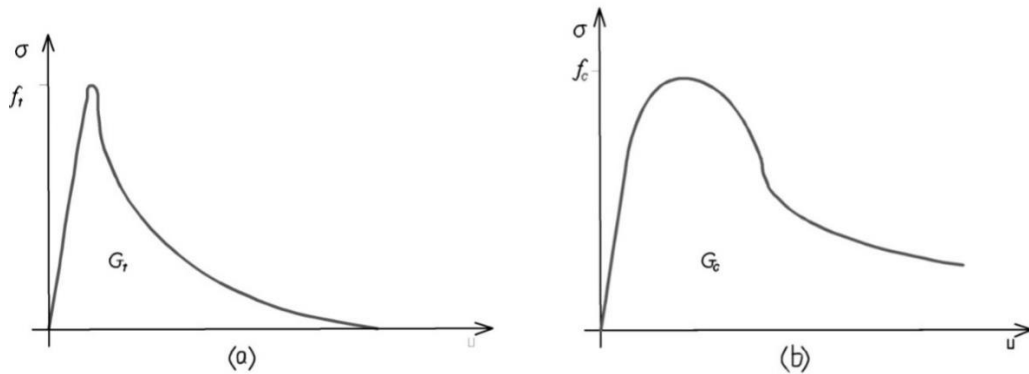
Ahşap Çeşidi	E (N/mm ²) (paralel)	E (N/mm ²) (dik)
Çam sınıfı	10.000	300
Meşe ve Kayın	12.500	600

Çizelge 3.4. Ahşap yapı elemanları için emniyet gerilmeleri (Esas yükler için)

TS 647' e göre ahşap yapı elemanları için emniyet gerilmeleri (Esas Yükler için)					
Gerilme türü	Notasyon	Emniyet gerilmeleri (N/mm ²)			
		İğne yapraklılar			Meşe Kayın
		I.sınıf	II.sınıf	III.sınıf	
Eğilme	$\sigma_{e,em}$	13	10	7	11
Liflere paralel çekme	$\sigma_{ç,em}$	10,5	8,5	0	11
Liflere paralel basınç	$\sigma_{b,em}$	11	8,5	6	10
Liflere dik basınç	$\sigma_{b,em}$	2	2	2	3
Makaslama	τ_{em}	0,9	0,9	0,9	1

3.2. Yığma Yapı Elemanlarının Mekanik Özellikleri

Tarihi yığma yapılar, basınç dayanımı yüksek olmasına karşın çekme dayanımları düşük yapılardır. Bundan dolayı yığma yapıların yapısal formları basınç dayanımı alacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3.3).

**Şekil 3.3.** a) Çekme dayanımı b) Basınç dayanımı

Tek eksenli yükleme ve kırılma tanımı altında kırılğan malzemelerin tipik davranışını gösterir. Yığma yapı elemanında gerilme ve rijitlik, deformasyon oranına göre değişir. Gerilme - Birim deformasyon eğrilerinde malzemenin özellikleri ve davranışı incelenebilir.

3.2.1. Basınç dayanımı

Tarihi yapı elemanları bileşik bir malzeme olarak kabul edilir ve her bileşeni doğrusal elastik kırılğan bir malzeme olarak kabul edilir. Geometrik özellikleri, tipi, biçimi, dayanımı,

birim elemanın su emme kapasitesi, harcın miktarı, karışımı, kalınlığı ve deformasyon özelliği basınç dayanımını etkileyen özelliklerdir (Ünay, 2002).

Yığma yapı elemanlarının basınç dayanımı, olası boşluklar göz önüne alınmaksızın, elemana etki eden en büyük basınç kuvvetinin net kesit alanına bölünmesi ile tanımlanır. Basınç dayanımı, harç ve bloklar ile birlikte hazırlanmış bir yığma yapı elemanının laboratuvarında test edilmesi sonucunda belirlenir. Tuğla gibi düzenli bloklar ile örülmüş elemanların basınç dayanımı, blok basınç dayanımına çok yakın bir değerdedir. Genellikle taşın kullanıldığı daha masif düzensiz elemanlarda ise yığma yapı elemanının basınç dayanımı, birim elemanları bağlayan harcın cinsine ve kalınlığına bağlıdır ve blok basınç dayanımının elemanın genel dayanımındaki etkisi azdır. Genellikle duvar basınç dayanımı, düşük basınç dayanımlı bloklarda blok basınç dayanımının % 50'si, yüksek dayanımlı bloklarda % 25 'i kadardır. Yığma yapı elemanlarının basınç dayanımı, elemana etki eden en büyük basınç kuvvetinin net kesit alana bölünmesi ile tanımlanır (Bayülke, 1992). Yapılan deneylerde, harç ve kullanılan birim elemanların sıkışma yüklemesi altında farklı elastik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Katı ve masif olan düzensiz elemanlarda basınç dayanımı, harcın cinsinden ve kalınlığından fazlaca etkilenir

Tarihi yapılarda kullanılan yığma yapı elemanları kendilerine özgü malzeme özellikleri gösterirler. Yapı mühendisliğinde çeşitli şartnameler yığma birimin basınç dayanımını belirlemek için çeşitli formüller göstermektedir. “Eurocode 6” da karakteristik basınç dayanımı aşağıdaki formülle tanımlanmaktadır (Ünay, 2002 ve Kuruşçu, 2012):

$$f_k = K f_b^\alpha f_m^\beta \quad (3.1)$$

f_k : yığma yapı elemanın karakteristik basınç dayanımı (MPa)

f_m : harcın ortalama basınç dayanımı (MPa)

f_b' : birim eleman (taş veya tuğla) basınç dayanımı (MPa)

K, α , β sabit değerlerinden yararlanarak gerekli basınç dayanım değerleri bulunabilir.

Tuğla veya taşın normalize edilmiş basınç dayanımı (f'_b) aşağıdaki denklemle hesaplanabilir;

$$f'_b = f_b \delta_m \delta_s \quad (3.2)$$

f_b :Birim elemanın basınç dayanımını (MPa)

δ_m :Birim elemanın nem oranını gösteren faktörü

δ_s :Birim elemanın biçim ve boyuta bağlı olan şekil faktörünü göstermektedir.

Yukarıdaki denklemlerde, K, α ve β sabit değerleri için çeşitli deneyler sonucunda elde edilen değerler kullanılmaktadır. Yukarıdaki denklemlerden de anlaşılabileceği gibi, yığma yapı elemanlarının karakteristik basınç dayanımını etkileyen önemli faktörler elemanın nem oranı, birim elemanın biçimi ve boyutudur (Ünay, 2002 ve Kuruşçu, 2012).

3.2.2. Kayma dayanımı

Yığma yapı elemanlarında kayma gerilmesi, harç ve yığma birimin birleşim şekline bağlıdır. Blok ve harç arasındaki mekanizma tam anlamıyla anlaşılmamış olsa da, yığma birim ile harcın fiziksel ve kimyasal özelliklerinden etkilenmektedir. Yığma yapı elemanları basınç ve çekme kırılması yanında kayma kırılmalarının da tehlikesi altındadır. Deneysel ortamda yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki formül elde edilmiştir (Ünay, 2002):

$$\tau = \tau_0 + \mu f_n \quad (3.3)$$

τ : kayma dayanımı (MPa)

τ_0 : kohezyon değeri

μ : iç sürtünme katsayısı

f_n : basınç dayanımı (MPa) göstermektedir.

Yapılan deneyler sonucunda τ_o ve μ değerleri sırasıyla 0,2-0,5 ve 0,2-1,0 olarak belirlenmiştir.

3.2.3 Çekme dayanımı

Yığma yapı elemanları oldukça gevrek malzemelerdir. Tarihi yığma yapılarda kubbe, kemer, tonuz ve pendentif gibi yapı elemanları ani çekme kırılmaları açısından büyük risk taşırlar. Deprem etkileri, rüzgâr etkileri, nem ve ısı değişim etkilerinden dolayı uzama ve kısalmadan kaynaklanan çekme gerilmeleri meydana gelebilir.

Tarihi yığma yapılarda, doğrudan aksel çekme gerilmeleri etkisinde kalan elemanlara ender rastlandığı için yapı elemanlarında eğilmeden dolayı oluşan çekme gerilmeleri, aksel çekme gerilmelerine göre daha fazla önem taşır. Araştırmalar, yığma yapı elemanlarında eğilmeden dolayı oluşan çekme gerilmesi dayanımının malzemenin nem oranı, harcın yoğunluğu ve blokların yüzey dokusu ile doğrudan ilgili olduğunu ortaya çıkarmıştır. Harç kalınlığı da daha fazla dayanım sağladığı için ince birleşim noktaları malzemenin çekme dayanımını artırmaktadır (Ünay, 2002).

3.2.4 Elastisite modülü

Yığmanın elastisite modülü, gerilme-birim şekil değiştirme arasında doğrusal olmayan bir ilişki ile tanımlanır. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi betondaki gibi paraboliktir. Yapılan araştırmalar sonucunda elastisite modülü (E_m) aşağıdaki formülle ifade edilir (Ünay, 2002):

$$E_m = 1000f_k \quad (3.4)$$

E_m : Yığma yapı elemanı elastisite modülü

f_k : Yığma yapı elemanı karakteristik basınç gerilmesi (MPa)

Gerilme-birim deformasyon eğrisinde görüldüğü gibi, elemanın üzerindeki yük arttıkça, harcın sıkışmasıyla dayanım artacağından, elastisite modülünün arttığı

görülmektedir (Ünay, 2002). Yığma yapının elastisite modülünü etkileyen faktörler yığmayı oluşturan taş, tuğla ve harcın elastisite modülleridir.

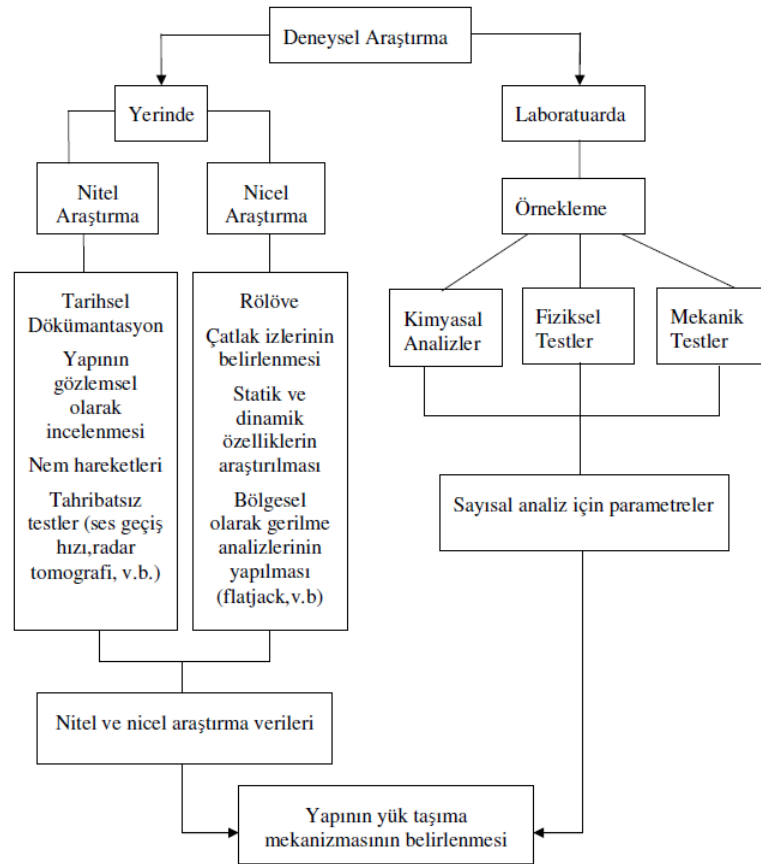
3.3. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi için Kullanılan Deneysel Yöntemler

Tarihi yapılar esas olarak düşey kuvvetlerin etkisine göre tasarım ve inşa edilmişlerdir. Birçoğunda da yatay ve düşey elemanlar arasındaki çekme ve kayma mukavemetinin düşük olduğu düşünülürse yapıların yatay yükler altındaki deformasyon kapasiteleri oldukça yetersizdir. Bu yapıların statik ve dinamik analizlerinin yapılabilmesi, doğru sismik onarım dizaynları için taşıyıcı duvarların deformasyon karakteristikleri ve taşıyıcılıklarının bilinmesi gerekmektedir. Bu da deneysel ve analitik yöntemler ile yapılabilir. Deneysel yöntemler olarak sertlik, radyografik, akustik, yüzey sertliği ve permeabilite gibi tahribatsız deneyler ile hidrolik cihaz vasıtasıyla malzemenin kuvvet-deplasman ilişkisinin belirlenmesini sağlayan deneyler sayılabilir. Bu deneylerin amaçları, kullanılan tuğla, taş, harç ve beton gibi malzemelerin dayanımlarını belirlemek, malzeme özelliklerinde korozyon, çevresel faktörler, savaş ve yangın gibi nedenlerle meydana gelen etkileri belirlemek ve yapısal elemanlardaki boşluk ve çatlak genişliği ile elemanın yüzey katmanlarındaki hasarların belirlenmesidir (Koçak, 1999).

Tarihi yapıların korunması gereken kültürel varlıklar olmasından dolayı yapılacak olan deneylerin yapıya zarar vermesi istenmez. Yapılan ve uygulanan tahribatsız deneyler, genel olarak yeterli sonuç vermezler. Malzeme özelliklerin tam anlamıyla belirlenebilmesinde en belirgin deneyler laboratuvar ortamında yapılanlardır. Yapılacak deneyler için uygun yerlerden numuneler alınması gerekir. Bunun için tahribatsız numune alma yöntemleri tercih edilebilir. Tarihi yapılarda tam anlamıyla kesin bir yapısal analiz yapılamadığından, malzeme özelliklerinin de yaklaşık olarak tespit edilmesi yeterli olmaktadır.

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. Sekil 3.4'te bir yapının strüktürel analizlerinin yapılması öncesinde laboratuvarda ve yapı yerinde yapılması gereken deneysel çalışmalar gösterilmiştir (Bağbancı, 2009).

Yapının değerlendirilmesi için ayrılacak olan bütçe ve öngörülen zaman, hangi deneysel yöntemin kullanılacağını belirlemede belirleyicidir. Önemli olan değerlendirilecek yapıya uygun olan deneysel yöntem ve araştırma seviyesinin seçilmesidir (Dabanlı. 2008). Tarihi yapılarda uygulanacak test yöntemleri, pahalı deneysel yöntemler olduklarından, seçilecek yöntemin en doğru sonucu vermesi istenmektedir.



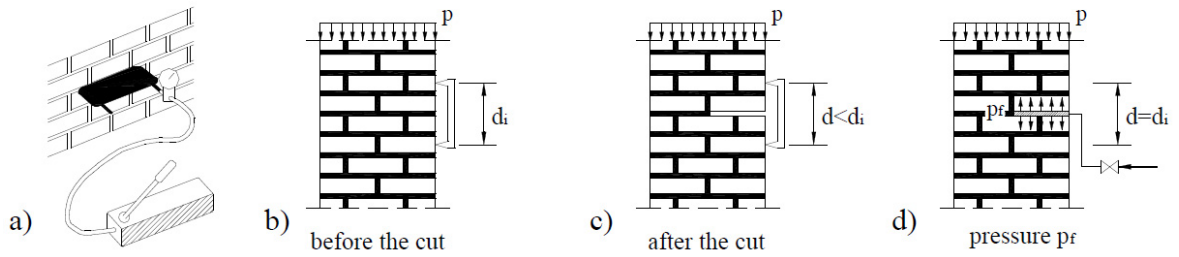
Şekil 3.4. Yapının strüktürel analizleri için yapılan deneysel araştırmalar (Bağbancı, 2009)

3.3.1. Yerinde yapılan tahribatlı deneyler

Tahribatlı yapılan deneyler daha çok laboratuvar ortamında gelişmesine rağmen, yerinde uygulanan yöntemlerde vardır. Bunların en çok uygulananları “yerinde basınç deneyi (flat-jack deneyi)” ve yerinde kayma deneyleridir.

Yerinde basınç deneyinde yığma yapı elemanı üzerinde iki nokta belirlenip aralarındaki mesafe ölçüldükten sonra elemanın içine doğru dik doğrultuda bir kesim yapılır.

Kesim yapıldıktan sonra noktalar arasındaki mesafe azalacaktır. Flat-jack ekipmanı açılan boşluğa yerleştirilir ve hidrolik ekipman vasıtasıyla jack içine basınç verilir. Basıncın artmasıyla birlikte, azalan mesafe büyümeye yani baştaki değerine yaklaşmaya başlar. İlk okunan orijinal mesafede ölçülecek olan gerilme değeri, elemanın o noktasındaki gerilme seviyesini gösterir (Şekil 3.5). Bu test, mevcut gerilme dağılımı, mevcut mukavemet ve elastisite modülünün belirlenmesi için kullanılabilir (Teomete, 2004).



Şekil 3.5. Flat Jack ekipmanı ile yerinde basınç deneyi ($d=d_i$ iken $p=p_f$) (Lourenço ve Gregorczyk, 2000).

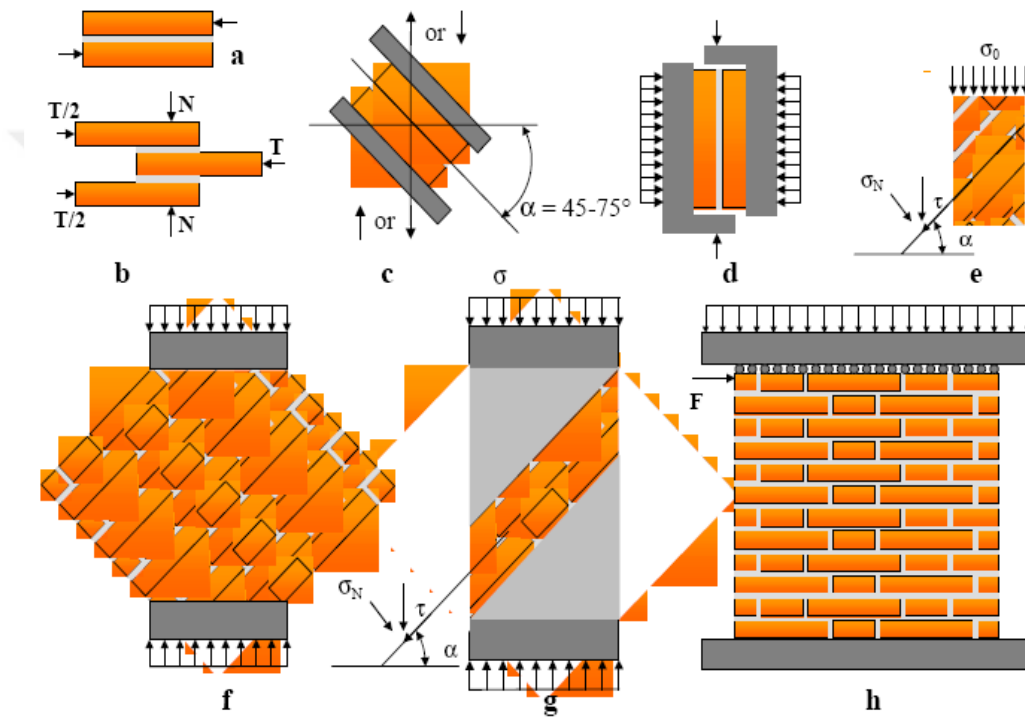
3.3.2. Laboratuvar deneyleri

Laboratuvar ortamında yapılan deneyler üç kısımda incelenir. İlk kısım, tarihi yapılardan alınan numunelerine çeşitli fiziksel testler uygulanması, ikinci kısımda mekanik testler, üçüncü kısım deneylerde ise yapının bir bölümünün ya da bir elemanın aynı ölçekle ya da küçülmüş ölçekle modellenmesi sonucunda üzerine yapılan çalışmalardır.

Fiziksel deneylerde kılcal su emme ve ağırlıkça su emme deneyleri yapılarak, boşluklu birim hacim ağırlığı, ağırlık ve hacimce su emme oranları hesaplanabilir. Bu deneylerin, onarımı ve güçlendirmesi yapılacak bölgelerde kullanabilecek malzemelerin, yapı elemanlarıyla uyumunun belirlenmesi açısından önemi büyüktür.

Çekme, basınç ve kayma deneyleri laboratuvar ortamında yapılan mekanik deneylerdir. Tuğla üzerinde yapılacak deneylerde, tek eksenli basınç deneyi uygulanarak, kırılma yükü, kırılma yükünün kuvvet uygulanan yüzeye oranlanması ile basınç mukavemeti hesaplanır.

Kayma deneyleri sonucunda tuğla ve taşları bağlayan harçlarla ilgili veriler hesaplanır. Yığma yapılarda, kayma mukavemetinin normal gerilme seviyelerine göre değişiklik gösterdiği düşünüldüğünde, tek bir tane kayma dayanımından söz edilemez. Temele yakın kısımlarda, kapı ve pencere boşluklarının bulunduğu zayıflatılmış duvarlarda kayma gerilmeleri fazlasıyla oluşmaktadır. Fakat düşey kuvvetlerin oluşturacağı kayma gerilmeleriyle karşılaştırılıp gerçek ve yaklaşık net değerlerin bulunması sağlanmalıdır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Kayma gerilmelerinin belirlenmesi için deneyler (Dabanlı, 2008).

Tarihi yapılarda ne kadar çekme dayanımları dikkate alınmasa da, yapı elemanları az da olsa çekme dayanımlarına sahiptirler. Çekme kapasitesinin belirlenmesi için geliştirilen deneylerde, çekme gerilmelerinden dolayı ortaya çıkan harçlarla yapı elemanları arasında aderansın kaybolması ve yığma elemanların kopup kırılması şeklinde ortaya çıkabilir.

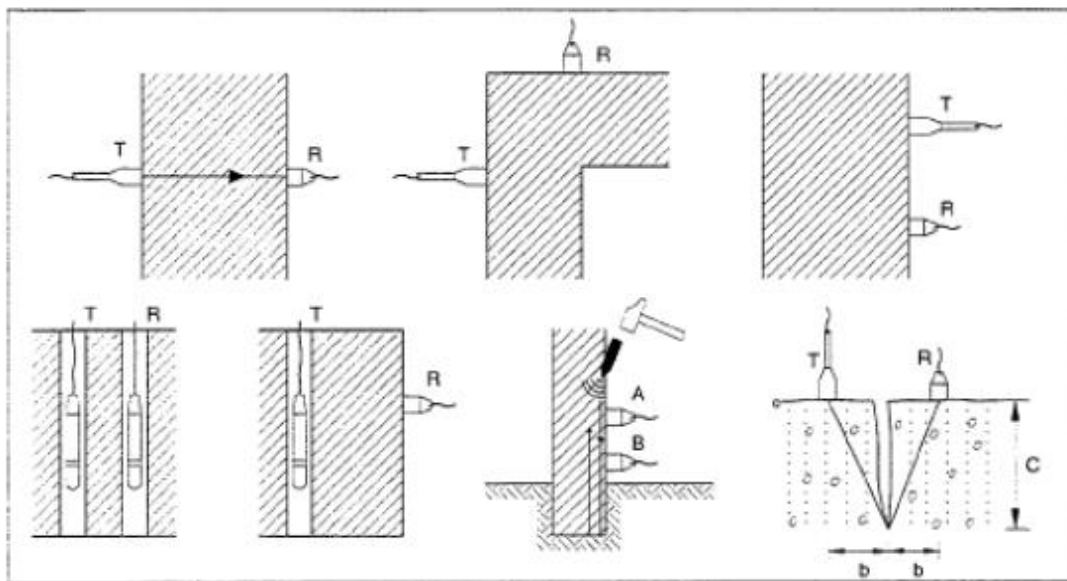
Mevcut yapıyı belli veya tam ölçekli olarak, benzer malzeme özellikleri gösterecek şekilde ölçekli modellemeler sonucunda, laboratuvar ortamında dinamik ve statik analizler yapılmaktadır. Sarsma tablası deneyleri bu örneklerden biridir.

3.3.3. Tahribatsız deneyler

Tarihi yapılarda, malzeme testi yapabilmek adına her zaman numune almak mümkün olmamaktadır. Bu konuda zorluklardan dolayı, yapıya zarar vermeden yapılabilecek tahribatsız testler geliştirilmiştir. Sertlik deneyi, serbest titreşim deneyi, ultra ses ve hız testleri ile rüzgâr hızı ve yönü, ısı ve nem farklılıkları, yapı titreşim hareketleri izlenmesi gibi uygulanan testler yardımıyla tam anlamıyla doğru bilgiler edinilemese de yaklaşık değerler elde edilebilir.

3.3.3.1. Ultra ses test yöntemi

Tahribatsız deneylerden alan içerisinde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Bu deneyde yüksek frekanslı ses dalgası üreten aletlerden yararlanılarak ses geçiş hızlarına göre çatlak derinliği ve yönünün araştırılması yapılabilir. Yapı elemanları yüzeyinde gözlenen çatlak bölgelerinin uygun noktalarına prob adı verilen ve sinyallerin arasından geçerek veri alınması sağlayan elemanlar kullanılır. Probların yerleri ve arasındaki mesafeler değiştirilerek ses geçiş süreleri ölçülerek literatürde kullanılan çeşitli ampirik (deneye dayalı) formüller yardımı ile yapının modellenmesi sırasında kullanılacak gerekli hesaplamalar yapılabilir. Şekil 3.7’de ultra ses test yönteminde kullanılarak yapılan ölçümler gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Sonik Ölçümlere örnekler (Bağbancı, 2009).

4. TARİHİ YAPIYI OLUŞTURAN YAPI ELEMANLARI

Bir yapının yapısal formu, yapının geometrik şekli olarak tanımlanabilir. Ancak, aynı gözüken dış görünümlere karşın, aynı türden yükler altında yapının davranışı farklı olabilir. Kullanılan malzemelerin farklı olması, eleman kesitlerinin değişik şekilde detaylandırılması, inşaat tekniklerinin yöresel olarak farklar taşıması, yapısal formun farklı davranış göstermesinin önemli nedenlerindendir.

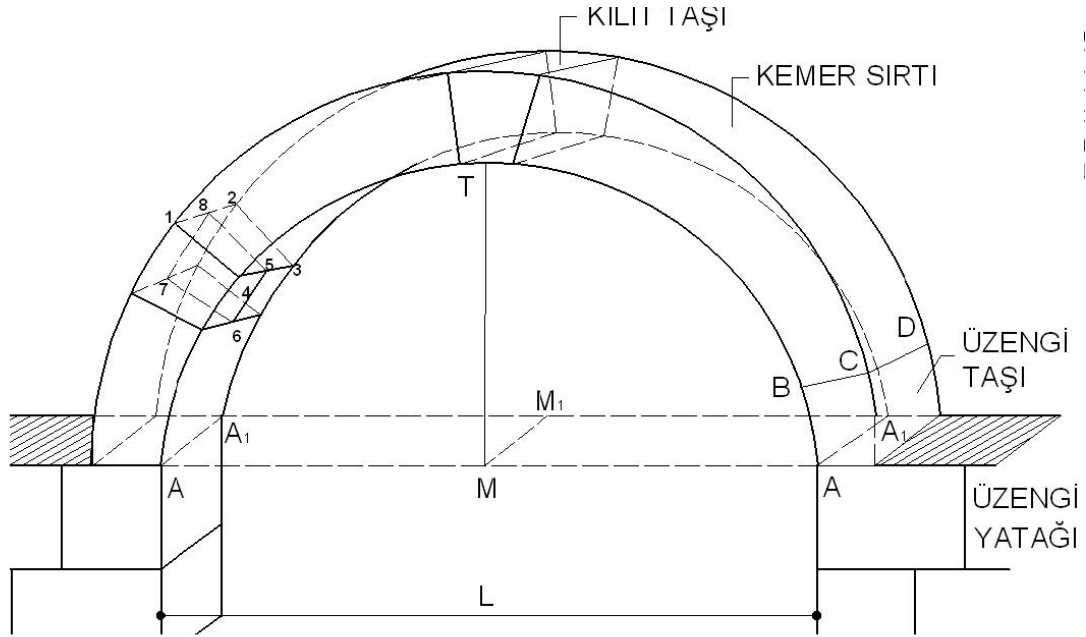
Tarihi yapılara etki eden asıl yük, yapı elemanlarının zati ağırlığıdır. Aynı yapı içinde bile yapısal rol üstlenen veya üstlenmeyen elemanların boyut ve ağırlıkları büyük farklılıklar gösterebilir. Kesit boyutlarının büyük olması yapı elemanının ağır olması sonucunu doğurur. Bunun sonucu olarak da alışılmış yük-dayanım- rijitlik oranlarının dışına çıkılır. Bu nedenle tarihi yapıların taşıyıcı sistemlerini sadece strüktürel davranışlarına göre sınıflandırmak oldukça zordur. Kullanılan malzeme tipi, eleman kesitlerinin dayanım-rijitlik özellikleri ve yapım tekniği gibi birçok kritere göre sınıflandırma yapılabilir. Yapısal davranışı en iyi tanımlayan sınıflandırma, kemer, tonoz, kubbe gibi temel yapısal elemanlara göre sınıflandırmadır (Ünay, 2002).

Kemer bir düzlem eleman olarak kabul edildiğinde, tek yönlü dizilen kemerler tonozları meydana getirirken, bir kemerin düşey eksen etrafında döndürülmesiyle de kubbeler oluşur. Kemer davranışı, kubbe ve tonozların davranışının da temelini teşkil eder (Dabanlı, 2008).

4.1. Kemer

Kemerler, iki sütun veya ayak arasındaki açıklığı geçmek için yapılan eğri eksenli kirişlerdir. Kemerler, taş ya da tuğla kullanılarak inşa edilir. Taş kemerler, moloz, kaba yonu, ince yonu veya kesme taştan yapılır (Ulkay, 1978).

Bir kemer elemanda, kemer örgü taşları olarak üzengi, kilit taşı ve kemer taşları bulunur. Üzengi taşı, kemerin başlama taşıdır. Kilit taşı, kemerin düşey ekseninde bulunan ve kendisi ile üzengi arasındaki taşları kilitleyen taştır. Kemer taşları ise, kilit taşı ile üzengi taşları arasında kemeri oluşturan taşlardır (Şekil 4.1) (Bayülke, 1992).



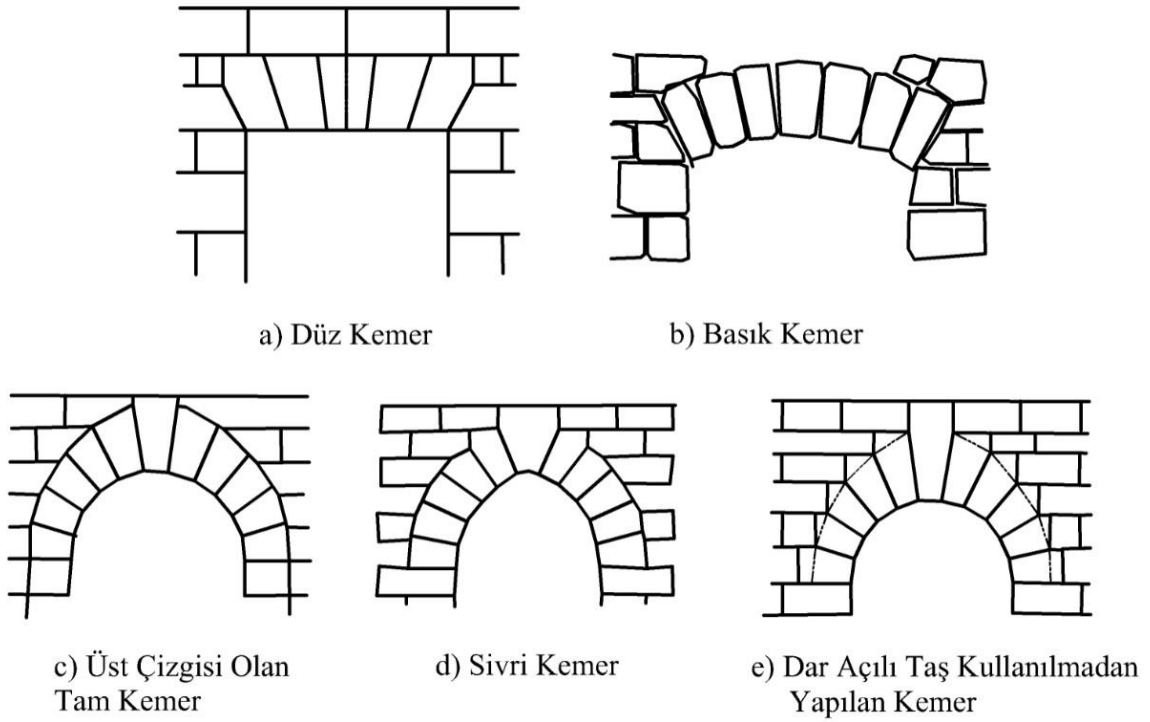
Şekil 4.1. Kemerin oluşturan elemanlar (Bayülke, 1992)

Yapıdaki düşey yükler, taşıyıcı sistem malzemesinin (kerpiç, tuğla veya taş) ve ince malzemelerin ağırlıkları toplamıdır. Kemerler, yerçekiminin etkisiyle düşey yük etkisi altındadır ve üzerlerine gelen yükleri basınca çalışan elemanlarıyla taşımaktadır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. İznik Yeşil Camii kemer örnekleri

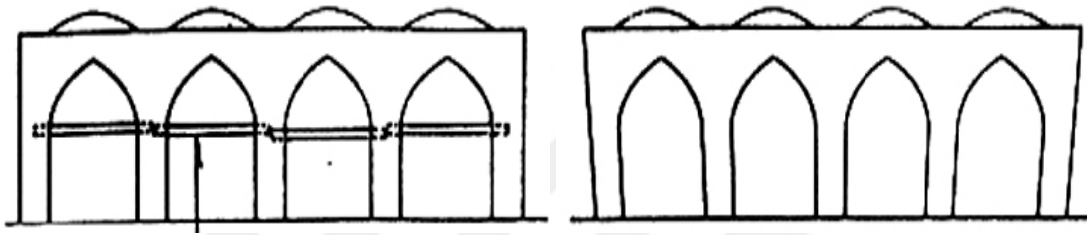
Kemerler, yatay ve düşey yükleri belirli noktalara yönlendiren ve taşıyan elemanlar olduğu için, kesit özellikleri üzerine etki eden yüklerden dolayı oluşan iç kuvvetler ve yük taşıma prensiplerinden dolayı, çerçeve sistemlerin yapısal elemanlarına benzerlik gösterirler (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Kemer yapım şekilleri

Kuvvetler kemerlerin içinde, eğrisel geometrilerinden dolayı herhangi bir köşe ya da birleşim noktasında yoğunlaşmadan düzgün bir şekilde mesnetlere aktarılır. Yatay yer değiştirmesi önlenmiş ve geometrik formu nedeniyle sahip olduğu eğrilik özelliğinden dolayı bir kemerde; eşit yayılı yükler altında hemen hemen hiç eğilme ve eğilme momenti meydana gelmez. Geometrik formunun parabolik olmasından dolayı kemerin her bölgesine etkiyen eşit yayılı yükler altında teorik olarak sadece aksel kuvvetleri taşır. Yapının pratik durumunda ise çok değişik yüklerin etkisi altında kalması ve diğer yapı elemanları ile etkileşimi nedeniyle bu durum pek mümkün olmamaktadır. Kemerler, kubbe ve tonoz gibi elemanların yatay itkilerini karşıladığı için düşey ve yatay yükleri aynı anda taşırlar. Düşey yükler altında kemerin her bölgesinde basınç gerilmeleri oluşmaktadır. Yatay yükler altında ise, yükün uygulanma yönüne göre, dış ve iç katmalarında çekme gerilmeleri oluşmaktadır.

Çekme kuvvetlerine karşı çok zayıf olan taş, tuğla ve harç elemanlarda, kemerin herhangi bölgesinde oluşabilecek çekme gerilmelerinden dolayı çatlama durumu gözlenebilir. Meydana gelen tek bir çatlak ya da birkaç çatlak kemerin stabilitesinin bozulmasına neden olmayabilir. Kemer stabilitesinin bozulmasının en temel nedeni, mesnetlerin açıklık yönünde açılmasıdır. Birçok tarihi yapıda, taş ve tuğla kemerlerinde gergi yöntemleri kullanılarak bu bozulmalar önlenmeye çalışılmıştır. Gergiler ile bağlama işleminin yararı, ayakların kemer itkisinden etkilenmesini önlemektir (Şekil 4.4) (Teomete, 2004).



Şekil 4.4. Kemerlerde gerginin etkisi (Teomete, 2004)

4.2. Kubbe

Kubbe, bir kemerin yayının, tepe noktasından inen dik eksenin çevresinde dönmesi ile meydana gelir. Kabuklar genel olarak kalınlığı diğer boyutlarına göre küçük olan yüzeysel elemanlardır. Üzerine etki eden yükleri birçok yönde tek veya çift eğrilikli bir düzlem içinde taşıyan yapısal sistemlere kabuk denir. Kubbe, kuvvetleri pozitif çift eğrilikli yüzeylerde taşıyan kabuklardır.

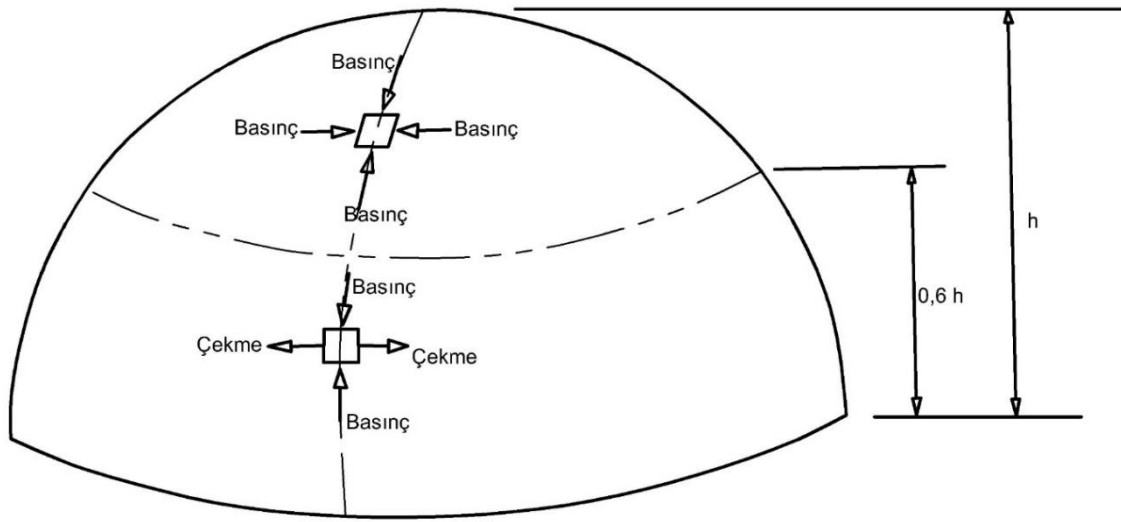
Kubbe, mesnetlerinde sürekli bir taşıyıcı yüzeye ihtiyaç duyar. Bu nedenle de dairesel bir sisteme oturması gerekir. Bu da geçiş elemanlarının kullanılmasıyla sağlanır. Bu nedenle kubbe, örtü sistemleri içinde ayrıcalıklı bir konuma kavuşmuştur. Dairesel planlı yapılarda, kubbeden gelen yüklerin doğrudan duvarlara iletilmesi olanağı olmasına rağmen, geçiş elemanları olan, pandatifler, tromplar ve Türk üçgeni yardımı ile yük aktarımı yapılmıştır (Şekil 4.5). Merkezi kubbeyi desteklemek amacıyla yarım kubbeler de kullanılmıştır.



Şekil 4.5. Türk Üçgenine Örnek (İznik Yeşil Camisi)

Kubbeye etkiyen yüklerin dağılımı ve kubbenin mesnetlendirme tarzı uygunsa, bir kubbe tekil yükler ve ısı yükleri hariç öz ağırlık, kar ve rüzgar gibi yayılı yükleri büyük ölçüde membran kesit kuvvetleriyle karşılayabilir. Tarihi kubbeler, çekme dayanımı basınç dayanımına göre düşük olan malzemelerden yapılmış olsalar dahi, yüklerin az bir kalınlıkla, yani en az malzeme miktarıyla taşınabilmesine olanak sağlar (Mungan, 1987).

Kubbeler, yüzeyinin meridyen doğrultusunda kemer etkisiyle basınç gerilmelerini mesnetlere ulaştırırlar. Bununla beraber meridyen doğrultusunda oluşan basınç kuvvetlerinin etkisi ile de paraleller doğrultusunda çekme gerilmelerinin oluşması kaçınılmaz bir davranıştır (Şekil 4.6). Bu nedenle kubbenin tabanında oluşacak çekme gerilmelerine karşı önlem alınması gerekmektedir. Bu bölgenin çekme gerilmelerine dayanıklı bir malzemeden yapılmış bir çember ile kuşatılması en uygun yöntemlerden birisidir. Büyük kubbeli yapılardaki kasnaklar masif ve ağır yapısıyla, bu bölgede oluşabilecek çekme gerilmelerini etkisiz hale getirebilir (Ünay, 2002).



Şekil 4.6. Kubbe de çekme ve basınç bölgeleri

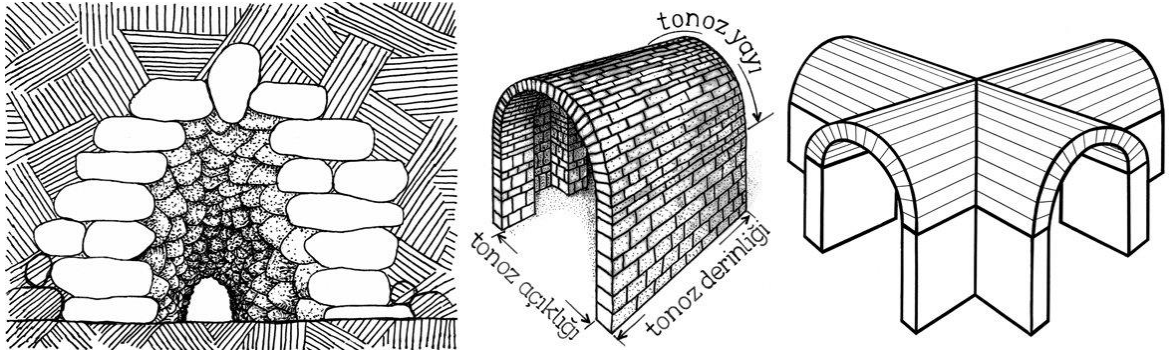
Kubbeler genellikle tuğladan yapılmıştır. Daha az görülmekle beraber taş ve ahşap malzemelerle yapılmış örnekleri de vardır.

Kubbe; kemer, lento, sütun gibi sadece kendi düzlemi içerisinde yük aktaran elemanlardan farklı olması, günümüzde halen yaygın olarak kullanılması ve gereksinimlere cevap vermesi yapısal davranışının iyi bir strüktür olmasından kaynaklanmaktadır. Kemer ve kubbenin karşılaştırılması sonucunda bu daha rahat bir şekilde görülebilir.

4.3. Tonoz

Tonoz, bir kemerin kendi düzleminde, dik doğrultusunda ötelenmesi sonucu oluşan; yükleri, kemerlerin yük taşıma prensibi ilkesine göre taşıyan ve aynı zamanda da kabuk özelliği gösteren tek eğrilikli yapı elemanıdır. Tonozlarda, basınç kuvvetlerinden dolayı basınç gerilmeleri oluşur (Ünay, 2002).

Tonoz, tarihi yapılarda dikdörtgen alanların kapalı bir hacim haline getirilmesinde kullanılmıştır. Tonoz çeşitleri arasında manastır tonoz, ilkel tonoz, sivri tonoz, beşik tonoz, eğri tonoz ve çapraz tonoz en fazla kullanılmış tonoz çeşitleridir (Şekil 4.7).



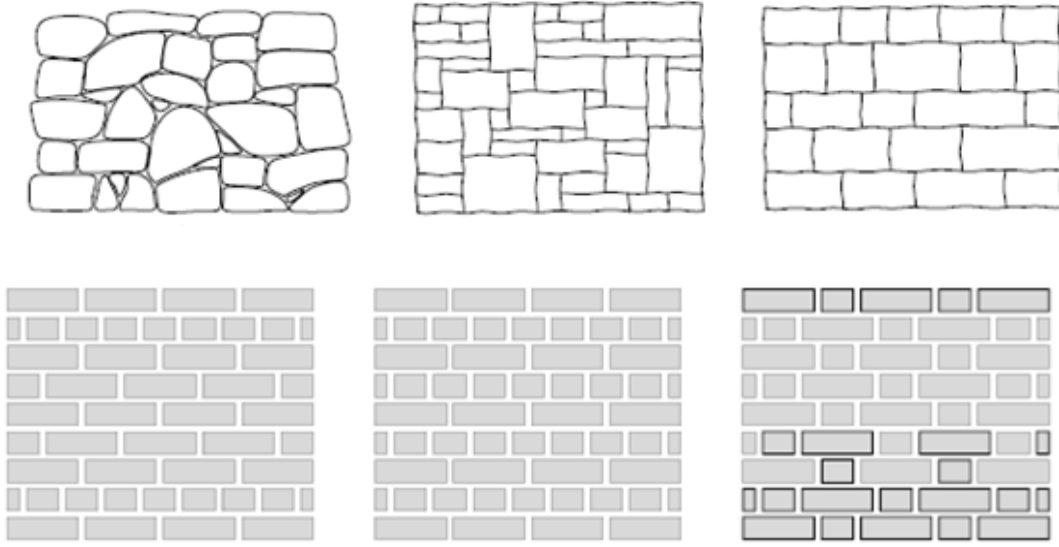
Şekil 4.7. Kâgir tonoz biçimleri örnekler

Tonoz, kendi ağırlığı ile birlikte üzerine gelen kaplama yüklerini de taşır. Bir tonozun kesiti, aynı eğrilikteki bir kemerin eşdeğeridir. Tonoz mesnetlerinde oluşan yanıl kuvvetler, temellere doğru kalınlaştırılmış duvarlar, kemerlerde olduğu gibi gergiler veya payandalar yardımıyla taşınır (Saraç, 2003).

4.4. Duvarlar

Duvarlar, mekan örtüsünden gelen yükleri zemine aktaran; malzemelerine göre taş, moloz taş, kaba yonu taş, tuğla, almalı malzeme (taş+tuğla), kerpiç olarak sınıflandırabileceğimiz düşey düzlemsel ve sürekli elemanlardır (Bayülke, 1978; Sesigür vd, 2007). Duvarlar, genellikle mekanı çevreleyen mimari unsurlar olarak kullanılmasına karşın, yığma yapı sisteminin vazgeçilmez elemanlarıdır.

Duvarın boyutlarını belirleyen etmenler; duvara üst yapıdan gelen düşey ve eğik yükler, yatay deprem yükleri, yapım malzemelerinin cinsi, duvar düzleminde açılmış olan kapı ve pencerelerin boyutlarıdır. Duvarın düşey ve yatay yükleri karşılayabilmesi için, bir bütün halinde çalışması gerekir. Tarihi yığma yapılarda düzlem dışı yükler, duvarların öz ağırlığı ile karşılandığından dolayı, duvar kalınlıkları ve en kesit alanları mümkün olduğunca büyük seçilmiştir. Yapı genelinde duvarların yatay kesitlerinde oluşan gerilmeler birbirlerine eşit ya da yakın değerlerde olmalı ve kesit içinde düzgün yayılı dağılmalıdır. Duvarların bütünlüğünün sağlanması için taş ve tuğlalar birbirine harç, kenet (demir, kurşun vb.) ve hatıllarla (ahşap, demir vb.) bağlanmıştır. Aşağıda farklı tip duvar örülmesi teknikleri gösterilmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Farklı tip taş ve tuğla duvarlar (Lourenço, 1998).

4.5. Sütun ve Ayaklar

Mekan örtü yüklerinin tekil noktalardan iletilmesi hallerinde, düşey taşıyıcılar ayak ve sütunlardan oluşur. Sütunlar; yekpare, davul şekilli mermer, granit ya da birkaç blok taş ile oluşturulmuş tarihi düşey yapı elemanlarıdır. Süreklilik parçaların birbirine merkezi pimlerle bağlanması ile sağlanmaktadır (Şekil 4.9).

Ayaklar, en kesiti sütunlardan daha büyük; duvar gibi örülerek yapılan düşey taşıyıcılardır. Mekan örtüsünün formuna, kullanım amacına ve yüklerin iletiliş biçimlerine göre karmaşık bir geometride imal edilmişlerdir (Çamlıbel, 2000).

Ana taşıyıcı ayaklarda meydana gelebilecek bir çatlak veya mafsallı oluşumu, yapının stabilitesini bozarak tamamen yıkılmasına neden olabilir. Bu sebeple, bu tür elemanlarda kesitin eğilme eksenine dik doğrultudaki boyutunun üçte birinden fazla bir bölümde çekme gerilmesi oluşturmayacak şekilde çok büyük kesit boyutlarına ihtiyaç vardır. Tarihi yapılardaki büyük kesite sahip sütun ve ayakların, geçmişte yıkılan yapılardan alınan derslere göre bu şekilde yapıldığı anlaşılmaktadır (Ünay, 2002).



(a)

(b)

Şekil 4.9. Sütunlar, (a) tek parça sütunlar (Roma tipi), (b) Çok parçalı sütunlar (Sesigür, 2007)

5. YAPILARIN DEPREM YÜKLERİ ALTINDA DAVRANIŞI

Deprem sırasında yer kabuğunda oluşan sismik dalgalar yüzeyde bulunan yapıya ulaştıklarında, yapıda titreşim oluşmasına neden olurlar. Bu titreşimlerin yapıda oluşturduğu tepki dinamik bir davranıştır. Deprem etkisi yapıların kendi ağırlığından dolayı ortaya çıkar (Ünay, 2002). Yapının ağırlığı ne kadar fazla ise yapıya o kadar fazla deprem yükü etkir.

Çok katlı yapıların çoğunda şiddetli bir deprem sırasında yapıya yansıyan enerjinin bir kısmı elastik enerjiye dönüşebilir, geri kalan ise diğer enerji formlarına özellikle termik enerjiye dönüşmek zorunda kalır ve yapı bu esnada enerji harcar. Eğer bu arta kalan enerjinin yutulması yanlış iç sönümleme ile gerçekleşirse, yapı ya hiç deformasyona uğramaz veya bir miktar kalıcı deformasyona uğrar fakat hasar oluşmaz. Yine bu arta kalan, elastik olarak depolanamayan enerji miktarı iç sönümleme ile tamamen harcanamaz ise, bundan geriye kalan enerji miktarı da yapı tarafından kendini hasara uğratmada, plastik deformasyon oluşturarak yatay rijitliğini azaltmada harcanır. Rijit yapıların elastik deformasyon yapma kabiliyetleri çok az, iç sönümleme oranları da çok düşüktür. Bu sebeple rijit yapıya iletilen enerjinin tümü kinetik enerjiye dönüşür ve yapıyı hasara uğratır. Bir yapının tasarımında ya da güçlendirilmesinde elastik davranışı göz önünde bulundurarak, olası bir deprem sonrası yapıda kalıcı bir hasar oluşmasını önlemek mümkündür. Ancak, bu tür bir tasarım için gerekli olan dayanım çok yüksek olacağı için bu çözüm ekonomik açıdan uygun değildir. Bunun yerine yapının elastik ötesi davranış göstermesine, yani bir miktar hasar görmesine izin verilir. Ancak azaltılmış deprem kuvvetleri ile tasarım yapılırken, yapının maruz kalacağı hasar her zaman kontrol altında tutulmalıdır. Bu da deprem yer hareketi özelliklerinin yapısal hasar üzerindeki etkilerinin çok iyi bilinmesini gerektirir.

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkındaki Yönetmelik (2007) yapıların depreme dayanıklılığını, yapının deprem enerjisini tüketmesi ile korunmasını ve bu amaçla yapının yeterince sünek olmasını ister. Yönetmeliğin amacı, çok şiddetli depremlerde dahi yapının tamamen yıkılmamasıdır. Bu yaklaşım üç aşamalı bir yapısal davranış esasına dayanır:

- Sık oluşabilecek hafif şiddetteki depremlerde yapıların elastik davranması, yapısal ve yapısal olmayan sistem elemanlarının herhangi bir hasar görmemesi,
- Orta sıklıkta oluşabilecek orta şiddetteki depremlerde yapıların elastik limitine yaklaşması, yapısal ve yapısal olmayan sistem elemanlarında oluşabilecek hasarın onarılabılır düzeyde kalması,
- Seyrek olarak oluşabilecek şiddetli depremlerde ise yapıların plastik davranması, can kaybını önlemek amacıyla binaların kısmen veya tamamen göçmesini önlemektir.

Bu yaklaşıma göre, depreme dayanıklı yapı tasarımında aşağıda belirtilen üç temel koşulun sağlanması gerekmektedir (Ünay, 2002):

- a. Dayanım
- b. Süneklik
- c. Rijitlik

a. Dayanım: Dayanım koşulu, yapı elemanlarının çeşitli yük etkileri karşısında oluşan iç kuvvetlere karşı gösterdiği direncidir. Dayanımın en güvenilir ölçüsü taşıma gücüdür. Taşıma gücü, bir yapı elemanının yük taşıma sınır durumunu yani güç tüketme sınırını tanımlar.

b. Süneklik: Yapı ve yapı elemanlarının taşıma gücünde önemli bir azalma olmadan deformasyon yapabilme ve tekrarlı yükler etkisinde enerji tüketebilme özelliğine, o elemanın ya da yapının sünekliği denilmektedir. Yapıların düşey yükler altındaki dayanımında çok önemli olmayan süneklik kavramı, depreme karşı olan davranışlarda en az dayanım kadar önemlidir. Binanın depreme karşı ayakta durması, deprem sırasında ortaya çıkan enerjinin tüketilmesi ile mümkün olacaktır. Sünek davranış gösteren elemanlar, sünek olmayan elemanlara göre daha fazla enerji tüketir (Doğangün, 2005).

c. Rijitlik: Yapı elemanlarının yer değiştirme veya dönme şeklinde oluşan deformasyonlara karşı gösterdiği dirençtir. Rijitlik için yapının geometrisi değil, düşey taşıyıcıların konumu ve bunların her iki doğrultudaki boyutları önemli olmaktadır.

Betonarme bir yapıda düşey taşıyıcı elemanlar olarak kolon ve perdeler dolgu duvarlara göre daha rijit davrandığı için, rijitlik hesabında bu elemanların dikkate alınması yeterli olmaktadır. Düşey taşıyıcı elemanların rijitliklerinin hesabında elemanlarda kullanılan malzemenin özellikleri (elastisite modülü, poisson oranı), elemanın en kesit boyutları ve eleman uçlarının mesnetlenme biçimleri etkili olmaktadır.

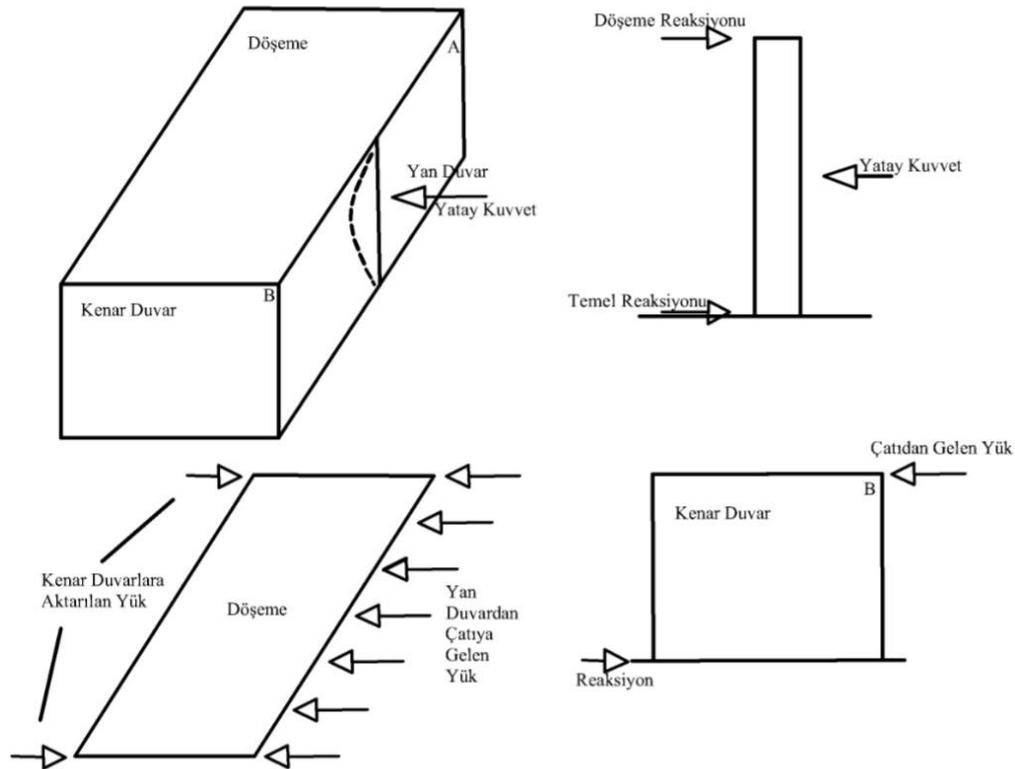
5.1. Tarihi Yığma Yapıların Dinamik Özellikleri

Tarihi yapılar, genellikle ağır ve rijit yapılardır. Ağır olmaları sonucu yapıya etkileyen deprem kuvvetleri de çok büyük olur (Çamlıbel, 1992). Yapıların dinamik özellikleri; periyotları, mod şekilleri ve sönüm oranlarıdır. Yığma yapılar çok rijit yapılar olduğu için doğal titreşim periyotları genellikle çok küçüktür. Bir yapının periyodu kat yüksekliği, eni, boyu ve dolu duvar oranı ile ilgilidir. Yapı rijitliği arttıkça periyodu kısalmaktadır. Mesela betonarme çerçeve yapıların periyodu yığma yapıların periyodundan uzundur. Deprem esnasında yapıda hasar meydana gelir ve çatlama olursa, periyodu uzar. Kırılma ve çatlama olduktan sonra yığma yapılar taşıma güçlerini hızla yitirirken, betonarme binalarda çatlama ve kırılmadan sonra taşıma gücü kaybı yavaş bir biçimde azalır, aniden oluşmaz. Yapı çatladıktan sonra bir süre eski yük taşıma gücünü korur.

Yapıların sönüm oranı yapının dıştan gelen dinamik etkiyi giderek harcaması olarak nitelenebilir. Sönüm oranı, periyot ve yapı elemanlarındaki gerilme düzeyi gibi faktörlere bağlıdır. Genellikle kısa periyotlu yapıların sönüm oranı küçüktür. Depremde hasar gören bir yapı çatladığında, çatlak yüzeyler arasındaki sürtünmeden dolayı yapının sönüm oranı artar ve yüksek bir düzeye ulaşır. Yığma yapılar hem kısa periyotlu hem de düşük sönümlü olmalarından dolayı depremde yüksek yatay kuvvetlere maruz kalırlar ve hasar gördükleri vakit hem periyotlarında hem de sönüm oranlarında artış olur, bu yüzden yapıya gelen deprem kuvvetlerinin azalması söz konusu olur ancak bu önemli mertebeye ulaşmaz.

Deprem, ağır bir kütleyle sahip taş ve tuğladan yapılmış yığma yapılar için büyük bir tehlike oluşturmaktadır. Yapının dayanımı ve taşıyıcı elemanlarının deprem yüklerine karşı yük taşıma kapasitelerinin hesaplanması bu açıdan çok önemlidir. Ancak taş, tuğla ve harç gibi malzemelerin çok değişken ve doğrusal olmayan mekanik özelliklerinden dolayı, yapının gerçek taşıma gücünü hesaplamak oldukça güçtür.

Yığma yapıların düşey yüklere ve yatay deprem yüklerine karşı dayanımı; duvar geometrisine, kullanılan malzemelerin dayanımına, yığma blokların birleştirilme şekline bağlıdır. Deprem sırasında yığma yapılarda karşılaşılan başlıca hasarlar: duvarların düzlemi içinde kesme çatlaklarının oluşması, düzlemi dışında devrilmesi, duvarların köşelerden ayrılması ve döşemelerin duvarlardan ayrılıp yıkılmasıdır. Depremde yığma yapılara gelen yatay kuvvetler düşey elemanlar tarafından alınır. Yığma yapılar depreme karşı tepkilerini deprem kuvvetinin olduğu yöndeki paralel duvarlar sayesinde karşılarlar. Deprem kuvvetine dik yöndeki duvarlar temelden ve üst döşemeden mesnetli bir kiriş gibi davranarak kendisine gelen kuvvetin bir kısmını temele, bir kısmını ise döşemeye aktarır (Şekil 5.1). Üst döşeme ise bu duvarlardan gelen kuvvetleri ve kendi kuvvetini yandaki duvarlara yani depreme paralel yöndeki duvarlara aktarır. Döşeme yan duvarlara mesnetli kiriş gibi davranır.



Şekil 5.1. Yığma yapılarda yatay kuvvetlerin dağılımı.

Burada sözü edilen biçimde bir kuvvet aktarılması işleminin gerçekleşebilmesi için çatı ya da kat döşemesinin belli bir rijitliğinin olması yani kendisinin deformasyon

yapmaması gerekir. Bu durumda yatay kuvvetler duvarlara rijitlikleri ile orantılı olarak dağılabilirler. Depreme paralel yöndeki bu duvarlar ise döşemeden gelen kuvvetler ile temel reaksiyonu etkisi altında kesme kuvvetlerine maruz kalmaktadır. Bu yüzden yığma yapılarda deprem yükünün zemine aktarılması esnasında duvarda kesme gerilmeleri oluşur. Duvarın kesme dayanımı aşılsa, dolu duvarda 45 derecelik eğik çekme çatlakları oluşur (Şekil 5.2). Deprem kuvveti her iki yönde etkidiğinden diğer yönde de eğik çekme çatlakları oluşur. Eğik çekme çatlakları bir kere duvarı zayıflattıktan sonra, duvar daha önce bir problem olmadan taşıyabildiği düşey yükleri de taşıyamaz duruma gelebilir. Böylece eğik çekme çatlaklarından sonra düşey basınç çatlakları da oluşur. Yapı titreşimine neden olan kuvvetler çatlakları oluşturdukça yapıdaki dinamik karakteristikler değişir ve yer değiştirmeler artar. Yanal hareket devam ettikçe, düşey yük ve sürtünme etkisiyle çatlaklar doğrultusundaki hareket artar. Titreşim periyodu uzayan yığma yapının rijitliği azalır.



Şekil 5.2. Yığma yapı duvarda çatlak oluşumu (Bursa Yenişehir Sinanpaşa İmaret)

Duvarların tonozlarla yüklü olması durumunda, tonozlardan gelen itki kuvvetleri ve deprem kuvvetleri ile oluşan yanal yükler büyüyerek duvarı daha da kritik duruma getirir. Tonoz duvardan oluşan sistemin deprem etkisinde kalması durumunda duvar boyutlarının

belli güvenliği sağlayamaması durumunda tonozda plastik mafsallar olur ve çatlaklar oluşur. Plastik mafsalin oluştuğu tonozun anahtar noktasında gerilme yığılmaları sonucu çatlaklar gittikçe artarak sistem göçer (Çamlıbel, 2000).

Kubbe, tonoz ve pendentif gibi üç boyutlu geometriye sahip elemanlar düşey yükler ve deprem etkilerinden dolayı oluşan yükler altında yapısal işlev açısından kabuk gibi çalışır. Yığma yapı elemanları çekme kuvvetlerine karşı çok zayıf olduklarından, kabuk davranışı altında oluşan çekme kuvvetlerinin etkisi altında teorik olarak çatlarlar. Ancak yapının genel geometrik formundan dolayı hemen çökmezler. Birçok kubbe ve tonoz, kabuk teorisine göre yıkılmaları gerekirken yüzyıllar boyunca ayakta durmaktadır.



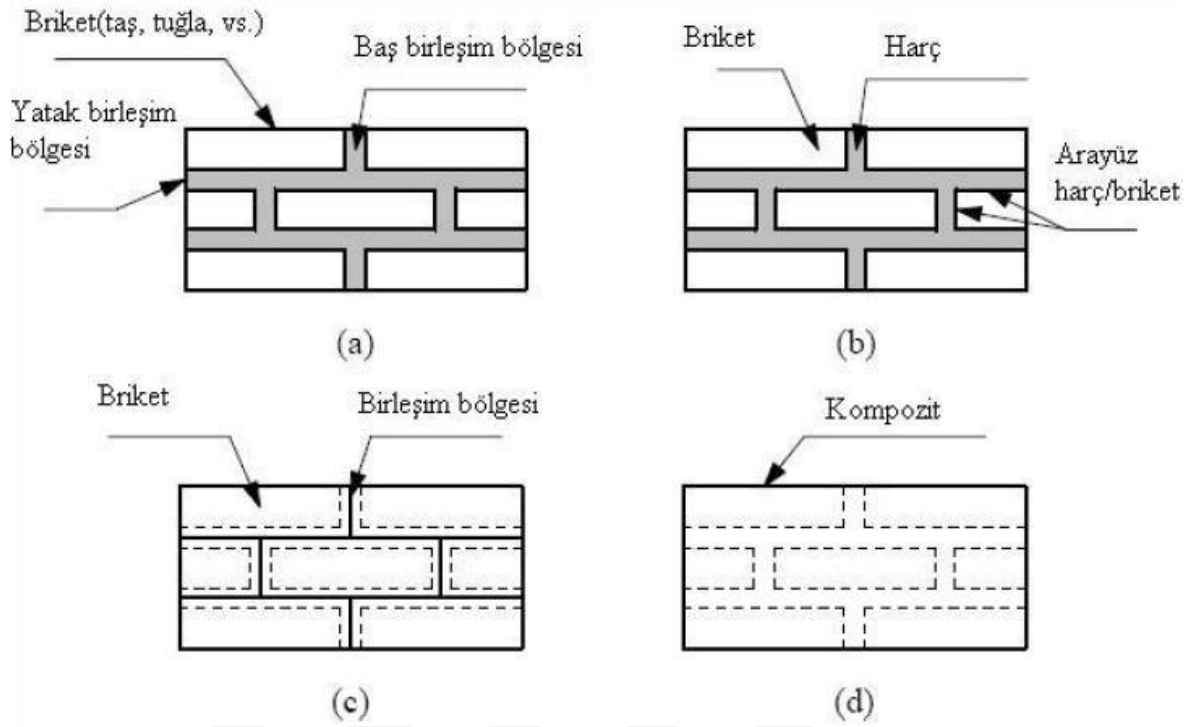
6. MATERYAL VE YÖNTEM

6.1 Tarihi Yapıların Modellenmesi ve Analiz Yöntemleri

Yığma yapı sistemleri, ülkemizde hem kırsal kesimlerde tercih edildikleri için hem de kültürel yapı mirasımızı oluşturdukları için çok kullanılan yapı grubudur. Ancak, yapısal çözümleri, malzeme özellikleri ve malzemelerin bir araya getirilme biçimleri göz önüne alındığında diğer yapı gruplarına göre oldukça farklıdır (Tetik, 2015). Yığma yapıların ve yapı elemanlarının yapısal davranışlarının doğru olarak anlaşılabilmesi amacıyla deneysel çalışmalar ve sayısal modelleme çalışmaları yapılmaktadır.

Yığma yapılarda sistemin büyüklüğüne göre, Lourenço (1998) tarafında önerilen üç farklı modelleme stratejisi kullanılmaktadır. Bu stratejiler, detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme olarak sınıflandırılmaktadır. Küçük yığma sistemlerde mikro modelleme kullanılırken, camii, köprü gibi büyük yığma yapılarda makro modelleme tekniğinin kullanılması önerilmektedir. Makro modelleme tekniğinde yığma yapıyı oluşturan taş/tuğla ve harç, homojenleştirme yaklaşımı ile bir bütün olarak modellenmektedir (Hökelekli, 2015).

Sonlu elemanlar yöntemiyle yığma yapıların modellenmesinde kullanılan elemanlar ve yapılan kabuller, betonarme yapılar için kullanılanlardan oldukça farklıdır. Çünkü betonarme heterojen bir malzeme olmasına rağmen, yapılan kabullerle bir yapısal elemanı aynı çeşit sonlu elemanla geçmek mümkün olmaktadır. Oysa yığma duvarlarda taş ve tuğla gibi yığma birimlerin ve farklı karakteristiklere sahip harcın bulunması tek tip sonlu eleman kullanmayı zorlaştırmaktadır. Bu durumda kabule uygun ve gerçekten uzaklaşmayacak şekilde bir modelleme tekniği geliştirmek ya da bu birimleri ayrı ayrı modellemek gerekmektedir. Yığma birimlerin ve ara yüzey elemanlarının ayrı ayrı modellendiği bu durumda ise bilinmeyen sayısı oldukça artmaktadır (Ural, 2009). Şekil 6.1’de yığma yapıların modellenmesi için birim yığma yapı elemanı için modellemede dikkat edilmesi gereken hususlar görülmektedir.



Şekil 6.1. Yığma yapıların modellenmesi, a) Yığma yapı, b) Detaylı mikro modelleme, c) Basitleştirilmiş mikro modelleme, d) Makro modelleme (Lourenço. 1998)

6.2. Detaylı Mikro Modelleme

Detaylı mikro modellemede yığma duvarı oluşturan taş veya tuğla ile harç ayrı ayrı modellenir ve her bir elemanın malzeme özellikleri (elastisite modülleri, poisson oranları) ayrı ayrı dikkate alınır ve ayrı ayrı atanır (Şekil 6.1.b). Bu modelleme stratejisi, yığma birim ile harcın beraberce ve ayrı ayrı nasıl davrandığını mercek altına alabilen bir yöntem olduğundan, genellikle yapı davranışının yerel olarak değerlendirilmesi amacı ile kullanılmaktadır. Mikro modelleme küçük boyutlu (duvar, panel vb.) elemanların modellenmesinde oldukça etkili ve gerçeğe yakın sonuçlar veren bir yöntemdir. Bu yaklaşımda potansiyel çatlakların ve kayma yüzeyinin yığma blok (taş, tuğla) ve harcın arasındaki ara yüzeylerde meydana geleceği varsayılmaktadır. Üç boyutlu karmaşık bir yığma yapı çok fazla elemandan oluşur ve böyle bir sistemin mikro modelleme ile modellenmesi zor ve zaman alıcıdır (Tetik, 2015).

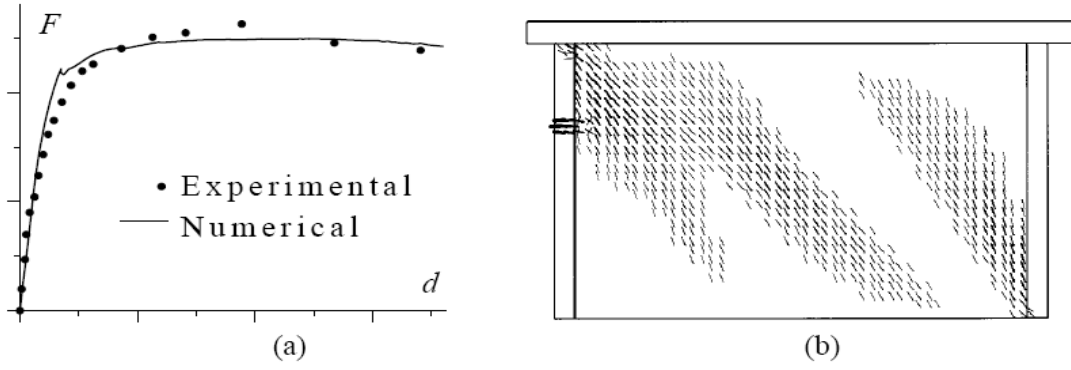
6.3. Basitleştirilmiş Mikro Modelleme

Bu modellemeye göre, yığma birimlerin boyutları, harç kalınlığının yarısı kadar genişletilerek göz önüne alınmakta ve harç tabakası ihmal edilmektedir. Yığma birimler enterfaz denilen ara yüzey çizgileriyle birbirinden ayrılmaktadır (Şekil 6.1.c) Yığma duvarda meydana gelebilecek olan çekme ve kayma çatlaklarının ise ara yüzeylerde oluşacağı ve tuğlalarda meydana gelebilecek olan potansiyel çatlakların ise tuğlanın orta kısmında düşey olarak gerçekleşeceği varsayımı yapılır (Tetik, 2016).

6.4. Makro Modelleme

Makro modellerin kavranması ve uygulanmasında deneysel verilerin bulunmayışı ve izotrop olmayan malzeme davranışındaki karmaşıklık sebebiyle zorluklarla karşılaşmaktadır. Yeterli sayıda çalışmaların yapılmadığı özel modeller, makro modellemenin zorluklarını aşmak için yeterli görünmemektedir. Bazı çalışmalarda ise anizotrop malzeme davranışı ve plastisite kavramı kullanılarak, farklı yönlerde farklı sertleşme/yumuşama özelliği gösteren uygulamalar oldukça iyi sonuçlar vermiştir (Lourenço, 2000) Buradan da anlaşıldığı gibi makro modellemede malzeme tanımları model ve analizin doğruluğunu belirleyen en önemli kriterdir. Aşağıdaki şekilde (Şekil 6.2) yığma bir duvara ait makro model analizi görülmektedir. Deney ile sayısal sonuçlar çok iyi bir benzerlik göstermiştir. Mikro model yöntemi olan ayırık eleman metodu ile aynı duvarın analiz edilmesinden benzer sonuçlar çıkmıştır. Burada uygun kabuller ve sınır şartları sağlandığı takdirde makro modelin kolay ve hız kazandıran bir teknik olduğu anlaşılmaktadır (Dabanlı, 2008).

Uygulamaya yönelik çalışmalarda, büyük sistemlerin analizinin gerekli olduğu durumlarda tüm sistem modellenirken yığma birimler ile harç arasındaki etkileşim ihmal edilmektedir (Şekil 6.1.d). Bunun esas sebebi mevcut bilgisayar teknolojisi ile özellikle doğrusal olmayan veya zaman-tanım alanında yapılacak olan analizlerde tüm bir yapının mikro modellemeyle oluşturulmasındaki güçlüklerdir. Çok büyük boyutlardaki sistem rijitlik matrisi ve yapısal analiz programların oluşturacakları sonuç dosyalarının boyutunun çok büyük olmasından dolayı büyük sistemler için en uygun modelleme tekniği makro modellemedir (Ural, 2009).

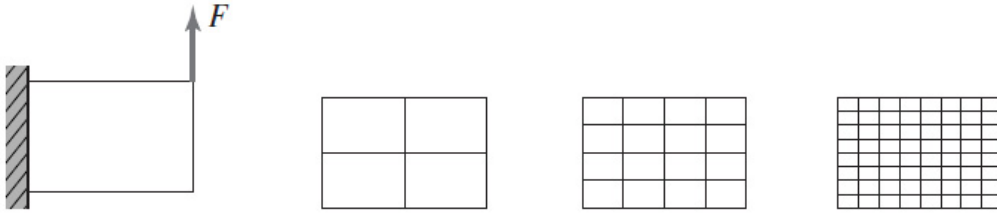


Şekil 6.2. Yığma duvarın makro model analizi a) Kuvvet-Yer değiştirme diyagramı b) Nihai yükte deformasyon şekli (Lourenço, 2000).

6.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Eleman Yöntemi; genel olarak mühendislikteki sınır değer problemleri için yaklaşık sonuçlar elde etmeye yarayan, yapıların üç boyutlu doğrusal ve doğrusal olmayan, statik ve dinamik analizlerinin yapılabildiği sayısal bir yöntemdir (Hutton, 2004). Zaman ve ekonomi yönünden tercih edilen bu yöntemde çeşitli yapı eleman modellerini bir arada kullanmak da (çubuk, kabuk, plak, prizma) mümkün olmaktadır (Dabanlı, 2008).

Sonlu elemanlar metodunda yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan birçok elemana bölünür. Elemanlar "düğüm" adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Gerilme analizinde bu denklemler düğümlerdeki denge denklemleridir. Her bir sonlu eleman için gerekli olan denklemler elde edildikten sonra, tüm denklemler problemin tanım bölgesini ifade edecek şekilde birleştirilir. Böylece problemin bütününe ait sistem denklemleri elde edilir. Burada, temel değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri, bu düğüm noktaları ile tanımlı bölge içinde sürekli bir değişime çeviren şekil fonksiyonlarından yararlanılır. Böylece, sonsuz sayıdaki küçük elemanların bir bütünü olarak düşünülebilen sürekli ortam, sonlu sayıda ve büyüklükte sonlu elemanlardan oluşan yarı sürekli bir ortama dönüşür. Sonlu elemanlara ayrılmış problemin tanım bölgesini artık sonlu eleman ağı oluşturmaktadır. Sonlu eleman analizinin en önemli adımı, bir takım elemanlar tarafından verilen alanı tanımlamaktır. Problemin analizi ve istenen doğruluk derecesi için eleman tipinin, eleman sayılarının ve eleman yoğunluğunun seçilmesi alanın geometrisine bağlıdır.



Şekil 6.3. Sonlu Eleman Sayısı İle Yaklaşık Sonuçların Yakınsama İlişkisi (Hutton, 2004)

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

Sonlu Elemanlar Metodu ile çalışmanın getirdiği kolaylıklar şöyle sıralanabilir:

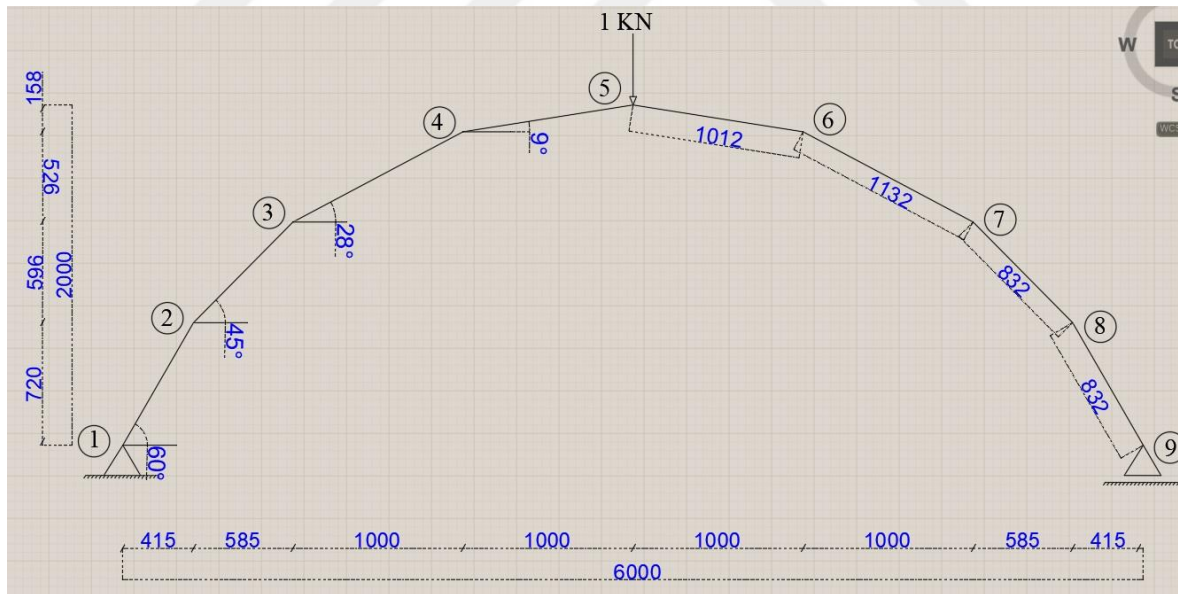
- Eğriliği bulunan, düzgün olmayan geometrilere sahip elemanlar ve amorf yapı elemanları rahatlıkla modellenebilir.
- Elemanlar istenilen boyutta parçalara ayrılarak istenilen hassasiyette sonuçlar elde edilebilir
- Aynı yapı elemanı içerisinde farklı malzeme özellikleri kullanmaya imkân sağlar.
- Farklı özelliklere sahip, farklı malzemeden oluşan yapı elemanlarının birleştirilmesine imkân tanır.
- Sınır şartlarını tanımlamak ve kontrol etmek oldukça kolaydır.
- Özellikle yığma yapılar gibi birçok elemanın birbirine bağlanması yoluyla oluşturulan yapı sistemlerinin gerçek yapım tekniğine uygun bir modelleme tekniğidir.
- Eleman boyutları kullanıcı tarafından değiştirilebilir. Böylece önemli değişiklikler beklenen bölgelerde daha küçük elemanlar kullanılarak hassas işlemler yapılabilirken, aynı

parçanın diğer bölgeleri büyük elemanlara bölünerek işlem hızı arttırılabilir.

- Sonlu eleman metodunun çok yönlülük ve esnekliği karmaşık yapılarda, sürekli ortam, alan ve diğer problemlerde sebep sonuç ilişkilerini hesaplamak için etkin bir şekilde kullanılabilir (Dabanlı, 2008).

6.5.1. Sonlu elemanlar yöntemi ile kemerin el ve bilgisayar ortamında analizlerinin karşılaştırılması.

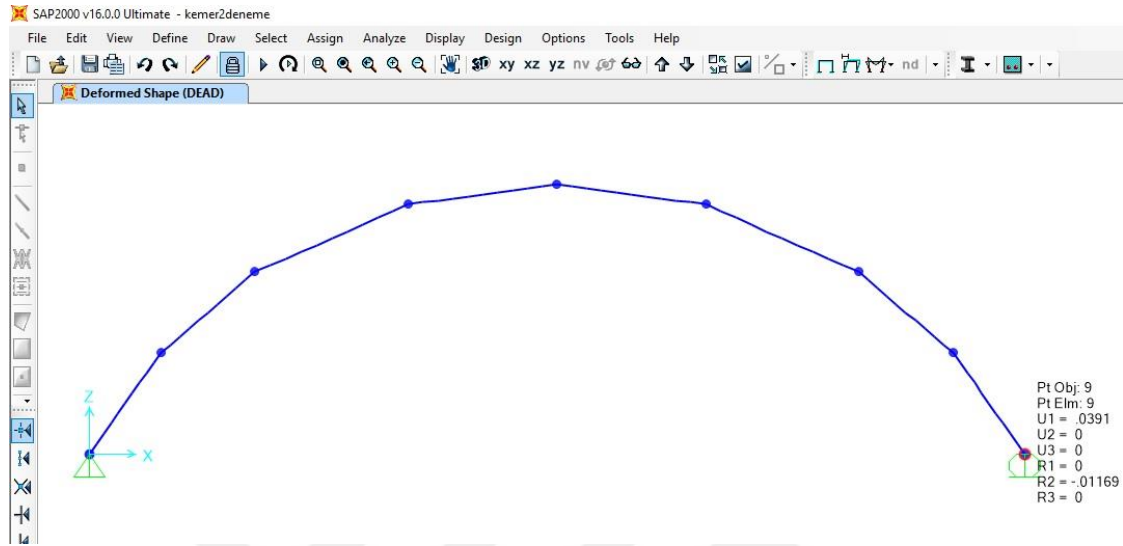
Sonlu elemanlar yöntemi ile Şekil 6.4'te ölçülendirmesi ve formu verilen kemer elemanın sonlu elemanlar hesabı yapabilen SAP 2000 programı kullanılarak yapılan analiz çalışması ile kemerin el hesabı yapılarak kıyaslamasının yapılması amaçlanmıştır. Yapılan analiz çalışması kemerin üst merkez noktasından 1 kN'lık bir yükleme yapılarak Şekil 6.4'te gösterilen dokuzuncu düğüm noktasında oluşan yer değiştirme değeri iki yönlü kontrol edilecek şekilde işlemler yapılmıştır.



Şekil 6.4. Örnek kemer eleman modeli

Yapılacak iki analiz çalışması içinde parametreler belirlenmiştir. Elastisite modülü $E=10^5$ kN/m² olarak kabul edilmiş, kemer elemanın kesitleri de 0,40 x 0,40 m olarak düşünülmüştür.

Kemerin ilk olarak Sap 2000 analiz programı kullanılarak dokuzuncu düğüm noktasında yer değiştirme hesabı yapılarak Şekil 6.5'te gösterildiği gibi 0,039 m yer değiştirmenin oluşacağı tespit edilmiştir.



Şekil 6.5. Sap 2000 programı ile kemerin analiz çalışması

Bilgisayar destekli sonlu elemanlar analiz sonuçlarının el ile yapılacak matematiksel hesap çalışmalarının kıyaslanması için düzlem çerçeve elemanın lokal rijitlik matrisi, transformasyon matrisi oluşturularak, global rijitlik matrisleri elde edilmiştir. Global rijitlik matrislerinden sistemin “ K_0 ” rijitlik matrisi kurulmuştur (Erol, 2018). Kullanılan rijitlik matrisi Şekil 6.6’da, transformasyon matrisi de Şekil 6.7’ de gösterilmiştir.

$$\hat{k} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_3}{L^3} & \frac{6EI_3}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_3}{L^3} & \frac{6EI_3}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI_3}{L^2} & \frac{4EI_3}{L} & 0 & -\frac{6EI_3}{L^2} & \frac{2EI_3}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_3}{L^3} & -\frac{6EI_3}{L^2} & 0 & \frac{12EI_3}{L^3} & -\frac{6EI_3}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI_3}{L^2} & \frac{2EI_3}{L} & 0 & -\frac{6EI_3}{L^2} & \frac{4EI_3}{L} \end{bmatrix}$$

Şekil 6.6. Sistemin lokal rijitlik matrisi (Erol, 2018)

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\alpha_{12} & \alpha_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_{11} & \alpha_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha_{12} & \alpha_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Şekil 6.7. Sistemin transformasyon matrisi

α_{11} : Lokal eksen ile Global eksen arasındaki saat dönüşü yönündeki açının cosünüsüdür.

α_{12} : Lokal eksen ile Global eksen arasındaki saat dönüşünün tersi yönündeki açının cosünüsüdür.

Kemer eleman örneği için oluşturulan lokal rijitlik matrisi Şekil 6.8’ de ve transformasyon matrisleri 6.9’da gösterilmiştir.

Elemanın Rijitlik Matrisleri

K ₁ :	19230,77	0	0	-19230,77	0	0
	0	4444,29	1848,82	0	-4444,29	1848,82
	0	1848,82	1025,48	0	-1848,82	512,74
	-19230,8	0	0	19230,769	0	0
	0	-4444,3	-1848,8	0	4444,287	-1848,8
	0	1848,82	512,74	0	-1848,82	1025,48
K ₂ :	19230,77	0	0	-19230,77	0	0
	0	4444,29	1848,82	0	-4444,29	1848,82
	0	1848,82	1025,48	0	-1848,82	512,74
	-19230,8	0	0	19230,769	0	0
	0	-4444,3	-1848,8	0	4444,287	-1848,8
	0	1848,82	512,74	0	-1848,82	1025,48
K ₃ :	14134,28	0	0	-14134,28	0	0
	0	1764,55	998,733	0	-1764,55	998,733
	0	998,733	753,71	0	-998,733	376,855
	-14134,3	0	0	14134,276	0	0
	0	-1764,5	-998,73	0	1764,545	-998,73
	0	998,733	376,855	0	-998,733	753,71
K ₄ :	15810,28	0	0	-15810,28	0	0
	0	2469,62	1249,63	0	-2469,62	1249,63
	0	1249,63	843,083	0	-1249,63	421,542
	-15810,3	0	0	15810,277	0	0
	0	-2469,6	-1249,6	0	2469,622	-1249,6
	0	1249,63	421,542	0	-1249,63	843,083
K ₅ :	15810,277	0	0	-15810,28	0	0
	0	2469,62	1249,63	0	-2469,62	1249,629
	0	1249,63	843,083	0	-1249,63	421,5415
	-15810,28	0	0	15810,277	0	0
	0	-2469,6	-1249,6	0	2469,622	-1249,63
	0	1249,63	421,542	0	-1249,63	843,083
K ₆ :	14134,276	0	0	-14134,28	0	0
	0	1764,55	998,733	0	-1764,55	998,7327
	0	998,733	753,71	0	-998,733	376,8551
	-14134,28	0	0	14134,276	0	0
	0	-1764,5	-998,73	0	1764,545	-998,733
	0	998,733	376,855	0	-998,733	753,7102
K ₇ :	19230,769	0	0	-19230,77	0	0
	0	4444,29	1848,82	0	-4444,29	1848,824
	0	1848,82	1025,48	0	-1848,82	512,7404
	-19230,77	0	0	19230,769	0	0
	0	-4444,3	-1848,8	0	4444,287	-1848,82
	0	1848,82	512,74	0	-1848,82	1025,481
K ₈ :	19230,769	0	0	-19230,77	0	0
	0	4444,29	1848,82	0	-4444,29	1848,824
	0	1848,82	1025,48	0	-1848,82	512,7404
	-19230,77	0	0	19230,769	0	0
	0	-4444,3	-1848,8	0	4444,287	-1848,82
	0	1848,82	512,74	0	-1848,82	1025,481

Şekil 6.8. Örnek olarak yapılan kemerin lokal rijitlik matrisi

Elemanların Transformasyon Matrisi

$T_1:$	0,4988	0,865	0	0	0	0
	-0,865	0,499	0	0	0	0
	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	0,4988	0,865	0
	0	0	0	-0,865	0,499	0
	0	0	0	0	0	1

$T_5:$	0,988	-0,156	0	0	0	0
	0,156	0,988	0	0	0	0
	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	0,988	-0,156	0
	0	0	0	0,156	0,988	0
	0	0	0	0	0	1

$T_2:$	0,7031	0,716	0	0	0	0
	-0,716	0,703	0	0	0	0
	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	0,7031	0,716	0
	0	0	0	-0,716	0,703	0
	0	0	0	0	0	1

$T_6:$	0,883	-0,465	0	0	0	0
	0,465	0,883	0	0	0	0
	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	0,883	-0,465	0
	0	0	0	0,465	0,883	0
	0	0	0	0	0	1

$T_3:$	0,8834	0,465	0	0	0	0
	-0,465	0,883	0	0	0	0
	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	0,8834	0,465	0
	0	0	0	-0,465	0,883	0
	0	0	0	0	0	1

$T_7:$	0,703	-0,716	0	0	0	0
	0,716	0,703	0	0	0	0
	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	0,703	-0,716	0
	0	0	0	0,716	0,703	0
	0	0	0	0	0	1

$T_4:$	0,9881	0,156	0	0	0	0
	-0,156	0,988	0	0	0	0
	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	0,9881	0,156	0
	0	0	0	-0,156	0,988	0
	0	0	0	0	0	1

$T_8:$	0,499	-0,865	0	0	0	0
	0,865	0,499	0	0	0	0
	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	0,499	-0,865	0
	0	0	0	0,865	0,499	0
	0	0	0	0	0	1

Şekil 6.9. Örnek olarak yapılan kemerin transformasyon matrisi

$$k = T^T \times k^{\wedge} \times T \quad (6.1)$$

k : Global rijitlik matrisi

T^T : Transformasyon matrisinin transpozu

$k^{\wedge}$: Lokal rijitlik matrisi

T : Transformasyon matrisi

6.1’de yararlanılan formül üzerinden global rijitlik matrisleri oluşturularak “**K₀**” kurulması işlemi yapılarak Şekil 6.10’da örnek kemer elemanın global rijitlik matrisleri gösterilmiştir.

Global Rijitlik Matrisleri											
K ₁ :	8112,89	6382,62	-1599,94	-8112,89	-6382,62	-1599,94	K ₅ :	15497,75	-2058,13	195,1	-15497,75
	6382,62	15507,5	922,1896	-6382,62	-15507,5	922,1896		-2058,13	2796,78	1234,8	2058,132
	-1599,9	922,19	1025,481	1599,943	-922,19	512,7404		195,1002	1234,81	843,08	-195,1002
	-8112,9	-6382,6	1599,943	8112,891	6382,617	1599,943		-15497,8	2058,13	-195,1	15497,75
	-6382,6	-15507	-922,19	6382,617	15507,48	-922,19		2058,132	-2796,78	-1235	-2058,132
	-1599,9	922,19	512,7404	1599,943	-922,19	1025,481		195,1002	1234,81	421,54	-1234,81
K ₂ :	11788	7447,67	-1324,4	-11788	-7447,67	-1324,4	K ₆ :	11411,12	-5077,54	464,08	-11411,12
	7447,67	12065,5	1299,954	-7447,67	-12065,5	1299,954		-5077,54	4428,79	882,27	5077,537
	-1324,4	1299,95	1025,481	1324,398	-1299,95	512,7404		464,0754	882,273	753,71	-464,0754
	-11788	-7447,7	1324,398	11787,99	7447,668	1324,398		-11411,1	5077,54	-464,1	11411,12
	-7447,7	-12065	-1299,95	7447,668	12065,49	-1299,95		5077,537	-4428,79	-882,3	-5077,537
	-1324,4	1299,95	512,7404	1324,398	-1299,95	1025,481		464,0754	882,273	376,86	-882,273
K ₃ :	11411,1	5077,54	-464,075	-11411,1	-5077,54	-464,075	K ₇ :	11787,99	-7447,67	1324,4	-11787,99
	5077,54	4428,79	882,2727	-5077,54	-4428,79	882,2727		-7447,67	12065,5	1300	7447,668
	-464,08	882,273	753,7102	464,0754	-882,273	376,8551		1324,398	1299,95	1025,5	-1324,398
	-11411	-5077,5	464,0754	11411,12	5077,537	464,0754		-11788	7447,67	-1324	11787,99
	-5077,5	-4428,8	-882,273	5077,537	4428,792	-882,273		7447,668	-12065,5	-1300	-7447,668
	-464,08	882,273	376,8551	464,0754	-882,273	753,7102		1324,398	1299,95	512,74	-1324,398
K ₄ :	15497,8	2058,13	-195,1	-15497,8	-2058,13	-195,1	K ₈ :	8112,891	-6382,62	1599,9	-8112,891
	2058,13	2796,78	1234,811	-2058,13	-2796,78	1234,811		-6382,62	15507,5	922,19	6382,617
	-195,1	1234,81	843,083	195,1002	-1234,81	421,5415		1599,943	922,19	1025,5	-1599,943
	-15498	-2058,1	195,1002	15497,75	2058,132	195,1002		-8112,89	6382,62	-1600	8112,891
	-2058,1	-2796,8	-1234,81	2058,132	2796,785	-1234,81		6382,617	-15507,5	-922,2	-6382,617
	-195,1	1234,81	421,5415	195,1002	-1234,81	843,083		1599,943	922,19	512,74	-1599,943

Şekil 6.10. Örnek olarak yapılan kemerin global rijitlik matrisleri

Sistemin rijitlik matrisi “**K₀**” kurularak mesnet şartları yerleştirilerek kemer elemanın dokuzuncu düğüm noktasında (U₂₅) olan hareketli mesnet bölgesinde oluşan yer değiştirme hesabı yapılmıştır. Rijitlik matrisinde U₁, U₂, U₂₆ deplasmanları mesnetler tarafından tutulduğu için değeri sıfır (0) olarak alınmıştır. Aşağıda verilen formül yardımı ile sistemin çözümünden global düğüm noktası deplasmanları bulunmuştur.

$$\underline{K} \times \underline{U} = \underline{P} \quad (6.2)$$

$\underline{K}$: Rijitlik matrisi

$\underline{U}$: Global düğüm noktaları yer değiştirmeleri

P : Sisteme etki eden kuvvet

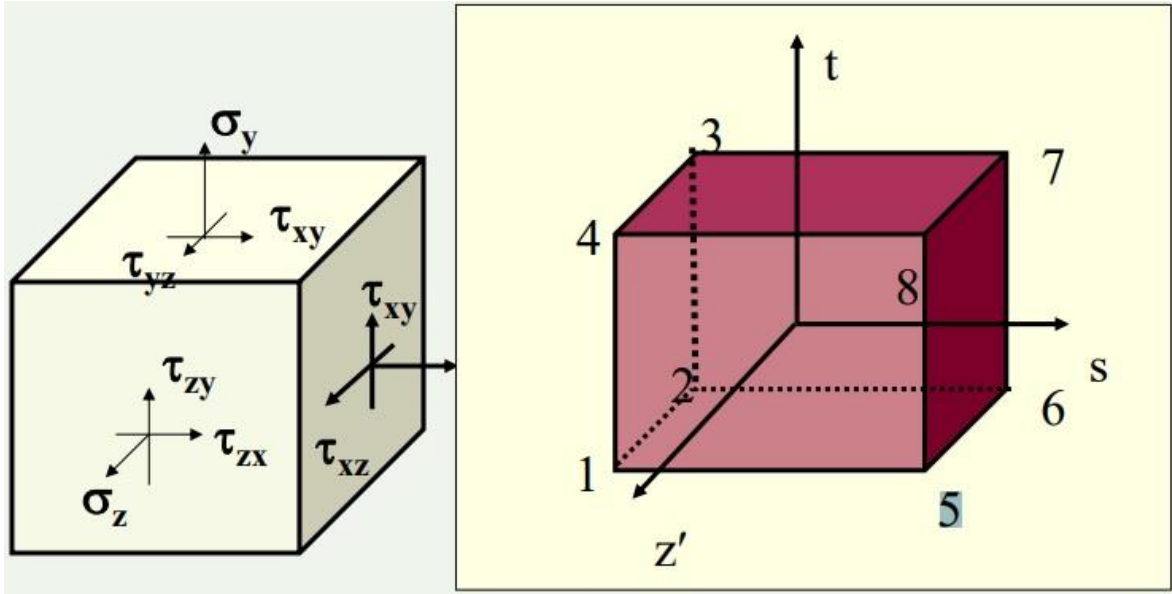
El ile matematiksel hesap sonucunda Şekil 6.11’de gösterildiği gibi yer değiştirme 0,039 m olarak tespit edilmiştir. İki farklı yöntemle yapılan hesapların birbiri ile örtüştüğü görülmüştür. Bilgisayar ortamında yapılan üç boyutlu modellemenin doğru şekilde yapıldığı taktirde sonuçların doğru olarak çıkacağı sonucuna varılmıştır. Fakat karmaşık yapıların el ile hesabını yapmak çok uzun zaman alacağı ve fazla bilinmeyen oluşacağından dolayı, tarihi yapıları makro modelleme yaparken el ile modellemek mümkün gözükmemektedir.

	U ₁	U ₂	U ₃	U ₄	U ₅	U ₆	U ₇	U ₈	U ₉	U ₁₀	U ₁₁	U ₁₂	U ₁₃	U ₁₄	U ₁₅	U ₁₆	U ₁₇	U ₁₈	U ₁₉	U ₂₀	U ₂₁	U ₂₂	U ₂₃	U ₂₄	U ₂₅	U ₂₆	U ₂₇	U ₁	P ₁	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0,013	-0,008	0,004	0,009	-0,01	0,008	-0,005	-0,014	0,012	0,001	-0,01	0,012	-0,001	-0,014	0,009	-0,003	-0,02	0,005	-0,005	-0,02	0,002	-0,005	-0,0229	0	-0,005	0	0	0
	0	0	-0,01	0,005	-0,003	-0,01	0,008	-0,006	-0,004	0,01	-0,008	-0,001	0,01	-0,01	1E-03	0,01	-0,007	0,002	0,011	-0	0,003	0,01	-0,002	0,0037	0,0162	0	0,004	0	0	0
	0	0	0,004	-0,003	0,002	0,004	-0	0,003	0,002	-0,005	0,005	6E-04	-0,01	0,005	-6E-04	-0,006	0,004	-0,001	-0,01	0,002	-0,002	-0,01	9E-04	-0,002	-0,0093	0	-0,002	0	0	0
	0	0	0,009	-0,006	0,004	0,009	-0,01	0,008	0,005	-0,012	0,011	0,001	-0,01	0,011	-0,001	-0,013	0,009	-0,003	-0,01	0,005	-0,005	-0,02	0,002	-0,005	-0,0214	0	-0,005	0	0	0
	0	0	-0,01	0,008	-0,005	-0,01	0,014	-0,01	-0,007	0,016	-0,015	-0,002	0,016	-0,01	0,002	0,017	-0,012	0,004	0,019	-0,01	0,006	0,02	-0,003	0,0066	0,0278	0	0,007	0	0	0
	0	0	0,008	-0,006	0,003	0,008	-0,01	0,007	0,006	-0,012	0,011	0,002	-0,01	0,011	-0,001	-0,012	0,009	-0,003	-0,01	0,005	-0,004	-0,02	0,002	-0,005	-0,0207	0	-0,005	0	0	0
	0	0	0,005	-0,004	0,002	0,005	-0,01	0,006	0,006	-0,009	0,009	0,002	-0,01	0,01	-8E-04	-0,01	0,008	-0,003	-0,01	0,004	-0,004	-0,01	0,002	-0,005	-0,0175	0	-0,005	0	0	0
	0	0	-0,01	0,01	-0,005	-0,01	0,016	-0,012	-0,009	0,02	-0,018	-0,003	0,02	-0,02	0,002	0,02	-0,015	0,005	0,024	-0,01	0,008	0,03	-0,004	0,0087	0,035	0	0,009	0	0	0
	0	0	0,012	-0,008	0,005	0,011	-0,01	0,011	0,009	-0,018	0,018	0,004	-0,02	0,019	-0,001	-0,019	0,016	-0,005	-0,02	0,009	-0,008	-0,03	0,004	-0,009	-0,0342	0	-0,009	0	0	0
	0	0	0,001	-0,001	6E-04	0,001	-0	0,002	0,002	-0,003	0,004	0,003	-0	0,006	5E-04	-0,004	0,005	-0,001	-0	0,003	-0,003	-0,01	0,001	-0,003	-0,0091	0	-0,003	0	0	0
	0	0	-0,01	0,01	-0,005	-0,01	0,016	-0,012	-0,009	0,02	-0,018	-0,004	0,02	-0,02	0,001	0,02	-0,016	0,005	0,024	-0,01	0,008	0,03	-0,004	0,009	0,0358	0	0,009	0	0	0
	0	0	0,012	-0,008	0,005	0,011	-0,01	0,011	0,01	-0,019	0,019	0,006	-0,02	0,022	-4E-16	-0,02	0,019	-0,006	-0,02	0,011	-0,01	-0,03	0,005	-0,011	-0,0388	0	-0,012	0	0	0
	0	0	-0	1E-03	-6E-04	-0	0,002	-0,001	-8E-04	0,002	-0,001	5E-04	0,001	-0	0,002	0,002	0,001	5E-04	0,002	0,001	-8E-04	0	6E-04	-0,001	6E-16	0	-0,001	0	0	0
	0	0	-0,01	0,01	-0,006	-0,01	0,017	-0,012	-0,01	0,02	-0,019	-0,004	0,02	-0,02	0,002	0,021	-0,016	0,006	0,025	-0,01	0,008	0,03	-0,004	0,009	0,0366	0	0,009	0	0	0
	0	0	0,009	-0,007	0,004	0,009	-0,01	0,009	0,008	-0,015	0,016	0,005	-0,02	0,019	0,001	-0,016	0,018	-0,004	-0,02	0,011	-0,009	-0,03	0,005	-0,011	-0,0342	0	-0,012	0	0	0
	0	0	-0	-0,002	-0,001	-0	0,004	-0,003	-0,003	0,005	-0,005	-0,001	0,005	-0,01	5E-04	0,006	-0,004	0,003	0,007	-0	0,002	0,01	-6E-04	0,0015	0,0091	0	0,001	0	0	0
	0	0	-0,02	0,011	-0,007	-0,01	0,019	-0,014	-0,012	0,024	-0,023	-0,005	0,024	-0,02	0,002	0,025	-0,02	0,007	0,03	-0,01	0,01	0,04	-0,005	0,0108	0,0438	0	0,011	0	0	0
	0	0	0,005	-0,004	0,002	0,005	-0,01	0,005	0,004	-0,009	0,009	0,003	-0,01	0,011	0,001	-0,009	0,011	-0,002	-0,01	0,007	-0,006	-0,01	0,003	-0,008	-0,0207	0	-0,008	0	0	0
	0	0	-0	-0,003	-0,002	-0	0,006	-0,004	-0,004	0,008	-0,008	-0,003	0,008	-0,01	-8E-04	0,008	-0,009	0,002	0,01	-0,01	0,006	0,01	-0,002	0,0055	0,0175	0	0,005	0	0	0
	0	0	-0,02	0,013	-0,008	-0,02	0,023	-0,017	-0,014	0,029	-0,028	-0,007	0,029	-0,03	1E-03	0,03	-0,026	0,008	0,036	-0,01	0,014	0,04	-0,006	0,0151	0,0555	0	0,015	0	0	0
	0	0	0,002	-0,002	9E-04	0,002	-0	0,002	0,002	-0,004	0,004	0,001	-0	0,005	6E-04	-0,004	0,005	-6E-04	-0	0,003	-0,002	-0,01	0,002	-0,004	-0,0093	0	-0,004	0	0	0
	0	0	-0,01	0,004	-0,002	-0,01	0,007	-0,005	-0,005	0,009	-0,009	-0,003	0,009	-0,01	-0,001	0,009	-0,011	0,001	0,011	-0,01	0,005	0,02	-0,004	0,0089	0,0214	0	0,009	0	0	0
	0	0	-0,02	0,016	-0,009	-0,02	0,028	-0,021	-0,017	0,035	-0,034	-0,009	0,036	-0,04	7E-16	0,037	-0,034	0,009	0,044	-0,02	0,017	0,06	-0,009	0,0214	0,0716	0	0,023	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	-0,01	0,004	-0,002	-0,01	0,007	-0,005	-0,005	0,009	-0,009	-0,003	0,009	-0,01	-0,001	0,009	-0,012	0,001	0,011	-0,01	0,005	0,02	-0,004	0,0088	0,0229	0	0,013	0	0	0
	$U = K_0^{-1} \times P \implies U = (-0,03883) \times (-1 \text{ kN}) = 0,039 \text{ m (Yer Değiştirme Gerçekleşmiştir.)}$																											U ₂₇	P ₂₇	0

Şekil 6.11. Örnek kemerin yer değiştirme hesabı

6.6. Katı (Solid) Eleman Tanımı

Katı (solid) elemanlar, üç boyutlu yapısal sistemleri modellemek için kullanılan Şekil 6.12.’de gösterildiği gibi sekiz düğümlü elemanlardır. Katı (solid) elemanlar tüm köşelerinde bir bağlantıya ve altı dörtgen yüze sahiptirler. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analiz çalışmalarında düğüm noktalarında bağlanarak farklı parametrelere sahip malzemelerin analizlerin yapılmasında kullanılan birim elemanlardır. Elemana yer çekimi yükleri, yüzey basınçları, termal yükler ve dinamik yükler atanabilir ve düğüm noktalarında bağlı elemanların ebatlarına göre sonuçların doğruluk payı artarak işlem yapılmasına olanak tanır.



Şekil 6.12. Solid elemana örnek (Fahjan, 2009)

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. Genel Bilgiler İznik Yeşil Camii

Bursa ili, İznik ilçesi, 30L-III c pafta 165 ada, 26 Parselde, Yeşil Cami Mahallesi'nde, İznik surları dâhilinde Lefke ve İstanbul kapıları arasında, Lefke Kapı'nın kuzey batısında kalmaktadır. Aşağıdaki Şekil 7.1'de, gösterildiği 1 numara İstanbul Kapı Surlarını, 2 numara Lefke Kapı Surlarını, 3 numaraları bölge ise çalışmalarımı yapmış olduğum Yeşil Cami ve çevresini göstermektedir.



Şekil 7.1. Günümüz İznik haritası (1-İstanbul Kapı surları, 2- Lefke Kapı surları, 3-Yeşil Camii ve çevresi)

İznik tarih boyunca çok önemli uygarlıklara ev sahipliği yapmış, tarih boyunca Anadolu'nun en büyük merkezlerinden biri olmuştur. Kent 30 yıl süren kuşatma sonucunda Orhan Gazi tarafından teslim alınarak Osmanlı Devletine bağlanmıştır. Orhan Bey'in kenti teslim almasından sonra merkez olarak kullanılmaya başlanılmış, şehrin imar ve iskân faaliyetlerine büyük önem verilmiş, bununla beraber Orhan Medresesi ve Süleyman Paşa Medreseleri gibi önemli yapılar İznik kentine kazandırılmıştır. Orhan Gazi dönemi sonrasında İznik'in en parlak dönemi İznik Kadılığı'na getirilen ve şehrin imar faaliyetlerine büyük katkısı bulunan Çandarlı Kara Halil zamanında olmuştur. Çandarlı ailesi ayrıca İznik'te Yeşil Cami'yi inşa ettirmiştir. Caminin iki adet kitabesi bulunmakta; birincisinde Cendereli Ali bin Halil'in izniyle, Hicri Takvime göre 780, Miladi Takvime göre ise 1379-80 yıllarında inşa ve imar edildiği bilgisi vardır. İkinci kitabede ise Hayreddin Paşa'nın emri ile inşaatın Hicri Takvime göre 794 yılı, Miladi Takvime göre ise 1391-92 yıllarında arasında tamamlandığı belirtilmektedir.

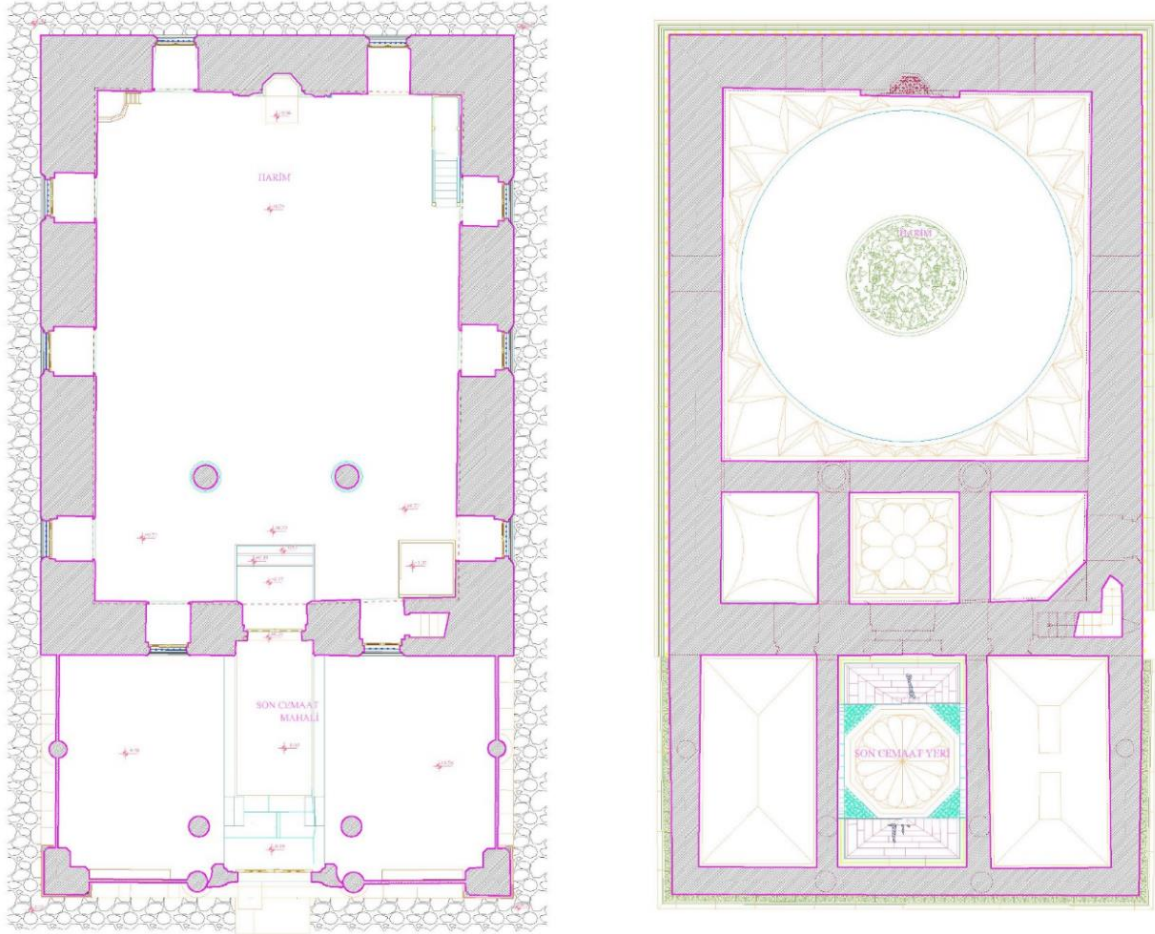
7.1.1. Mimari ve geometrik özellikleri

Kuzey – güney doğrultusunda uzanan dikdörtgen planlı, tek kubbe ile örtülü ana ibadet mekânı ve kuzey cepheye yerleştirilmiş son cemaat yerinden oluşan yapı, “tek kubbeli cami” plan tipindedir.

Kuzey güney yönünde bir akış sağlayan yapının, kuzeyine yerleştirilmiş, doğu batı doğrultusunda derinlemesine dikdörtgen planlı olan son cemaat yeri yanlara doğru ikişer kemerle açılan üç gözlü şekilde tasarlanmıştır. Kemerler köşelerde, “L” profilli payelerle ve bunların arasına, eksene simetrik olarak yerleştirilmiş iki sütuna oturmaktadır. Bu sütunların hemen arkasına birer sütun daha yerleştirilerek, ikiz sütun uygulaması yapılmıştır. Son cemaat mahallî orta birimi yandakilere göre daha geniş ve büyük tutulmuş, üzeri tromplarla geçilen, kubbe ile iki yan birimin üzeri ise aynalı tonozla örtülmüştür. Son cemaat yerinin yanları, yapının doğu ve batı cephelerinde duvara ve köşedeki “L” profilli paye arasına yerleştirilmiş bir sütuna oturan karşılıklı iki kemerle dışa açık olarak tasarlanmıştır.

Yapının esas mekânına giriş kuzey cepheden, son cemaat mahalinin ortasından, eksende yer alan taç kapıdan sağlanmaktadır. Kapının iki yanında birer pencere bulunmaktadır. Yapının giriş bölümünde, yanlarda duvara, ortada ise iki sütuna oturacak

şekilde tasarlanmış üç gözlü son cemaat mahalini iç mekânda da bir tekrar uygulaması vardır. Bu üçlü uygulamanın orta bölümünün üzeri tromplarla geçilen, sekiz dilimli, üzerinde sağır bir feneri olan kubbe ile yan birimleri ise aynalı tonozlarla örtülmüştür. Bu üçlü uygulamadan sonra, kare planlı harime geçilir. Harim prizmatik Türk üçgenleri üzerinde, yüksek kasmağa oturan kubbeye örtülüdür (Şekil 7.2).



Şekil 7.2. İznik Yeşil Cami zemin kat ve tavan planı

Yapının Yeşil Camii olarak anılması esas neden minaresinin kaidesinden başlayarak kurşun külahına kadar tüm alanı kaplayan ağırlıklı olarak turkuaz çiniler ve sırlı tuğlalar ile kaplanmış olmasındandır. Yapılan restorasyon çalışmalarında sonucunda oluşturulan envantere göre minare 12.000 kadar çini ve sırlı tuğla malzeme mevcuttur.

Yapı, dıştan dışta 26,20 x 14,25 metre ebatlarına sahiptir. Duvar kalınlıkları son ana beden duvarlarında 1,70 m ile 1,80 m arasında değişen ölçülere sahiptir ve tamamen mermer

olarak imal edilmiştir. Tek kubbeli olan yapı, dıştan dışa 13,50 metre ebadına sahip bir açıklıktan oluşmaktadır. Yapıya bütünleşik olarak imal edilmiş bir minareye sahiptir. Son cemaat duvar dış kotları 9,55 metreye ulaşırken, ana mahfil kısmında dış beden duvarları 8,50 kotuna ulaşmaktadır. Ana kubbe üst kotu ise 18,30 metre olarak gözükmetedir.

7.1.2. Taşıyıcı sistem ve malzeme özellikleri

Yeşil Camii plan olarak son cemaat-giriş-mihrap aksına dik bir şekilde simetrik olarak yığma kâgir taşıyıcı sistemi oluşturarak inşa edilmiş bir anıt yapıdır. Kalın kesme taş duvarlar, yekpare granit sütunlar, kesme taş kemerler, tuğla malzemelerden imal edilmiş tonoz, geçiş elemanı olan Türk üçgenleri ve kubbelerden oluşmaktadır (Şekil 7.2). Kemer elemanlar arasında ahşap malzemedan gergi elemanlar yer almaktadır.

Yapının ana inşa malzemesine bakıldığından yekpare sütunların granit olarak tek parçadan oluşturulduğu, ana taşıyıcı beden duvarlarının ise sarımtırak kısmen küfeki kesme taşlar ile yoğunlukta kesme granit taşların kullanılarak yapıldığı görülmektedir (Şekil 7.3).



Şekil 7.3. İznik Yeşil Camii günümüz ve 1960'lı yıllar

7.1.3. Yapının genel durumu

Camii genel olarak, günümüze gelen süreçte, iyi korunmuş ve genel mimari özellikleri kaybetmeden gelmiştir. Özgün hali genel olarak korunmuştur. Cami etrafında bulunan alanlar da genel olarak yapılaşmadan uzak kaldığı için cami ana beden duvarlarında ciddi deformasyonlar gözlenmemiştir. Kuzey- güney doğrultusu ile dikdörtgen plana sahip camide son cemaatten mahallinden üç gözlü giriş mekânına geçildiğinde iki adet granit sütun eleman bulunmaktadır. Batı kısmında yer alan sütunda üzerine gelen yüklerin de etkisi ile çatlaklar ve malzeme kayıpları gözlenmiştir. Aynı şekilde sütun başlığı olarak kullanılan granit elemanlarda da malzeme kayıpları net olarak gözlenmektedir. Cami giriş bölümünün batı kısmında kalan alanda minare bulunmaktadır. Tamamı simetrik olan caminin batı kısmında yer alan minarenin düşey yükleri etkisi sonucunda olduğu düşünülen malzemelerdeki deformasyonlar gözle görülebilmektedir.



Şekil 7.4. Cami giriş kısmı batı cephesi – deformasyon oluşmuş sütun ve alan

Şekil 7.4 ‘te gösterilen alanda bulunan sütunda oluşan deformasyonları gidermek amacı ile demir lama malzemeler ile kısmi olarak sarılarak, sütunun daha fazla deformasyon

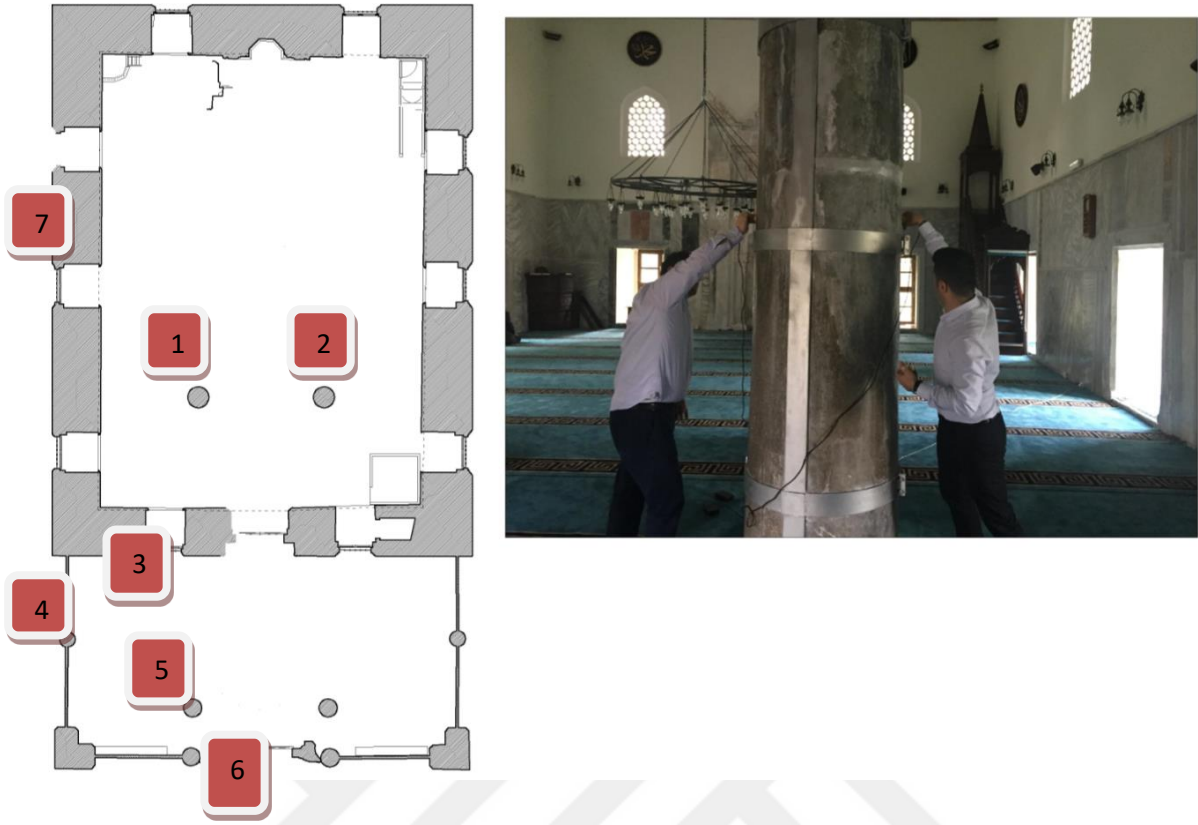
almasının önüne kısmen geçilmiştir. 1 ve 2 numaralı bölümlerde yer alan başlıklarda ise malzeme kayıpları net bir şekilde izlenebilmektedir. Yapının diğer bölümlerinde bulunan malzemeler genel olarak iyi ve korunmuş durumdadır. Farklı oturmalarından olduğu düşünülen bazı kemer kilit taşlarında ayrılmaların gözlemlense dahi yapı stabilitesini korumaktadır.

7.2. Yerinde ve Laboratuvarda Yapılan Testler

Caminin modellenmesinden sonra yapılacak statik ve dinamik analizlerin doğru sonuç vermesi için, cami içerisinde ultrases test yöntemi ile çalışmalar yapılmıştır. Yapıdan daha önce ayrılmış olan fakat restorasyon çalışması sırasında toplanarak muhafaza altına alınan yapı beden duvarlarına ait malzemeler kullanılarak da birim hacim ağırlıklarının belirlenmesi için laboratuvar ortamında testler yapılmıştır. Ayrıca yapıya yakın parsellerde yapılan jeolojik çalışmalarla zemin parametreleri belirlenmiştir.

7.2.1. Yerinde yapılan ultrases testleri

Tarihi yapılarda tahribatsız olarak yapılan testlerden ultrases deneyleri yüksek frekansları ses dalgaları üreten alet kullanımı ile ses geçiş süreleri belirlenebilir, çatlak derinliği ve yön tahmini yapılabilir.



Şekil 7.5. Camii içerisinde yapılan test bölümleri

Şekil 7.5'te belirtilen numaralı bölgelerde bulunan beden duvarı ve sütun elemanların ultrases testleri yapılmıştır. 1-2-4-5-6 numaralı elemanlar son cemaat ve cami giriş kısmında yer alan sütunlar, 3-7 numaralı gösterilen alanlar ise yapı beden duvarlarında yapılan test alanlarıdır. Tahribatsız olarak yerine yapıma uygun olan testler sonucunda ses geçiş süreleri belirlenmiştir.

Ultrases testlerinde ses geçiş sürelerinin belirlemek amacı ile belli uzunluklar arasında probler yerleştirilerek ölçümler yapılmıştır. Malzemenin durumuna göre ses geçiş süreleri farklılıklar göstermiş, deformasyon olmayan ve çatlak olmadığı düşünülen malzemelerin ses geçiş sürelerinin daha az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca numune test uzunlukları artırdıkça ses geçiş hızlarının süresinin arttığı tespit edilmiştir. Çizelge 7.1'de yerinde yapılan testler sonucunda bulunan değerler gösterilmiştir.

Çizelge 7.1. Yerinde yapılan ultrases metoduna göre ses geçiş süresi

	Numune Yeri	Numune Sayısı	Boy (L- mm)	Ses Geçiş Süresi (μ sn)
Numune - 1	Cami Giriş Doğu Cephe Sütun- 1	1	340,00	62,80
		2	200,00	39,10
		3	800,00	209,30
		4	780,00	206,10
		5	800,00	177,00
		6	800,00	177,40
Numune - 2	Cami Giriş Batı Cephe Sütun- 2	1	340,00	75,50
		2	200,00	63,30
		3	740,00	302,60
		4	730,00	365,00
		5	740,00	174,40
		6	740,00	215,00
		7	750,00	304,70
Numune-3	Son Cemaat Dış Cephe Ana Beden Duvarı	1	200,00	32,60
		2	200,00	51,50
		3	200,00	56,00
		4	200,00	59,40
		5	200,00	53,50
		6	200,00	33,90
Numune-4	Camii Son Cemaat Doğu Sütun -1	1	200,00	32,70
		2	300,00	42,60
		3	500,00	83,10
Numune-5	Camii Son Cemaat Sütun -2	1	200,00	38,10
		2	330,00	57,10
		3	520,00	93,30
Numune-6	Camii Son Cemaat Sütun -2	1	200,00	31,50
		2	310,00	48,20
		3	600,00	100,40
Numune-7	Cami Doğu Cephe Ana Beden Duvarı	1	200,00	34,30
		2	200,00	40,20
		3	200,00	38,60
		4	200,00	31,90
		5	200,00	52,00
		6	200,00	45,00

Bu yöntem ile camii bünyesinde yapılan testler sonucunda, direk olarak net sonuca varılamayacak olsa da hangi bölümde malzemenin sıkıntılı olduğu, boşlukların ve deformasyonların hangi bölümde etkili olduğu dair fikir elde edilebilir.

7.2.2. Zemin analizleri

Bursa İli, İznik İlçesinde yer alan İznik Yeşil Camii genel zemin özelliklerini incelemek için çevresinde yapılan zemin etüt çalışmalarına bakıldığında 15 metrelik sondaj kuyusunun sonuçlarına göre 6 metrelik derinliğe kadar az çakıllı kumlu kil tabakası, 6 ile 15 metre arasında ise kumlu kil tabakalarının tespit edildiği Çizelge 7.2’de gösterilmiştir. Zemin etüdü çalışmalarında 3,00-4,00 metre arasında yer altı suyuna rastlanılmıştır.

Çizelge 7.2. Zemin etüt çalışmalarına göre zemin profili

Kuyu	Derinlik (metre)	Litoloji	N _{ort}
1	0,00-0,80	Bitkisel Toprak	-
	0,80-6,00	Az Çakıllı Kumlu Kil	25
	6,00-15,00	Kumlu Kil	21

Sondaj kuyularının muhtelif kotlarından alınan 3 adet örselenmiş (SPT) numune üzerinde laboratuvarında standart zemin deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde zemin profiline göre zemin kıvamlılık indeksi belirlenmiştir. Çizelge 7.3’te açılan kuyu içerisinde değerlere göre kıvam indisi değeri ve sınıfı gösterilmiştir.

Çizelge 7.3. Kıvam indisi değeri

Kuyu, Numune No	Derinlik (m.)	Dane Dağılımı (%)		Atterberg Limitler (%)			Kıvami İndisi I _c	Su İçeriği W(n) (%)	SINIF
		+10 [#]	-200 [#]	W _L	W _P	I _P			
		kalan	geçen	LL	PL	PI			
SK-1, SPT-2	3,00-3,45	3	70	41	20	21	0,952	21,00	CI
SK-1, SPT-	6,00-6,45	6	46	23	15	8	0,5125	18,90	SC
SK-1, SPT- 6	9,00-9,45	6	45	22	14	8	0,5125	17,90	SC

Hesaplanan kıvam indisi değerine göre sahada bulunan killi birimlerin katı- orta katı kıvamda olduğu tespit edilmiştir. Bununla beraber sıvılaşma durumu değerlendirildiğinde, yer altı suyu altında kohezif malzeme özelliğindeki killi birimlerin yer alması, bununla beraber sıvılaşmanın da suya doymun gevşekten orta sıkıya kohezyonsuz zeminler için non-plastik siltli zeminlerde ortaya çıktığı bilinmektedir. Yer altı su seviyesi altında ince daneli birimler incelendiğinde sıvılaşma riskinin olmadığı düşünülmektedir.

Yeşil Cami ve çevresinde yapılan zemin etüt çalışmalarında genel olarak temellerin gömme durumları da dikkate alınarak Terzaghi taşıma gücü hesabına göre hesap yapıldığında taşıma gücü ortalama olarak $Q_{em} = 1,20 \text{ kg/cm}^2 < 120 \text{ kN/m}^2 >$ olarak belirlenmiştir ve zemin sınıfı da Z3 / C3 olarak tespit edilmiştir.

7.2.3. Birim hacim ağırlık deneyi

Yeşil Cami’de 2015-2016 yılları arasında yapılan restorasyon çalışmaları sırasında bulunan fakat yeri tespit edilemeyerek cami içerisinde muhafaza altına alınan ana beden duvarı ve sütun elemanlara ait granit elemanların laboratuvar ortamında birim hacim ağırlık testleri yapılarak ortalama değeri hesaplanmıştır (Çizelge 7.4).

Çizelge 7.4. Ortalama birim hacim ağırlığı tespiti

Alınan Numune	Etüv Kuru Ağırlığı (Gram) G_k	Suya Doymuş Ağırlık Gram G_d	Su İçindeki Ağırlık Gram G_{ds}	Kütlece Su Emme Oranı % $S_k = (G_d - G_k) / G_k$	Hacimce Su Emme Oranı % $S_h = (G_d - G_k) / (G_d - G_{ds})$	Birim Hacim Ağırlığı (g/cm ³) $\beta_h = G_k / (G_d - G_{ds})$
1	744,30	746,67	471,70	0,32	0,86	2,71
2	327,37	328	206,60	0,19	0,52	2,70
3	182,38	183,38	114,08	0,55	1,44	2,63
4	34,58	34,80	21,70	0,64	1,68	2,64
Ortalama						2,67

7.2.4. Yapı elemanlarının elastisite modülü tayini

Yerinde yapılan ultrases testleri sonucunda belirli boy aralıklarında belirlenen ses geçiş süresi (μsn) ile laboratuvar ortamında birim ağırlık değerlerinin tespit edilmesinden sonra literatürde bulunan ampirik formüller yardımı ile yapının test edilen bölgesine ait ortalama elastisite modülü tayini yapılmıştır. Ultrases teorisi ve birim hacim ağırlıkları tespit edilmiş yapı elemanlarının elastisite modülünü belirlerken kullanılan formüller aşağıda verilmiştir (Bağbancı, 2009 ve itll.colorado.edu, 2018)

$$E = \left(\frac{L}{T}\right)^2 \times \rho \times 10^3 \quad (7.1)$$

E : Elastisite Modülü

L : Ses Geçiş Süresi Hesabında Probların Arasındaki Mesafe

T : Ses Geçiş Süresi

P : Ortalama Birim Hacim Ağırlığı

$$E = Cl^2 \times Q \times (1 + \gamma) \times (1 - 2\gamma) / (1 - \gamma) \quad (7.2)$$

E : Elastisite Modülü

γ : Poisson Oranı (0,15—0,20)

Cl : Ses Geçiş Hızı

P : Ortalama Birim Hacim Ağırlığı

Elastisite Modülünün belirlenmesi amacı ile test yapılan bölümlerde yapılan hesaplama işlemleri literatürde kullanılan iki formül için Çizelge 7.5'te gösterilmiştir.

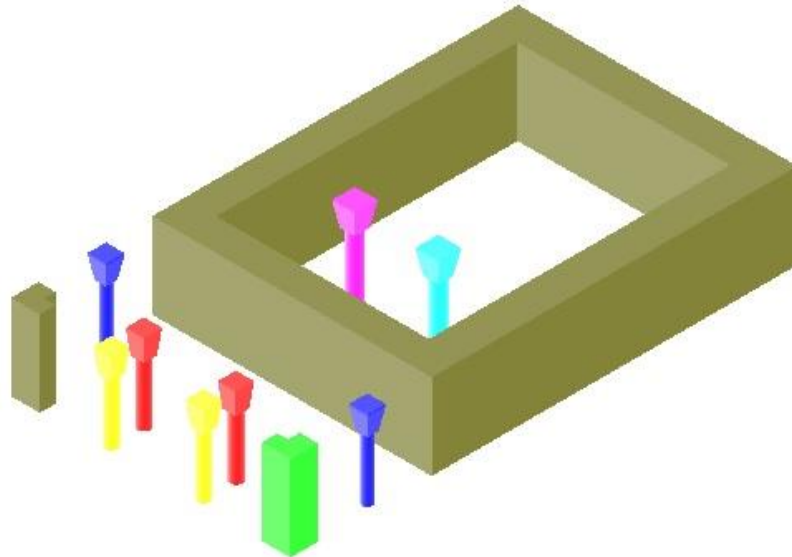
Çizelge 7.5. Elastisite modüllerinin belirlenmesi

Numune Yeri	Test Sayısı	Boy (L) (mm)	Ses Geçiş Süresi (µsn)	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Formül -1	Formül-2	Ortalama Statik Elastisite Modülü (N/mm ²)	Statik Elastisite Modülü (kN/m ²)
					Statik Elastisite Modülü (N/mm ²)	Statik Elastisite Modülü (N/mm ²)		
Cami Giriş Doğu Cephe Sütun- 1	1	340,00	62,80	2,67	78.261,80	72.077,20	51.300,19	51*10 ⁶
	2	200,00	39,10	2,67	69.858,26	64.337,75		
	3	800,00	209,30	2,67	39.007,92	35.925,34		
	4	780,00	206,10	2,67	38.242,34	35.220,26		
	5	800,00	177,00	2,67	54.543,71	50.233,43		
	6	800,00	177,40	2,67	54.298,02	50.007,15		
Cami Giriş Batı Cephe Sütun- 2	1	340,00	75,50	2,67	54.147,10	49.868,16	26.751,20	26*10 ⁶
	2	200,00	63,30	2,67	26.654,09	24.547,77		
	3	740,00	302,60	2,67	15.967,50	14.705,68		
	4	730,00	365,00	2,67	10.680,00	9.836,02		
	5	740,00	174,40	2,67	48.070,84	44.272,07		
	6	740,00	215,00	2,67	31.629,90	29.130,36		
	7	750,00	304,70	2,67	16.176,66	14.898,31		
Son Cemaat Dış Cephe Ana Beden Duvarı	1	200,00	32,60	2,67	100.493,06	92.551,65	51.472,19	51*10 ⁶
	2	200,00	51,50	2,67	40.267,70	37.085,57		
	3	200,00	56,00	2,67	34.056,12	31.364,86		
	4	200,00	59,40	2,67	30.269,02	27.877,03		
	5	200,00	53,50	2,67	37.313,30	34.364,64		
	6	200,00	33,90	2,67	92.933,41	85.589,40		
Camii Son Cemaat Doğu Sütun -1	1	200,00	32,70	2,67	99.879,36	91.986,45	100.986,24	100*10 ⁶
	2	300,00	42,60	2,67	132.414,2	121.950,25		
	3	500,00	83,10	2,67	96.660,54	89.022,00		
Camii Son Cemaat Sütun -2	1	200,00	38,10	2,67	73.573,48	67.759,38	75.425,32	75*10 ⁶
	2	330,00	57,10	2,67	89.179,89	82.132,50		
	3	520,00	93,30	2,67	82.938,21	76.384,07		
Camii Son Cemaat Sütun -3	1	200,00	31,50	2,67	107.634,1	99.128,44	96.221,51	96*10 ⁶
	2	310,00	48,20	2,67	110.443,6	101.715,87		
	3	600,00	100,40	2,67	95.355,63	87.820,21		
Cami Doğu Cephe Ana Beden Duvarı	1	200,00	34,30	2,67	90.778,50	83.604,79	65.348,64	65*10 ⁶
	2	200,00	40,20	2,67	66.087,47	60.864,95		
	3	200,00	38,60	2,67	71.679,78	66.015,33		
	4	200,00	31,90	2,67	104.951,8	96.658,05		
	5	200,00	52,00	2,67	39.497,04	36.375,81		
	6	200,00	45,00	2,67	52.740,74	48.572,94		

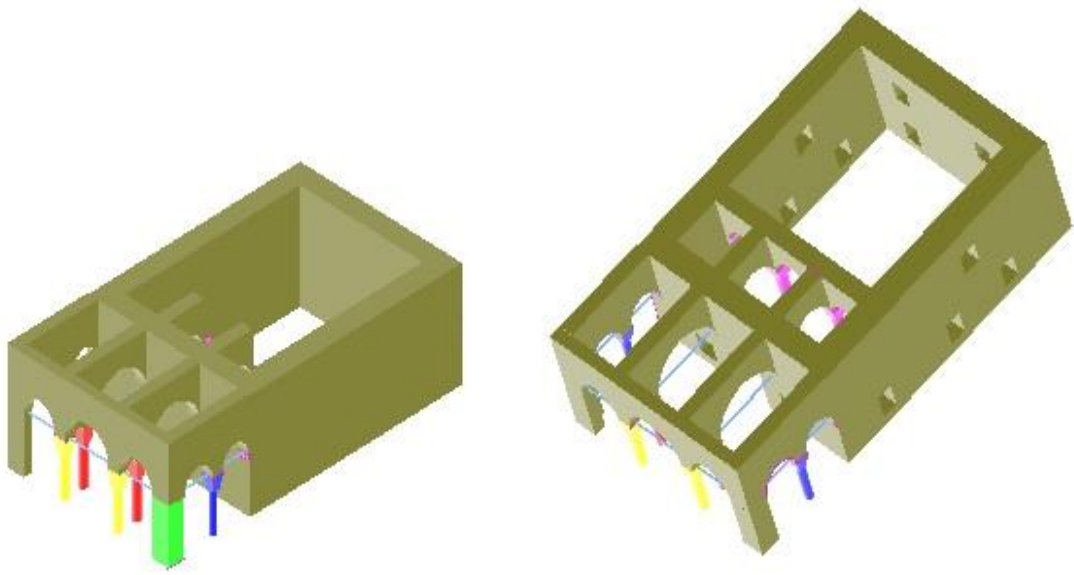
7.3. Yapının Sonlu Elemanlar Modeli ve Analiz Çalışmaları

7.3.1. İznik Yeşil Caminin üç boyutlu modelinin oluşturulması

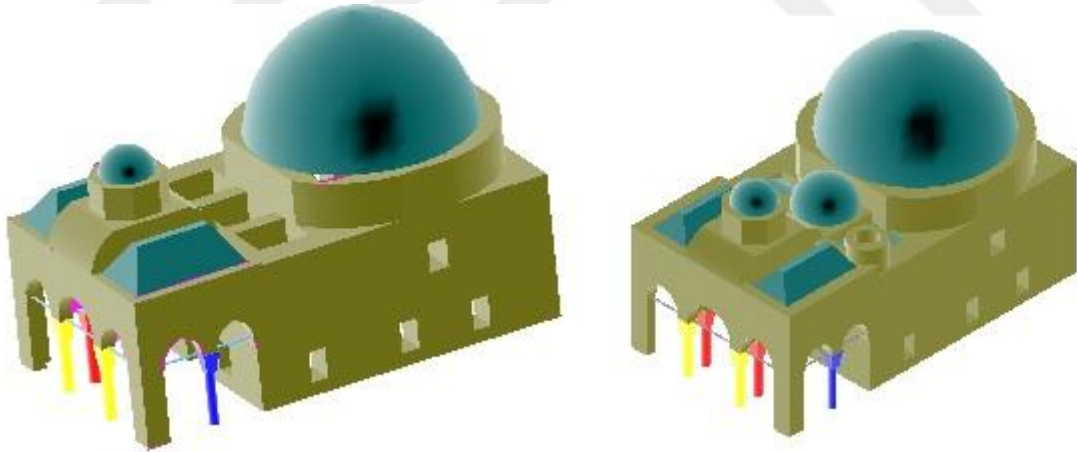
Yapının sonlu elemanlar modeli oluşturulması için üç boyutlu yapı tasarımı yapılan Key Creator yazılım programını kullanılmıştır. Yapının üç boyutlu modeli için Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından yaptırılmış ve Bursa Büyükşehir Belediyesine teslim edilmiş olan rölöve çizimleri ile restorasyon ve restitüsyon projelerinde verilmiş olan plan, kesit, görünüş ve detay paftalarından yararlanılarak ölçülendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak yapının sütunları ile beden duvarlarının modellenmesi yapılmıştır. Genel olarak beden duvarlarının modellenmesi yapıldıktan sonra yapı üzerinde bulunan pencere, kapı gibi boşluklar oluşturulmuştur. Yapının son cemaat kısmında sütunlar ve duvarlar arasında kalan hatıl elemanların modellenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Son kısımda ise yapıda bulunan kubbe, tonoz gibi örtü elemanı olarak kullanılan yapı elemanlarının modellenmesi yapılarak yapının üç boyutlu olarak tasarlanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Modelin idealleştirilmesi için rölöve çizimleri ile restorasyon projesine sadık kalınarak, CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) modelin statik ve dinamik analiz çalışmalarında kullanılması için hazır hale getirilmiştir. Şekil 7.6'dan başlayarak Şekil 7.10'a kadar yapının üç boyutlu modellemesinin evreleri gösterilmiştir.



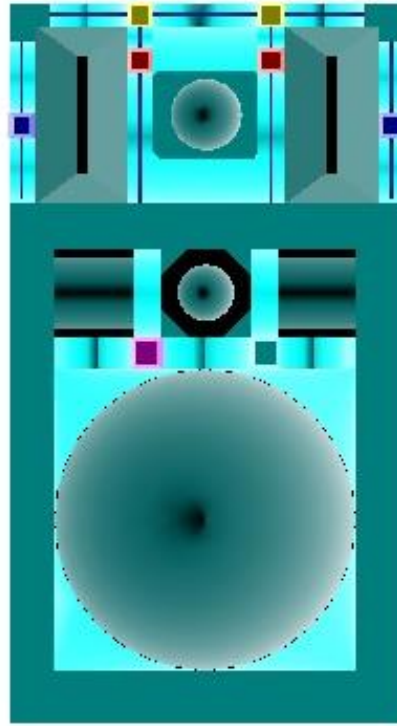
Şekil 7.6. Yapının üç boyutlu modeli – Sütun ile beden duvarlarının modellenmesi



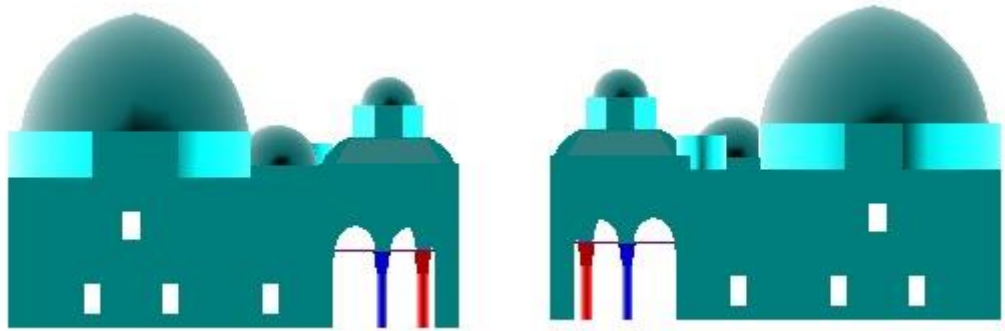
Şekil 7.7. a) Yapının beden duvarı- Sütun ve kemer elemanların modellenmesi b) Yapının pencere ve kapı boşluklarının açılması ve tüm kemer elemanların modellenmesi



Şekil 7.8. a) Son cemaat kubbe, tonoz ile ana mahfil kubbe modellenmesi b) Yapının tüm elemanlarının modellenmesi



Şekil 7.9. Yapının alttan görünüşü, yapı elemanlarının modelleri



Şekil 7.10. a) Yapının doğu cephesinden görünüşü b) Yapının batı cephesinden görünüşü

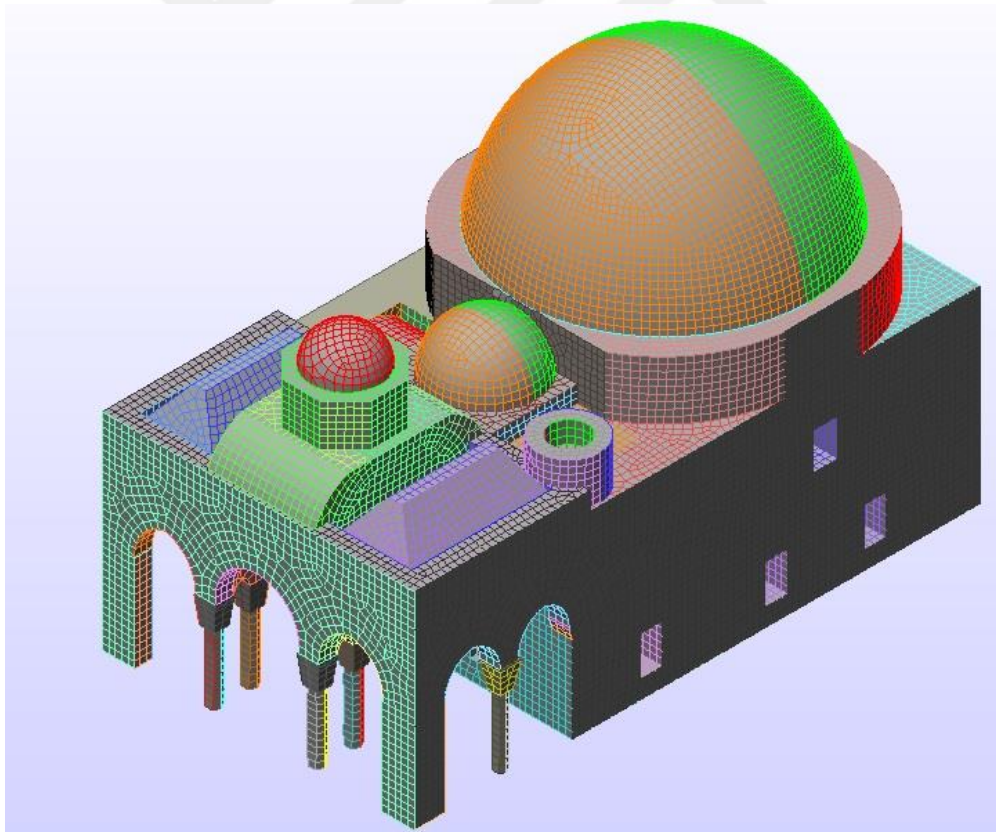
7.3.2. İznik Yeşil Caminin sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

Yapının sonlu elemanlar modelinin oluşturulması ve analizlerin detaylı olarak yapılabilmesi amacı ile cami giriş kısmı sütunları, son cemaat sütunları, yapı ana beden duvarları, ahşap gergiler ile kubbe, tonoz yapı elemanları ayrı ayrı olarak modellenmiştir. Modelde bulunan elemanlar sekiz ana parçaya ayrılarak tanımlamalar yapılmıştır. Modelleme için sonlu eleman ağı 30 cm olarak belirlenmiştir. Analiz sonuçlarının

doğruluğu için sonlu eleman ağlarının ölçülendirilmesi ile doğru orantılı olarak değiştiği düşünüldüğünde, sonlu eleman ağ ebatlarının küçültülmesi yapılacak analizde daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır.

Yapıdaki tüm elemanlar katı (solid) eleman olarak tasarlanmıştır. Sonlu elemanların ağ oluşturulması ile yapıda 117709 adet solid eleman, 38018 adet katı (solid) eleman ağ yüzeyi ve 101420 adet düğüm noktası (node) oluşmuştur. Analizin yapılması için oluşturulan sonlu elemanlar modelinin detaylı olarak hazırlandığı görülebilir (Şekil 7.11).

Sonlu elemanlar modelinin oluşturularak modellenmesi ve analiz çalışmalarının yapılması için çok sayıda yazılım programı bulunmaktadır. Bu çalışma için ALGOR sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak analiz çalışmaları yapılmıştır. ALGOR programı lineer, non-lineer gibi analizleri yaparak çözümleme yapabilmektedir.



Şekil 7.11. Yapının sonlu elemanlar modelinin perspektif görünüşü

7.3.3. İznik Yeşil Caminin düşey yükler altında statik analizi

Yapının düşey yükler altında statik analizinin yapılması, yapının düşey yükleri altında oluşabilecek gerilme yığılmaları ve dağılımını, yapıda oluşabilecek çatlaklar ile düzlem dışı hareketler ve yer değiştirmeleri görmek açısından oldukça önemlidir. Yapının üzerinde bulunan ve devamlı taşımak zorunda olduğu yükler sırasındaki davranış şeklinin anlaşılması sağlamaktadır. Yapıya etkiyebilecek diğer yüklerden hariç olarak yapılan analizde, düşey yüklerin yapıda nasıl bir deformasyon oluşturma ihtimali olduğu görülüp, uygun bir teknik ile önlem alınması açısından önemlidir. Yapının kendi zati yükü, yapıda bulunan hareketli yükler ve mevsimsel olarak etkiyen kar yükleri düşey yükler olarak tanımlanabilir.

Yeşil Cami'nin günümüzdeki durumu incelendiğinde kuzey-batı bölümünde bulunan minarede düşey yüklerin etkisiyle bir takım deformasyonların oluştuğu düşünülmektedir. Yapılacak analizlerde bu kısımların incelenmesi düşünülmüştür.

Bu yapı için düşey yükler altında iki adet analiz yapılması düşünülmüştür. Birinci analizde malzeme özelliklerinin malzeme cinsine göre aynı olarak kabul edilmesi, ikinci yapılacak düşey yükler altındaki analizde ise hasar oluşmuş bölge ve diğer yapı elemanları için yapılarda yapılan tahribatsız testler sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda bir analiz yapılacaktır. Birinci analiz için Çizelge 7.6'da verilen değerler kullanılmış, ikinci yapılacak analiz için ise Çizelge 7.7'de verilen değerler kullanılmıştır.

Çizelge 7.6. Düşey yükler altında analiz parametreleri (Birinci analiz)

	Taş	Tuğla
Basınç Mukavemeti (MPa)	50 MPa	20 MPa
Eğilmede Çekme Mukavemeti (MPa)	5 MPa	3,9 MPa
Elastisite Modülü (N/m ²)	50*10 ⁹ N/m ²	5*10 ⁹ N/m ²
Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)	2607 kg/m ³	1600 Kg/m ³
Kayma Modülü (N/m ²)	21* 10 ⁹ N/m ²	2,1* 10 ⁹ N/m ²

Çizelge 7.6'da verilen değerlerden taş için basınç mukavemeti ile eğilmede bulunan çekme mukavemeti değeri Çizelge 3.2'de belirtilen değerlerden alınmıştır. Elastisite modülü ise yerinde yapılan testler sonucunda oluşan ortalama değere yakın alınmıştır. Birim hacim

ağırlık değerleri test edilmiş, kayma modülü de 7.3 ile verilen formülden yararlanılarak hesaplanmıştır. Tuğla için literatür değerlerinin ortalaması kullanılmıştır.

$$G = E / (2*(1+\nu)) \quad (7.3)$$

G : Kayma Modülü

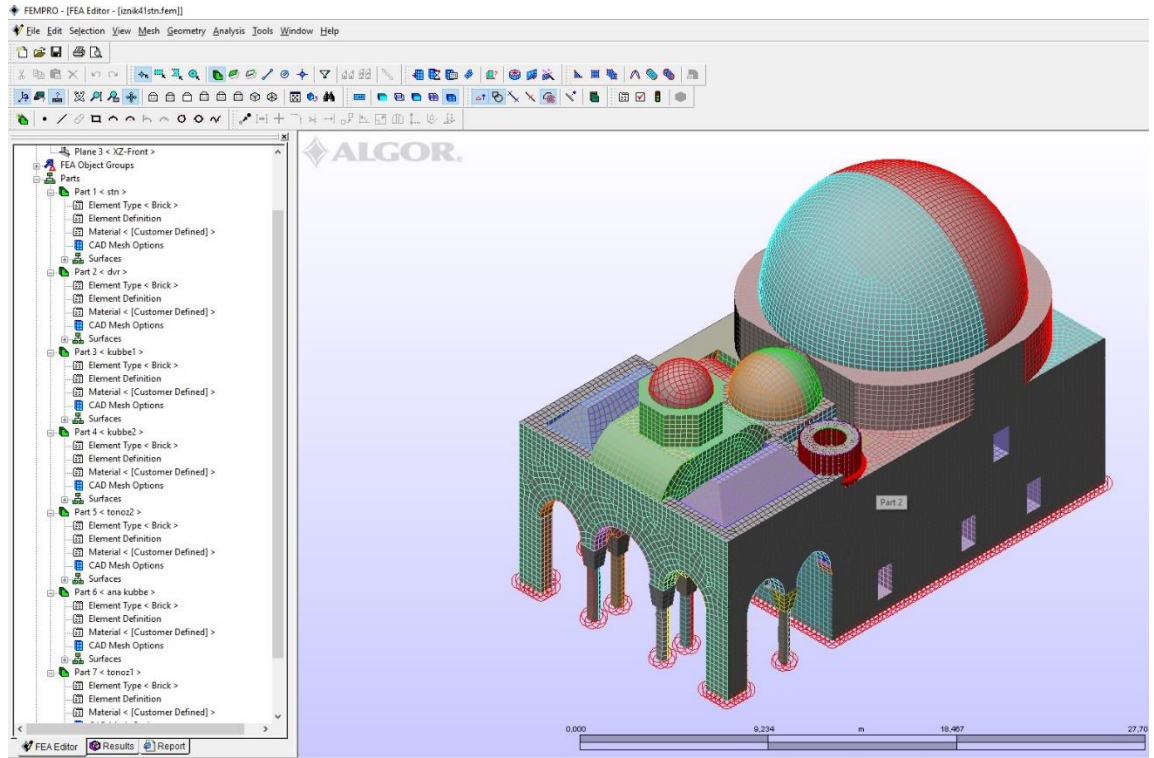
E : Elastisite Modülü

ν : Poisson Oranı ((0,15-0,20)-(0,18 olarak alınmıştır)

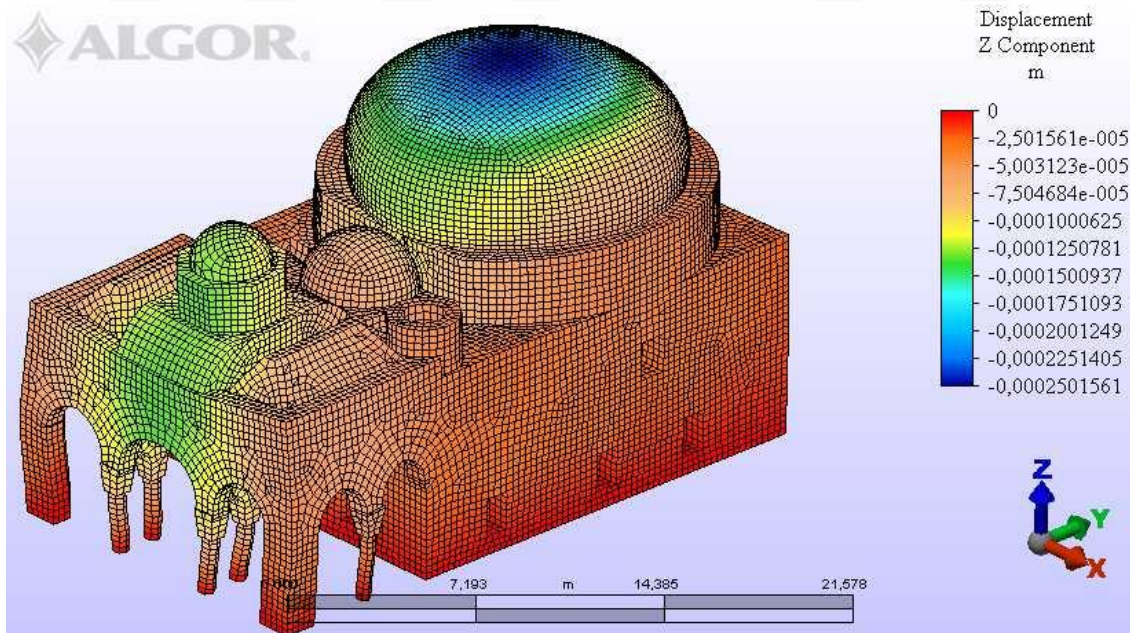
Çizelge 7.7. Düşey yükler altındaki analiz parametreleri (İkinci analiz)

	Taş - 1	Taş -2	Tuğla
Basınç Mukavemeti (MPa)	50 MPa	50 MPa	20 MPa
Eğilmede Çekme Mukavemeti (MPa)	5 MPa	5 MPa	3,9 MPa
Elastisite Modülü (N/m ²)	50*10 ⁹ N/m ²	26*10 ⁹ N/m ²	5*10 ⁹ N/m ²
Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)	2607 kg/m ³	2607 kg/m ³	1600 Kg/m ³
Kayma Modülü (N/m ²)	21* 10 ⁹ N/m ²	11* 10 ⁹ N/m ²	2,1* 10 ⁹ N/m ²

Yapılacak analiz ile alakalı olarak parametrelerin belirlenmesinden sonra yapının kendi ağırlığı altında analiz çalışması – Z yönünde 9,81456 m/sn² yer çekimi ivmesi etkisi ile gerçekleştirilmiştir. Yapıda camiye bütünleşik olarak bulunan minare belli bir kota kadar üç boyutlu modellemesi yapılmış, modeli oluşturulmayan kısmından dolayı oluşan düşey yükler matematiksel hesap yapılarak – Z yönünde silindir kısmında -1.500.000 N’luk bir yük olarak programa tanımlanmıştır. Belirlenen parametreler doğrultusunda değerlerin yapıya aktarılması ve zemine oturan sonlu eleman düğüm noktaları üç yönde de moment almayacak şekilde belirlenmiştir. Şekil 7.12’de etkiyen düşey yükler ve mesnetlenme durumu gösterilmiştir.



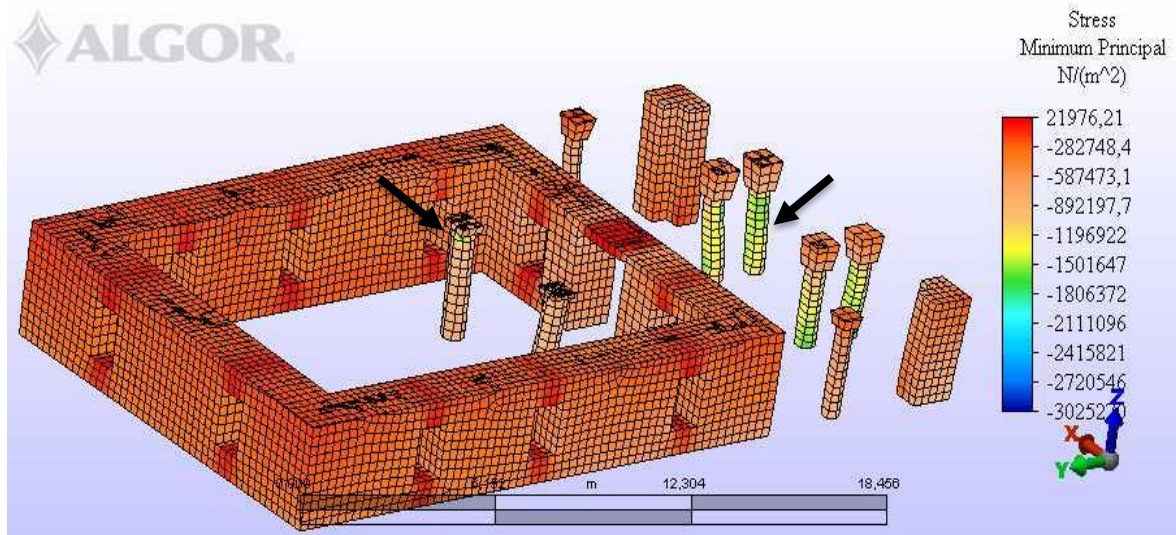
Şekil 7.12. Sonlu elemanlar eğrisi, yapıya etkiyen düşey yükler ve mesnetlenme şekilleri



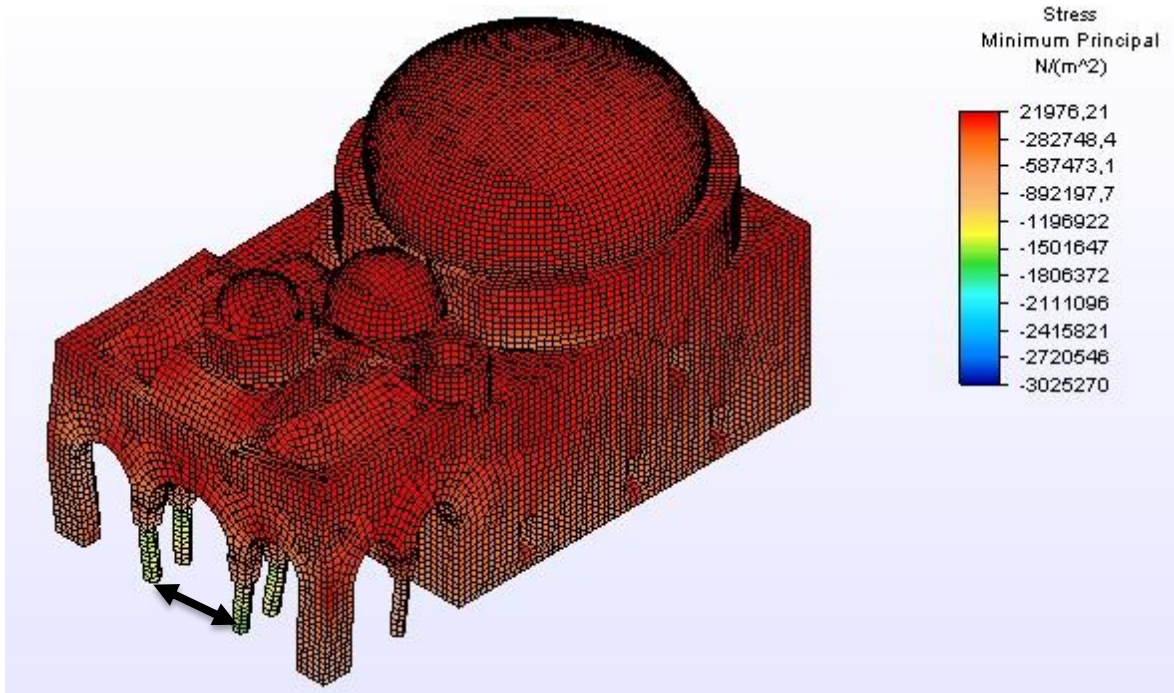
Şekil 7.13. Yapının Çizelge 7.6'da verilen değerlere göre Z (düşey) yöndeki yer değiştirmeleri

Çizelge 7.6’da verilen parametrelere göre yapının düşey yükler altında yapılan analizi sonucundan maksimum 0,25 mm yer değiştirmenin olduğu tespit edilmiştir. Yapıda en fazla düşey yönde yer değiştirme kubbede üst birleşim kısmına yakın bölgelerde gerçekleştiği tespit edilmiştir.

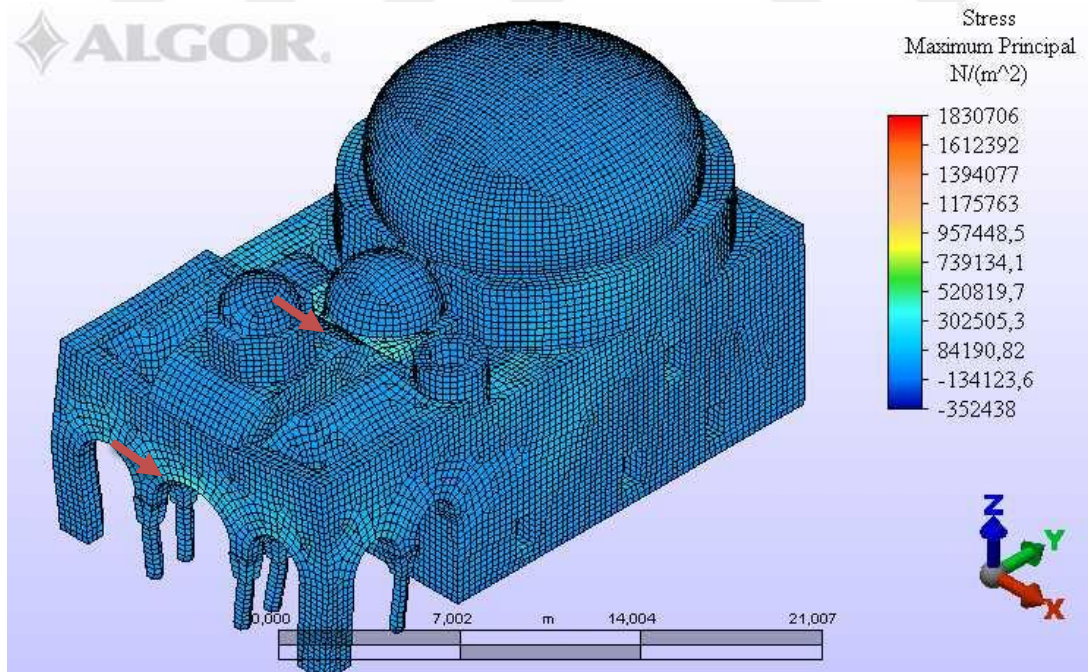
İznik Yeşil Cami yapı duvarlarında yapılan analiz sonucunda oluşan minimum ve maksimum asal gerilmeler tespit edilmiştir. Maksimum ve minimum gerilmeler yapı elemanlarında analiz sonucunda oluşan çekme ve basınç gerilmelerini tanımlamaktadır. Tarihi yığma yapılarda basınç dayanımının çekme dayanımına göre daha yüksek olmasından dolayı, yapılan analizlerde özellikle maksimum asal gerilme sonuçları dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir. Yapılan analiz sonucunda minimum asal gerilmeler incelendiğinde Şekil 7.14 ve 7.15’de gösterildiği gibi 3,02 MPa değerinde olduğu gözlenmiştir. Minimum asal gerilmesinin maksimum olduğunu gözlenen nokta camii giriş kısmı batı cephesinde yer alan sütun başlığıdır. Ayrıca cami son cemaat kısmında bulunan mono blok sütunlarda basınç gerilmelerinin olduğu Şekil 7.14’te gösterilmiştir. Maksimum asal gerilmeler ise giriş kısmının üstünde yer alan kemer ile cami giriş kısmının olduğu alan üzerinde bulunan kemer ve sütun başlıklarında meydana gelmiştir ve Şekil 7.16’de görüldüğü gibi 1,83 MPa değerlerinde olduğu gözlenmiştir. Şekil 7.17’de giriş kısmı batı cephesi sütun başlığı, iç kemer ve giriş kemerinde bulunan gerilme yığılmaları gösterilmiştir.



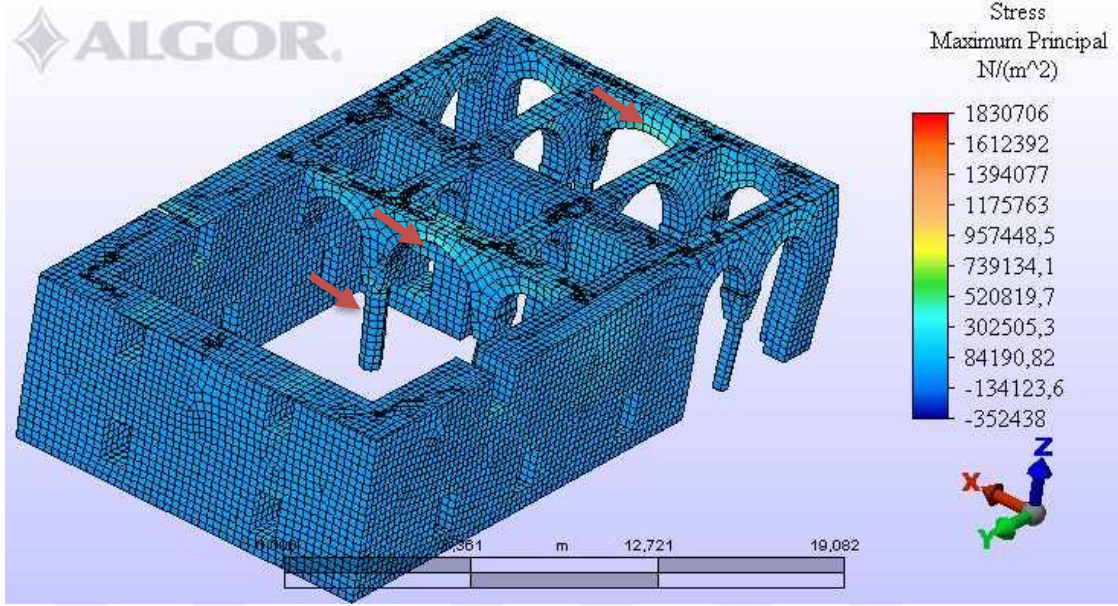
Şekil 7.14. Yapının Çizelge 7.6’da verilen değerlere göre düşey yükler altında sütunlarda oluşan minimum gerilmeleri



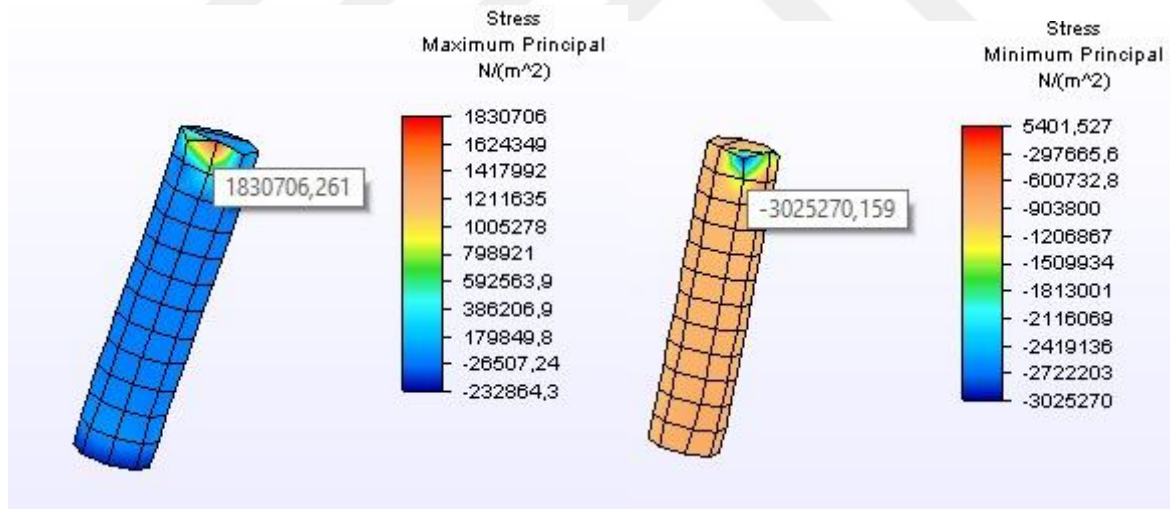
Şekil 7.15. Yapının Çizelge 7.6’da verilen değerlere göre düşey yükler altında oluşan minimum gerilmeleri



Şekil 7.16. Yapının Çizelge 7.6’da verilen değerlere göre düşey yükler altında oluşan maksimum gerilmeleri



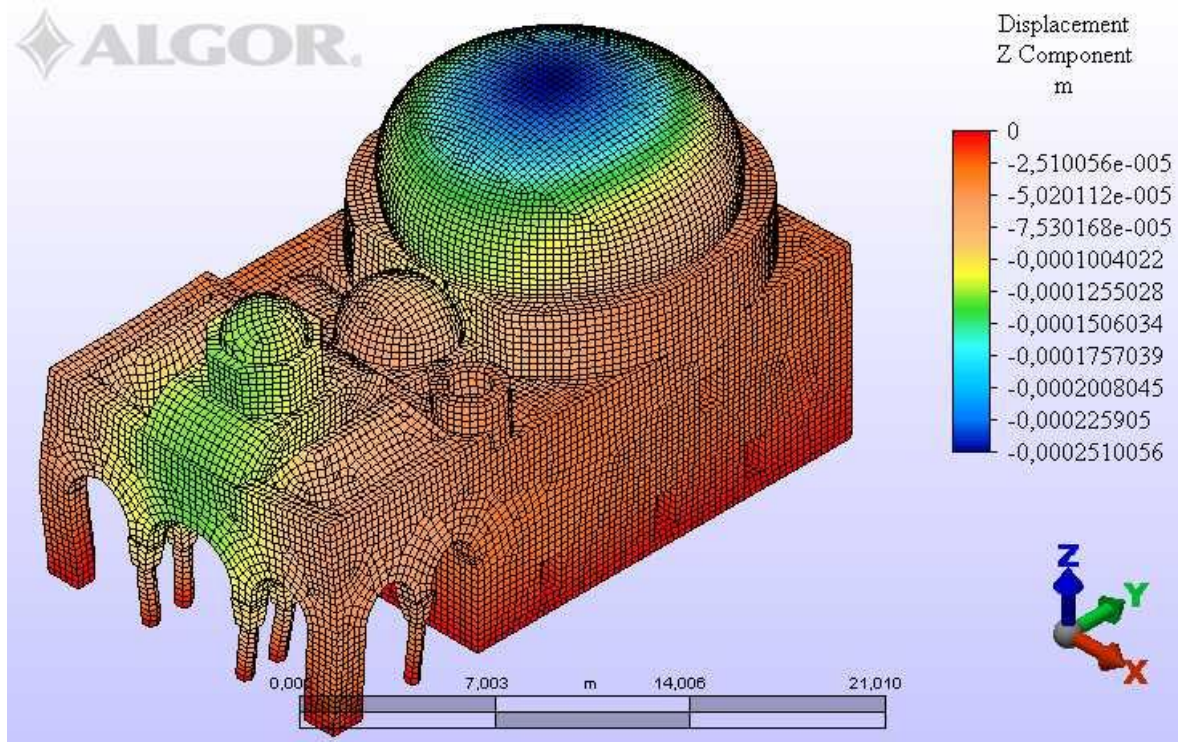
Şekil 7.17. Yapının Çizelge 7.6’da verilen değerlere göre düşey yükler altında oluşan cami giriş kısmı batı sütunu ve son cemaat batı sütunu bölgesi maksimum gerilmeler



Şekil 7.18. Yapının Çizelge 7.6’da verilen değerlere göre düşey yükler altında oluşan cami giriş kısmı batı sütunu ve son cemaat batı sütunu bölgesi minimum ve maksimum gerilmelerin olduğu bölgeler ve değerleri

Şekil 7.18’ de düşey yükler altında yapılan analiz sonucunda giriş kısmında bulunan sütununda oluşan gerilme değerleri gösterilmiştir. Minimum ve maksimum asal gerilme değerlerinin bu bölgede olduğu tespit edilmiştir

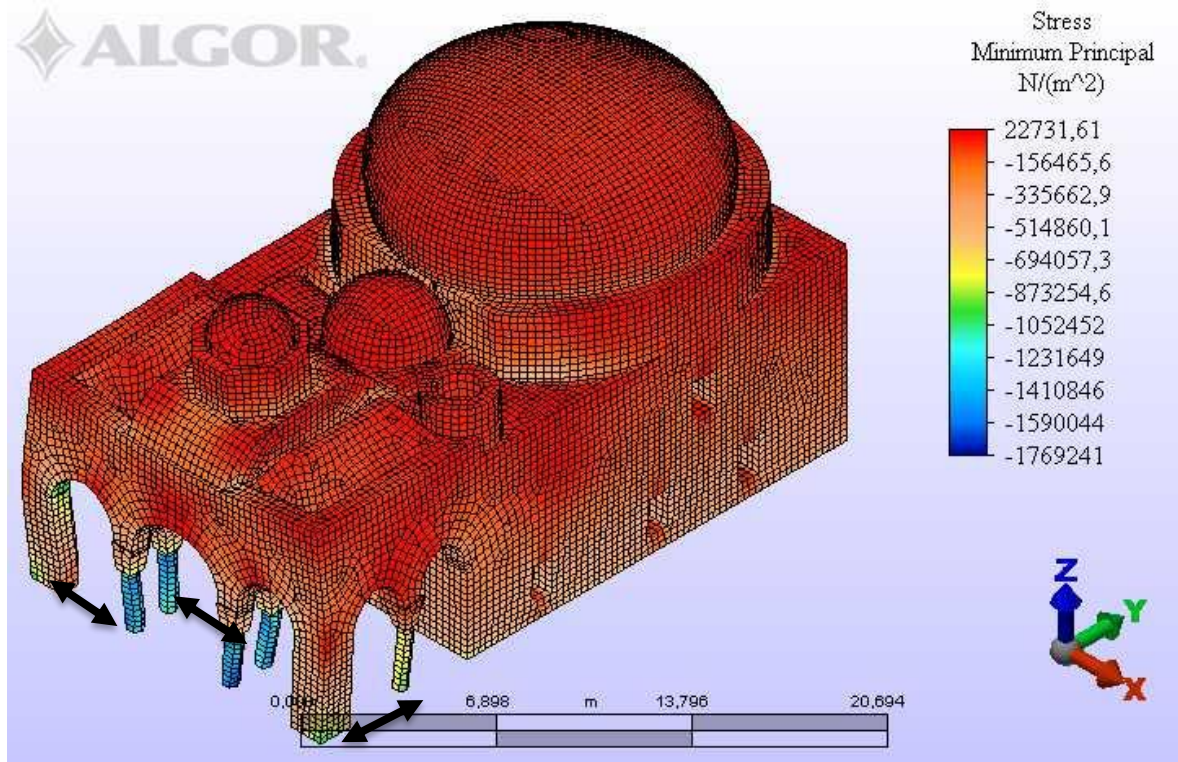
Çizelge 7.6’da verilen parametrelere göre yapılan yapının birinci düşey yükler altındaki statik analizden sonra Çizelge 7.7’de verilen değerlere göre de analiz yapılmıştır. 2. yapılacak analiz için özellikle cami giriş kısmı batı tarafında bulunan sütunda yerinde yapılan tahribatsız testler sonucunda belirlenen elastisite modülü kullanılmıştır. Yapının düşey yükler altında analiz çalışması – Z yönünde $9,81456 \text{ m/sn}^2$ yer çekimi ivmesi etkisi ile analiz yaptırılarak maksimum yer değiştirmeler ile minimum ve maksimum asal gerilme değerleri elde edilmiştir. Şekil 7.19’de gösterildiği gibi maksimum yer değiştirmenin 0,25 mm olarak oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.19. Yapının Çizelge 7.7’de verilen değerlere göre Z (düşey) yöndeki yer değiştirmeleri

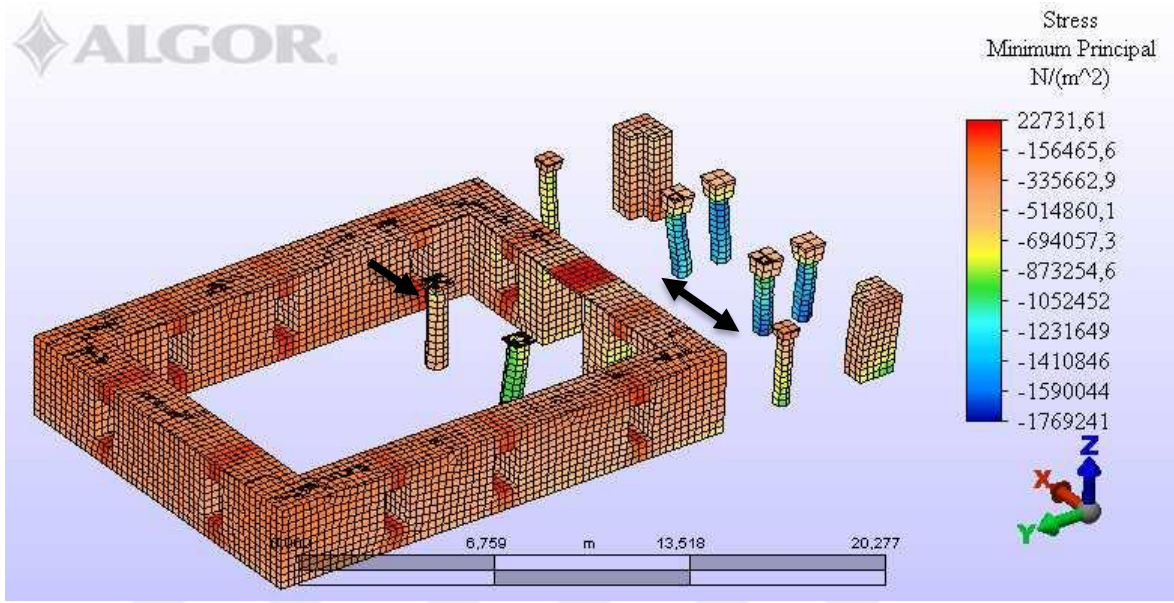
Yapılan ikinci analiz sonucunda maksimum ve minimum asal gerilme değerleri de elde edilmiştir. Oluşan minimum asal gerilme değeri 1,76 MPa civarındadır ve Şekil 7.20’ de gösterilmiştir. Basınç gerilmesinin maksimum görüldüğü yer birinci analiz ile örtüşecek şekilde cami giriş kısmı batı cephesinde bulunan sütun başlığıdır. Minimum asal gerilmelerin yapı genelinde sütunlarda ve son cemaat köşe ayaklarında görüldüğü tespit

edilmiştir. Yapı da analiz sonucunda oluşan maksimum gerilme değerleri de yaklaşık olarak 1,36 MPa olarak tespit edilmiştir. Maksimum asal gerilmelerin özellikle çekme dayanımı olarak zorlanacağını düşündüğümüz yapı giriş kemeri ve iç kemerlerde olduğu, ayrıca minare kısmının bulunduğu iç batı tarafında bulunan sütun başlığında olduğu gözlenmiştir. Şekil 7.22’de maksimum asal gerilmeler sonucunda oluşan gerilme yığılmaları ve değerleri gösterilmiştir.

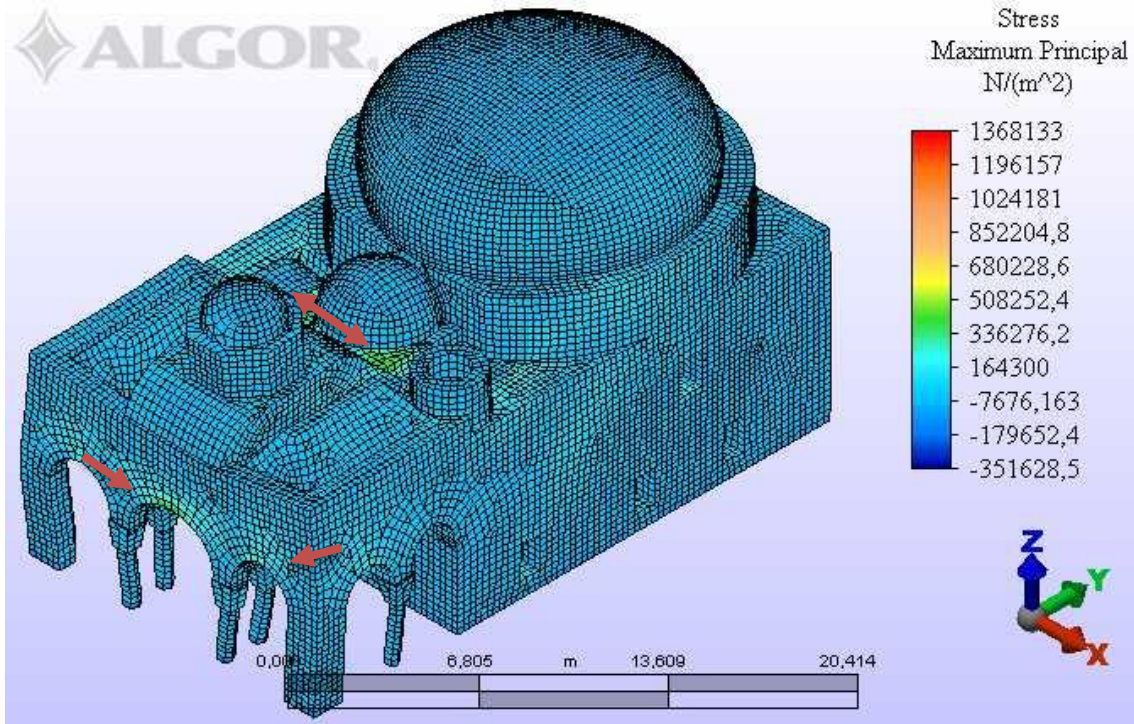


Şekil 7.20. Yapının çizelge 7.7’de verilen değerlere göre düşey yükler altında oluşan minimum gerilmeleri.

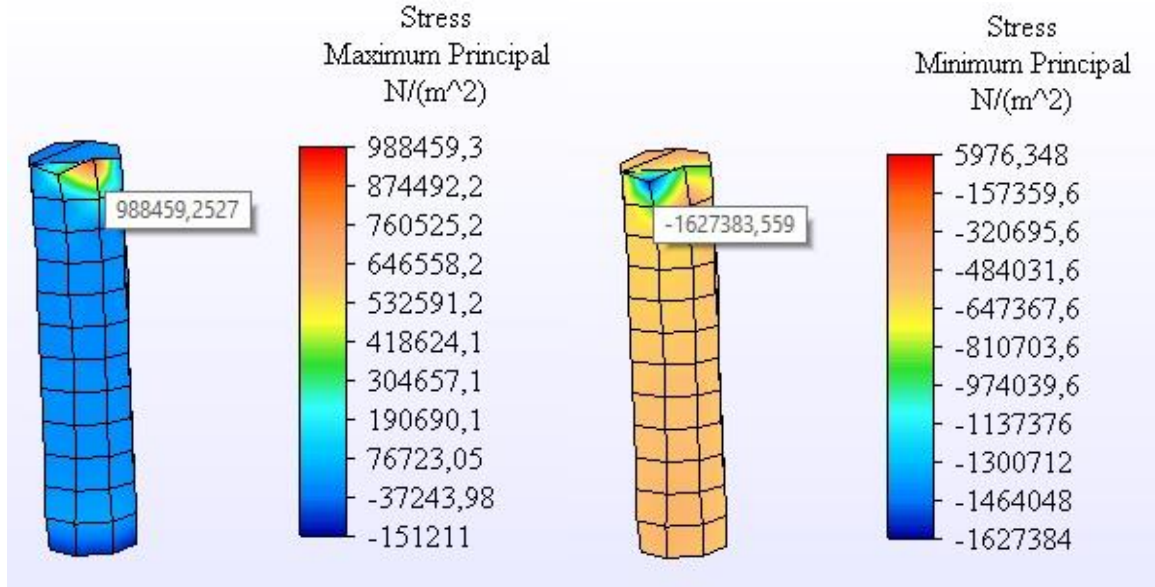
Mono blok halde olan ve günümüzde deformasyonun en fazla hissedilen yapı elemanı olan sütunlardan ve başlıklarından başlayarak sütun gövdesine ulaşan gerilme yığılmaları Şekil 7.21’de gösterilmiştir. Bu bölgede oluşan minimum asal gerilme (basınç gerilmeleri) değeri 1,4 MPa ile 1,7 MPa arasında olduğu görülmektedir. Şekil 7.23’ de düşey yükler altında yapılan analiz sonucunda giriş kısmında bulunan sütununda oluşan gerilme değerleri gösterilmiştir. Minimum ve maksimum asal gerilme değerlerinin bu bölgede olduğu tespit edilmiştir



Şekil 7.21. Yapının Çizelge 7.7’de verilen değerlere göre düşey yükler altında oluşan yapı sütunları ve köşe taşıyıcılarda oluşan minimum gerilmeleri



Şekil 7.22. Yapının çizelge 7.7’de verilen değerlere göre düşey yükler altında oluşan maksimum gerilmeleri



Şekil 7.23. Yapının Çizelge 7.7’da verilen değerlere göre düşey yükler altında oluşan cami giriş kısmı batı sütunu ve son cemaat batı sütunu bölgesi minimum ve maksimum gerilmelerin oluştuğu bölgeler ve değerleri

İznik Yeşil Cami’nin düşey yükler ile düşey yükler altında yapılan iki analize bakıldığında iki analiz içinde yapının basınca çalıştığı, düşey yükler altında yapı davranışının iyi olduğu gözlenmiştir. Yapılan iki analiz kıyaslandığında ise genel olarak düşey yer değiştirme değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlemlenmiş olsa da, ikinci analiz günümüzde hasarlı olarak nitelendirdiğimiz sütunun analiz parametreleri deneysel yöntemlerle verilen değerler ile yapıldığında, tüm yapının özellikle de sütun elemanların bundan etkilendiği, minimum asal gerilmelerin sütunlarda arttığı gözlenmiştir. Maksimum asal gerilme değerlerine ve oluştuğu bölgelere bakıldığında görüldüğü gibi yapı Şekil 7.3’te gösterildiği gibi giriş kemelerinde kısmi deformasyonlar ile örtüşmektedir. Yapının güncel durumu ile kıyaslandığında caminin harım giriş kısmının batı tarafından olan sütunda çekme gerilmelerinin oluştuğu, bu bölge hasarların başlayabileceği görülmüştür.

7.3.4. İznik Yeşil Caminin deprem analizi

Deprem analizi, zamana bağlı olarak değişen yükler altında yapıların davranışını inceler. Statik analiz ile deprem (dinamik) analizi arasındaki en büyük fark, deprem kuvvetlerinden dolayı yapının kendi oluşturmuş olduğu atalet kuvvetleridir. Atalet

kuvvetleri dıştan gelen yatay yüklerin etkisi ile yapının hareketin ivmelenmesine karşı koyan kuvvetlerdir.

Doğal titreşim periyotları yapıların deprem analizleri yapılarak hesaplarının belirlenmesi için çok önemlidir. Öz değer analizi ya da modal analiz yapıların mod şekillerini ve serbest titreşim periyotlarını görmek için kullanılan bir yöntemdir. İznik Yeşil Cami'nin sonlu elemanlar modeli ALGOR programı yardımı ile modal analiz çalışmaları yapılmıştır. Modal analiz çalışmalarında 10 adet mod durumuna bakılmıştır.

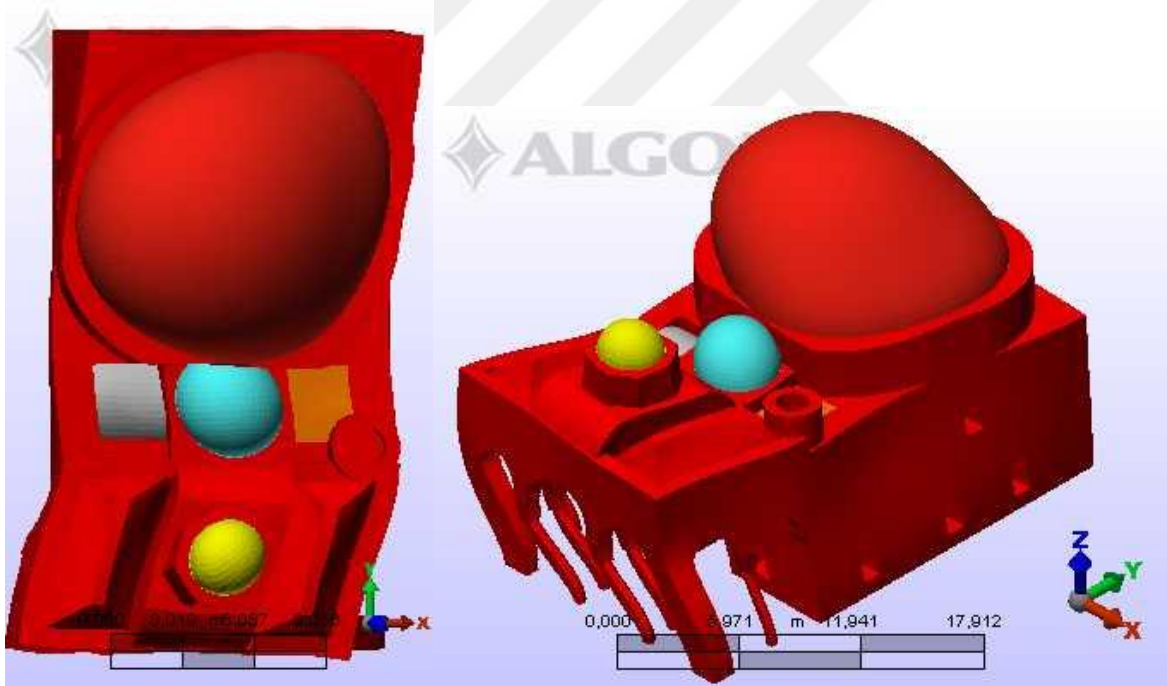
Bir serbest titreşim periyoduna ait olan mod şeklindeki titreşimin, yapının toplam kütlelerinin ne kadarını harekete geçirip salınım hareketine dâhil edebildiği kütle katılım oranı ile ifade edilir (Dabanlı, 2008). Deprem anında yapı tam X ve Y eksenlerine paralel olarak titreşmez, X ve Y eksenlerini arasında titreşmeye çalışır. Ayrıca yapıda, X yönünde titreşmeye çalışan yapı kütlesi X yönünde deprem kuvveti, Y yönünde titreşmeye çalışan yapı kütlesi Y yönünde deprem kuvveti oluşturur.

Çizelge 7.8. Yapının Serbest Titreşim Periyotları, Modal Frekansı ve Kütle Katılım Oranları

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (sn)	Kütle Katılımı X (%)	Kütle Katılımı Y (%)	Kütle Katılımı Z (%)
1	20,547	0,04866891	60,99	0	0
2	24,162	0,0413873	1,9	0,65	0
3	24,870	0,04020909	0,02	41,05	0,05
4	29,022	0,03445662	0,01	10,94	0
5	31,690	0,0315557	3,36	0,09	0
6	34,069	0,0293522	0,01	15,7	0
7	38,750	0,02580645	8,53	0,01	0,02
8	39,115	0,02556564	0,05	0	4,95
9	44,880	0,02228164	0,03	0	0,01
10	45,500	0,02197802	0	1,04	2,56
Toplam Katılım Oranları:			74,90	69,48	7,7

Çizelge 7.8'de hesaplanan 10 moda ait serbest titreşim periyotları, modal frekansları ve kütle katılım oranları gösterilmiştir. Yapılan analizler sonucunda yapının tamamı x doğrultusunda (doğu-batı) yanal hareket yapmaktadır. Birinci mod olan bu moda ait titreşim

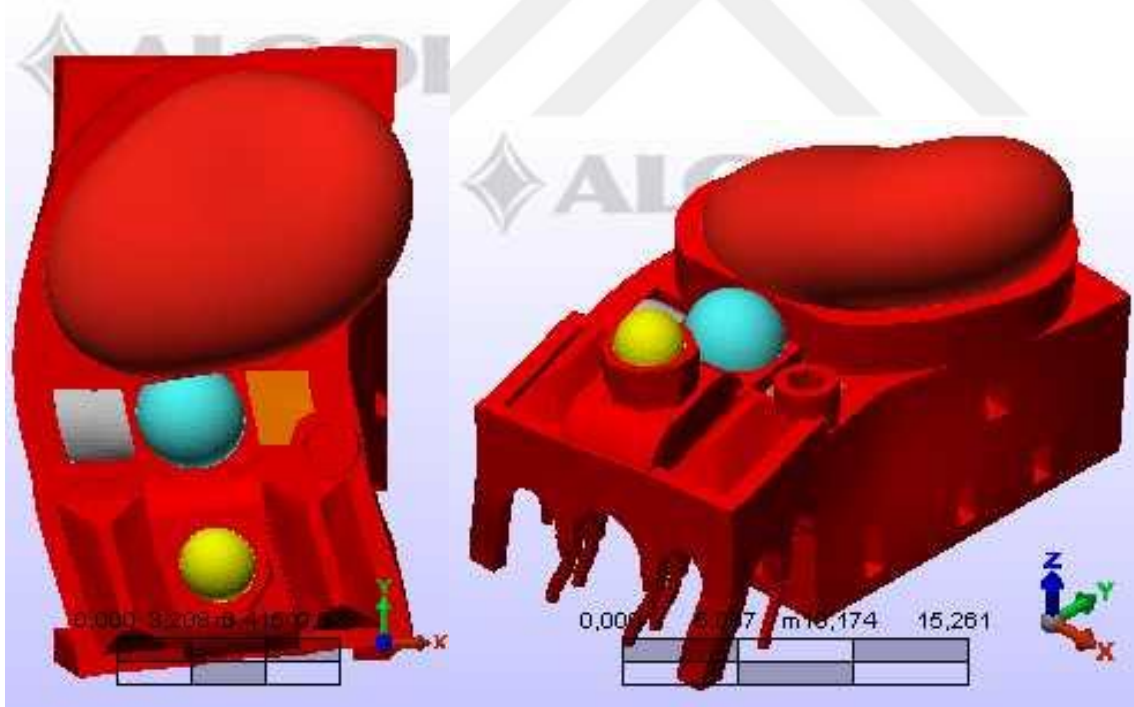
frekans değeri 20,547 Hz'dir ve kütle katılım oranı % 60,99 olarak hesaplanmıştır. Yapının üçüncü modunda ise y doğrultusunda (kuzey-güney) yanal hareket yapmaktadır. Üçüncü moda ait titreşim frekans değeri 24,87 Hz'dir ve kütle katılım oranı % 41,05 olarak hesaplanmıştır. 10 Mod üzerinden yapılan analizde X yönünde toplam katılım oranı % 74,90 olurken Y yönünde toplam katılım oranı % 69,48, Z yönünde ise % 7,7 olarak hesaplanmıştır. Aşağıdaki Şekil 7.24'te birinci, Şekil 7.25'te üçüncü ve Şekil 7.26'da altıncı moda ait olan plan ve görünüşler gösterilmiştir. Yapının 10 mod üzerinde yapılan analizinde X yönünde hâkim modun birinci mod olarak belirlenmiş, Y yönünde hâkim modun ise üçüncü mod olduğu analiz sonuçlarında belirlenmiştir. Yapının mod şekilleri incelendiğinin hâkim periyotların burulma şeklinde olduğu anlaşılmaktadır. X doğrultusunda da, Y doğrultusunda etkin oldukları mod durumların burulma hareketi gözlenmiştir.



Şekil 7.24. Yapının birinci modunda oluşan şekli (Üstten ve izometrik görünüş)



Şekil 7.25. Yapının üçüncü modunda oluşan şekli (Üstten ve batı cephesinde görünüş)



Şekil 7.26. Yapının altıncı modunda oluşan şekli (Üstten ve izometrik görünüş)

Deprem analizlerinde, “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmeliğin” 2.4 bölümünde yer alan spektrum analizlerinden yararlanılarak hesaplamalar

ve analizler yapılmıştır. Spektrum hesaplarında “Tam Karesel Birleştirme” yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Analizlerde kullanılacak değerler ivme spektrum grafiğinin oluşturmak için yönetmeliğin ilgili maddelerinde yer alan ve aşağıda gösterilen formüller kullanılmıştır. (DBYBHY, 2007, s:10-11).

$$A(T) = A_0 \times I \times S(T) \quad (7.4)$$

$$S_{ae}(T) = A(T) \times \rho \quad (7.5)$$

Deprem yüklerinin belirlenmesi için esas alınacak olan Spektral İvme Katsayısı, $A(T)$, Denk. (2.1) ile verilmiştir. %5 sönüm oranı için tanımlanan Elastik İvme Spektrumunun ordinatı olan Elastik Spektral İvme, $S_{ae}(T)$, Spektral İvme Katsayısı ile yer çekimi ivmesi g 'nin çarpımına karşı gelmektedir. Etkin yer ivmesi olan (A_0) deprem bölgeleri için değerler verilmiştir. Bursa İli, İznik İlçesi birinci derece deprem bölgesi içerisinde kalmasından dolayı $A_0 = 0,40$ olarak alınmıştır (DBYBHY, 2007, s:10). Ayrıca yönetmelikten alınan spektrum katsayılarının $S(T)$ denklemleri de aşağıda verilmiştir.

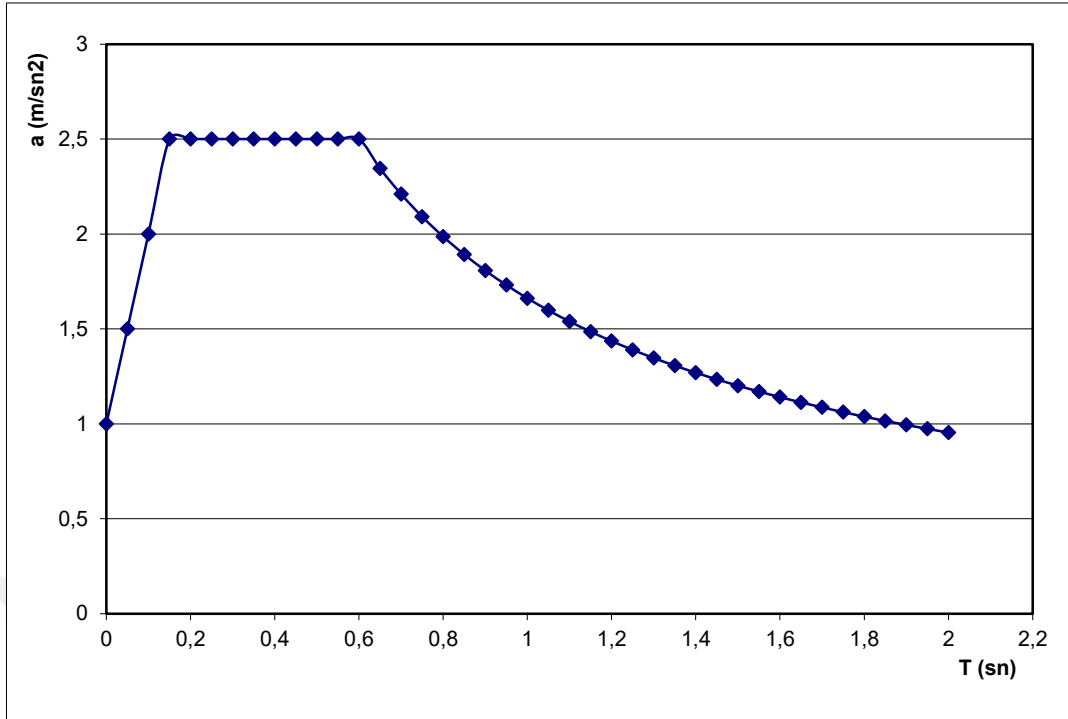
$$S(T) = 1 + 1,5 \times \left(\frac{T}{T_A}\right) \quad (0 \leq T \leq T_A) \quad (7.6)$$

$$S(T) = 2,5 \quad (T_A \leq T \leq T_B) \quad (7.7)$$

$$S(T) = 2,5 \times \left(\frac{T_B}{T}\right)^{0,8} \quad (T_A \leq T \leq T_B) \quad (7.8)$$

Yerel zemin sınıflarının durumuna göre T , T_A , T_B yapıların doğal titreşim periyotları olarak değer alırlar (DBYBHY, 2007, s:11).

Bölüm 7.2.2’de belirtildiği gibi zemin analizleri sonucunda zemin sınıfı Z3 olarak belirlenmiştir. Buna göre ivme spektrum grafiğinin için kullanılması gereken $T_A=0,15$, $T_B=0,60$ olarak kabul edilerek oluşturulmuştur. İvme spektrum grafiği Şekil 7.27’de gösterilmiştir ve grafik üzerinde oluşan değerlere göre yapının X ve Y yönünde deprem analizleri yapılarak, yapının oluşabilecek deprem sonrasındaki durumuna bakılmıştır.

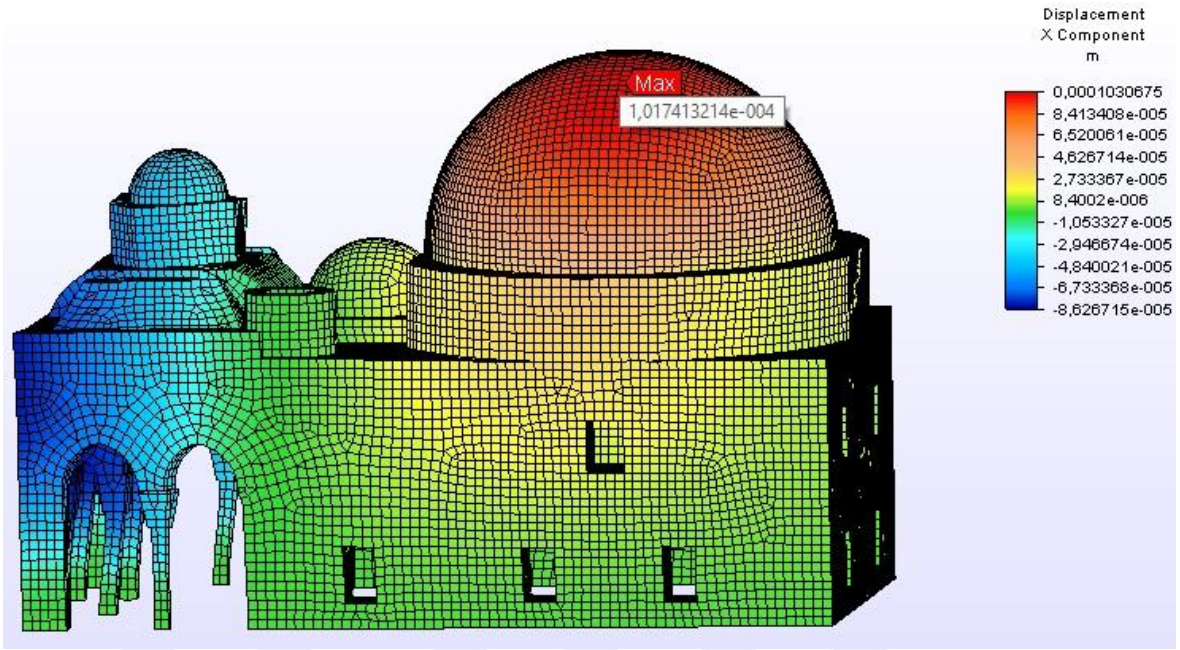


Şekil 7.27. İvme spektrum grafiği

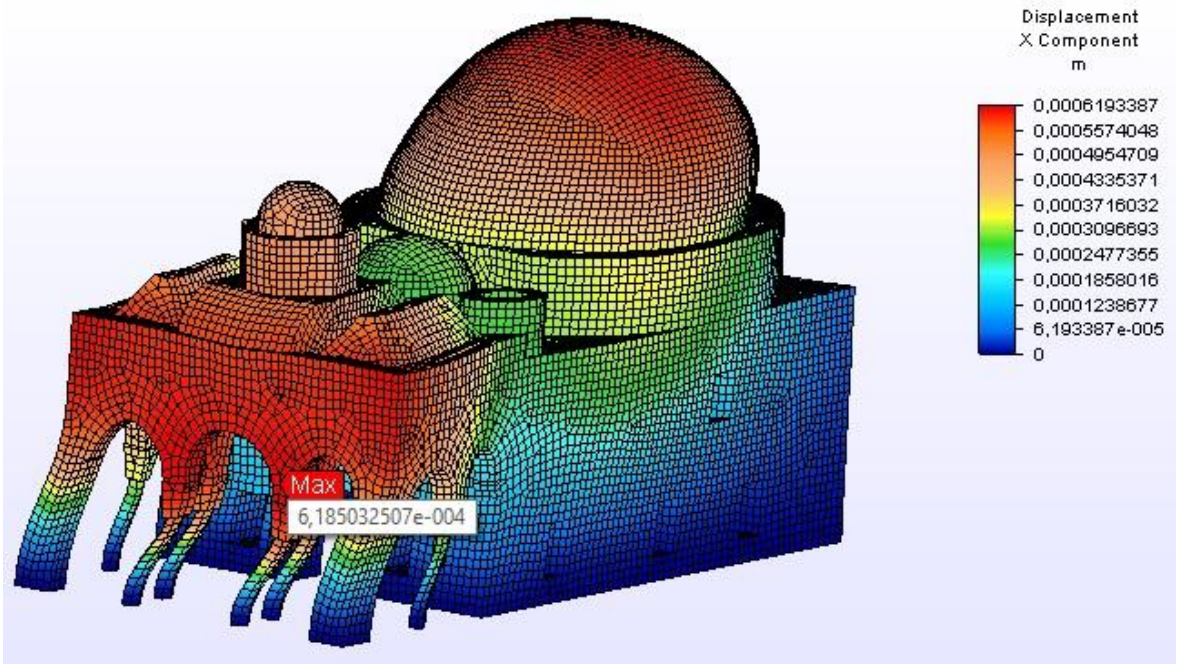
7.3.5. İznik Yeşil Caminin X yönündeki deprem analizi

İznik Yeşil Cami yapısının X yönünde deprem analizleri sonucunda kütle katılımının en fazla olduğu birinci modda maksimum yer değiştirme yapının kubbe örtüsünde meydana gelmiştir (Şekil 7.28). Yapının X yönündeki maksimum yer değiştirmesi 0,10 mm olarak tespit edilmiştir. Yapının son cemaat kısmında sütunlarla ve duvar yapı elemanları taşınan üst örtü bölgesinde 0,60 mm'lik yer değiştirmelerin olduğu gözlenmiştir (Şekil 7.29). Yapının diğer bölgelerinde X yönünde yer değiştirme değerleri genel olarak düşüktür.

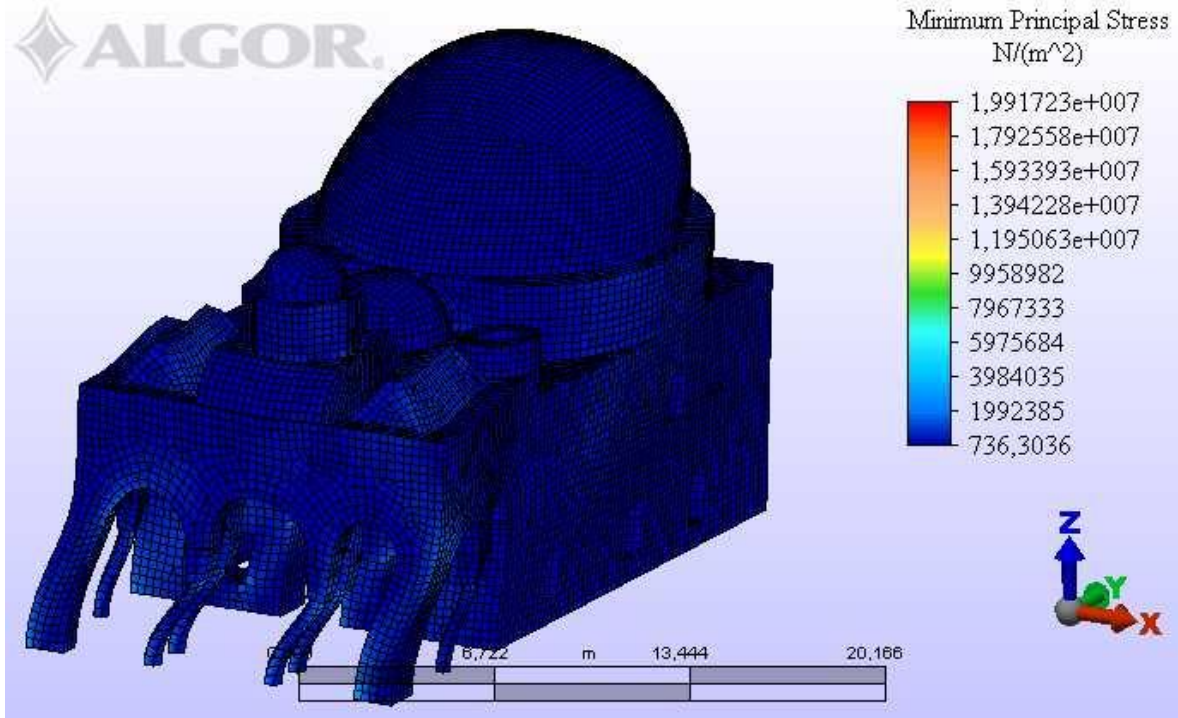
Yapı da analiz sonucunda oluşan asal gerilmeler incelendiğinde maksimum asal gerilmelerin 10,56 MPa ile 19,90 MPa değerlerinde olduğu gözlenmiştir (Şekil 7.30, Şekil 7.31). Yapının mod durumlarına göre almış oldukları değerler incelendiğinde ise asal gerilmelerin ana kubbe kasnağı ile Türk üçgenleri, ana beden duvarları köşelerinde olduğu belirlenmiş olsa bu değerler 0,8-1,0 MPa aralığında olduğu belirlenmiştir (Şekil 7.32a, Şekil 7.32b). Yapının genel olarak X yönünde ciddi deformasyonların oluşmadığı, yapının genel olarak iyi bir yapısal davranış gösterdiği söylenebilir.



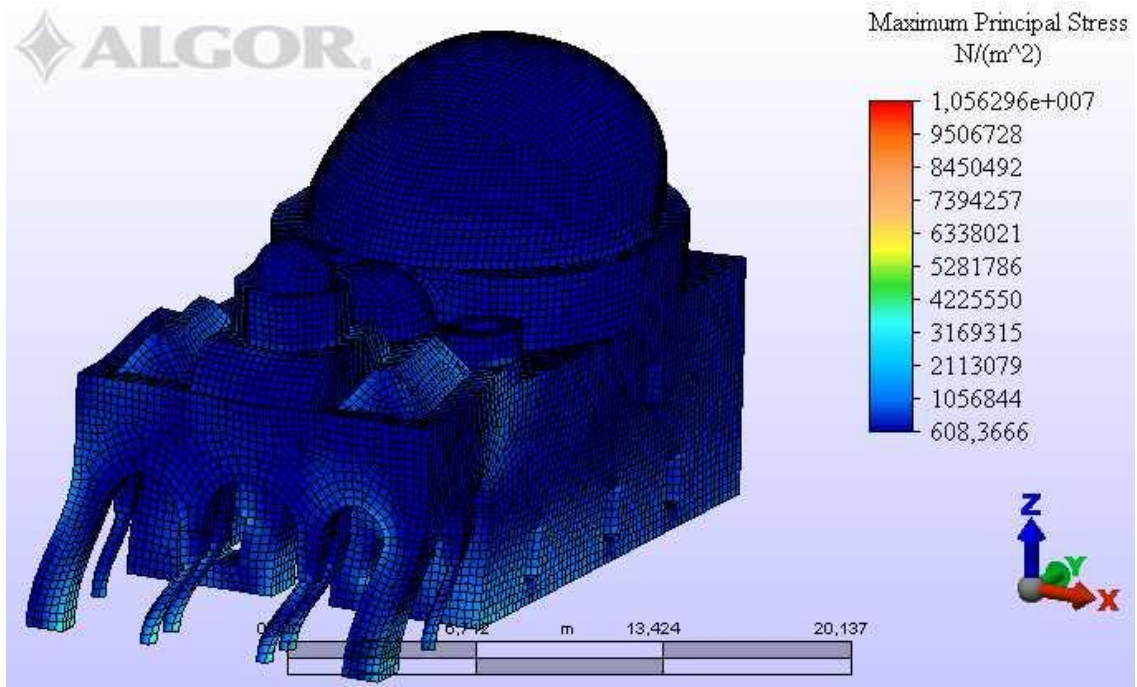
Şekil 7.28. Yapının X yönünde deprem analizi sonucunda X yönünde oluşan maksimum yer değiştirme değerleri



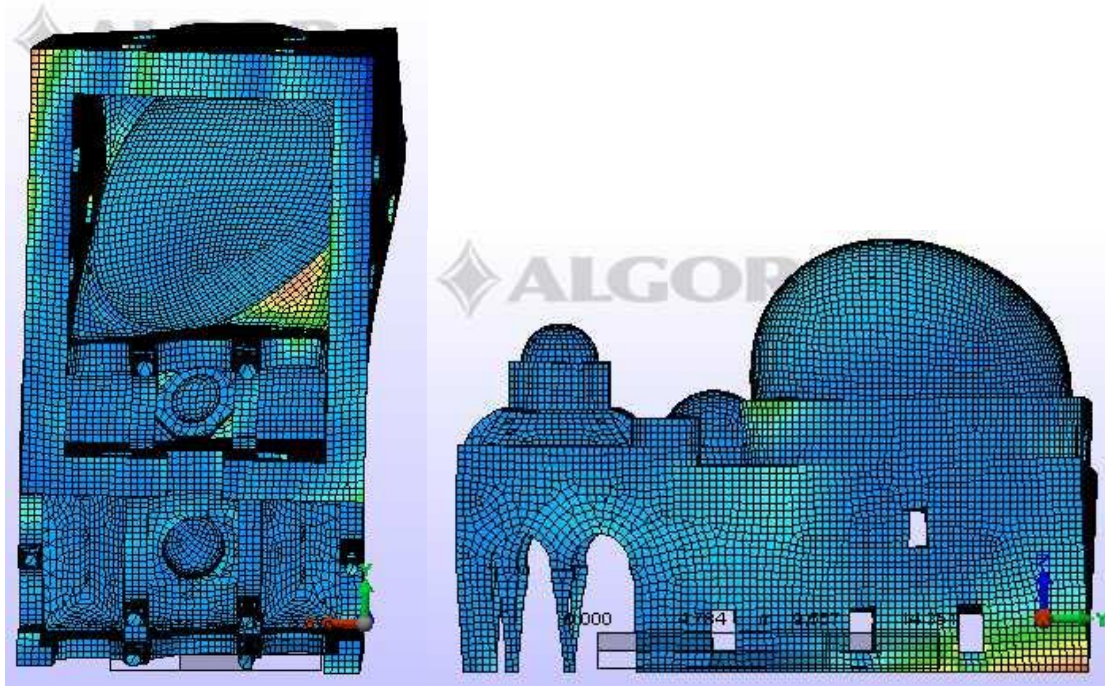
Şekil 7.29. Yapının X yönünde deprem analizi sonucunda X yönünde oluşan ve son cemaat üst örtü kısmı ve duvarlarında oluşan yer değiştirme değerleri



Şekil 7.30. Yapının X yönünde deprem analizi sonucunda oluşan gerilme değerleri



Şekil 7.31. Yapının X yönünde deprem analizi sonucunda oluşan gerilme değerleri

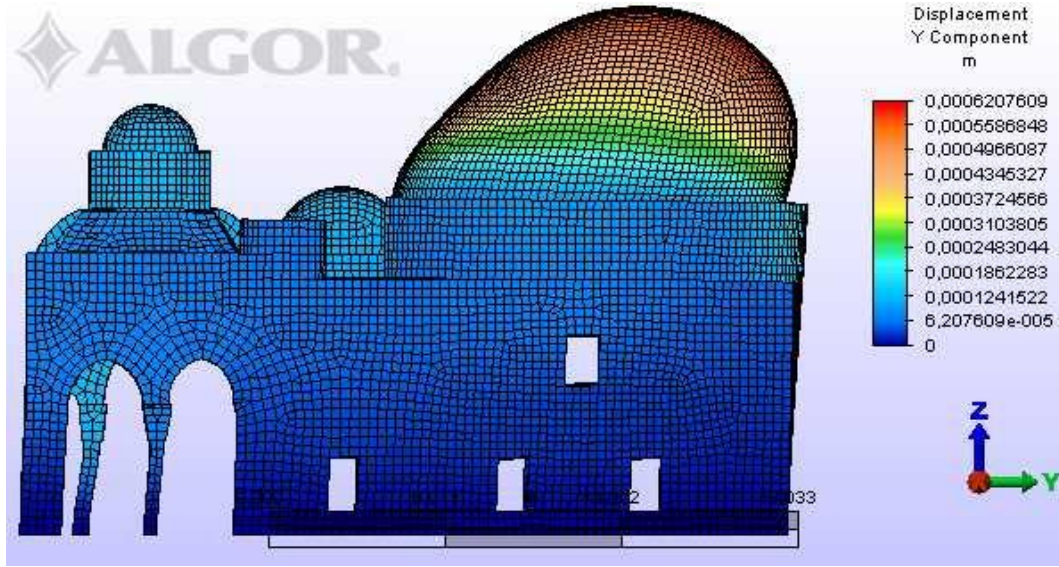


Şekil 7.32. a) Yapının X yönünde deprem analizi sonucunda oluşan yapının alttan görünüşü ve gerilme yığılmalarının bölgeleri b) Yapının X yönünde deprem analizi sonucunda oluşan yapının batı cephe görünüşü ve gerilme yığılmalarının bölgeleri

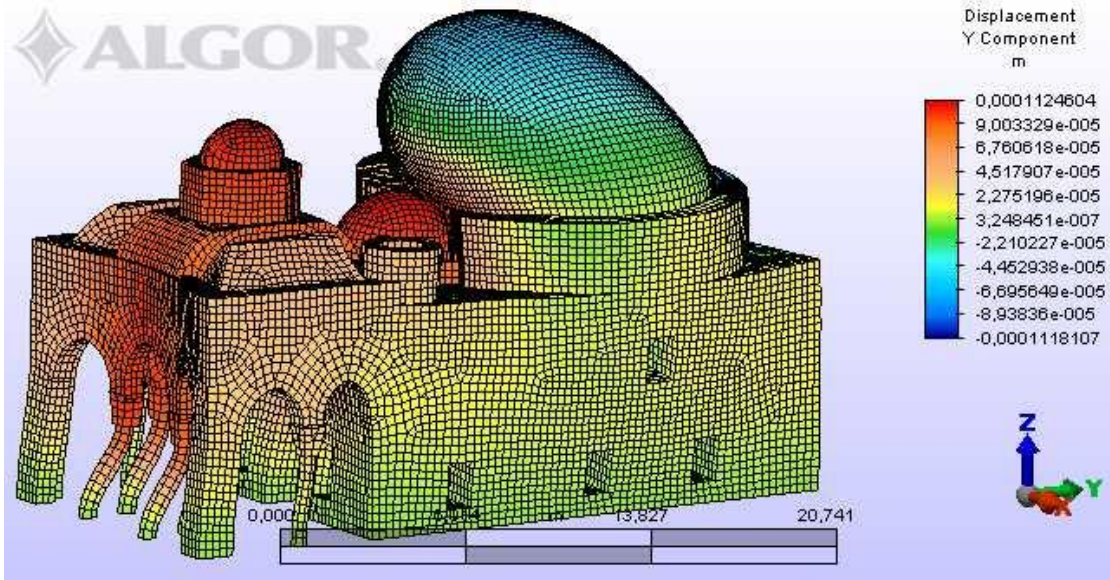
7.3.6. İznik Yeşil Caminin Y yönündeki deprem analizi

İznik Yeşil Cami yapısının Y yönünde deprem analizleri sonucunda kütle katılımının en fazla olduğu üçüncü modda maksimum yer değiştirme yapının kubbe örtüsünde meydana gelmiştir (Şekil 7.33). Yapının X yönündeki maksimum yer değiştirmesi 0,62 mm olarak tespit edilmiştir. Yapının dördüncü ve altıncı modunda ise 0,11-0,13 mm arasında Y yönünde yer değiştirmenin olduğu, yer değiştirmelerin olduğu bölgeler ise son cemaat bölümünde ve cami giriş kısmının üst örtü elemanlarında olduğu belirlenmiştir (Şekil 7.34).

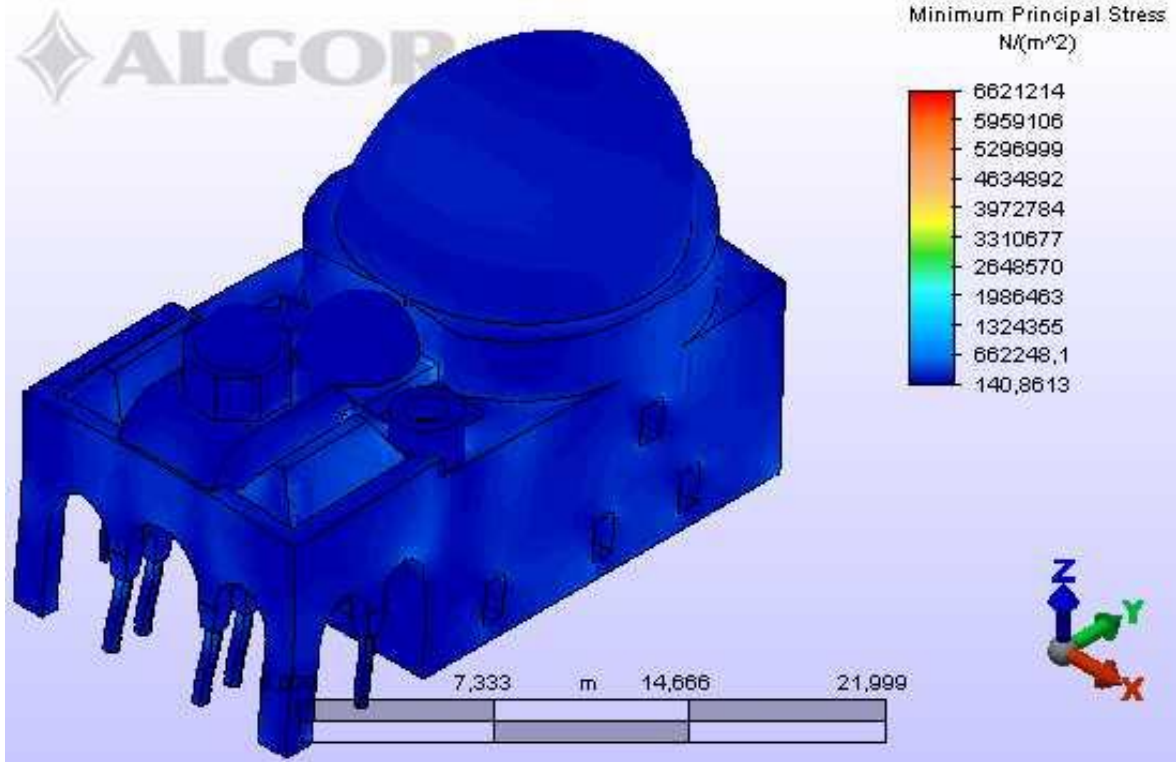
Yapı da analiz sonucunda oluşan asal gerilmeler incelendiğinde maksimum asal gerilmelerin 6,62 MPa ile 4,77 MPa değerlerinde olduğu gözlenmiştir (Şekil 7.35, Şekil 7.36). Yapının mod durumlarına göre almış oldukları değerler incelendiğinde ise asal gerilmelerin ana kubbe kasnağı, son cemaat üst örtü ve köşe ayaklarında olduğu belirlenmiş olsa bu değerler 2,00-2,75 MPa aralığında olduğu belirlenmiştir. Yapının genel olarak Y yönünde ciddi deformasyonların oluşmadığı, yapının genel olarak iyi bir yapısal davranış gösterdiği söylenebilir.



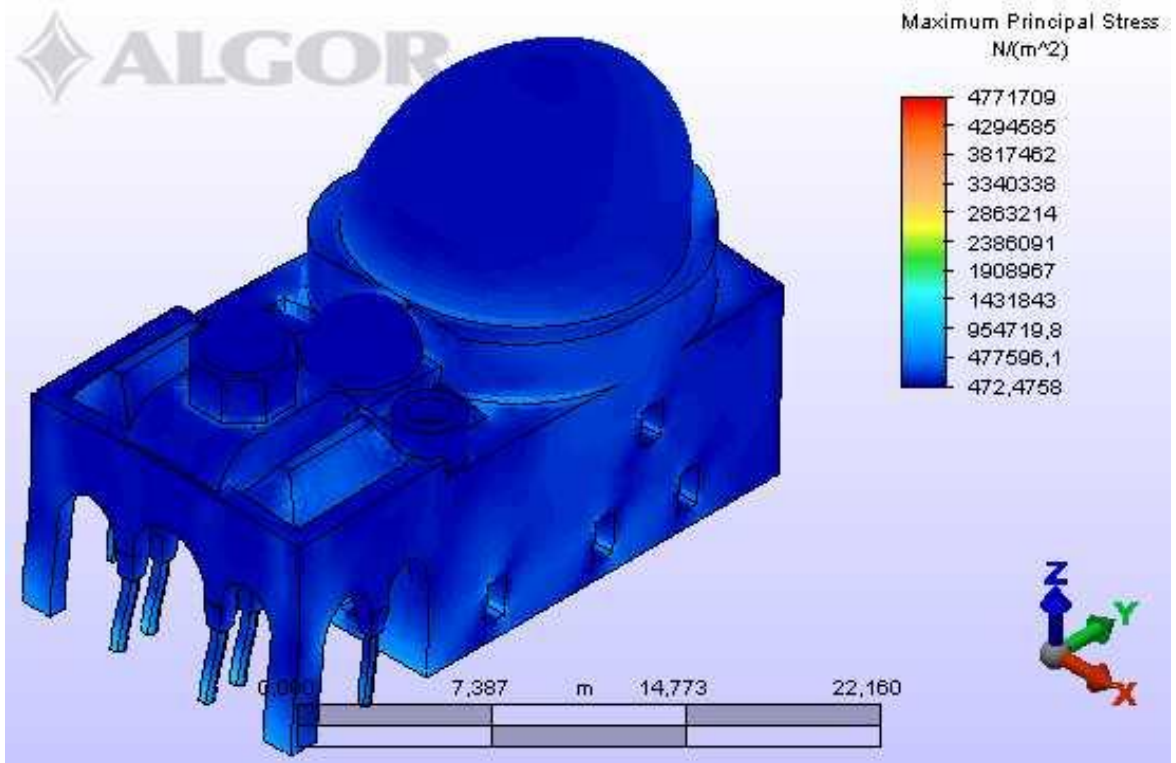
Şekil 7.33. Yapının X yönünde deprem analizi sonucunda Y yönünde oluşan maksimum yer değiştirme değerleri



Şekil 7.34. Yapının X yönünde deprem analizi sonucunda Y yönünde oluşan maksimum dördüncü ve altıncı modların yer değiştirme değerleri



Şekil 7.35. Yapının Y yönünde deprem analizi sonucunda oluşan gerilme değerleri



Şekil 7.36. Yapının Y yönünde deprem analizi sonucunda oluşan gerilme değerleri

Yapının dinamik analizleri yapılmasında sırasında 01.01.2019 yılında yürürlüğü gireceği açıklanan” DEPREM ETKİSİ ALTINDA BİNALARIN TASARIMI İÇİN ESASLAR” çıkmış olsa da, 2017-2018 yılları içerisinde hazırlanan bu tez çalışmasında yürürlükte olan “DEPREM BÖLGELERİNDE YAPILACAK BİNALAR HAKKINDA YÖNETMELİK” üzerinden analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir.

7.4. Güçlendirme Önerisi

Yapının analiz çalışmalarının tamamlanması ile yapının zayıf bölgesi olarak düşünülen ve hasar tespit edilen cami giriş cephesi son cemaat kısmının batı tarafında bulunan taşıyıcı sütun için yapının restorasyon çalışması içinde önerilen ve uygulaması yapılan paslanmaz çelik elemanlar ile sargı işleminin uygun olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7.37). Yapının diğer kısımlarında tespit edilen gerilme yığılmalarına göre oluşabilecek hasarlara göre güçlendirme çalışmalarının yapı hasarı olmadan uygulamak mümkün olmamakla beraber özellikle son cemaat kısmında oluşabilecek hasarları güçlendirme çelik çubuk ya da hatıllar ile sarılmasının uygun olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 7.37. Yapının güncel durumu ve cami giriş kısmında bulunan sütuna yapılan güçlendirme örneği

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

İznik Yeşil Caminin sonlu elemanlar yöntemi ile statik ve dinamik analizleri yapılarak yapının düşey yükler altında davranışı ile depremde yapının davranışı belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca yapının güncel durumundan yola çıkarak, yapıda oluşan deformasyonların yapılacak analizlerde de belirlenmesi amaçlanmıştır. Tüm bu çalışmaların yapılması için tarihi yapı araştırmacılarının kullandığı malzeme parametrelerinin belirlenmesi üzerine yerinde ve laboratuvar ortamında yapılan testler olan ultrases testleri ve birim hacim ağırlık tespitinden yararlanılarak sonlu eleman modeli ile yapılacak analizlerde kullanılmak üzere gerekli malzeme parametreleri belirlenmiştir. İznik Yeşil Camii'nin üç boyutlu modelinin oluşturulması ile beraber, yapının statik analiz, modal analiz ile davranış spektrum analizleriyle gerilme değerleri, yer değiştirme değerleri ve yapının performansı için veriler elde edilerek değerlendirmeler yapılmıştır. Yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda şu değerlendirmeler yapılabilir.

1. İznik Yeşil Cami'de güncel durumu incelendiğinde cami giriş kısmı batı cephesinde bulunan sütun ve başlığında deformasyonların olduğu gözlenmiştir. Yapının düşey yükler altında yapılan statik analizlerinin sonucunda gerilme yığılmalarının hasarlı sütunun başlığında olduğu gözlenmiştir. Yapılan modelin, deneylerin ve analizlerin caminin güncel durumu ile örtüştüğü tespit edilmiştir.
2. Caminin son cemaat girişi, cami giriş cephesi kemerlerinde gerilmelerin olduğu izlenmektedir. Yapının güncel durumda da aynı bölgelerde bulunan kemer taşlarının kilit taşlarında kısmi ayrılma durumu gözlenebilmektedir. Bu alanlarda modelin analizi sonucunda 0,10 - 0,12 mm civarında yer değiştirme olduğu tespit edilmiştir.
3. Yapının düşey yükler altında yapılan statik analizi sonucunda maksimum yer değiştirmenin ana kubbe örtüsü üzerinde olduğu ve 0,25 mm civarında değerler aldığı gözlemlense de yapı incelendiğinde ana kubbede gözle görülen bir deformasyona rastlanılmamıştır. Fakat yapının altmışlı yıllarda onarım gördüğü, müdahale yapıldıysa onarım imalatlarının bu dönemde gerçekleştirildiği düşünülmektedir.

4. Yapıda iki adet düşey yükler altında statik analiz gerçekleştirilmiş ve iki analizin sonuçları kıyaslandığında değerlerin birbirine benzer olduğu tespit edilmiştir. Yapının düşey yükler altında yapılan statik analizi sonucunda gerilme değerleri incelendiğinde yapı genelinde basınç gerilmelerin daha fazla olduğu, mono blok olarak yapılan sütunlarda değerlerin arttığı olduğu gözlemlenmiştir. Fakat yerinde yapılan testler ile beraber hasarlı sütunda hesaplanan parametrelere göre değerler verilerek yapılan analiz çalışmasında, özellik tüm sütunlara gelen yüklerin ve yer değiştirme değerlerinde artışlar olduğu gözlemlenmiş, son cemaat köşe duvarlarında da gerilme yığılmalarına rastlanılmıştır. Yapılan iki adet düşey yükler altında statik analizi sonucunda oluşan yükleri yapının güvenli bir şekilde taşıdığı sonucuna varılmıştır.
5. Yapıda modal analiz ve davranış spektrum analizleri incelendiğinde, X yönünde birinci modun hâkim mod olduğu, Y yönünde ise üçüncü modun hâkim mod olduğu tespit edilmiştir. Yapının mod şekilleri incelendiğinde yapının doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusunda hareketin olduğu izlenebilmektedir. Deprem yüklerinin yapıda en fazla 0,60 mm yer değiştirmeye sebep olduğu, yer değiştirme değerinin de en fazla son cemaat üst örtüsünde olabileceği yapılan analiz çalışması sonucunda ortaya çıkmıştır. Yapıya etkiyen basınç gerilme değerleri X (doğu-batı) yönünde yapılan deprem analizinde son cemaat üst örtü ve duvarlarında olduğu, gerilme değerlerindeki 10 MPa civarında olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde Y yönünde yapılan deprem analizi sonucuna ve değerlerine bakıldığında son cemaat üst örtü kısmında 6 MPa civarında gerilmelerin oluşabileceği sonucuna varılmıştır. Yapının modal analizi ve davranış spektrum analizlerine bakıldığında deprem oluşması durumunda son cemaat kısmında deformasyonların ve çatlakların oluşması durumu muhtemeldir.

Yapının güçlendirme durumu düşünüldüğünde günümüzde hasar görmüş sütun ve başlığında yapılan paslanmaz çelik lamalar ile yapılan işlemlerin yapının güncel durumu için yeterli olduğu düşünülmektedir. İznik Yeşil Cami etrafında yer alan alanda ciddi bir yapılaşma olmadığı, bu yüzden de zeminden kaynaklanabilecek sıkıntıların yapı içinde ortaya çıkmadığı düşünülmektedir. Bu durumun sürdürülebilir olması için cami etrafında

yapılaşmanın zemin dengesi bozacak şekilde yapılacak imalatlara izin verilmeyecek şekilde yapılması tavsiye edilmektedir.

Yapıya etkiyecek deprem kuvvetlerinin etkisi ile yapının zayıf bölgesi olarak düşündüğümüz son cemaat kısmında oluşabilecek deformasyonlara önlem almak şu aşama mümkün gözükmemektedir. Fakat yapı hareketlerinin izlenilerek oluşabilecek bir deformasyon ile beraber gerekli önlemlerin alınması yapının geneli için önemlidir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ahunbay, Z. (2009). Tarihi Çevre Koruma ve Restorasyon, Yem Yayın, İstanbul
- Aköz, A.H., 2008, Deprem Etkisi Altında Tarihi Yığma Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- ALGOR V20.00, 2007, Autodesk Inc.,U.S.A.
- Almaç, U., 2011, Zeyrek Camii (Pantokrator Kilisesi) Kuzey Bölüm Strüktür Analizi ve Sağlamaştırma Önerileri, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Bağbancı, M.B., 2009, Tarihi Yapıların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizinin Bursa Ördekli Hamamı Örneğinde İncelenmesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa
- Bayülke, N., 1978, Depremler ve Depreme Dayanıklı Yapılar, İmar ve İskan Bakanlığı Deprem Araştırma Enstitüsü Yayınları, Ankara.
- Bayülke, N., 1992, Yığma Yapılar, T.C. İmar ve İskan Bakanlığı Deprem Araştırma Enstitüsü, Ankara.
- Böke, H., Akkurt, S. ve İpekoğlu, B. (2004) Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harcı ve Sıvaların Özellikleri. Yapı Dergisi
- Böke, H., Saltık, E.N., Güçhan N.Ş., Özgönül, N., 1999. Osmanlı Dönemi Yapılarında Kullanılan Horasan Sıvaların Özelliklerinin Belirlenmesi,
- Celep, Z., Kumbasar, N., 2004, Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, İstanbul.
- Çamlıbel, N., 1988, Sinan Mimarlığında Strüktürün Analitik İncelenmesi, YTÜ Mimarlık Fakültesi, İstanbul.
- Çamlıbel, N., 2000, Geleneksel Yapılarda Stabilitenin İyileştirilmesi ve Temellerin Takviyesi, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Çamlıbel, N., 2000, Yapıların Taşıma Gücünün İyileştirilmesi, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Çılı, F., Sesigür, H., 2007. Tarihi Yapıların Onarımı/Güçlendirilmesi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Seminer Notları.
- Dabanlı, Ö., 2008, Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- DBYYHY, 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Mart, 2007.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Deren, H., 1980. Ahşap Yapı Elemanları Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası,
- Doğangün, A., 2005, Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 844 s.
- Erol, H., 2018, Sonlu Elemanlar Ders Notları, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir
- Fahjan, Y., 2008, Sonlu Elemanlar Yöntemi (Sap2000 Uygulaması), İnşaat Mühendisleri Odası Gebze Temsilciği
- Gedik, Y.H., 2008, Tarihi Yığma Yapıların Modellenmesi, Analizi ve Güçlendirilmesi: Mehmet Ağa Camii Örneği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Güler, K., Sağlamer, A., Celep, Z., Pakdamar, F., 2004, Structural And Earthquake Response Analysis of the Little Hagia Sophia Mosque, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada.
- Gürdal, E. Altaş, G.K, Özgünler, S.A. (2012). İstanbul’da Bulunan Erken Bizans Dönemi Dini Yapılarında Kullanılan Horasan Harçların Özelliklerinin İncelenmesi Vakıf Restorasyon Yıllığı
- Heyman, J., 2006, The Science of Structural Engineering, Imperial College Press, London.
- Hökelekli, E., 2015, Manisa Hafsa Sultan Camii Deprem Davranışının Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İncelenmesi, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa
- Hutton, D.V., 2004, Fundamentals of The Finite Element Analysis, The Mc-Graw Hill Companies, London.
- Kara, H.G., 2009, Tarihi Yığma Yapıların Taşıyıcı Sistemleri, Güvenliğinin İncelenmesi, Onarımı ve Güçlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- KEY CREATOR V4.0.0, 2004 Cubotek Corporation, U.S.A.
- Koçak, A., 1999, Tarihi Yığma Yapıların Statik ve Dinamik Yükler Altında Lineer ve Non-linear Analizi: Küçük Ayasofya Camii Örneği, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Kuban, D., 1998, Mimarlık Kavramları, Yapı Endüstri Merkezi Yayınları, İstanbul.
- Kuruşcu, A.O., 2012, Yığma Duvar ve Temellerde Doğrusal Olmayan Modelleme, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lea, F.M., 1940. Investigations on Puzzolanas, Building Research, Technical Papers No:27, s.1-63.
- Lourenço, P.B., 1998, Experimental and Numerical Issues In The Modelling of the Mechanical Behaviour of Masonry, Structural Analysis of Historical Constructions II, Barcelona.
- Lourenço, P.B., 2000, Structural Behavior of Civil Engineering Structures: Highlight in Historical and Masonry Structures, Universidade do Minho, Portugal.
- Lourenço, P.B., Gregorczyk, P., 2000, A Review on Flat-jack Testing, Universidade do Minho, Portugal
- Mahrebel, H.A., 2006, Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Özellikleri, Hasarlar ve Onarım ve Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- McClellan, G.H., Eades, J.L., 1970. The Texture Evolution of Limestone Calcinas, ASTM Special Technical Publication 472, American Society for Testing and Materials, s.209-227, Philadelphia.
- Mungan, İ., 1987, Mimar Sinan ve Kubbe Statîği (bildiri) MSÜ, İstanbul.
- Sap2000 Manuel, 2005. Integrated Structural Analysis and Design Software, Computer and Structures Inc., Berkeley, California.
- Saraç, M.M., 2003, Tarihi Yığma Kargir Yapıların Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, İstanbul.
- Sesigür, H., Çelik, O.C., Çılı, F., 2007, Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Bileşenler, Hasar Biçimleri, Onarım ve Güçlendirme, İstanbul Bülten, sayı 89.
- Teomete, E., Aktas, E., 2004, “Structural Assessment of a Historical Masonry Structure: Urla Kamanlı Mosque”, Sixth International Congress on Advances in Civil Engineering, Bogazici University.
- Tetik, T., 2015, Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansı ve Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Timur, T., 2011, Edirnekapı Mihrimah Sultan Camii Taşıyıcı Sistem Deprem Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Türker, B., 2010, Tarihi Yapıların Yapısal Davranışının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Türkmen, M., Bilgin, H., 2002, Geleneksel Mimaride Kubbeli Örtü Sistemlerinin Yapısal Davranışı, Balıkesir Üniversitesi IV. Mühendislik-Mimarlık Sempozyumu, 11-12-13 Eylül 2002, Balıkesir.
- Türkmen, M., 1994, Ayasofya, Süleymaniye, Şehzade ve Mihrimah Tipi Cami Örtülerinde Yük Aktarımının Sonlu Elemanlar Metoduyla Çözümünü İrdelenmesi, Doktora Tezi, Mimar Sinan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ulkay, S., 1978, Yapı Bilgisi, YTÜ Mimarlık Fakültesi Baskı İşliği, İstanbul.
- Ural, A., ve Doğangün, A., 2009. Geliştirilen Bir Yapısal Analiz Programıyla Yığma Yapıların Analizi. New World Sciences Academy,
- Ünay, A.İ., 2002, Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, ODTÜ Mimarlık Fakültesi Ankara, 172 s.
- Yılmaz, P., 2006, Tarihi Yapıların Modellenmesi ve Deprem Güvenliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Anonim, 2018. University of Colorado, Integrated Teaching & Learning Laboratory Ultrasound Test, <https://itll.colorado.edu/> Erişim Tarihi: 2018