

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**TARİHİ YAPILARIN BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ:
PATARA ANTİK KENT TİYATROSU SAHNE YAPISI ÖRNEĞİ**

Habibe ÖZDEMİR

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2018

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**TARİHİ YAPILARIN BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ:
PATARA ANTİK KENT TİYATROSU SAHNE YAPISI ÖRNEĞİ**

Habibe ÖZDEMİR

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2018

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARİHİ YAPILARIN BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ:
PATARA ANTİK KENT TİYATROSU SAHNE YAPISI ÖRNEĞİ

Habibe ÖZDEMİR
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez .../.../201... tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN (Danışman)

Prof. Dr. Murat BİKÇE

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim AYDOĞDU

ÖZET

TARİHİ YAPILARIN BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ: PATARA ANTİK KENT TİYATROSU SAHNE YAPISI ÖRNEĞİ

Habibe ÖZDEMİR

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi. Engin EMSEN

Temmuz 2018; 105 sayfa

Tarihi yapılar geçmişten günümüze kalan en nadide eserlerdir. Bu yapılar, yaşadıkları doğal afetler ve bu afetlerden en önemlisi olan depremler neticesinde zarar görmektedir. Tarihi yapıların en iyi şekilde korunup muhafaza edilerek gelecek kuşaklara aktarılması için olası yenileme çalışmalarında faydalı olabilecek gerekli sayısal altyapının sağlanması oldukça önemlidir. Bu bilgi ancak, davranışı iyi temsil eden uygun yapısal analizinin gerçekleştirilmesiyle mümkün olabilir.

Bu tez çalışmasında öncelikle tarihi yapıların tanıtımı, taşıyıcı sistem özelliklerinin belirlenmesi, kullanılan malzemeler ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi, yapısal modelleme ve olası bir deprem anında yapıda meydana gelebilecek hasar türleri hakkında genel bilgi verilmiştir. Daha sonra örnek çalışma olarak Patara bölgesinde bulunan ve tarihsel öneme sahip Antik Kent Tiyatrosu'nun sahne yapısı için bilgisayar destekli yapısal modelleme ve analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler SAP2000 bilgisayar programı ile sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılmıştır. Modelleme tekniği olarak, büyük ölçekli yapılar için uygun olan "Bütünleşik (Makro) Modelleme" tekniğinden faydalanılmıştır. Bu modelde yapıyı oluşturan taş duvarlar düzlemsel kabuk elemanlarla temsil edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları; gerilme ve şekli değiştirme yönünden değerlendirilerek yapının zayıf yönleri, olası hasar durumları ve alınabilecek önlemler hakkında çeşitli yorumlar yapılmıştır. Bununla birlikte yapının deprem davranışıyla ilgili parametreler (mod şekil vektörleri, taban kesme kuvvetleri vb.) belirlenmiştir. Böylece bu yapının olası yenileme çalışmalarında faydalı olabilecek gerekli sayısal altyapının sağlanması hedeflenmiştir.

ANAHTAR KELİME: Makro modelleme, Patara Antik Kent Tiyatrosu, Sonlu elemanlar yöntemi, Tarihi yapıların analizi.

JURİ: Prof. Dr. Murat BİKÇE

Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim AYDOĞDU

ABSTRACT

COMPUTER AIDED ANALYSIS OF HISTORIC STRUCTURES: EXAMPLE OF PATARA ANTIQUE CITY THEATER STAGE STRUCTURE

Habibe ÖZDEMİR

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN

July 2018; 105 pages

Historical buildings are the rarest artifacts left over from the past. Natural disasters that they live in and as a result of the earthquakes that are the most important of these disasters are damaged. It is very important to provide the necessary numerical parameters that can be useful for possible renewal studies in order to ensure that historical structures are best preserved and transferred to future generations. This information can only be achieved by carrying out the appropriate structural analysis which well represents the behavior.

In this thesis, firstly, introduction of historical structures, determination of structural system properties, determination of materials and material properties used, structural modeling and types of damage that may occur in a structure during a possible earthquake are given. Then, as a case study, computer aided structural modeling and analysis processes were carried out for the scene structure of the Antique City Theater in the Patara region. These processes were performed by using the SAP2000 computer program and the finite element method. As a modeling technique, the "Macro Modeling" technique, which is suitable for large-scale constructions, has been utilized. The stone walls forming the structure are represented by planar shell elements in the model. The analysis results obtained; stress and shape change, various comments were made about the weaknesses of the structure, possible damage cases and possible measures. Along with this, related parameters (modal vectors, base shear forces, etc.) related to earthquake behavior of the structure are determined. Thus, it is aimed to provide the necessary numerical parameters, which can be useful for possible renewal work of this structure.

KEYWORDS: Patara Antique City Theater, Finite element method, Macro modeling, Analysis of historical structures.

COMMITTEE: Prof. Dr. Murat BİKÇE

Asst. Prof. Dr. Engin EMSEN

Asst. Prof. Dr. İbrahim AYDOĞDU

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında hiçbir konuda yardımını esirgemeyen, yaptığı yorumlarla tezime katkıda bulunan, genel hatlarıyla tezimi belirlememde yardımcı olan, mesleki ve kişisel anlamda gelişmemde katkıda bulunan değerli tez danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN'e şükran ve saygılarımı sunarım.

Bu tez çalışmasında yer alan ve Patara Antik Kenti ile ilgili yaptıkları yapı malzeme çalışmalarını esirgemeyen değerli hocalarım Doç. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL ve Doç. Dr. Nihat DİPOVA'ya teşekkür ederim. Ayrıca, tez komitesinde yer alan ve önerileri ile katkıda bulunan değerli hocalarıma teşekkür ederim ve saygılarımı sunarım.

Eğitim- öğretim hayatım boyunca maddi- manevi her konuda bana destek olan, hiçbir şeyi esirgemeyen, bana sonuna kadar güvenen ve onların bu güvenlerinin verdiği his sayesinde hayata sıkı sıkıya bağlanmamı sağlayan aileme ve Sayın Ramazan GÜLCAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarak bu tez çalışması aileme ithaf ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	3
3. MATERYAL VE METOT.....	7
3.1. Patara Antik Kent Tiyatrosu.....	7
3.2. Patara Antik Kenti Yerleşim Alanı Depremselliği.....	12
3.3. Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistemler	14
3.3.1. Temel.....	14
3.3.2. Duvar.....	15
3.3.3. Döşeme.....	16
3.3.4. Sütün ve ayaklar	17
3.3.5. Kemer.....	18
3.3.6. Tonoza	19
3.3.7. Kubbe	20
3.3.8. Tarihi yapılarda harçsız duvar örgü sistemleri.....	21
3.4. Tarihi Yapılarda Kullanılan Malzemeler	22
3.4.1. Doğal taşlar	22
3.4.2. Tuğla	23
3.4.3. Kerpiç.....	24
3.4.4. Kâgir malzeme	25
3.4.5. Harç	25
3.5. Tarihi Yapılarda Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi.....	26
3.5.1. Sertlik deneyi	26
3.5.2. Ultrases Ölçümü.....	27
3.5.3. Yerinde Basınç Deneyi (Flat-jack Deneyi)	28
3.5.4. Radyoaktif Metodlar	29

3.5.5. İnfrared Tomografi Yöntemi.....	29
3.5.6. Yerinde Kayma Deneyi.....	29
3.5.7. Yapıdan Numune Alınması.....	30
3.5.6. Laboratuvar Çalışmaları.....	30
3.6. Tarihi Yapıların Yapısal Davranış	31
3.7. Tarihi Yapılarda Görülen Hasar Tipleri.....	34
3.7.1. Zeminden kaynaklanan hasarlar.....	34
3.7.2. Taşıyıcı sistem tasarımındaki hatalar	36
3.7.3. Hatalı malzeme kullanımı	36
3.7.4. Kötü işçilikten kaynaklanan hasarlar	36
3.7.5. Hava kirliliği ve trafikten kaynaklanan hasarlar	36
3.8. Modelleme İlkeleri ve İdealleştirmeler	37
3.8.1. Geometrinin İdealleştirilmesi.....	37
3.8.2. Malzemenin İdealleştirilmesi.....	37
3.9. Tarihi Yapılarda Modelleme Yöntemleri.....	40
3.9.1. Detaylı mikro modelleme.....	41
3.9.2. Basitleştirilmiş mikro modelleme	41
3.9.3. Makro modelleme	43
3.10. Tarihi Yapılarda Modelleme Araçları.....	45
3.11. Tarihi Yapılarda Analiz Yöntemleri	45
3.11.1. Düşey Yükler Altında Statik Analiz	47
3.11.2. Serbest Titreşim Analizi (Modal Analiz).....	47
3.11.3. Davranış Spektrumu Analizi.....	47
3.11.4. Zaman Tanım Alanında Analiz.....	48
3.12. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	48
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	49
4.1. Patara Antik Tiyatrosu Sahne Yapısının Modellenmesi	49
4.1.1. Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısının geometrik özellikleri	49
4.1.2. Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısının malzeme özellikleri.....	58
4.1.3. Bütünleşik (makro) modelleme için ön çalışma.....	59
4.1.4. Bütünleşik (makro) model ile yapısal analiz.....	63
4.1.4.1. Düşey yük analizi.....	68
4.1.4.2. Serbest titreşim analizi (Modal analiz)	69
4.1.4.3. Davranış spektrum analizi.....	74

4.1.5. Ayrık (mikro benzeri) modelleme için ön çalışma	78
4.1.6. Ayrık (mikro benzeri) modelleme denemesi.....	82
4.2. Tartışma.....	87
5. SONUÇLAR	88
6. KAYNAKLAR.....	90
7. EKLER	96
ÖZGEÇMİŞ	



AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Tarihi Yapıların Bilgisayar Destekli Analizi: Patara Antik Kent Tiyatrosu Sahne Yapısı Örneği” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olduğunu belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

30/07/2018

Habibe ÖZDEMİR



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	: Deprem bölgesi etkin yer ivmesi katsayısı
A _o	: Etkin yer ivmesi katsayısı
A(T)	: Spektral ivme katsayısı
E	: Elastisite modülü
g	: Yerçekimi ivmesi [9.81m /s ²]
G	: Ölü yük
I	: Yapı önem katsayısı
kg	: Kilogram
kN	: Kilo Newton
L _o	: Pimin ilk uzaklığı
R	: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
R _a (T)	: Deprem yükü azaltma katsayısı
sn	: Saniye
S(T)	: Spektrum katsayısı
S _{ae} (T)	: Elastik spektral ivme [m /sn ²]
S _{aR} (Tr)	: r'inci doğal titreşim modu için azaltılmış spektral ivme [m/sn ²]
t	: Ses geçiş süresi
T	: Bina doğal titreşim periyodu [sn]
T ₁	: Binanın birinci doğal titreşim periyodu [sn]
T _m , T _n	: Binanın m'inci ve n'inci doğal titreşim periyotları [sn]
T _A ; T _B	: Spekturum karakteristik periyotları
V	: Ses geçiş hızı

σ	: Basınç gerilmesi
σ_e	: Basınç emniyet gerilmesi
Δl	: Pimler arası mesafe
τ	: Kayma gerilmeleri
τ_e	: Kayma emniyet gerilmeleri
μ	: Sürtünme katsayısı

Kısaltmalar

ASTM C1196-92	: Standard Test Method for in Situ Compressive Stress within Solid Unit Masonry Estimated Using Flat-jack Measurements
ASTM C 1531-03	: Standard Test Method for in Situ Measurement of Masonry Joint Shear Strength Index
DBYBHY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
Eurocode 8	: Depreme Dayanıklı Yapıların Tasarımı
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
TBMM	: Türkiye Büyük Millet Meclisi
TS	: Türk Standardı
TS2510	: Kâgir Duvarlar Hesap ve Yapım Kuralları
TS704	: Harman Tuğla Standardı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Roma dönemi liman alanı ve Patara antik kent merkezi vaziyet krokisi.....	7
Şekil 3.2. Patara Antik Tiyatrosu'nun kumla kaplanmış hali.....	8
Şekil 3.3. Patara Antik Tiyatrosu'nun 1833 yılı kuzey cephe görünümü (Texier 1849).....	8
Şekil 3.4. Patara Antik Tiyatrosu 1881 yılı batı cephesinden görünüm (Benndorf ve Niemann 1884).....	9
Şekil 3.5. Patara Antik Tiyatrosu 1881 yılı doğu cephesinden görünüm (Ferrero 1969)	9
Şekil 3.6. Patara Antik Tiyatrosu galeri kısmı tetrastylos planlı tapınak inşaaı (Alanyalı 2005)	10
Şekil 3.7. Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısı dış cephesi (Alanyalı 2005)	11
Şekil 3.8. Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısı (Alanyalı 2005).....	11
Şekil 3.9. Güneybatı Türkiye'nin jeolojik haritası (Softa, Turan ve Sözbilir 2018)	13
Şekil 3.10. Anadolu ve Akdeniz bölgesinin ana tektonik yapıları (Softa, Turan ve Sözbilir 2018).....	14
Şekil 3.11. Sürekli temel örnekleri	14
Şekil 3.12. Kaba yönlü taş duvar	15
Şekil 3.13. Sıfır derz taş duvar.....	16
Şekil 3.14. Volta döşeme sistemleri ve volta döşeme duvar birleşim detayı (Arun 2005).....	17
Şekil 3.15. Sütun başındaki mesnetlenme sistemi	17
Şekil 3.16. Ayak detayı.....	18
Şekil 3.17. Kovuk (Eğri) kemeri.....	18
Şekil 3.18. Kemerin muhtelif kısımları	19
Şekil 3.19. Tonoz türleri (Çıllı ve Sesigür 2007).....	20
Şekil 3.20. Pandantif kubbe detayı (Çelebi 2001)	21
Şekil 3.21. İsodom duvar örgüsü (Taşlar çift ve tek sıra halinde) (Atalay 2010).....	21
Şekil 3.22. Dolu ve delikli tuğla elemanları (TS704 1979)	23
Şekil 3.23. Tipik kerpiç boyutu (Yorulmaz, Vintzeleou ve Convenour 1984).....	25
Şekil 3.24. N tipi schmidt çekici- P tipi schmidt çekici.....	27
Şekil 3.25. Doğrudan ölçüm - Dolaylı ölçüm (Öztürk ve Mahberel 2006)	28
Şekil 3.26. Çatlak derinliğinin tespiti (Öztürk ve Mahberel 2006).....	28

Şekil 3.27. Tek plakalı ölçüm ile - Çift plakalı ölçüm ile (Aköz 2005)	28
Şekil 3.28. Yerinde kayma deneyi (Öztürk ve Mahberel 2006)	30
Şekil 3.29. Karot makinesi ve numune alımı - Karot numunesi.....	30
Şekil 3.30. Basınç yükleri altında kırılma mekanizması (Ünay 2002)	31
Şekil 3.31. Yığma yapı elamanın yatay yükler altında göstermiş olduğu deformasyon ve basınç çizgisinin konumu (Ünay 2002)	32
Şekil 3.32. Kayma mekanizmasının kırılması (Ünay 2002)	32
Şekil 3.33. Basamak şeklinde diyagonal kırılmanın oluşumu (Ünay 2002).....	32
Şekil 3.34. Deprem yer hareketi süresince yığma yapıda oluşan salınımlar (Yorulmaz, Vintzeleou ve Convenour 1984)	33
Şekil 3.35. Serbest yapısal bir duvarın çökme mekanizması (Yorulmaz, Vintzeleou ve Convenour 1984)	33
Şekil 3.36. Temel oturma çatlakları (Wilson 2018).....	35
Şekil 3.37. Tarih Boyunca Yapısal Analizlerin Doğrulukları.....	38
Şekil 3.38. Yığma malzemelerin homojenleştirilmesi (Lourenço 2002)	39
Şekil 3.39. Basınç altında yığma eleman gerilme-şekil değiştirmesi (Özen 2006)	39
Şekil 3.40. Yığma duvarlarındaki modelleme teknikleri, a) detaylı mikro modelleme, b) basitleştirilmiş mikro modelleme, c) makro modelleme (Lourenço 1996)	40
Şekil 3.41. Basitleştirilmiş mikro model tekniği	42
Şekil 3.42. Yığma duvarın mikro model analizi: a) kuvvet- yer değiştirme diyagramı, b,c) maksimum ve nihai yüklerdeki deformasyonlar (Lourenço 2000).....	42
Şekil 3.43. Birim hücre yöntemi ile homojenleştirme işlemi	44
Şekil 3.44. İki adımlı homojenleştirme işlemi (Schueremans 2001)	44
Şekil 3.45. Analiz tiplerinin karşılaştırılması (Şen 2003).....	46
Şekil 4.1. Patara Antik Tiyatrosu genel görünümü.....	49
Şekil 4.2. Pantik Antik Tiyatrosu sahne yapısının görünümü	49
Şekil 4.3. Patara Antik Tiyatrosu'na ait istiflenen taş bloklar.....	50
Şekil 4.4. Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısı vaziyet planı.....	50
Şekil 4.5. Sahne yapısı güney cephesi dış görünüm	51
Şekil 4.6. Sahne yapısı güney cephesi iç görünüm.....	51
Şekil 4.7. Sahne yapısı kuzey cephesi dış görünüm	52
Şekil 4.8. Sahne yapısı kuzey cephesi iç görünüm	52
Şekil 4.9. Sahne yapısı batı cephesi dış görünüm.....	52

Şekil 4.10. Sahne yapısı batı cephesi iç görünüm.....	53
Şekil 4.11. Sahne yapısı doğu cephesi dış görünüm.....	53
Şekil 4.12. Sahne yapısı doğu cephesi iç görünüm.....	53
Şekil 4.13. Patara Antik Tiyatrosu duvar örüm tekniği (Niescken ve Piesker 2008)	54
Şekil 4.14. Sahne yapısı güney cephesi dış kısmına ait çizim.....	55
Şekil 4.15. Sahne yapısı güney cephesi iç kısmına ait çizim.....	55
Şekil 4.16. Sahne yapısı kuzey cephesi dış kısmına ait çizim	56
Şekil 4.17. Sahne yapısı kuzey cephesi iç kısmına ait çizim	56
Şekil 4.18. Sahne yapısı batı cephesi iç kısmına ait çizim	56
Şekil 4.19. Sahne yapısı batı cephesi dış kısmına ait çizim.....	57
Şekil 4.20. Sahne yapısı doğu cephesi dış kısmına ait çizim.....	57
Şekil 4.21. Sahne yapısı doğu cephesi iç kısmına ait çizim	58
Şekil 4.22. Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısı duvar kalınlıklarının ölçülendirilmesi.....	58
Şekil 4.23. Sahne yapısının bütünleşik modelleme için hazırlanan üç boyutlu görünümü	60
Şekil 4.24. Sahne yapısının bütünleşik model için hazırlanan plan görünümü	60
Şekil 4.25. Bütünleşik model için hazırlanan güney cephesinin detay çizimi.....	61
Şekil 4.26. Bütünleşik model için hazırlanan kuzey cephesinin detay çizimi	62
Şekil 4.27. Bütünleşik model için hazırlanan batı cephesinin detay çizimi.....	63
Şekil 4.28. Bütünleşik model için hazırlanan doğu cephesinin detay çizimi.....	63
Şekil 4.29. Sahne yapısına ait bütünleşik (makro) modelin perspektif görüntüsü	64
Şekil 4.30. Sahne yapısına ait bütünleşik (makro) modelin düşey izdüşümü.....	64
Şekil 4.31. Sahne yapısı bütünleşik (makro) modelinin güney cephesi görüntüsü	65
Şekil 4.32. Sahne yapısı bütünleşik (makro) modelinin kuzey cephesi görüntüsü.....	66
Şekil 4.33. Sahne yapısı bütünleşik (makro) modelinin batı cephesi görüntüsü	67
Şekil 4.34. Sahne yapısı bütünleşik (makro) modelinin doğu cephesi görüntüsü	67
Şekil 4.35. Bütünleşik modellemeyle düşey yük altında planda oluşan şekil değiştirme	68
Şekil 4.36. Yapının serbest titreşim mod şekilleri (Mod1-5).....	70
Şekil 4.37. Yapının serbest titreşim mod şekilleri (Mod6-10).....	71
Şekil 4.38. Yapının serbest titreşim mod şekilleri (Mod15-50).....	72
Şekil 4.39. Yapının serbest titreşim mod şekilleri (Mod100-500).....	73

Şekil 4.40. DBYBHY-2007'ye göre deprem spektrum grafiği	74
Şekil 4.41. Bütünleşik (makro) modellemeyle elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri (G + SPCX yüklemesi)	76
Şekil 4.42. Bütünleşik (makro) modellemeyle elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri (G + SPCY yüklemesi)	77
Şekil 4.43. Sahne yapısının ayırık modelleme için hazırlanan üç boyutlu görünümü	78
Şekil 4.44. Ayırık model için hazırlanan güney cephesinin detay çizimi	79
Şekil 4.45. Ayırık model için hazırlanan kuzey cephesinin detay çizimi	80
Şekil 4.46. Ayırık model için hazırlanan batı cephesinin detay çizimi	81
Şekil 4.47. Ayırık model için hazırlanan doğu cephesinin detay çizimi	81
Şekil 4.48. Ayırık mikro modeli oluşturan kabukların üçboyutlu görünümü	83
Şekil 4.49. Ayırık mikro modeli oluşturan kabukların perspektif görüntüsü	83
Şekil 4.50. Ayırık mikro modeli oluşturan kabukların güney cephe görüntüsü	84
Şekil 4.51. Ayırık mikro modeli oluşturan kabukların kuzey cephe görüntüsü	85
Şekil 4.52. Ayırık mikro modeli oluşturan kabukların batı cephe görüntüsü	86
Şekil 4.53. Ayırık mikro modeli oluşturan kabukların doğu cephe görüntüsü	86

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Güneybatı Anadolu ve yakın çevresinde hissedilen tarihsel dönem depremlerinin dağılımı	12
Çizelge 3.2. Doğal yapı taşlarının ortalama fiziksel özellikleri (Ünay 2002)	22
Çizelge 3.3. Doğal duvar taşlarının dayanım gruplarına göre en küçük basınç dayanımları (TS2510 1977)	23
Çizelge 3.4. Tuğlaların otlama fiziksel özellikleri.....	24
Çizelge 3.5. Analiz Tiplerinin Karşılaştırılması (Şen 2003)	47
Çizelge 4.1. Taş numunelerin ortalama su emme, özgül ağırlık ve boşluk oranı değerleri.....	59
Çizelge 4.2. Taş numunelerin ortalama basınç dayanımı ve elastisite modülü	59
Çizelge 4.3. Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısının homojen malzeme özellikleri	59
Çizelge 4.4. Yapının global doğrultudaki kütle katılım oranları	69
Çizelge 4.5. Yapının bütünleşik (makro) modellemeyle modal periyotları ve frekansları	69
Çizelge 4.6. Yapının ağırlık merkezi	75
Çizelge 4.7. Yapının global doğrultuda oluşan taban reaksiyonları	75

1. GİRİŞ

Tarihi yapılar geçmiş ile gelecek arasında bağ oluşturan kültürel değerlerimizin en önemli parçalarıdır. Bu nedenle en iyi şekilde korunmalı ve muhafaza edilmeleri gerekir. Tarihi yapılar fonksiyonel gereksinimlere göre; sağlık yapıları, sosyal hizmet ve kültürel yapılar, ulaşım yapıları, eğitim yapıları, ticaret yapıları, vb. olabilmektedir. Malzeme çeşitliliği ise kerpiç, tuğla, taş, ahşap, çelik vb. gibi oldukça geniştir. Tarihi yapıların inşası genellikle yığma yapı tekniğiyle yapılmıştır. Tüm taşıyıcı sistem tuğla, taş, ahşap gibi yapı elemanlarının harçlı veya harçsız olarak üst üste konulmasıyla meydana getirilen duvarlı yapılara yığma yapı denir.

Yığma yapıların dayanımını genellikle seçilen malzemenin dayanımı, taşıyıcı elemanın geometrisi ve yerleştirilme şekli belirler. Yığma yapılar çoğunlukla basınca karşı dayanıklı, çekmeye karşı dayanımı düşük malzemeler ile inşa edilmiştir. Bu nedenle bu tür yapılar büyük basınç kuvvetlerinin etkisine karşı büyük direnç gösterirken, eğilme ve kayma gibi etkilere karşı dayanıksız kalmaktadır. Yığma yapıları oluşturan tüm elemanların birlikte davranışı ve etkileşimi de incelenmelidir. Yığma yapının davranış biçimi bu niteliklere göre yorumlanmalıdır.

Tarihi yapıların kullanım ömrünü genelde zemin problemleri ve deprem olmak üzere iki etmen belirler. Bunların dışında kötü işçilik, çevre ve doğa şartları, insanın neden olduğu hasarlar, restorasyon aşamasında yanlış malzeme seçimi vb. etmenler de bulunmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında öncelikle tarihi yığma yapılar, bu yapıların taşıyıcı sistemleri, kullanılan malzemeleri, malzeme özelliklerinin belirlenmesi, yapı davranışının incelenmesi, yapılarda meydana gelen hasar türleri ve modelleme yöntemleri araştırılmıştır. Aynı zamanda örnek çalışma olan Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısının, tarihi önemi, yerleşim alanı, antik kentin bulunduğu bölgenin depremselliği, yapının mevcut durumu incelenmiştir. Patara Antik Tiyatrosu'nda bulunan sahne yapısının bilgisayar modeli hazırlanıp ve bu yapının olası bir deprem senaryosu altındaki davranışına bakılması hedeflenmiştir.

Patara, Batı Akdeniz'de bulunan ve eski çağlarda Likya Uygarlığı'nın başkentliğini yapmış bir liman kentidir. Binlerce yıllık geçmişi ile tarihi miras özelliğine sahip bu bölge ve üzerinde bulunan mevcut tarihi yapılar, günümüzde koruma altına alınmıştır. Son yıllarda yapılan arkeolojik kazılarla kent yeniden gün ışığına çıkmaya başlamıştır. Günümüze kadar mevcut haliyle ulaşan ve en eski demokratik meclise ait bina da bu şehirdedir. 2010'da TBMM kararı ile bu bina restore edilmiştir. Patara Antik Kenti'ndeki bir diğer önemli eser olan tiyatro yapısı da (M.Ö.2.yy.) bir yamacın eteğinde kurulmuş olup tahmini olarak 10.000 kişilik kapasitededir.

Patara Antik Kent Tiyatrosu tarihi yapılar içerisinde nadide eserlerimizden grekon-roman tarzı tiyatrolar içerisinde yer almaktadır. Ayrıca Lykia coğrafyası içerisinde de eşsiz taş işçiliği ile işlenmiş sütunlar, alınlıklar ve nişlerle süslü bir mimariye sahiptir. Patara Antik Tiyatrosu'nun dikkat çeken sahne yapısı yaşadığı doğal afetler neticesinde kumlar altında kalarak tüm güzelliğiyle en özgün şekilde günümüze kadar

ulaşmıştır. Günümüzde tiyatronun kum ile kaplı bölümleri önemli ölçüde temizlenmiş ve yapı sahnesiyle birlikte ortaya çıkartılmıştır.

Patara bölgesi büyük ölçekli deprem yükü üretebilen çeşitli aktif tektonik fayların bulunduğu depreme hassas bir bölgedir. Bu nedenle, bölgede bulunan mevcut tarihi yapıların olası bir deprem sırasında olumsuz etkileneceği söylenebilir. Bu çalışma kapsamında; sonlu elemanlar tekniğine dayanan makro modelleme yöntem ile Patara Antik Kent Tiyatrosu'nda bulunan sahne yapısının bilgisayar modeli hazırlanarak düşey ve yatay yükler altında davranışına bakılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları; gerilme ve şekli değiştirme yönünden değerlendirilerek yapının zayıf yönleri, olası hasar durumları ve alınabilecek önlemler hakkında çeşitli yorumlar yapılmıştır. Bununla birlikte yapının deprem davranışına yönelik ilgili parametreler belirlenmiştir.

Tarihi yapılarda strüktürel davranışını belirleyebilmek için önemli bir etmen de yapıyı oluşturan malzemeler ve bu malzemelerin özelliklerinin belirlenmesidir. Tarihi yapıların duvar gibi taşıyıcı elemanları homojen olmayan bir yapıda olduğundan malzeme özelliklerinin belirlenmesi oldukça zor olmakta ve kendi içinde değişkenlik göstermektedir. Bu çalışmada, yapısal analizde ihtiyaç duyulan malzeme parametreleri için daha önceden aynı bölgede yapılmış ortak özelliklere sahip çalışmalardan faydalanılmıştır.

Literatürde büyük ölçekli tarihi yapıların incelenmesine yönelik çalışmaların, hızlı ve kolay uygulanan bir teknik olması nedeniyle, "makro modelleme" yöntemi üzerine yoğunlaştığı görülmüştür. Yapılan analizler neticesinde ortaya çıkan kritik bölgeler için ayrıca mikro modeller kullanılabilmektedir.

Tarihi yapıların korunması için bu yapıların geometrik ve malzeme özelliklerinin ayrıntılı bir biçimde belirlenmesi ve uygun modelleme teknikleriyle bilgisayar destekli yapısal analizlerinin gerçekleştirilmesi oldukça önemlidir. Davranışın belirlenmesine yönelik yapılan hesaplar, tarihi yapılar için uygun olan yenileme, onarım ve güçlendirme tekniklerinin seçilmesinde ihtiyaç duyulan bilgiyi sağlamaktadır. Bu tez çalışmasının amacı; tarihi Patara Antik Kent Tiyatrosu'nda bulunan sahne yapısının olası bir deprem yüklemesi altında gerçekleştireceği davranışı bilgisayar destekli olarak irdelemektir.

Bu tez çalışmasında hazırlanan bilgisayar modeli için ihtiyaç duyulan cephe resimleri ve detay çizimleri için Piesker ve Ganzert (2012)'nin kitabından faydalanılmıştır. Sahne yapısının öncelikle SAP2000 analiz programı kullanılarak bütünsel (makro) modelleme yöntemiyle analiz yapılmıştır. Bu yöntemle göre; yapıyı oluşturan taş bloklar elastik davranışa sahip birer sonlu kabuk (shell) eleman olarak modellenmiştir. Ayrıca yapının doğrusal ötesi davranışını belirleyebilmek için ayrık (mikro) modelleme tekniğiyle de bir çalışma yapılmış ancak davranışa uygun ara yüz elemanının belirlenememesi ve yeterli bilgisayar gücüne sahip olunmaması nedenleriyle analiz gerçekleştirilmemiştir. Bütünsel (makro) modelleme yöntemiyle elde edilen sonuçlara göre yapının mevcut durumu hakkında yorum yapılmıştır. Böylece bu yapının olası yenileme çalışmalarında faydalı olabilecek gerekli sayısal altyapının sağlanması hedeflenmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

Olatunji, Warwaruk ve Longworth (1986) yığma duvar ve döşeme noktasının dayanımını ve davranışını incelemişlerdir. Değişik durumlar için döşemenin ve yığma duvarın birbirine etkileri üzerine yaklaşımda bulunmuşlar ve yığma yapının maksimum dayanımını ve şekil değiştirmelerini hesaplayan bilgisayar yazılımı yapmışlar.

Paulay ve Priestley (1992) betonarme ve yığma yapıların sismik incelemesini yapmıştır. Yaptıkları çalışmada çok katlı yapıların yapısal analizinden çok inşa ayrıntılarına dikkat çekmişlerdir. Üç prototip üzerine yığma yapıların sismik yükler etkisinde sünekliğini artıran tasarım hesapları vermişler.

Lourenço (1996) çalışmasında mikro modelleme tekniği ile yapılacak olan modellemelerde mümkün olabilecek tüm göçme mekanizmalarını dikkate alan matematiksel bir model geliştirdi. Bu modelleme malzemelerin gerçek davranışlarını dikkate alarak Rankine ve Hill kriterlerini birleştirmek suretiyle bir sınır yüzeyleri elde etmiştir. Geliştirmiş olduğu modellerden elde ettiği sonuçları literatürde yapılmış olan deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırmıştır.

Bayülke (1999) depremde hasar gören yapıların onarımı ve güçlendirilmesi konularında çalışmalar yapmıştır. Yaptığı çalışmada hem betonarme hem de yığma yapılarda deprem sonrası oluşan hasar biçimlerini açıklamış, onarım ve güçlendirme yöntemleri hakkında değerlendirmelerde bulunmuştur. Yapıların güvenlik düzeyinin hesaplanması hakkında bilgiler vermiştir.

Batur (1999) çalışmasında donatısız yığma binanın yatay yükler altındaki davranışını incelemiş ve bu konu ile ilgili Türk Standartlarını, Eurocode 8, AIJ, ACI ve BS 5628 ile karşılaştırmıştır. Türk Şartnamelerinin eksik olduğu durumları belirlemiş ve önerilerde bulunmuştur. Çalışmanın sonunda 3 katlı donatısız yığma binanın yatay ve düşey yükler altında çözümünü yapılmış ve sonuçları irdelenmiştir.

Akhan (2001) İstanbul Üniversitesi Rektörlük Binası örneğindeki kagir yapılarda deprem etkileri konusunda çalışmalar yapmıştır. Çalışmasında taşıyıcı duvar narinlik tahkiklerini ve kayma gerilmesi tahkiklerini yapmış ve tüm yapı için güvenli bulmuştur. Depremden dolayı oluşan kayma gerilmelerinin kullanılan duvar malzemelerinin derzlerinde etkili olduğunu, bunun için kullanılacak harcın önemli olduğunu belirlemiştir.

Luciano, Marfia ve Sacco (2002) çalışmalarında bir tarihi yığma yapının mekanik davranışını gözlemlemişlerdir. Tarihi yığma yapı malzemeleri, bir harç derzindeki bloklardan oluşturulmuş bir bileşik malzeme şeklinde değerlendirilmektedir. Tarihi yığma yapılara ait genel özellikleri görebilmek için mikromekanik yaklaşım önerilmiştir. Çalışmalarında ayrıca FRP katmanlı saçlar ile güçlendirilmiş bir duvar (Saçlar bu duvarın yüzeyine yapıştırılmıştır) analiz edilmektedir. Desteklenmiş ya da desteklenmemiş bir tarihi yığma yapıya ait davranış modelleyebilmek için; FRP saçların, bloğun ve harcın ilerleyen hasarını da dikkate alarak basit bir homojenleştirme yöntemi tavsiye edilmektedir. Elastik ile izotropik viskozite hasar modellerinde, blok ve harç açısından ayrı ayrı hasar kriteri uygulanmıştır. Desteklenen ya da desteklenmeyen tarihi yığma yapı

panelleri üstündeki hasarı gözlemlemek üzere tavsiye edilen prosedür işletilerek sayısal çalışmalar geliştirilir.

Asteris ve Tzamtzis (2003) çalışmalarında donatısız yığma yapıların sonlu elemanlar modellemesinde makro modellemeyi dikkate alarak iki eksenli gerilme hali için bir algoritma önermişlerdir. İki eksenli gerilme altındaki model için, anizotropik kırılma yüzeyi tanımlamışlardır.

Akan ve Özen (2005) sonlu elemanlar yöntemi ile Bursa Yeşil Türbe'nin deprem analizini gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, Bursa Yeşil Türbe incelenmiş ve SAP2000 programı ile strüktürel analizini yapmışlardır. Yapının modları incelenerek, salınım periyodları hesaplanıp elde edilen veriler tepki spektrumu ile yapıya deprem yükü uygulamak için kullanılmıştır. Yeşil Türbe'ye ait sonlu elemanlar analizi sonuçlarının yorumlanması amacıyla moment, yer değiştirme (deplasman), kesme kuvveti ve eksenel kuvvetleri içeren grafiklerden yararlanılmıştır. Bu çalışmada sınırlı sayıda eleman ve düğüm noktası kullanılarak ve doğrusal elastik malzeme özelliklerine göre yapıldığı için gerçek malzeme davranışı açısından tatmin edici sonuçların elde edilmesinin zor olduğundan bahsetmiştir. Daha fazla gerçekçi sonuçlar elde etmek amacıyla doğrusal olmayan analiz yöntemleri kullanılmasının sonucuna varılmıştır. Yapının basınç gerilmelerine karşı dayanım sağladığını, yapıda çekme gerilmeleri oluşacağını ve bunların çatlaklar oluşturacağı sonucuna varmıştır.

Aköz (2005) yığma kagir yapılarda hasar tespiti hakkında çalışmalar yapmıştır. Yapmış olduğu çalışmalarda yığma yapılarda oluşan hasar biçimlerini açıklamıştır. Oluşan hasarların tespitinin en kısa sürede yapılması gerektiğini belirtmiştir. Yığma yapıların olması muhtemel depremlere ve dış etkilere karşı onarım ve güçlendirilmesi gerektiği sonucuna varmıştır.

Bilgin (2005) Mimar Sinan'ın kubbeli tasarladığı yapıların mekân örtü sistemlerinin yapısal davranışları hakkında çalışma yapmıştır. Çalışmasında, İstanbul'da bulunan Şehzade Camisi'ni ele almıştır. Camiyi mekân örtü sistemine ait geometrik boyutları göz önüne alarak; dört eşit rijitlikli kemere oturan sabit yükleri altındaki teorik örtü sistemlerinin, SAP2000 Yapısal Analiz Programı aracılığıyla sonlu elemanlar yöntemi kapsamında statik analizler yapılmıştır. Bu analizlerin sonucunda; kemer, yarım kubbe, ana kubbe ile pandantif dörtlüsünün birbiriyle yapısal etkileşimleri belirlenmiştir. Ayrıca her sistemin sayısal olarak yapısal davranışı da oluşturulmaya çalışılmıştır.

Ercan, Kırılı, Nuhoğlu ve Arısoy (2006) tarihi yapılarda sütun-kiriş taşıyıcı sistemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile yapısal analizi konusunda çalışmışlardır. Antik yapılarda sıklıkla karşılaşılan, mermer malzemesinden silindir formda kesilen tamburların üst üste oturtulup kurşun kenetler ile bağlanan sütunlar ve iki sütunun tepede mermer bir kirişle birleştirilmesinden oluşan çerçeve taşıyıcı sistemlerin yapısal davranışı araştırılmıştır. Uygulama örneği olarak İzmir Ahmetbeyli'de yer alan Apollon Klarus tapınağı ele alınmıştır. Msc Marc Mentat bilgisayar programı ortamında solid sonlu elemanlarla modellenen tek sütun ve sütun-kiriş çerçevesinin, 12 Kasım Düzce depremi etkisinde dinamik davranışı incelenmiştir. Teorik analizlerin sonucunda, inşa edildiği devirlerdeki koşullarda kullanılmış olan kurşun malzemesinin deprem etkisinde oldukça etkili bir birleşim aracı olduğu tespit edilmiştir.

Özcan ve Yılmaz (2006) tarihi Sapanca Rahime Sultan Cami'sinin dinamik davranışı hakkında çalışma yapmış, çekme gerilmelerinin küçük bir bölgede ve çok kısa bir zaman aralığında ortaya çıktığını bunun yapı güvenliğini olumsuz etkileyeceğini, sınırlı bir bölgede kılcal çekme çatlaklarının oluşabileceğini belirtmiş, yapının dinamik parametrelerden olan serbest titreşim periyotları ve mod biçimleri incelendiğinde birinci ve ikinci modların yatay salınımlar şeklinde olduğunu, burulma moduna hemen girmediğini belirtmiştir.

Öztürk ve Mahberel (2006) antik yapıların güvenliğinin belirlenmesi, güçlendirilmesi ve onarımı konusunda çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında; antik yapılar, kullanılan malzeme özellikleri ve taşıyıcı sistem elemanlarının yerinde belirlenmesiyle alakalı çalışmalar ve hasarla ilgili detaylara yer verilmiştir. Ayrıca bu yapıların güvenliğinin belirlenmesi, deprem yükleri altında oluşacak davranışı ve gereken durumlarda uygulanabilecek onarım ve güçlendirme yöntemleri tanıtılmıştır. Uygulamada Edirne Muradiye Cami ve İstanbul Vefa Lisesi örnekleri verilmiştir. Muradiye Cami'nin duvarlarının basınç ve kayma gerilmelerini sağladığı sonucuna varmışlar. Bazı duvarlarda bulunana çatlakların onarılması ve farklı oturmalar bulunan temellerin iyileştirilmesinin gerekliliğinden bahsetmişler. Vefa Lisesi'nin bazı duvarlarının güçlendirilmesi gerektiği sonucuna varmışlar ve güçlendirme örnekleri vermişler.

Aydın, Fahjan ve Çömlekçioğlu (2007) yaptıkları çalışmada tarihi yığma yapıların sismik güçlendirilme işlerinde yaygın olarak kullanılan Fiber Takviyeli Plastikler ile Zemin yalıtımı gibi güncel sismik güçlendirme yöntemleri üzerinde durulmuştur. Bu tür yöntemlerin tarihi yığma yapılarda uygulanmasında olumlu veya olumsuz taraflarını uluslararası koruma tüzükleri ve koruma disiplini çerçevesinde değerlendirilerek öneriler geliştirmişlerdir.

Ural ve Doğangün (2007) yığma yapıların deprem performansını mikro modelleme tekniğini kullanarak incelemişlerdir. Çalışmalarında basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemini kullanarak tarihi yığma modellere ait deprem davranışlarını incelenmiştir. Yapılan bu çalışmada 4 farklı yığma yapı modeli incelenmiştir. Çalışmanın inceleme aşamaları öncelikle doğrusal elastik analiziyle gerçekleştirilmiştir. Bu analizin neticesinde en çok düşey eksenindeki hatıla ait olan modelde ötekilerine kıyasla en düşük miktarda yatay yer değiştirme (deplasman) gerçekleşmiştir. Modal analizin sonucunda aynı modele ait periyotlar diğerlerine kıyasla daha küçük çıkmıştır. Nedeni ise düşeydeki hatıllar modele ait rijitliği artırması yönündeki katkıdan dolayı olmuştur. Tepki spektrumu analizleri neticesinde yine en az yer değiştirme yapan en fazla düşey hatıla sahip olan model olmuştur. Yığma yapının düşey hatıllarla desteklendiğinde depreme karşı daha dayanımlı olduğunu belirtmişlerdir.

Türker (2007) taş yapıların onarımı, hesap esasları, yönetmelik önerileri ve depreme karşı güçlendirilmesi çalışma yapmışlar. Yaptığı çalışmada, taş yapıların doğru hesaplama, doğru malzeme ve doğru bağlantılarla yapımı anlatılmış, mevcut yapıların hasar şekilleri verilmiş, onarım ve güçlendirilmesi üzerinde durulmuştur. Ülkemizde yığma yapılarla ilgili standart bulunmadığı ve ülkemizin büyük bir kısmında yığma yapı olmasına karşın bu konu hakkında sadece deprem yönetmeliğinde bahsedildiği için bu konunun Eurocode ile incelemesi yapılmıştır.

Piesker ve Ganzert (2012) yapmış oldukları çalışmalarında Likya tiyatrosu ile ilgili ortaya konulan ilk monografik örneği hazırlamışlardır. Yapıyı bir bütün olarak (sahne binası, koloin, summe cevea'daki noas ve devşirme duvarlar) ortaya koymuşlar ve böylece tiyatronun tarihçesi Helenistik dönemdeki inşası ve İmparatorluk-Roma dönemi tadilatlarından olasılıkla erken Bizans dönemine terk edilişine dek belgelenmişler ve araştırmışlardır.

Ural (2009) yapmış olduğu çalışmasında geliştirilmiş olan bir adet pratik deprem hesabı programı ile 2 adet sonlu elemanlar programını tanıtmış ve bunlarla birlikte LUSAS ve DIANA programları yardımıyla çeşitli analizler gerçekleştirmiştir. Yığma duvar dayanımlarını, dolayısıyla da yığma yapıların deprem davranışlarını etkileyecek olan bazı parametreler (harç ve tuğla dayanımları, örgü biçimleri, düşey hatılların durumu gibi) yapısal modeller yardımıyla irdelenmiştir. Önerilen modelleme tekniği depremde hasara uğramış gerçek bir yığma yapı üzerinde uygulanmış ve sonuçlar tartışılmıştır. Ayrıca çalışmada, harç ve yığma birimlerin dayanımlarının, örgü biçimlerinin ve hatılların yerleştirilme biçimlerinin duvarın yük taşıma kapasitesine etkileri ortaya konmuş, bu konuda çalışacak olanlara açık kaynak kodlu bir sonlu elemanlar programının yazılımı sunulmuştur.

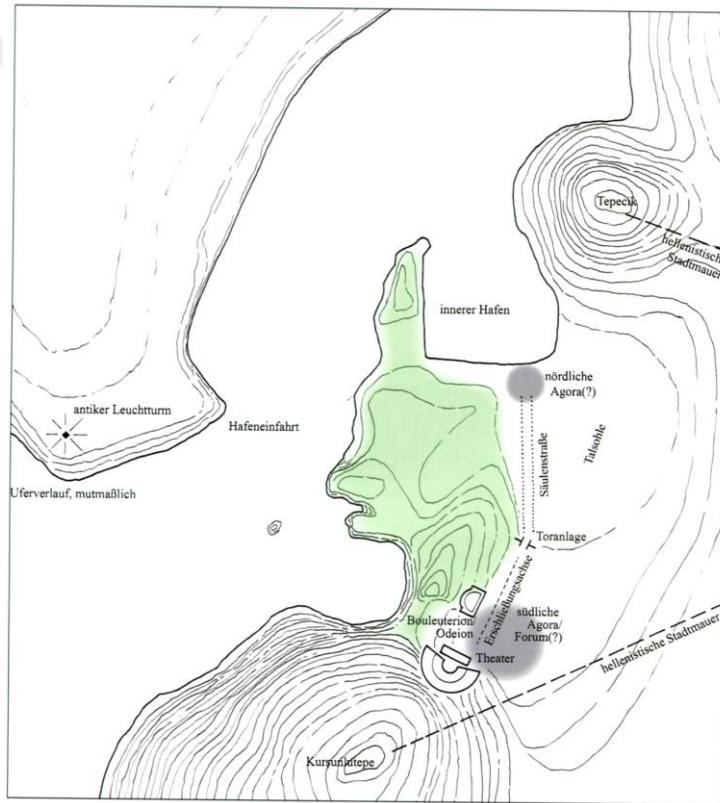
Örnek olarak ele alınan Patara Antik Kent Tiyatrosu sahne yapısının incelenmesiyle ilgili literatürde herhangi bir analitik çalışmaya rastlanmamıştır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Patara Antik Kent Tiyatrosu

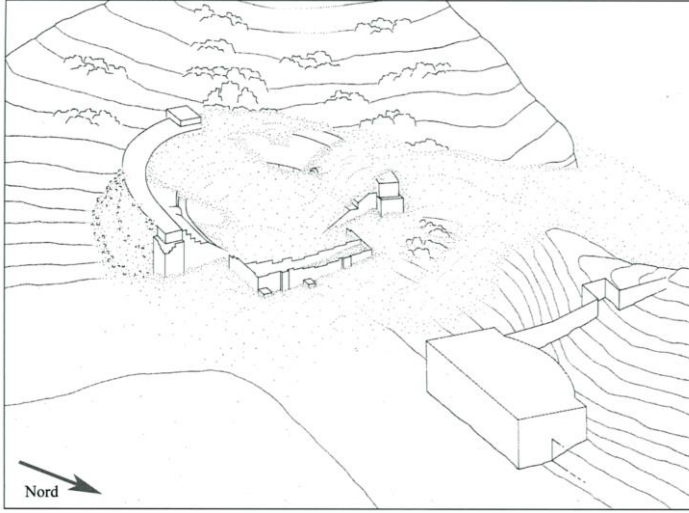
Patara antik kenti Antalya iline ait Kaş ilçesi sınırları içerisinde yer almaktadır (Şekil 3.1). Kayalık Lykia coğrafyası içerisinde deniz kıyısında yer alan önemli bir liman kentidir. Kent, Roma İmparatorluk Dönemi'nde Lykia-Pamphylia eyaletinin başkentliğini yapmış bir metropoldür. Patara, Lykia bölgesinin en önemli liman kenti olmasının yanında, Xanthos Vadisi'nin ağzında yer almasından dolayı da bölgenin dış dünyaya açıldığı nokta olmuştur (Işık 2000).

Patara Antik Tiyatrosu, Roma dönemi kentinin güneyinde, günümüzde Kurşunlu Tepe olarak adlandırılan yükseltinin kuzey yamacına yaslanır şekilde inşa edilmiştir.



Şekil 3.1. Roma dönemi liman alanı ve Patara antik kent merkezi vaziyet krokisi

Eski ve köklü bir Lykia kenti olan Patara kentinin terk edilmesine neden olan olay Patara limanının deniz kumları ile dolararak kullanılmaz hale gelmesi ve deniz kumunun sadece limanda kalmayıp karaya doğru ilerlemesi ile şehrin kumlarla kaplanması ve kullanılmaz hale gelmesidir. Kum fırtınasından Patara Antik Tiyatrosu da nasibini almış ve yıllar boyu kumlar altında örtülü halde kalmıştır (Şekil 3.2). Kum örtüsünün sağlamış olduğu koruyucu tabaka yapının antik özelliklerinin bozulmasını önlemekle kalmayıp dışarıdan müdahaleye ve kaçak kazılara da olanak vermemiştir.



Şekil 3.2. Patara Antik Tiyatrosu'nun kumla kaplanmış hali

19'uncu yüzyılın ilk yarısından Texier'in yapmış olduğu Patara Antik Kenti'nin kuzey cephesini gösteren resim çalışmasında sahne yapısının oldukça iyi korunduğunu ve ayakta kaldığını göstermektedir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Patara Antik Tiyatrosu'nun 1833 yılı kuzey cephe görünümü (Texier 1849)

19'uncu yüzyılın ikinci yarısında bu bölge ile ilgili çalışma yapan Benndorf ve Niemann'ın görüntülediği batı cephesine ait fotoğraf çalışması, sahne yapısının ikinci kata kadar oldukça iyi korunduğunu göstermektedir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Patara Antik Tiyatrosu 1881 yılı batı cephesinden görünüm (Benndorf ve Niemann 1884)

Aynı dönemde bu bölge ile ilgili çalışma yapan Ferrero'nun doğu cephesini gösteren fotoğraf çalışması, sahne yapısının kuzey ve güney cephelerinin ikinci katının zarar gördüğünü ancak birinci katının ayakta kaldığını göstermektedir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Patara Antik Tiyatrosu 1881 yılı doğu cephesinden görünüm (Ferrero 1969)

Patara Antik Tiyatrosu harçsız taş duvar örüm teknikleri kullanılarak inşa edilmiştir. Seyircilerin oturması için yapılan alan cavea ve sahne yapısı sert kaya üzerine oturtulmuş, sahne yapısının iç kısmında mermer, granit ve yerel kayalar kullanılmıştır. Bu özelliği ile Helen dönemi mimarlığı ile benzerlik göstermektedir.

Hanson (1959)'a göre, oturma basamaklarının en üstünde yer alan galeri kısmında, tam orta eksene gelecek şekilde inşa edilmiş tetrastylos planlı bir tapınak yer almaktadır. Bu şekillendirme Roma mimarlığında Cumhuriyet dönemi tapınak tiyatro geleneğinin bir yansıması olarak görülmelidir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Patara Antik Tiyatrosu galeri kısmı tetrastylos planlı tapınak inşaatı (Alanyalı 2005)

Hanson (1959)'a göre, Pompeii's tiyatrosunda ilk kez tapınak tiyatro kavramına farklı bir anlam kazandırılmıştır. Roma tiyatrosu şeklinde bir yapı inşa edildikten sonra direkt caveanın üzerine bir tapınak oturtulmuş. Anadolu da böyle bir oluşuma bir tek Patara'da rastlanır. Bu özelliği ile de Patara Anadolu tiyatroları arasında ünik olduğunu bir kez daha vurgulamaktadır.

Alanyalı (2005)'ya göre 2004 yılında yapılan kazı çalışmaları neticesinde ortaya çıkan sahne yapısının dış cephesinin orta ekseninde bulunan kapı, tiyatronun dış cephesinin açıldığı alanın ne kadar önemli olduğunu bir kez daha vurgulamıştır. Sözü edilen tiyatro sahne yapısının dış cephesi, ScaenaeFrons cephesi ile boy ölçüşecek şekilde mimari unsurlar ile hareketlendirilmiştir (Şekil 3.7). Patara bu konumu ile de Anadolu tiyatroları içerisinde ünik bir yapıdır.



Şekil 3.7. Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısı dış cephesi (Alanyalı 2005)

Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısı, zemin katının tamamı ve birinci katın da bir kısmı ile özgün şekilde ayakta kalmıştır. Lykia bölgesine özgü taş işçiliği ile özenli olarak inşa edilmiş sahne yapısının ilk halinde mermer, granit ve yerel kayacın malzeme olarak karşılıklı kullanıldığı, sütunlar, nişler, aedula ve alınlıklarla süslü bir cephe mimarisine sahip ScaenaeFrons bulunduğu bilinmektedir (Alanyalı 2005) (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısı (Alanyalı 2005)

Patara antik tiyatrosu hem sosyal merkez hem de dini merkez olması yönüyle antik kentler içerisinde yerini almış ve bu tiyatro üzerine yapılacak çalışmalar ile Helenistik ve Roma dönemi tiyatrolarına ışık tutacak ünik bir yapıdır.

3.2. Patara Antik Kenti Yerleşim Alanı Depremselliği

Patara antik kentinin de içinde bulunduğu Lykia kıyıları tarihsel süreçte birçok deprem yaşamış ve önemli derece hasar görmüştür (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Güneybatı Anadolu ve yakın çevresinde hissedilen tarihsel dönem depremlerinin dağılımı (Softa, Turan ve Sözbilir 2018)

Numara	Zaman	Lokasyon	Şiddet	Açıklamalar
1 ^a	88-MÖ	38.0781-30.1609	?	
2 ^b	60-MS	37.8000-29.1000	IX	
3 ^a	68-MS	Likya Kıyıları ve Demre	IX	Tsunami
4 ^{acde}	141/142-MS	Myra-Demre	VIII	
5 ^d	144-MS	Fethiye-Kalkan	VIII	
6 ^f	240-MS	Myra-Arycanda	?	
7 ^d	344-MS	Rhodos	IX	
8 ^a	494-MS	37.8383-29.0866	IX	
9 ^{ac}	529/530-MS	Myra	VIII	
10 ^g	1609-MS	Rhodos	IX	Tsunami
11 ^g	1741-MS	Rhodos	VIII	Tsunami
12 ^c	1743-MS	Antalya	?	Tsunami
13 ^g	1756-MS	Doğu Akdeniz	V	
14 ^h	1759-MS	Akdeniz Kıyıları	VIII	
15 ^h	1849-MS	Akdeniz Kıyıları	VI	
16 ^h	1857-MS	36.800-28.300	VI	
17 ^h	1869-MS	36.800-27.900	VIII	
18 ^h	1885-MS	37.800-28.200	IX	
19 ^h	1887-MS	Akdeniz Kıyıları	VII	
20 ^h	1896-MS	36.5000-28.000	X	
21 ^h	1897-MS	36.8000-28.3000	VI	

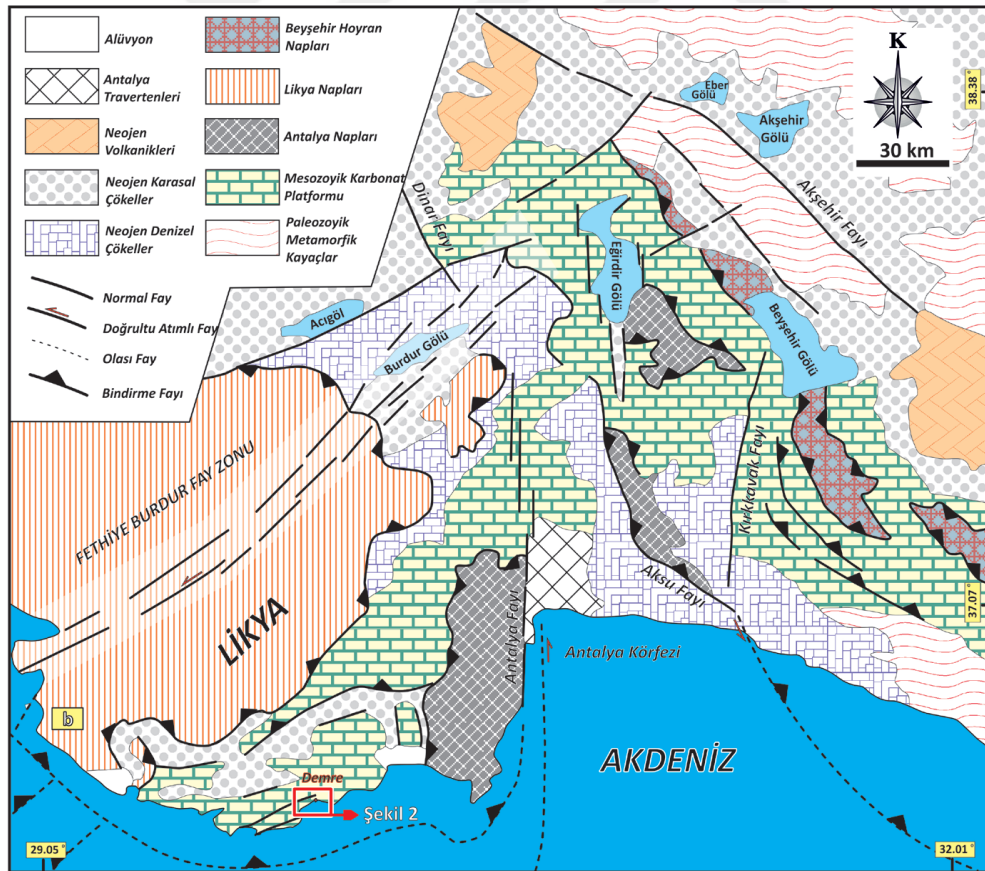
Patara antik kenti tiyatro bölümü Bean (1978) ve Duggan (2004)'nın çalışmalarına göre M.S. 13-37'deki yıkıcı depremden sonra yoğun hasar görmüştür. Lykia kıyılarının büyük bir bölümüne hasar veren M.S. 60-68 depreminin ardından Patara'da tsunami meydana gelmiştir (Öner 1998). M.S. 141'de Rodos, Lykia ve Karya'da ciddi zararlar yaratan 7 büyüklüğündeki depremler Myra, Trebendai, Sura, Ision antik kentleri de etkilenmiştir. Bu depremden sonra buralarda ve daha birçok yerde (Xanthos, Olympos, Pinara, Tlos, Letoon, Choma, Podalia, Arycanda, Oinoanda, Calynda, Cyaneae, Aperlae, Nysa, Sidyma, Acalissos, Patara, Perge, Termessos) hayırsever Opramoas tarafından taş tiyatrolar, hamam, tapınak vb. yapılar onarılarak restore edilmiştir (Duggan 2004).

Bayburtluoğlu (2003), çalışmasında M.S. 240 ve M.S. 385 yıllarında Arycanda merkezli neredeyse tüm Likya kıyı şeridi boyunca hasara neden olan depremler meydana geldiğini ifade etmiştir.

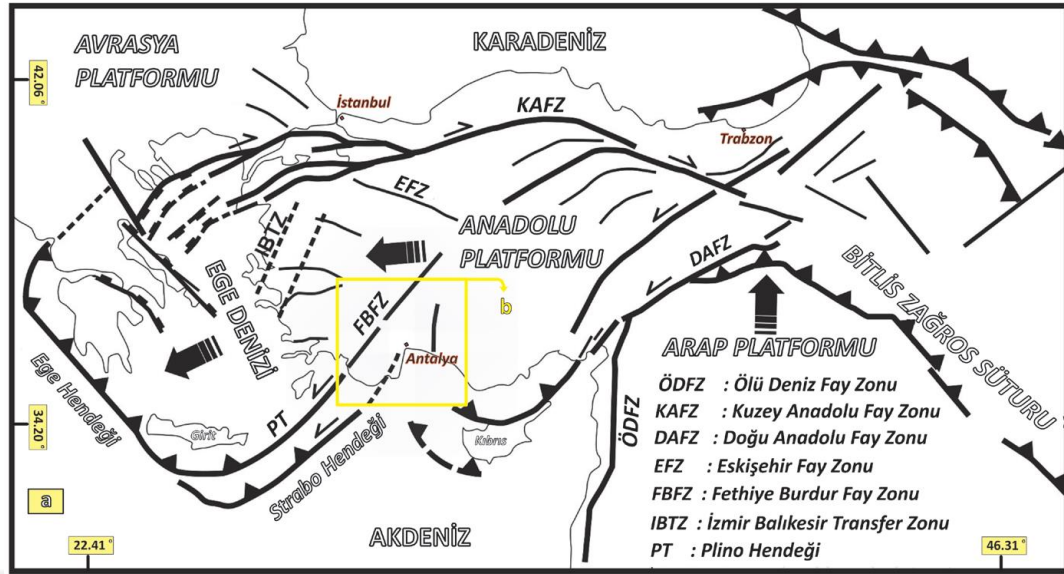
Guiooni vd. (1994), Ötügen (1996) ve Duggan (2004), Myra-Demre'ye yoğun hasar veren diğer bir depremin M.S. 529-530 depremi olduğunu ve bu sarsıntıdan kırık hattı boyunca oluşan yatay yer değiştirmenin Kekova yakınlarında 7 metreye eriştiğini saptamışlardır. Aynı zamanda bu depremden tüm Likya kıyıları ağır bir şekilde etkilenmiş ve bu olay M.S. 68 yılında Likya sahillerindeki Myra, Patara, Xanthos, vb. gibi aynı alanları etkileyen depremin ve tsunaminin tekrar ettiğini göstermektedir.

7. yüzyılda Myra'da iki büyük sarsıntı meydana gelmiş ve Aparlea, Kekova ve Simena'nın denizin içine batarak Antalya'nın batık kentlerinin şekillenmesine neden olmuştur. 1489, 1492 ve 1741 yıllarında Rodos ve yakın çevresini etkileyen depremler meydana gelmiştir. Bu depremler deniz içinden geçen tektonik hatlarda meydana gelmiş ve sonrasında tüm Likya kıyılarını etkileyen tsunamiler oluşmuştur (Duggan 2004).

1743, 1759, 1849, 1858, 1887 ve 1911'de depremler Antalya ve Rodos kıyılarını etkilemiştir (Duggan 2004). 1969 ve 1975 yıllarındaki depremlerde tüm Akdeniz kıyıları, özellikle Kaş, Kalkan, Rodos ve yakın çevresi etkilenmiştir (Duggan 2005) (Şekil 3.9-10).



Şekil 3.9. Güneybatı Türkiye'nin jeolojik haritası (Softa, Turan ve Sözbilir 2018)

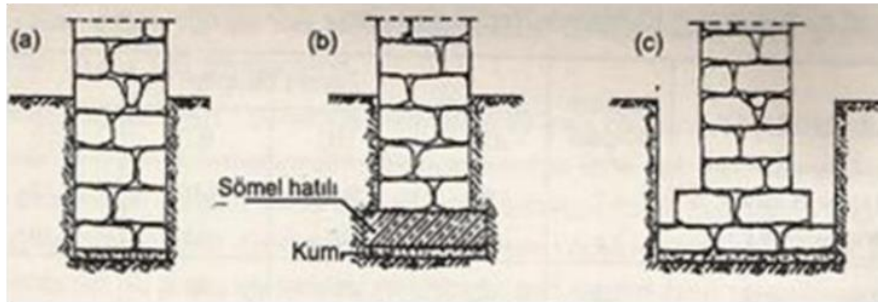


Şekil 3.10. Anadolu ve Akdeniz bölgesinin ana tektonik yapıları (Softa, Turan ve Sözbilir 2018)

3.3. Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistemler

3.3.1. Temel

Temel, yapıya etki etmekte olan yüklerin (yapının kendi ağırlığı, hareketli olan yükleri, rüzgâr, deprem, kar vb.) aktarılmasını yapının zeminine doğru ileten taşıyıcı elemandır. Tarihi yapılarda günümüzün şartlarındaki yapı tekniğindeki gelişme olmadığı için ilkel kalmıştır. Sağlam zeminlerde sığ temeller kullanılırken, yumuşak zeminler de yapının ana kayanın üzerine oturması için derin temeller kullanılmıştır. Sığ temel yapıları taşıyıcı duvarlarının altında sürekli temel şeklinde yapılabilir ya da sütun ve ayaklarının altında tekil temel şeklinde de yapılabilir. Derin temel çeşitleri genel olarak zeminin zayıf ve gevşek olduğu yerlerde zeminin sağlamlaştırması için tercih edilmiş, ahşap vb. malzemeler kullanılarak kazıklar çakılmış ve bunlarında üzerine yeniden ahşaba benzer malzemelerden ızgaralar oluşturulup yapının ızgaralar üzerine oturtulması sağlanmıştır. Derin temeller ve sığ temellerin haricinde tonoz temeller de bulunmaktadır. Bu tür temeller de yapının kademeli bir şekilde inşa edilmesinde kullanılmaktadır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Sürekli temel örnekleri

3.3.2. Duvar

Kerpiç, taş, tuğla malzemelerinden oluşabilen, yükleri zemine doğru aktaran düşey eksenli düzlemsel elemanlar olarak tanımlanır. Duvarların boyutlarını belirleyecek olan etkenler; üst yapı doğrultusunda gelen düşey ve eğik yükler, malzeme türü, yan eksenindeki deprem yükleri, kapı veya pencere boyutları olarak sıralanabilir. Duvar bu tür yükleri taşıyabilmesi için bütün bir şekilde çalışabilmesi gerekmektedir. Gerilme kuvvetlerini duvar kesitlerinde homojen bir şekilde dağıtmak için tuğla ve taşlar birbirlerine hatıl, harç ve kenetlerle bağlanmaktadır (Öztürk ve Mahberel 2006).

Duvarlar yapıma çeşitlerine göre, sıfır derz taş duvar ve kaba yönü taş duvar şeklinde sınıflandırılabilir.

Kaba yönü taş duvarlar: Taşların rastgele yontularak düzlendiği yüzeylerin, görünen duvar yüzeylerine denk gelebilecek şekilde duvarlar oluşturulur. Her iki duvarın da yüzleri böyle oluşturularak duvarların orta kısmı sandık taş dolgusu yapılıdır. Bu şekildeki taş duvarların yapılması, tarihi yığma yapılarda birer metrelik yükseklik olacak şekilde örülerek gerçekleştirilir. Duvar örme işlemi bir metreye ulaşıncaya duvarın düzleme yüzeyi oluşturulmaktadır. Bu yüzeyin üzerinde iki sıralı tuğlaya da iki sıradan çok tuğladan duvar bölgesini oluşturmak gelenek olmuştur. Tarihi yapıların taşıyıcı duvarlarının, düzleme yüzeylerine, ahşaptan kalas çekme elemanlarını yerleştirmektedir. Duvarlar üzerinde oluşan çekme güçlerini karşılamak amacıyla duvarlara ait bu kısımlara ahşap hatıllar yapılmaktadır. (Bayraktar 2006) (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Kaba yönlü taş duvar

Sıfır derz taş duvar: Sürtünmeyi azaltmak ya da mimari estetiklik amacıyla ya da kapiler sularının duvarın üst katmanlarına çıkmasını engellemek maksadıyla taşların aralarında harç kullanılmadan yapılmış olan düzgün örme taş duvar yapılarına sıfır derz taş duvarlar denilir (Bayraktar 2006) (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Sıfır derz taş duvar

3.3.3. Döşeme

Döşeme, yapıya ait iki katı, en üstteki kat ile dıştaki mekânın ya da yapının oturmuş olduğu zemin ile kapalı hacmini ayırma görevini üstlenmiş yatay taşıyıcı yapı elemanlarıdır. Yapıya ait döşemeler, inşa edilmiş oldukları malzemelerin türüne göre kâgir, ahşap döşemeler gibi isimlendirilmektedir (Soygeniş 1999).

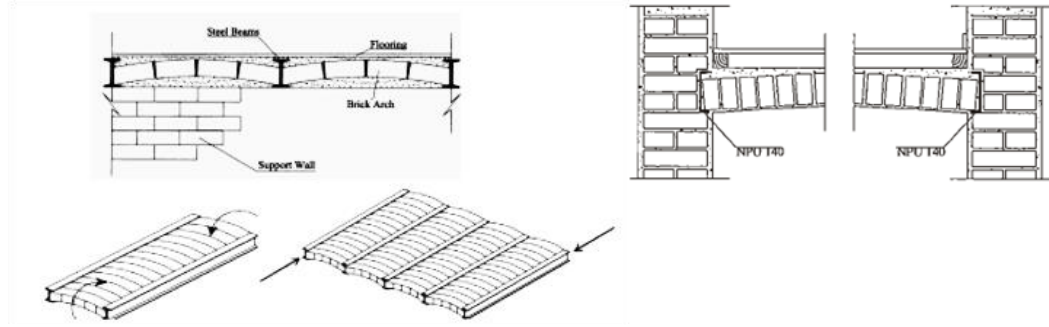
Özellikle bina türü yapılarda, döşemeler yüklerin yapı sistemi ile ilk karşılaştıkları elemanlarıdır. Yapıların gerçek amacının bir mekânı örtmek olduğu düşünülürse, örtü sistemini veya katlar arasında tabanı ve tavanı oluşturan döşemelerin, yapıların mimari formunu etkilen en önemli yapı elemanları olduğu söylenebilir. Döşemeler düşey eksenli yüklerin etkisinde, farklı yük iletme çeşitleri haricinde yapıların genel davranışlarını değiştirmezler. Deprem esnasında diyafram etkisini göstermesi nedeniyle yatay eksenli yüklerin iletimi açısından döşemelere yönelik önem artmaktadır. Ayrıca, yapıya ait bir kısım bölümlerin döşemelerinin olmaması veya boşluklar bulunması düzensiz bir plan oluşturmakta olup, yapının deprem durumundaki tepkilerini olumsuz etkilemektedir (Ünay 2002).

Tarihi yapıların yığma duvarlarındaki çatı ile döşemeler; prekast beton kirişli, çelik kirişli (volta), ahşap kirişli, ahşap aşık ve mertekli veya yerinde dökme olan betonarme döşemeler şeklinde yapılmaktadır (Arun 2005).

Tarihi yapıların yığma duvarlarındaki ahşap kirişlere sahip döşemeler sadece bir yönün doğrultusunda çalışmaktadır. Ahşap özellikli döşemelerin kirişlerini yığma duvara ait nemden korumalı, hizmet süresi boyunca düşmesini engellemek amacıyla duvar ile sağlam bağlanmalıdır ayrıca herhangi bir nedenden dolayı yerinden oynama yaptığında duvarı parçalamasını önleyecek biçimde dönebilmesini sağlamak gereklidir (Arun 2005).

Çelikten I tip profillerden oluşan kirişlerin arasını tuğla tonozlar ile örülmüş olan çelik döşemeler, sadece tek bir yön doğrultusunda çalışabilen döşeme çeşitlerindendir. Düşey eksenli döşemelere etki eden yükleri tuğla tonoz kemerleri baskılayınca çalışarak uzun eksendeki volta kirişler üzerine, bu kirişler ise üzerindeki duvarların veya kirişlerin üzerine iletir. (Arun 2005) (Şekil 3.14).

Yatay eksendeki deprem yüklerinin etkisinde çelikten profiller kayma yapabilir, tuğladan kemerler, düzlemine dikey aynı zamanda da düzleminin doğrultusunda eğilmeyle zayıflama yapabilir, volta kirişler ile tuğlalar arasındaki dinamik etkileşim ortaya çıkabilir ayrıca sistemin diyafram özellikli bir çalışmayı göstermemesi beklenebilir (Arun 2005).

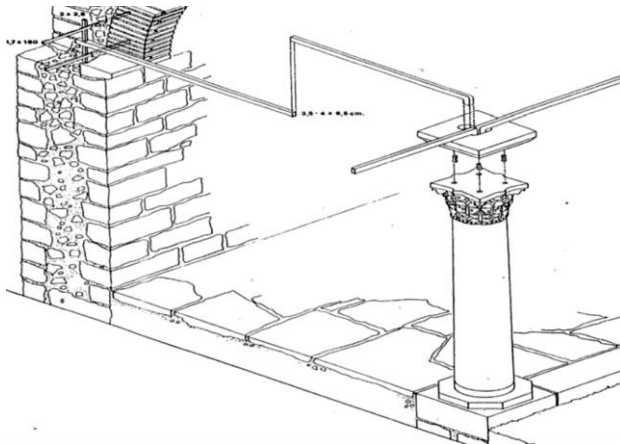


Şekil 3.14. Volta döşeme sistemleri ve volta döşeme duvar birleşim detayı (Arun 2005)

I profilden kirişin uçlarının dikey bağlama veya I kirişlerin aralarında ızgara yapı gerçekleştirecek biçimde I profilleri düzenleme, çelik döşemelerin depremsel dayanıklılığını artırmaktadır. Tarihi yapılara ait döşeme ve çatıları tonoz veya kubbeyle gerçekleştirilmiştir. Böyle eğrilik özellikli yüzeylerdeki mesnetlerine uygulanan itki kuvvetler yeterli düzeyde karşılandığı takdirde gayet stabil olacaktır (Arun 2005).

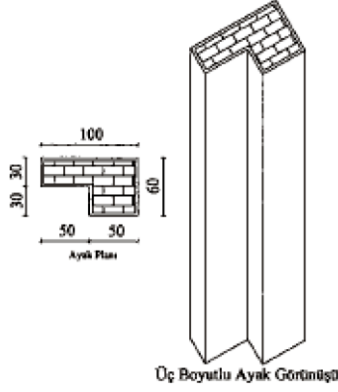
3.3.4. Sütün ve ayaklar

Sütunlar tek parça şeklinde veya birden fazla taş bloktan oluşan düşey eksen yapı elemanlarıdır. Birkaç blok ile oluşturulurlar ise, ahşap ya da bronz kenetlerin yardımı ile birleştirilebilirler. Genellikle daire veya çokgen kesite sahip olabilen sütunun taşımış olduğu kirişlerin veya kemerlerin yüklerini toplama amacıyla sütunun başlık kısmı, yükleri altında bulunan yapı elemanlarına aktarmak maksadıyla sütun tabanı yapılmaktadır (Çamlıbel 2000) (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Sütun başındaki mesnetlenme sistemi

Ayaklar, enine kesitinin sütunlarınkinden geniş olmasıyla birlikte; duvara benzer şekilde örülmüş olan düşey taşıyıcılardandır. Mekân örtüsüne ait düzen ile kullanılış amacına aynı zamanda da yükün aktarılma şekillerine göre karışık geometrilerde üretilmişlerdir (Wilson 2018) (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Ayak detayı

Ayıklardan ana taşıyıcı olanlarında oluşabilecek bir çatlaklık ya da mafsala benzer oluşum, yapıya ait stabilizeyi bozabilir hatta yıkılmasına sebep olabilmektedir. Böyle nedenlerden dolayıdır ki, bu tarz elemanların kesitinin eğilme doğrultusuna dikey yöndeki boyutun üçte bir oranından daha çok kısmında çekme kuvveti olmayacak daha büyük kesitlerdeki boyutlara gerek duyulur. Tarihi yapılara ait örneklerde, görülen geniş kesitlere sahip olan sütun veya ayaklar, geçmiş zamanlarda yıkılmış yapılar üzerinden çıkarılan dersler doğrultusunda böyle yapıldıkları anlaşılmıştır (Ünay 2002).

3.3.5. Kemer

Kemer yapıları iki adet sütunun ya da ayakların aralarındaki açıklık oluşturan bölümü geçmesi amacıyla yapılmış eğri eksene sahip kirişlerdendir (Şekil 3.17). Kemer bölümleri, tuğla veya taşla oluşturulur. Taş kemer yapıları, kaba ya da ince moloz, kesme taş gibi malzemelerden yapılmaktadır (Ülkay 1978)

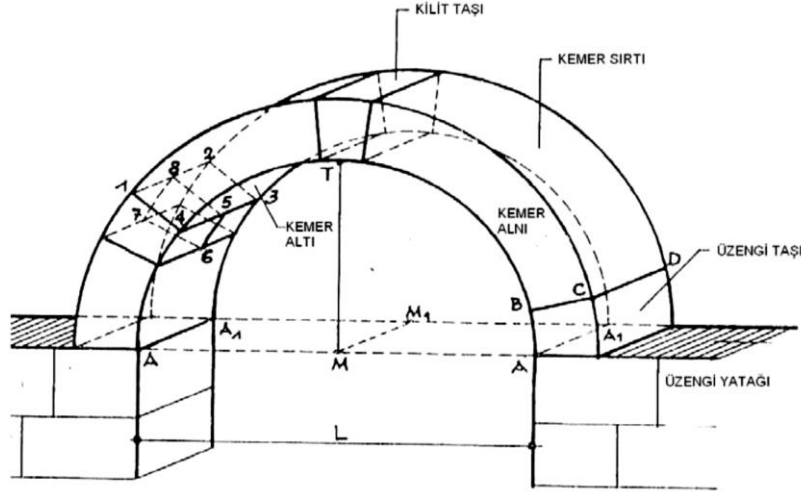


Şekil 3.17. Kovuk (Eğri) kemeri

Geniş açıklıklara sahip mekânların yapabilmek amacıyla ilk adım kemer yapılarının bulunması ile başlamıştır. Kemerler, strüktürel gelişimin ilk çeşidi olduğunu söylemek mümkündür. Kemerin üstündeki yükler, kemer tarafından basınç şeklinde iletilerek açıklığa ait yan kısımlara aktarır, bu şekilde kemer sadece basınç üzerinde çalışmaktadır. Bundan dolayı tuğla, taş benzeri basınç direnci fazla, çekme direnci az malzemeler kemerin yapılmasında kullanımı uygun olmaktadır (Özer 2006).

Kemerler, yerçekimi kuvvetinin etkisi ile düşey olarak belli bir yükün etkisinde olmaktadır. Buradaki yüklerin toplamı yapıda bulunan detay malzemenin ve taşıyıcı sistemin malzemelerinden (taş, tuğla ya da kerpiç) oluşmaktadır. Kemer, üstündeki yüklerin tamamını basınç için çalışmakta olan elemanları ile taşır (Wilson 2018).

Kemerlerde, kilit, kemer ile örgü taşı olarak üzengitaşı bulunmaktadır. Kemerlerin başlangıcı üzengi taşıyla olmaktadır. Kemerin düşey eksen pozisyonunda kilit taşı bulunur ayrıca kendisiyle üzengi taşının arasında bulunan taşlar bu taş sayesinde kilitlenmektedir. Kilit ile üzengi taşlarının araları kemer taşlarıyla doldurulur (Bayülke 1992) (Şekil 3.18).



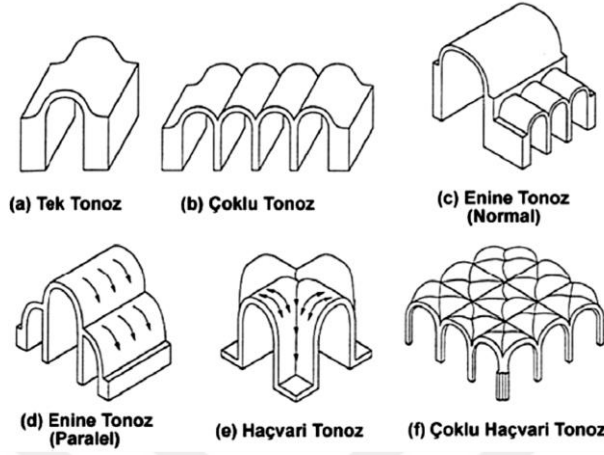
Şekil 3.18. Kemerin muhtelif kısımları

Kemer, üzerindeki hem yatay hem de düşeydeki yükü belli noktalarına aktarabilen aynı zamanda da taşıyabilen yapı elemanlarından biridir. Mesnetleri gergi çekme çubuklarına sahip olabilmektedir. Gergi çubukları olmadan yapılırsa kesinlikle dayanıklı duvarlar üzerine oturtulması şarttır. Açıklıklarında da aynı kirişler gibi yük taşımaktadırlar (Bayraktar 2005).

3.3.6. Tonoz

Tonoz, kemerlerin kendi düzlemlerinin dik doğrultusunda ötelenmesiyle oluşur. Üzerlerine etki eden yükler, kemerlerdeki yük taşıma sistemine göre taşınır ve kabuk özelliğini de göstermekte olan tek eğrilik özellikli bir yapı elemanı olduğu bilinmektedir. Tonozlar üzerinde, basınç kuvvetlerinin etkisinden kaynaklı olarak basınç gerilme kuvvetleri oluşmaktadır (Ünay 2002).

Manastır, çapraz, beşik, ilkel tonoz olarak dört tonoz türü bulunmaktadır (Şekil 3.19). İlkel ile beşik tonozların mesnet noktalarındaki düzlemin taşıyıcı ve sürekli olması gerekmektedir. Ayak ve sütunlarla taşınabilen haçvari ve çapraz tonozlar ayrıca birden fazla üniteli mekân örtüsü birimi de olmaktadır (Çıllı ve Sesigür 2007).



Şekil 3.19. Tonoz türleri (Çıllı ve Sesigür 2007)

Tonozlar, kendi ağırlıklarıyla beraber üzerlerindeki kaplamaya ait yükleri de taşımaktadır. Tonozların yüklerin etkisinde iken çalışması tarzı, kemerlere benzemektedir. Bir tonozun kesitiyle, aynı eğrilik özelliğindeki kemerinki ile eşdeğer olmaktadır. Tonoz eksenine ait paralel kesitlerde, basınç gerilme kuvvetleri oluşmaktadır ve tonozun malzemesiyle karşılanmaktadır. Tonozun mesnetleri üzerinde oluşacak yatay kuvvetler ise kemerlerdekine benzer gergilerle ya payandalar ile ya da temellerin doğrultusunda güçlendirilmiş duvarlarla taşınmaktadır (Çıllı ve Sesigür 2007).

Açıklıklara kıyasla sehimi arttırılan tonozla ait taşıyıcılık özelliği daha fazla olur. Ama hacimde kayıp çok fazla olacağı için sehimi fazla olmayan tonoz daha çok tercih edilir. Çeşitli boyutlara sahip olan tonozlar kesişebilmektedir (Çelebi 2001).

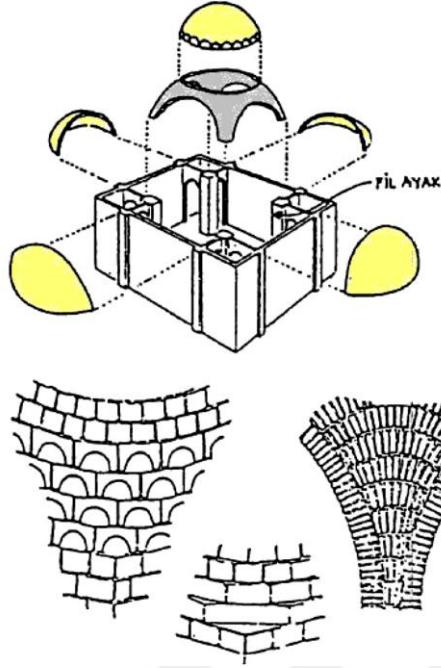
3.3.7. Kubbe

Kubbeler, kemerlerin kendi simetri eksenleri etrafında dönmesi ile oluşmaktadır. Üzerlerine etki eden kuvvetlerini pozitif çift eğrilik özellikli yüzeylerinde taşıyabilen kabuklar olarak tanımlanır. Kubbeli mekân örtüsü için geçit elemanları amacıyla en çok görülen çeşitler arasında Türk üçgeni, pandantif (küresel mesnet), tromp (tonoz mesnet) sıralanabilir (Küban 1998).

Kubbelerin tabanlarında oluşabilecek çekme gerilme kuvvetlerine karşı alınabilecek önlemlerden en önemlisi, ilgili bölümün çekme gerilme kuvvetlerine dayanımı yüksek bir malzeme ile yapılan çemberle kuşatmaktır. Büyük kubbeye sahip yapılarda bulunan kasnakların masif aynı zamanda da ağır yapısıyla, ilgili bölümde oluşabilecek çekme kuvvetleri etkisiz hale getirilirler (Ünay 2002).

Kubbeye ait yükleri, kubbenin ayakları aracılığıyla mesnet yüklerine ait düşey bileşenleri kemerlere doğru; yanal bileşenlerini de kemerin düzlemine dikey doğrultuda

yarım kemerlerin yerleştirilmesiyle ya da payandalar ile alınmaktadır (Şekil 3.120). Kubbe üzerinden kemerlere doğru aktarılan düşey yükün kemer düzlemi içindeki etkileri de gergiler ile alınmaktadır (Saraç 2003).



Şekil 3.20. Pandantif kubbe detayı (Çelebi 2001)

3.3.8. Tarihi yapılarda harçsız duvar örgü sistemleri

Patara Antik Tiyatrosu harçsız duvar örüm tekniklerinden isodom tekniği kullanılarak inşa edilmiştir. İsodom, Helenistik dönemde kullanılmış ve birçok antik kentte görülebilecek bir yöntem olup aynı yükseklikteki iki taşın yan yana konulması ve bir üst sıraya iki taşın genişliğine karşılık gelecek taşların kullanılması ile oluşturulan düzensiz yapıya sahip harçsız duvar örgü sistemidir. Bu teknik yapının sağlamlık gerektiren yerlerinde daha çok tercih edilmiştir (Şekil 3.21)



Şekil 3.21. İsodom duvar örgüsü (Taşlar çift ve tek sıra halinde) (Atalay 2010)

3.4. Tarihi Yapılarda Kullanılan Malzemeler

3.4.1. Doğal taşlar

Doğada bulunabilen ya da taş ocaklarında çıkarılabilen, atmosfer etkilerine dayanımı yüksek, homojen bir yapıya sahip olan doğal taş, akıcı kıvamdaki magma tabakasının zamanla soğuması ve sertleşmesi sonucu oluşan bir malzemedir (Türkçü 2000).

Taşlar, yapı malzemelerinden en eski olanlarındandır ayrıca kalıcı olmasının düşünüldüğü yapılarda öncelikli olarak tercih edilmektedir. Taşın yaygın bir şekilde tarihi yapılarda kullanılmasına neden olarak, çok kolay tedarik edilebilmesidir (Ünay 2002).

Doğal taş, basınç ve taşımaya yönelik dayanıklılığı fazla, çekmeye karşı dayanıklılığı düşük malzemelerdendir. Bu özelliklerine bağlı olarak sadece basınçla yönelik kuvvet alan kemer, tonoz ve kubbeler için kullanılma durumu uygun olmaktadır. Basınç kuvvetlerine maruz kalan ayak ve duvarlar da taş malzeme ile yapılmaktadır. Basınç kuvvetine maruz kalan taşlar deforme olması yönünden beton ile benzerlik göstermektedir. Granite ait elastisite modülü $E = (15\sim70) \times 10^3$ MPa ve betona ait elastisite modülü $E = (14\sim30) \times 10^3$ MPa mertebesinde olmaktadır. Elastisite modülü bilinmeli çünkü taşıyıcı elemana ait yüklenme neticesinde elemanın yapmış olduğu sehimin hesaplanması amacıyla gerekmektedir (Wilson 2018).

Tarihi yapılar için genelde tercih edilecek yapı taşlarına ait ortalama fiziksel özellikler Çizelge 3.2’de gösterilmektedir.

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	9-35	1-15	25000-70000
Kireç taşı	18-35	6-20	2-6	10000-55000
Kum taşı	5-30	2-10	2-4	13000-50000
Kuvars	10-30	3-10	3-4	15000-55000
Serpantin	7-30	2-10	6-11	23000-43000

Taşlar dış etkilerden (rüzgâr, yağış faktörleri, sıcaklık değişimleri, vb.) kaynaklanan aşınmalara ve bozulmalara uğrayabilirler. Taşlarda çekme gerilme kuvvetlerinin, malzemeye ait çekme mukavemetini aşması halinde genişleme çatlaklarına da rastlanabilir.

Temel eleman olarak taşın kullanıldığı yapı elemanlarına ait dayanıklılık, eğer taş harca göre daha düşük bir dayanıklılığı varsa, öncelikli olarak harca ait dayanıklılığa bağlı olmaktadır. Diğer taraftan taşta ait öz kırılma dayanım özelliği, taşın kullanıldığı yığma yapı elemanlarının gerçek dayanım özelliği üstünde fazla etkili olmayacaktır. Taştan

yığma yapı elemanlarına ait dayanıklılık genellikle harç ile taş birleşiminin ortak davranışı çevresinde belirlenmektedir. Tarihi yapılar için kullanılmakta olan taştan yığma yapı elemanlarının daha geniş bir dayanıma sahip olduğu görülmektedir. Taş yapı elemanlarına ait kaymaya yönelik dayanım özelliği genellikle basınç dayanım özelliğinin %25'i kadar olmaktadır (Ünay 2002).

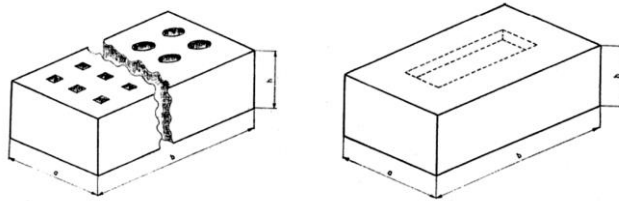
Duvar yapımında kullanılacak doğal taşların en küçük basınç dayanımları cinsine göre Çizelge 3.3'te verilen değerlerden küçük olmamalıdır. Çizelge 3.3'te anılanların dışında kalan doğal taşların kullanılması halinde, yukarıdaki diğer özelliklerin gerçekleşmiş bulunması koşulu ile basınç dayanım sonuçlarına göre yük taşıma bakımından girilebileceği dayanım grubu ve taşıma gücü saptanır (TS2510 1977).

Çizelge 3.3. Doğal duvar taşlarının dayanım gruplarına göre en küçük basınç dayanımları (TS2510 1977)

Dayanım Grupları	Taş Cinsleri	En Küçük Basınç Dayanımı (kgf/cm ²)
I	Kireç taşı, traverten, kireç bağlayıcılı kum taşı	350
II	Yoğun kireçtaşı, dolomit, bazalt	500
III	Silis bağlayıcılı kumtaşı, grovak vb.	800
IV	Granit, siyenit, diorit, melafir, diabaz vb.	1200

3.4.2. Tuğla

Harman tuğlası; balçık, killi toprak ve kilin ayrı olarak ya da karıştırılarak gerekirse de kiremit tozuyla, öğütülmüş tuğlarla ve su ile karıştırılıp şekil verildikten sonrasında kurutularak genelde harman bölgesinde ocaklarda pişirilerek elde edilir. Tuğla duvarların yapılmasında temel olarak kullanılan malzemelerdendir (TS704 1979) (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. Dolu ve delikli tuğla elemanları (TS704 1979)

Tarihi yapılarda, kilin pişirilmesi ile üretilmiş tuğlaların yapımında kullanılan malzemeleri genelde dere yataklarının içinde birikmiş kum taşlarına ait kalıntılardan elde edilmiştir. Killerin pişirilmesiyle yapılan tuğlaların sınıflandırılması görünümü ve işlevine göre yapılır, ayrıca yüksek sıcaklıkta fırınlar içerisinde pişirilmektedir. Fırın

teknolojilerinin olmadığı bölgelerdeyse güneşin yaydığı ısıdan yararlanarak üretiminin yapıldığı biliniyor (Ünay 2002).

İnşaatlarda kullanılan tuğlaların pişirilme sıcaklıkları 950 – 1200°C civarındadır. Yüksek sıcaklıkta pişirilmelerinden dolayı ateşe dayanıklı malzemedirler. Pişirilme sırasında, içinde sonsuz sayıda mikroskobik çatlaklar, boşluklar ve geçitler oluşur. Bu boşluklar tuğlanın bütün özelliklerini etkiler. Genellikle tuğlanın porozitesi (boşluk hacminin dış hacmine oranı) % 25’den fazla ise basınç dayanımı giderek azalır (Batur 1999)

Tuğla yapımında kullanılan malzemelerin kalitesi, kullanılan tuğla ve harcın örülmedeki düzeni de tuğlaların dayanıklılığını belirlemektedir. Tuğlalara ait basınç dayanıklılığı, malzemenin niteliklerine dayalı olarak 10 MPa’dan 30 MPa’a kadar değişmektedir. Tuğlanın iyi şekilde fırınlanması durumundaki hali, fırınlanmamış haline kıyasla üç katı oranda daha çok dayanıklılığa sahip olabilmektedir. Genellikle tuğlaya ait basınç dayanıklılığının %10’u, kayma dayanıklılığının %30’u kadar olmaktadır. Sık rastlanılan tuğla çeşitlerinin ortalama fiziksel nicelikleri Çizelge 3.4’te gösterilmektedir (Ünay 2002).

Çizelge 3.4. Tuğlaların otlama fiziksel özellikleri

Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)
10-30	2.5-5	10-20

3.4.3. Kerpiç

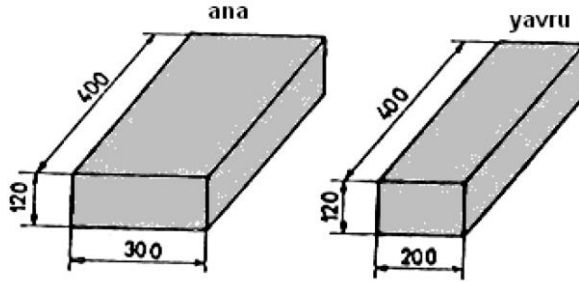
Güneşin sıcaklığında pişirilerek üretilmiş olan kerpiçler mimarlık tarihine ait en eski dönemlerde, değerli yapı malzemelerindendi. Ağaç sayısının az miktarda olduğu, taşlarında kolay bulunmadığı bölgelerde kerpiçler çok yaygın olarak kullanılmıştır. 6000 yıl öncesine kadar Mezopotamya bölgesinde Asurluların kerpiçler kullanıp yığma yapıları inşa ettikleri görülmüştür. Mezopotamya’nın o zamanlar kerpiç yapılarla kaplı olduğu rahatlıkla söylenebilir. Eski Mısır’da da kerpiç bilinmekte ve kullanılmaktaydı. 3000 yıl önce inşa edilmiş olan II. Ramses’in Luksor’daki Ölüler Tapınağının girişindeki tonozlar kerpiçlerden üretilmişti ve bugün hala ayakta durmaktadır. Birçok dinsel yapılar ve hatta prestij yapılarının, örneğin ünlü Babil Asma Bahçeleri ve Zigguratların yapımında çoğunlukla kerpiç kullanılmıştır (Türkçü 1997)

Kerpicing yapı malzemesi olarak kullanılması çok eski zamanlara dayanır. Kerpicing ana malzemesi kil olmakla beraber malzeme dayanımını arttırmak için bazı katkı maddeleri eklenmiştir. Bunlar; lifli malzemeler (ot, saman, kamış artığı vb.), ağaç cinsi malzemeler (çam iğneleri, ağaç dalları, elyaf vb.), taş cinsinden malzemelerdir (kum, çakıl, tuğla kırıntısı vb.).

Bitkisel katkılar, malzemedeki nemin dışarı atılarak çatlakların önlenmesi için kullanılmıştır. Ancak, günümüzde bitkilerin çürüyerek yapıda bozulmalara neden olduğu

bilinmektedir. Bundan dolayı, yapıda stabiliteyi artırmak için taş cinsinden malzemeleri killi toprağa katmak uygundur (Kömürcüoğlu 1962).

Kerpiç üniteler, %30 - %40 oranında kil ve %60 - %70 oranında toprağın su ile karıştırılması ile genellikle 300/400/120 mm boyutlarında üretilmektedir (Aytekin 2006) (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. Tipik kerpiç boyutu (Yorulmaz, Vintzeleou ve Convenour 1984).

İnsanlık tarihi ile hemen hemen aynı yaşıta olan yapı gereci kerpicing uzun ömrünün sebebi iyi sorgulanmalıdır. Kerpiç açık hava şartlarında, yapısındaki çekme elemanları ile oluşan dokusu, blokların dağılmaya karşı direncini oluşturmuştur. Dağılmaya karşı direncinin olması yapılarıdaki uzun ömrün sebebidir. İnsan eli ile oluşturulan hiçbir yapı malzemesi kerpiç kadar uzun ömürlü olmamıştır (Bayraktar 2006).

3.4.4. Kâgir malzeme

Doğal taş ya da pişirilmiş toprağın (veya tuğlanın), bağlayıcı bir harç ile beraber kullanılmasıyla elde edilmiş malzemeye kâgir denilmektedir. Kubbe, tonoz, kemer, monolitik taşıyıcı (destek, duvarlar) elemanlar vb. kâgir malzemeyle yapılmaktadır. Kâgir malzemeler, heterojen malzemelerdir. Birim ağırlık değeri 21~22 kN/m³ arasında değişiklik göstermektedir. Kâgir malzemelerin taşıma güçleri, yapımlarında gösterilmiş olan özen ve dikkate, yapı taşlarına, harcın özelliğine, yapılma tekniğine, çevresel şartlara ayrıca zaman faktörüne de bağlı olmaktadır (Wilson 2018).

Kâgir malzemeler, basınç kuvvetine belli seviyelerde dayanmaktadır. Kâgirin çekme kuvvetine karşı dayanıklılığı düşüktür. Kâgir malzemelerin mukavemet değeri, içinde bulunan bağlayıcı harca ait mukavemete eşdeğer durumdadır. Bağlayıcı harcının kireçten yapıldığı kâgir malzemenin basınç emniyet gerilmesi, $\sigma = 0.2 \sim 0.6$ MPa, bağlayıcı harcının horasandan yapıldığı kâgir malzemenin ise yaklaşık $\sigma = 1.5 \sim 3.0$ MPa seviyelerindedir. Horasanın dayanıklılığının, düşük dozajdaki çimento harcının dayanımıyla aynı civarda olmasının varsayımını yapabiliriz (Saraç 2003).

3.4.5. Harç

Yığma yapılarda duvar yapı elemanları arasında yataklık ve yapışma görevi yaparak duvara süreklilik kazandıran yapı harçları kireç harcı ve horasan harcı olarak ikiye ayrılmaktadır

Kireç harcı;

Roma ve Eski Yunan dönemlerinden çimento bulunana kadar ki zaman içerisinde, yapılarda kullanılan sıva ve harçlar, kireç ile yapılmıştır. Kireç harcı ile sıvaların elde edilmesinde, dolgu malzemesi amacıyla agregalar, bağlayıcı madde olarak da kireç karıştırılarak kullanılırdı. Kireç harçları hazırlanırken kireç ile harca ait özellikleri geliştirmek için harca ya da kirece inorganik ve organik maddelerden karıştırıldığı biliniyor (Böke, Akkurt ve İpekoğlu 2004).

Horasan harcı;

Toprak kullanılarak elde edilmiş kerpiç ile tuğla, yapı malzemesi amacıyla kullanılarak, harçların da artık üretilmesine sebep olmuştur. Bu kapsamda tarihte ilk harç olarak çamurun kullanıldığı bilinmektedir. Çamurdan sonra, Romalılar döneminde kireçten harç kullanmaya başlanılmıştır. Kireç harcı sonrasında, kum ile kirecin karışımına puzolan denilen volkanik tüf ya da pişmiş kilin karıştırılmasıyla suyun dâhil edilmesiyle sertleşebilen bir bağlayıcı üretilmiştir. Tarihi yığma yapıların yapımında, Osmanlı, Selçuklu, Bizans ve Roma mimarilerinde horasan adı verilen harç bağlayıcı kullanıldığı bilinmektedir (Küban 1998).

3.5. Tarihi Yapılarda Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Tarihi yapıları oluşturan malzemelerde genellikle basınç dayanıklılığı yüksek, çekme dayanıklılığı düşük olmasından dolayı, depremin etkilerinden ya da zeminden kaynaklanan etkiler yüzünden oluşacak çekme gerilme kuvvetlerini, gevrek davranışları sebebiyle karşılayamayacaklardır. Bundan dolayı duvar, ayak, tonoz, kubbe benzeri taşıyıcı elemanlar üzerinde hasar ve çatlaklar oluşmaktadır. Sıcaklık değişimleri, yağış, nem, donma ve çözünme benzeri olayların, çevre kirliliğinin de sebep olduğu klorür ve sülfat bulunduran eriyiklere ait zarar verici etkilerle birlikte, rastgele onarımlar ile yapılara ciddi zararlar verilerek, yapının ömrünü azaltılmaktadır. Tarihi yapıların basınç gerilme kuvvetlerinin, tuğla ile taş ve harcın arasında bulunan kayma gerilme kuvvetinin, elastisite modülünün ve malzemenin belirlenmesi amacıyla ultra ses, sertlik, flat-jack (yerinde basınç deneyi) gibi tahribat vermeyen deneysel yöntemlere ilaveten radyoaktif teknikler, infrared tomografive yapı üzerinden numunenin alınması gibi yöntemlerden de yararlanılabilir (Çöğürtücü 2007).

3.5.1. Sertlik deneyi

Malzemelere ait mekanik özelliklerden en önemlileri, sertlik, tokluk, dayanıklılık, elastisite ve sünekliktir. Özellikler arasından sertliği, malzemeye ait bir yüzeye sert bir cisim batırılarak bu cisme göstereceği direnç olarak ölçülür, cisme ait dayanıklılık konusunda bilgi vermektedir; fakat dayanıklılık ya da süneklik belli bir karakteristik bilgiyi net şekilde ifade etmemektedir. Sertliği belirleyerek malzemeye ait köken hakkında fikir sahibi olunur bu sayede iki ayrı numune örneğinin aynı malzemeden olup olmadığı anlaşılabilir. Sertlik deneylerini yapmak kolay olur, deney esnasında malzeme tahribe uğramaz. Sertlik değeriyle malzemeye ait içyapısal özellikleri elde edebilmek için cisim homojen olmalı ve yüzey özellikleri de içyapısından farklı olmalıdır (Aköz 2005).

Schmidt Deneyi, esnek bir maddenin, yüzey sertliğiyle ilgili geri sekme mantığına dayalı bir çeşit çekiç aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Seramik yapılı, gözeneklere sahip olan yapı malzemelerinin sertliğini belirlemek amacıyla genellikle geri sekme miktarının ölçme mantığına dayalı N ya da P tipi Schmidt çekiçten yararlanılmaktadır. Bunlar arasından N tipi bir bilye ile P tipi bir pandül, arka tarafındaki yayın yardımıyla yüzeye doğru fırlatılmaktadır. Bilye ya da pandül taş cisme çarpmasından sonra geri sıçrama yapar ve geri sıçramanın miktarı ne kadar fazlaysa sertliği o derece büyüktür. Eleman yüzeyindeki kaplamaya da sıva söküldükten sonra farklı bölgelere on veya daha fazla vuruş yapılmalı, minimum vuruş değeriyle maksimum vuruş değeri arasındaki farkın 10'dan düşük olması gerektiği bilinmelidir (Postacıoğlu 1981) (Şekil 3.24).

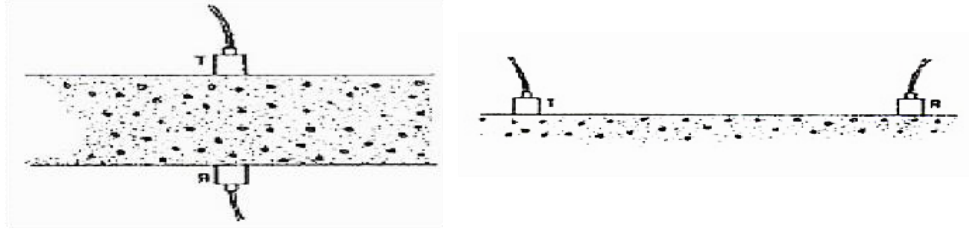


Şekil 3.24. N tipi schmidt çekici- P tipi schmidt çekici

3.5.2. Ultrases Ölçümü

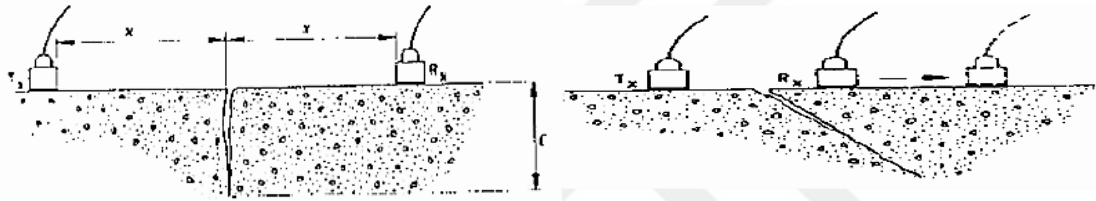
Frekansı 16.000'in üzerinde olan ve insanlar tarafından işitilemeyen ultrasese ait dalgalar katı, sıvı ve gaz içinde belirli bir hız içerisinde yayılır. Işık dalgalarına benzer yayılan ultrases dalgası, yansımaya, kırılmaya ile difraksiyona uğrayabilir. Ultrases deneyinin yönteminde, cisim ile arasında boşluk bırakmadan temas ettirilmiş piezoelektrik transduser aracılığıyla ses dalgası göndermektedir ardından aynı özelliklere sahip transduser vasıtasıyla da alınmaktadır. Alıcı prob ile verici prob arasında ses dalgasının iletilme zamanı ve hızları zaman ölçen devreyle ölçülmektedir. Cisme ait yoğunluk düşükse ve çatlakları varsa ses dalgalarına ait yayılım ve dolaylı olarak sesin geçme hızının düşük olacağı görülür. Bu deneye ait en önemli özellik, bir numune için birden fazla uygulanabilir olmasıyla birlikte, kuruma, ıslanma, donma-çözülme ya da agresif solisyonlar ile yapılmış deneylerde mukavemetin değişimi de tayin edilebilir. Süresinin az olduğu kadar ise boşluğu da az olur ve malzemenin kendisi de o derece kaliteli olacaktır (Postacıoğlu 1981).

Ultrases cihazıyla Şekil 3.25'te görüleceği üzere karşı karşıya olan yüzeyleri direkt ya da Şekil 3.30'deki gibi tek bir yüzeyden dolaylı bir şekilde ölçme yapıp sesin geçme süresi (t , μs) ölçülmektedir ek olarak da sesin geçme hızı (V , km/s) hesaplanmaktadır. Sesin geçme hızı yüksek olursa, boşluk miktarının az aynı zamanda dayanımında yüksek olacağı anlamına gelecektir. Fakat dayanımı belirlemek için bu deney yeterli olmayacaktır. Başka ölçümler ile beraber değerlendirilmesi gerekir (Postacıoğlu 1981).



Şekil 3.25. Doğrudan ölçüm - Dolaylı ölçüm (Öztürk ve Mahberel 2006)

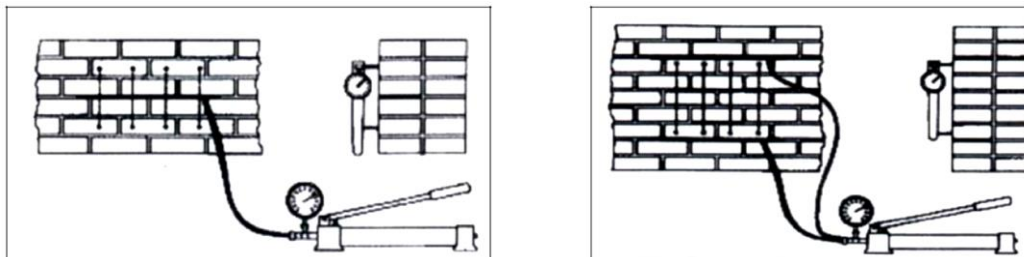
Çatlaklara ait derinlik ile yönü araştırmak için çatlakın olduğu yerlerde Şekil 3.26'da görüleceği üzere belirlenmiş noktaların üstünde, problar yer değiştirilerek sesin geçme süreleri $t_1-t_2-t_3-t_4$ (μs) ölçülmektedir. Gerek olan hesapları yaparak çatlakla ait derinlik ile yön belirlenmektedir (BS 1881: Part 203: 1986). Tarihi yapılardaki, çatlakları gidermek amacıyla uygulanan enjeksiyon işlemleriyle çatlaklıkların ne kadar yok edilebildiğini araştırmak amacıyla bu ölçüm tekniğinden faydalanılabilir (Aköz vd. 2001).



Şekil 3.26. Çatlak derinliğinin tespiti (Öztürk ve Mahberel 2006)

3.5.3. Yerinde Basınç Deneyi (Flat-jack Deneyi)

Bu deney tarihi yığma yapılar üzerinde (ASTM C 1196-92 (Reapproved 1997))'ye uygun bir şekilde yapılmaktadır. Bu deney içerisinde, eleman üzerine uygulanan kuvvet ile boy değişimini ölçmeye yarayan flat-jack deneyine özel düzenden faydalanılır. Basıncı uygulayan kompresör ile basınç ölçer, basınç kuvveti uygulamayı sağlayan plaklar, elemanın deplasmanını ölçmek için komparatör ve pimden oluşur. Deneyde gerilme ile şekil değiştirmeleri, elastisite modülü ve ölçümün yapıldığı bölgede bulunan gerilme seviyesi belirlenmektedir. Gerilme seviyesi, şekil değiştirmenin başlangıçta olan seviyesine ulaştığındaki nokta, gerilme seviyesi kabul edilmektedir (Öztürk ve Mahberel 2006) (Şekil 3.27).



Şekil 3.27. Tek plakalı ölçüm ile - Çift plakalı ölçüm ile (Aköz 2005)

Deney uygulamasında, ilk olarak deplasmanların ölçüldüğü pimler, şablona uygun olarak yapılandırılmaktadır; başlangıçtaki uzaklığı (L_0 , mm) ölçülmektedir. Elemanda tercih edilen yatay derzdeki plağın yerleştirilecek olan bölüm, matkapla açılmaktadır, harç kaldırılacağından yapıdaki mevcut yük sebebiyle ölçüm bölgesi üzerinde meydana gelecek boy değişimini belirlemek amacıyla pimlerin aralarındaki uzaklık (Δl , mm) yeniden ölçülür. Açılmış olan bölüme plak yerleştirilmektedir, lazım olan bağlantılar yapılarak, kuvveti uygular, belli aralıklar ile kuvvet ve deplasman değerleri ölçülmektedir. Deneyler sonucunda ölçümün yapıldığı bölgenin gerilme seviyesi, elastisite modülü (E , MPa) ile şekil değiştirmeler belirlenmektedir. Gerilme seviyesi, şekil değiştirmenin başlangıçta olan seviyesine ulaştığındaki nokta, gerilme seviyesi kabul edilmektedir (Aköz 2005).

3.5.4. Radyoaktif Metotlar

Malzemeleri incelemek amacıyla 1950’li yıllarda radyoaktif deney tekniği geliştirildi. Bu metot, elektromanyetik radyasyon üreten yayacak kaynakla, elemanın içerisinde radyasyonun geçmesi için geçecek zaman aralığını ölçecek sensörden oluşur. Bu yöntemde sistemi adlandırırken, sensörü, özel fotoğraf filmi formundaysa radyografi, gelecek radyasyonu elektrik dalgaları formuna çevirecek özellikteyse radyometri şeklinde adlandırılmaktadır. Malzemenin içerisindeki elementlerle alakalı radyografik araştırmalara yönelik başlarda, 1940’li yılların sonunda, X ışınlarını kullanmaya odaklanılmıştır; fakat 1950’li yıllarda dikkatleri gama ışınlarını kullanmaya yöneltmişlerdir. İki ışın türünün de radyasyon yayma özelliklerindeki en temel farkları, radyasyon üretme kaynakları ile yayılım özellikleridir. X ışınlarını üretmek için yüksek voltaja sahip elektronik aletler kullanılırken, radyoaktif izotopların bölünmeleri sonucunda açığa çıkacak yan ürünler ise gama ışınlarıdır (Carino 1991).

3.5.5. İnfrared Tomografi Yöntemi

Bu teknikte kızılötesi ışınlarla yüzeyin sıcaklığı ölçülüp yüzeye yakın olan hasar almış bölgeleri tespit etmeye çalışılmaktadır. Bu yöntemin temeli, yüzey sıcaklığıyla belli bir yoğunluğa sahip elektromanyetik radyasyonun yayılmasına dayanmaktadır. Yüzeyin sıcaklığı, oda sıcaklığına yakın iken radyasyon, elektromanyetik spektrum bölgelerinden, kızıl ötesi (infrared) ışınlarına ait bölümündedir. Eğer eleman üzerinde içeriden dışarıya doğru ya da dışarıdan içeriye doğru bir ısı aktarımı varsa, hasarlı bölgelerin çevresinde bulunan malzemeler çeşitli termal iletken özellik gösterdiğinden dolayı bu olay ısı akışını etkilemektedir ve ısı akışındaki farklılıklar sebebiyle yüzeyin sıcaklık dağılımı uniform olmamaktadır. Yüzeyin sıcaklık değeri ölçülüp hatalı bölgelerin durumu tespit edilip, yerleri belirlenmektedir. Uygulamada yüzeyin sıcaklık değeri, video kameraların kullanıldığı sistemler gibi çalışmakta olan infrared tarayıcılar aracılığı ile ölçülmektedir (Carino 1991).

3.5.6. Yerinde Kayma Deneyi

Yığılma yapılarıdaki kayma dayanım değerlerinin (ASTM C 1531-03)’e göre belirlenen deney düzeneği, deplasman değerini tespit edecek transducer, kuvvet uygulayan kompresör, kuvvet ölçerden oluşur (ASTM C 1531-03). Deneyin uygulanması Şekil 3.28’de görüleceği üzere ölçümü yapılan bölgeye ait her iki taraf da açılır, bir tarafından yatay doğrultuda kuvvet uygulanıp, öteki tarafa yerleştirilmiş transducerin yer

değiştirme miktarını kaydetme anındaki kayma gerilmesi, yapının kayma dayanım değeri belirlenebilir (Aköz 2005).



Şekil 3.28. Yerinde kayma deneyi (Öztürk ve Mahberel 2006)

3.5.7. Yapıdan Numune Alınması

Yığma yapılarda malzeme özelliklerinin belirlenmesi yöntemlerinden birisi olan numune alma yöntemi için tahribatsız ölçümlerin yapıldığı bölümlerde, karot numunesinin alınacağı yerler tespit edilir. TS10465 (1992)'e göre, gerekli miktarda 50 mm çapında, h yüksekliğine sahip karot numunesi alınmaktadır. Bu numuneler isimlendirilerek numune kapları içerisinde muhafaza edilir. Laboratuvar ortamına getirilen karot numunelerinin ortama açık yüzeylerinden minimum 3 cm kalınlığa sahip parça kesilip, karot alınmış bölgeler, metoduna uygun biçimde kapatılır iken, kesilen parça karot alınmış yüzeye kapak olarak yerleştirilmektedir ve numune alınan bölgelerin görünümü düzeltilmektedir (Aköz 2005) (Şekil 3.29).



Şekil 3.29. Karot makinesi ve numune alımı - Karot numunesi

3.5.6. Laboratuvar Çalışmaları

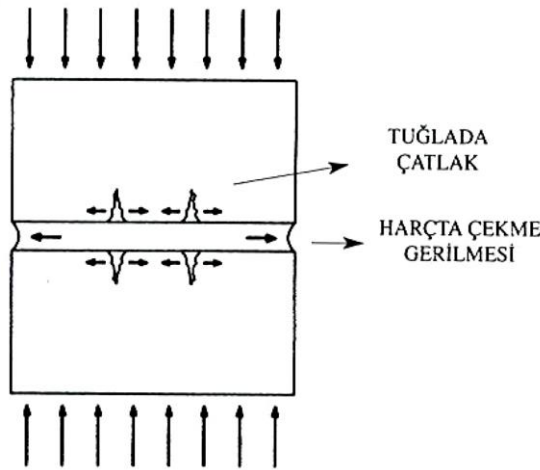
Tarihi yapılardan alınan taş numuneler, deneye hazır hale getirmek için çap/yükseklik oranı 1/1 olacak şekilde taş kesme aleti ile düzeltilir. Her iki yüzünde birbirine paralel düzgün başlık oluşturacak şekil verilir. Laboratuvar ortamında uygun sıcaklık ve nem koşullarında 48 saat bekletildikten sonra numunelerin çapı ve yüksekliği ölçülür ve numuneler tartılır, ses geçiş süresi ölçülür. Tartım işleminden sonra düzeltilen yüzeylere alçı, çimento karışımı hamur başlık yapılır, sertleştikten sonra numuneler tekrar

ölçülür. Tek eksenli basınç deneyi yapılan numunelerin basınç altında meydana gelen boy değişimi, yük- boy değişimi ve kırılma yükü belirlenir, basınç mukavemeti hesaplanır.

3.6. Tarihi Yapıların Yapısal Davranış

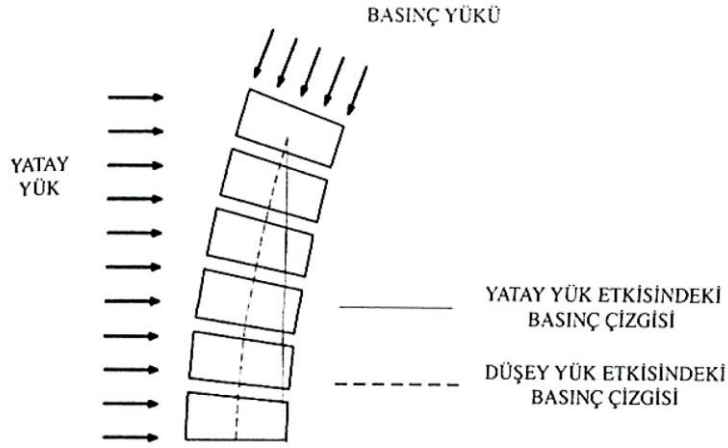
Tarihi yığma bir yapının yapı davranışını belirlerken hem yapıyı oluşturan malzeme özelliklerinin hem de bağlayıcı harcın mekanik ve kimyasal özelliklerinin bilinmesi gerekir.

Yığma yapılarda yükler, duvar boyunca temele iletilirler. Çatı, döşeme ve duvar yükleri düşey yükler olup çizgisel etkiyen yüklerdir. Bu yükler etkisiyle duvar kesitinde (σ) basınç gerilmeleri oluşur. Normal hallerde bu gerilmelerin duvar basınç emniyet gerilmelerini (σ_e) geçmemesi gerekir. Duvarın kalınlıkları bu esasa göre belirlenir. Ayrıca bu duvar kalınlıklarına göre duvar kesitinde deprem kuvvetleri etkisi ile oluşacak kayma gerilmeleri (τ)'nin duvar malzemesi kayma emniyet gerilmesi (τ_e)'den küçük olması gerekir (Wilson 2018) (Şekil 3.30).



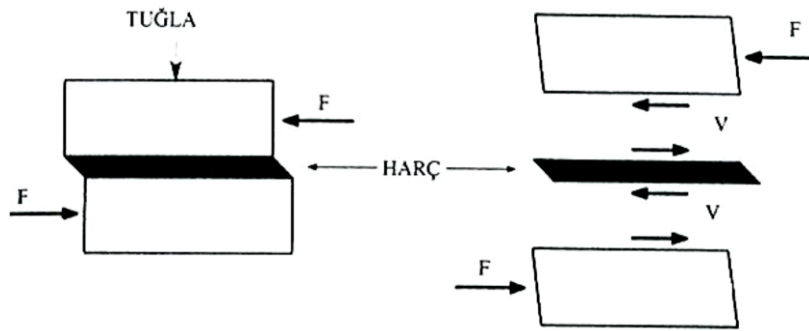
Şekil 3.30. Basınç yükleri altında kırılma mekanizması (Ünay 2002)

Betonarme yapıların deprem yükleri altında davranışları büyük ölçüde bilinmekle beraber yığma yapıların depremdeki davranışı tam olarak bilinmemektedir. Yığma yapılar, betonarme yapılara göre daha az sünektir. Takviyeli harçlı, donatılı yığma yapılar betonarme yapılar kadar sünek davranış gösterememektedirler. Yığma yapılarda düşey yükler döşemelerden taşıyıcı duvarlara, duvarlardan da temele aktarılır. Deprem ile oluşan atalet kuvveti yapıyı etkiler. Yatay atalet kuvveti, rijit diyafram gibi davranan döşemelerden duvarlara aktarılır. Duvarlarda kesme ve eğilme tesiri yaratır (Yorulmaz, Vintzeleou ve Convenour 1984) (Şekil 3.31).

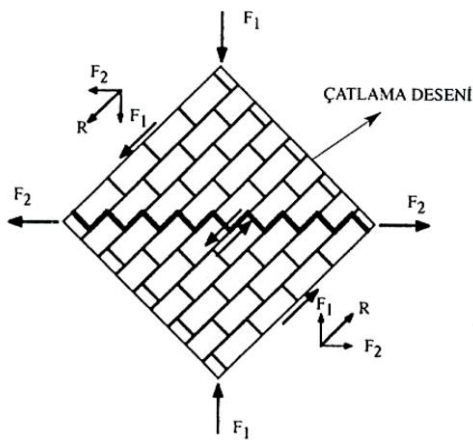


Şekil 3.31. Yığma yapı elemanın yatay yükler altında göstermiş olduğu deformasyon ve basınç çizgisinin konumu (Ünay 2002)

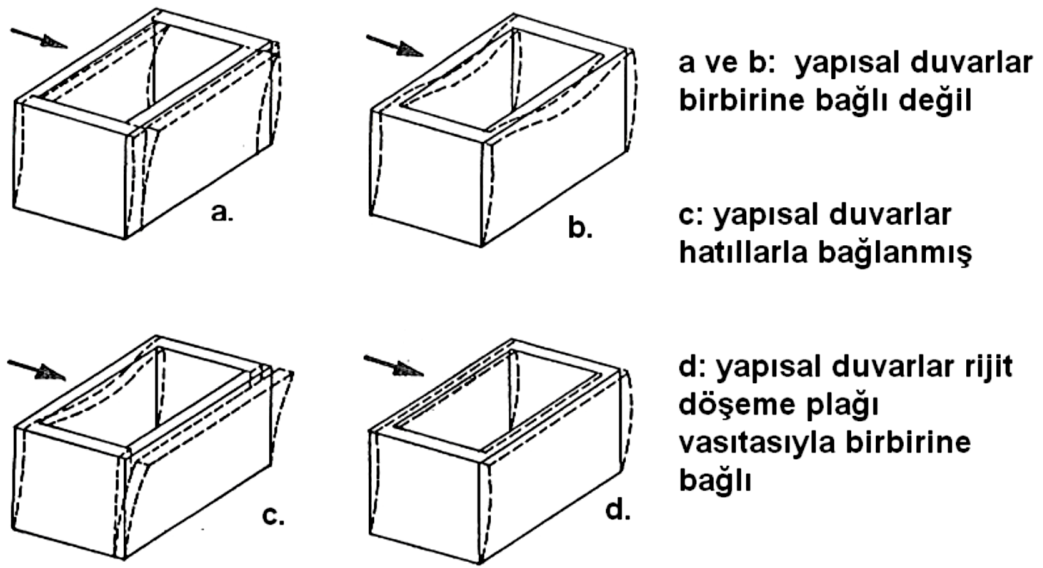
Yığma yapılarda deprem anında yatay yüklerin etkisiyle kritik bölgelerinden (kapı ve pencere boşlukları, duvar ve döşeme bileşimleri vb.) başlayarak çatlaklar oluşur ve yapı göçme mekanizmasına ulaşır (Şekil 3.32-35).



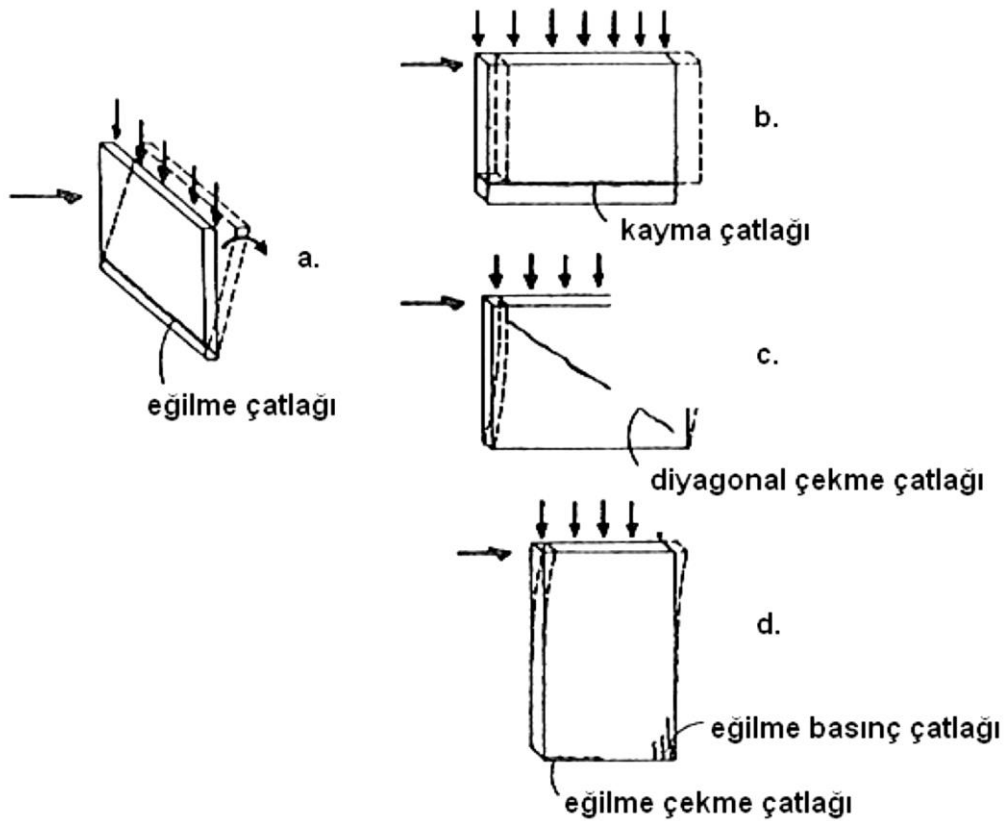
Şekil 3.32. Kayma mekanizmasının kırılması (Ünay 2002)



Şekil 3.33. Basamak şeklinde diyagonal kırılmanın oluşumu (Ünay 2002)



Şekil 3.34. Deprem yer hareketi süresince yığma yapıda oluşan salınımlar (Yorulmaz, Vintzeleou ve Convenour 1984)



Şekil 3.35. Serbest yapısal bir duvarın çökme mekanizması (Yorulmaz, Vintzeleou ve Convenour 1984)

3.7. Tarihi Yapılarda Görülen Hasar Tipleri

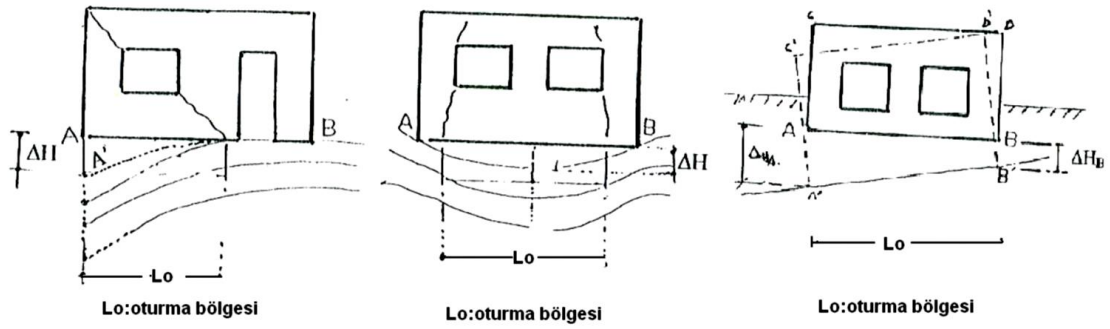
3.7.1. Zeminden kaynaklanan hasarlar

Tarihi yapılarda görülen zemin kaynaklı hasarları altı grupta toplarsak, bunlar; oturmalar, ayrışmalar, kabarma ve şişme, parça kopması, çatlaklar ve kaymalardır. Oturmalar, yeterli zemin kırılması güvenliği altında zemin tabakalarının, farklı büyüklük ve yönde etkiyen kuvvetlerin itilmesiyle sıkışması sonucu oluşur. Yatay kuvvetler de oturmalarla neden olabilir. Düzgün oturmalar, yapının stabilitesini ve kullanım süresini genellikle tehlikeye sokmaz ve hiçbir oturma hasarı da doğuramaz. Zemin kırılması tehlikesi, zeminin kesme direncinin artması, temel derinliğinin ve genişliğinin azalması, yükün eksantrisitesi ve eğimin büyümesi ile artar. Ayrıca, zeminin birim hacim ağırlığının azalması ve yer altı su düzeyinin yükselmesi zemin kırılması tehlikesini arttırır (Köseoğlu 1986).

- Temel oturmalarının başlıca nedenleri şu şekilde sıralanabilir;
- Yer altı su seviyesinin değişmesi,
- Yapıda yapılacak değişimler veya yük sisteminde yapılacak değişimler,
- Yapı çevresinde gerçekleşen kazılar neticesinde yapıda meydana gelen değişimler,
- Zeminin yapısına uygun drenaj yetersizliği,
- Temel kazıklarının deformasyonu,
- Deprem etkisi vs.

Tarihi yapıların civarına yapılacak kazı çalışmaları neticesinde yer altı suyunun alçalması sonucu boşluk suyu basıncı düşer ve su içinde yüzen zemin danelerinin ağırlıkları artacağından, daha altlardaki zeminle ilave yükler gelir. Bu ilave yüklerin etkisi ile zemin tabakaları tekrar oturmaya başlar. Bu oturmaların belli değerlere ulaşması sonucu yapıda çatlaklar oluşur. Aynı zamanda yer altı su seviyesinin düşmesi sonucu kuruyan zeminlerde rötre oluşur. Rötre sonucu, özellikle aşırı konsolide bağlı kil zeminlerde, aşırı bir hacim küçülmesi oluşacağından, oturmalar bir evvelki durumdan daha büyük boyutlara ulaşır (Namlı 2001).

Kohezyonsuz zeminlerde daha aşırı yükleme sonucu yüklerinin artması neticesinde veya yapının taşıyıcı sisteminde yapılacak değişiklikler (masif duvarlarda delik veya pencere açma gibi) neticesinde temel zemini farklı biçimde zorlanarak, zeminde göçmeler oluşmakta ve bunun sonucunda yapıda çatlaklar meydana gelmektedir (Namlı 2001) (Şekil 3.36).



Şekil 3.36. Temel oturma çatlakları (Wilson 2018)

Tünel ve metro kazılarıyla tarihi yapılara yakın yerlerde yapılacak yapı kazıları, heyelan ve kaymaların oluşmasına neden olabilmektedir. Örneğin tarihi yapılar civarında açılan maden ocaklarının oluşturmuş olduğu boşluklar temel zeminin dengesini bozarak tarihi yapıda hasara neden olabilmektedir (Namlı 2001)

Temel seviyesindeki taşıyıcı tabakanın kil ve silt olduğu durumlarda yağmur ve benzeri nedenlerden zeminin ıslanması durumunda, eğer yeterli drenaj yoksa permeabilitesinin düşük olması nedeni ile tutulan su temel altındaki kil veya siltli zeminlerdeki ince danelerin taşınmasına ve bütün bunların sonucu olarak zemine yerel (lokal) göçmelerin meydana gelmesine neden olmaktadır (Namlı 2001)

Dolgu ve yumuşak zeminlerde, genellikle su içinde bulunan zeminlerde, tarihi yapılar zemine çakılan ahşap kazıkların oluşturduğu bir temel sistemine oturtulmuştur. Bazı hallerde kazık başlarının ahşap bir ızgara ile bağlandığı görülür. Ahşap kazıklar genellikle su içine bulunduğu ve hava ile temas etmediğinden bozulmamıştır. Ancak tarihi yapıların civarından yol yapım ve benzeri çalışmalar neticesinde yer altı su seviyesinin düşmesi durumunda hava ile temasa geçen ahşap kazıkların çürümesi sonucu temel oturmaları olmaktadır (Namlı 2001).

Yığma yapılarda depremten dolayı olan hasar duvarlarda çeşitli biçimlerde oluşan çatlamlar ve kısmen yıkılma şeklinde ele alınabilir. Yapılarda oturma nedeni ile de çatlak oluşabilir. Yığma yapıların duvarları oturmalarla karşı hassastır, en ufak bir farklı oturma duvarlarda derhal çatlaklar şeklinde görülür (Bayülke 1984)

Tuğla yığma duvarlar çok gevrek bir malzeme olduklarından küçük şiddetli depremlerde bile yapılarda önemli çatlaklar oluşabilir. Çatlakların yönü, biçimi ve genişliği yığma yapının dış duvarlarındaki pencere ve kapı boşluklarının yerine ve miktarına, duvardaki düşey gerilme ve gelen yatay deprem kuvvetine bağlıdır (Bayülke 1984)

Yığma yapılarda depremlerde olan kesme ya da eğik çekme çatlaklarının genişlikleri bakımından sınıflandırılması yapılabilir. İlk aşamada çatlak kılcal olarak yalnızca sıvada olabilir. Daha sonraki aşama duvarın içine kadar işlemiş derin çatlakların iyice genişleyip yayılması ve duvar malzemesinin ezilip parçalanması, duvardan parçaların ayrılıp dökülmesi vb. şeklinde olur (Bayülke 1984)

Ayrışma neden olan hasarlar kimyasal ve fiziksel etki olarak iki grupta incelenir. Fiziksel etki, sıcaklık değişimine bağlı ortaya çıkan donma-çözülme olayına bağlı gelişir; kimyasal etki dış ortamdan kaynaklanan sülfat etkisi ile ortaya çıkar. Yapıda meydana gelen ayrışma hasarlarında yoğun ve derin çatlama durumu söz konusu ise kimyasal etki, tekil ve seyrek çatlama durumu söz konusu ise fiziksel etki araştırılmalıdır.

Parça kopmasına neden olan etkiler incelenirken hasara sebep olabilecek atmosfer etkisi, iç sıcaklık yükselmesi, kimyasal reaksiyonlar gibi faktörlerin yanı sıra deprem ve benzeri şok dalgalarının da etkisi üzerine düşünülmelidir (Namlı 2001).

3.7.2. Taşıyıcı sistem tasarımındaki hatalar

Yapıların tasarımından kaynaklı, taşıyıcı sistemlerinin planda düzensiz yerleştirilmesi, bina yüksekliğince yapı rijitliğinin uniform olmayan şekilde düzenlenmesi, hatılların olmaması, yapı elemanlarının yükleri taşıyabilecek yeterlilikte boyutlandırılmamış olması vb. durumlar yapılarda kalıcı hasarlara neden olur ve bu kalıcı hasarlarda yıkımlara yol açabilir.

3.7.3. Hatalı malzeme kullanımı

Yığma yapılarda kullanılan taş, tuğla, kerpiç, ağaç vb. malzemelerin düşük kaliteli olması yapısal hasarların oluşmasına neden olmaktadır. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri yeterli düzeyde olması büyük önem taşır ve yapıda kesme göçmesine neden olabilecek düşük gerilme dayanımlarının oluşmasına neden olabilir. Örneğin; taşın doğadaki tabakalaşmasına uygun olarak yapıda yer alması aksi takdirde bozulma tabakaları cepheden katman katman dökülmesi, tuğla yapılarda tuğlanın iyi pişirilmiş olması aksi takdire hızlı aşınma, dökülme, çukur oluşturma, dökülme vb. etkiler görülmesi, kerpiç ve taştan yapılan yığma yapılarda killi kum ve çamur harçlarının kullanılmaması gerekir.

3.7.4. Kötü işçilikten kaynaklanan hasarlar

Yığma yapılarda kullanılan malzemelerin kalitesinin iyi olmasının yanı sıra yapıyı oluşturan bileşenlerin dayanımları açısından uygun bir bağlayıcı malzeme ve teknikle birleştirilmeleri önemlidir. Yapının birleşim detaylarında yeterli kalitede bağlayıcının kullanılması veya yapıya uygun görülen örüm tekniğinin eksik veya hatalı uygulanması yapılarda kalıcı hasarlara neden olur.

3.7.5. Hava kirliliği ve trafikten kaynaklanan hasarlar

Atmosferi kirlüten çeşitli gazlar, sanayi atıkları, kömürle çalışan araçlar, motorlu taşıtlardan çıkan zararlı gazlar yapının dış yüzeyinde kirli bir yüzey oluşmasına, ayrışmaların başlamasına ve zamanla özelliklerini yitirmesine neden olmaktadır.

Trafik sıklığına bağlı olarak taşıtların geçişi sırasında oluşan titreşimler ve yapı temellerine etkileri yığma yapılarda kalıcı hasarların oluşmasına neden olurlar.

3.8. Modelleme İlkeleri ve İdealleştirmeler

Son yıllarda, yığma yapıların sayısal modellerle incelenmesi yaygınlaşmıştır. Gelişen bilgisayar teknolojisiyle beraber, yığma yapıların analizinde de çeşitli yaklaşımlar ve yöntemler ortaya çıkmıştır. Yığma yapılar yapım tekniği itibarıyla birkaç farklı malzemenin bir araya getirilmesi şeklinde uygulandığı için, farklı doğrultularda farklı davranışlar gösteren bir karaktere sahiptir. Modellemede esas olan bu davranışın temsil edilebilmesidir. Yapının gerçek davranışını model yoluyla elde etmek için bazı idealleştirmeler ve basitleştirici kabullere ihtiyaç vardır. Yapının değerlendirilmesi için ayrılan zaman ve bütçenin de belirleyici olduğu bir süreçte, kabul edilen yaklaşım sınırları içerisinde hesaplar yapılması için farklı idealleştirmeler ve modelleme ilkeleri kullanılabilir. Mesela, yapıdaki bir elemanın yerel davranışını incelemek için kullanılacak model çok detaylı olarak hazırlanabileceği gibi, yapının genel değerlendirmesi için daha az detay kabul edilebilir. Bilgisayarların işlem ve hafıza kapasiteleri de bu konuda belirli sınırlamaları getirmektedir (Dabanlı 2008).

3.8.1. Geometrinin İdealleştirilmesi

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

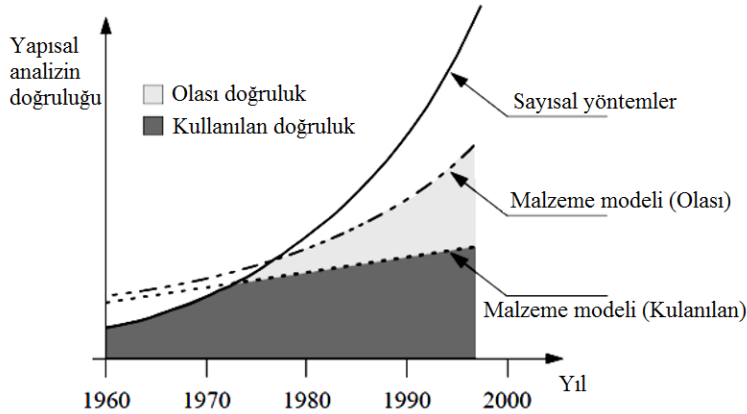
- Geometrik idealleştirmeler, mümkün olduğunca basit olmalıdır. İdeal ve ortogonal geometrili modeller analizde daha kararlı davranırlar.
- 3 boyutlu modeller yerine, daha kolay kurulan ve analizi daha kolay ve kısa sürede gerçekleştirilebilen 2 boyutlu modelleme seçeneği unutulmamalıdır.
- Kabuk elemanların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

3.8.2. Malzemenin İdealleştirilmesi

Malzeme davranışı gerilme - şekil değiştirme bağıntısını ifade eden bir matematik model ile tanımlanır. Malzemeye ait matematik modeller, uygun bir analiz modelinin kurulmasında en önemli kısmı teşkil eder. Bu matematik modele 'esas model' (constitutive model) adı verilir. Esas model, gerçek davranışın basitleştirilmiş bir şekilde temsil edilmesidir. Bir yapının gerçek davranışını anlamak için karmaşık ve detaylı kurulacak malzeme modelleri kullanılabilir. Fakat bu modellerin göçme yüküne

yakınsayan sonuçlar vermediği tespit edilmiştir. Günümüzün yaygın olarak kullanılan yaklaşımı ise, lineer elastik davranıştan, yapının gerçek davranışını tahmin etme kapasitesine sahip sağlam sayısal araçların kullanılmasıdır. Bu araçların kullanılması, tamamen güç tükenmesine ulaşmadan önce meydana gelecek olan çatlak ve kırılmaların tespitiyle, kullanılabilirlik seviyesi, göçme mekanizmaları ve yapısal güvenliğin değerlendirilmesine imkân tanımaktadır (Lourenço 1998).

Geçtiğimiz yüzyıl, yapısal analiz ve sayısal metotlar açısından fevkalade gelişmelere şahitlik etmiştir. Günümüzde bilgisayar vasıtasıyla, yüksek doğruluk ve güvenilirlik seviyelerinde analizler yapılabilmektedir (Şekil 3.37). Fakat yapı mühendisliğinde, mekanik, statik ve hesaplama metotlarına verilen ehemmiyet, malzeme bilimine verilmemektedir. Bu, yapısal analiz alanındaki gelişmeye malzeme davranışının ayak uyduramadığı anlamına da gelir. Bu sebeple, günümüzdeki esas malzeme modelleri, genellikle yapısal analizin doğruluk derecesini ve yaklaşıklığını da belirleyen bir faktördür. Malzemedeki her gerilmenin bir şekil değiştirme durumuna karşılık geldiğini anlatan ve $\sigma/E = \epsilon$ şeklinde R. Hooke tarafından homojen/elastik cisimler için ifade edilen elastisite kuralı, mühendisler tarafından yapı davranışını ve göçme yükünü belirlemek için kullanılmaktadır.



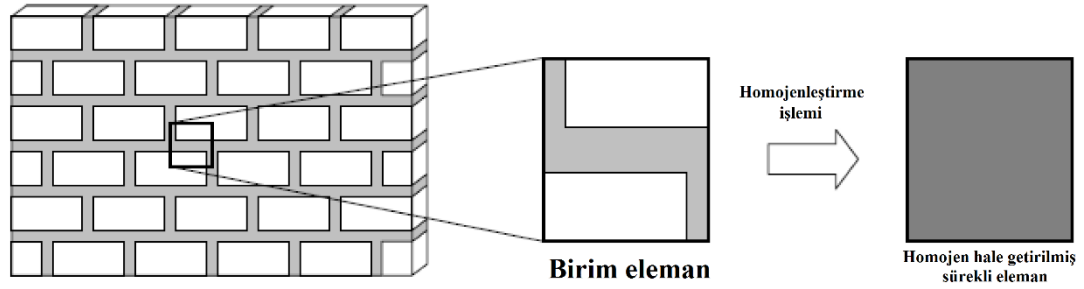
Şekil 3.37. Tarih boyunca yapısal analizlerin doğrulukları

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

- Mekanik davranış homojen değildir.
- Malzeme izotropik değildir, doğrultuya göre farklı davranışlar gösterir.
- Özellikle uzun vadeli yükler için çekme mukavemeti sıfır kabul edilir.
- Basınç gerilmeleri altında davranışı gevrek (akma bölgesine sahip değildir).
- Kayma gerilmeleri altında belirli bir oranda sünek davranış görülür.
- Elemanların gerçek rijitliklerinin hesabında çatlaklar ve elemanlar arasındaki bağlar dikkate alınmalıdır.
- Mekanik davranış lineer ve sıklıkla da elastik değildir (Oğuzmert 2002).

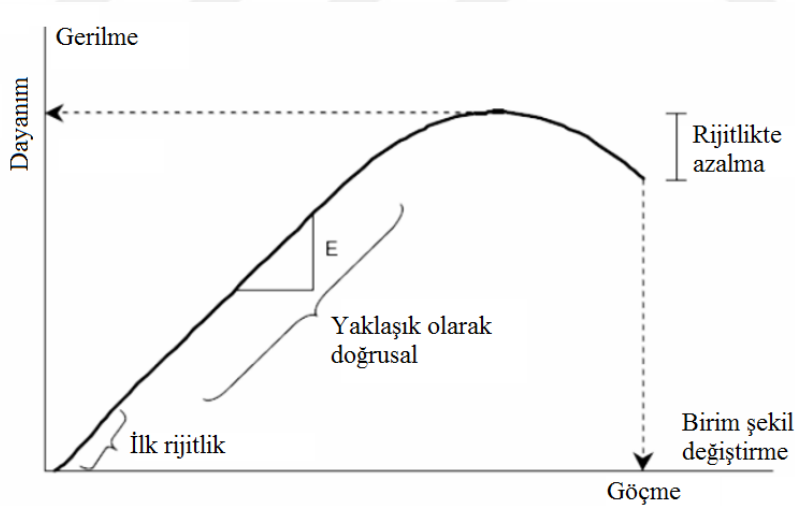
Malzeme idealleştirilmesi yaparken, özellikle yapının bir bütün olarak değerlendirildiği makro modellemede aşağıdaki basitleştirme ve idealleştirmeler yapılabilir:

- Homojen ve İzotrop Malzeme: Malzeme homojen kabul edilebilir, bütün doğrultularda aynı davranışı gösterdiği kabulü yapılabilir (Şekil 3.38).



Şekil 3.38. Yığma malzemelerin homojenleştirilmesi (Lourenço 2002)

- Lineer-Elastik Davranış: Düşük gerilme seviyelerinde malzemenin lineer elastik davranış gösterdiği kabul edilebilir. Gerçekte bu kabul basınç gerilmeleri altında oldukça tutarlıdır. Çünkü yığma yapıların kesitleri zati yükler altında oldukça düşük seviyelerde gerilmelere sahiptir. Fakat çekme gerilmeleri küçük seviyelerde de olsa çatlaklara sebep olabilmektedir (Şekil 3.39).



Şekil 3.39. Basınç altında yığma eleman gerilme-şekil değiştirmesi (Özen 2006)

- Çekme Mukavemeti: Yığma malzemelerin çekme mukavemeti taşıdığı da kabul edilebilir. Bu gerçek davranışa aykırı gibi görülürse de çekme gerilmesi oluşan bölgeleri tespit etmek, muhtemel çatlakların yerleri hakkında bilgiler verdiği için faydalıdır. Ayrıca, çekme gerilmesi meydana gelen bölgedeki malzemeleri modelden çıkarmak suretiyle, lineer olmayan davranışın belirlenmesi de mümkündür.

- Lineer Olmayan Davranış: Doğrusal olmayan davranışı, yüksek gerilme seviyelerinde dikkate almak gerekir. Lineer olmayan davranış genellikle iki kriter şeklinde modellenir. Bunlar Mohr-Cloumb kriteri ve Drucker-Prager kriterleridir.

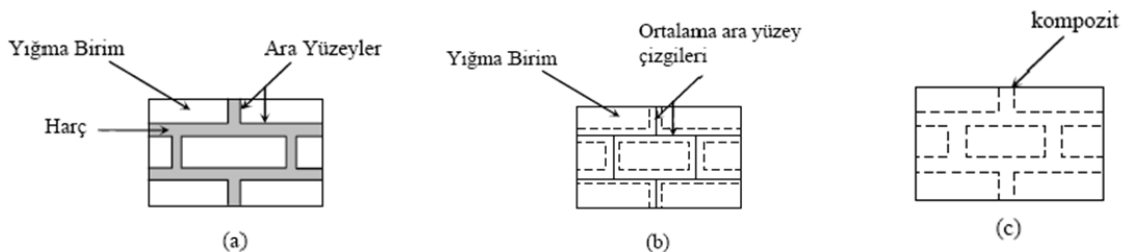
Yığma yapılar üzerinde yapılan çalışmalarda, malzemenin lineer kabul edildiği birçok çalışma bulunmaktadır. Santa Maria del Fiore için yapılan bir çalışmada ise tuğla elastik, harç ise elasto-plastik bir birleşim malzemesi olarak dikkate alınmıştır. Yığma malzemelerin, betonun akma kriterine benzer bir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

3.9. Tarihi Yapılarda Modelleme Yöntemleri

Sonlu elemanlar yöntemiyle yığma yapıların modellenmesinde kullanılan eleman ve kabuller, betonarme yapılar için kullanılanlardan oldukça farklıdır. Yığma yapılarda, taş ve tuğla gibi yığma birimlerin ve farklı karakteristiklere sahip harcın bulunması, tek bir sonlu eleman tipinin kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Bu durumda kabule uygun ve gerçekte uygulanmayacak şekilde bir modellenme tekniği geliştirmek gerekmektedir. Ya da bu birimleri ayrı ayrı modellemek yolu tercih edilmelidir. Yığma birimlerin ve ara yüz elemanlarının ayrı ayrı modellendiği bu durumda ise bilinmeyen sayısı oldukça fazla olmaktadır. Özellikle doğrusal olmayan çözümlemede iterasyonların da işleme katıldığı düşünülürse, sistemin çözüm süresi aşırı oranlarda artmaktadır (Ural 2009).

Yığma yapıların modellenmesinde, mikro modelleme ve makro modelleme şeklinde iki temel yaklaşım mevcuttur. Mikro modelleme tekniğinde, bağlayıcıyı temsil eden harç ile taş veya tuğla ayrı ayrı modellenir. Bu modelleme tekniği de kendi içinde detaylı ve basitleştirilmiş olarak iki grupta tanımlanabilir (Şekil 3.40). Makro modellemede ise malzemeler ayrı ayrı değil, genel bir ilişki içerisinde tek malzeme gibi modellenmektedir. Mikro modelleme yaklaşımında, elastik ötesi davranış ara yüz elemanlarında oluşur ve dolayısıyla rijitliğin azalmasına yol açan gerilmeler ve yük akışı izlenebilir. Ara yüz elemanı için çeşitli göçme modlarını içeren modeller de geliştirilmiştir. Uygun modelleme tekniğinin, sistemin büyüklüğüne bağlı olarak sırasıyla aşağıdaki gibi kullanıldığı söylenebilir:

- Detaylı mikro modelleme,
- Basitleştirilmiş mikro model,
- Makro modelleme.



Şekil 3.40. Yığma duvarlarındaki modelleme teknikleri, a) detaylı mikro modelleme, b) basitleştirilmiş mikro modelleme, c) makro modelleme (Lourenço 1996)

3.9.1. Detaylı mikro modelleme

Bu modelleme tekniğinde, yığma duvarı meydana getiren yığma birimlerin ve harcın mekanik özellikleri yani Elastisite Modülleri, Poisson Oranları ve elastik olmayan diğer özellikleri ayrı ayrı dikkate alınmaktadır. Bu yaklaşımda çatlakların yığma birim elemanların arasındaki ara yüzeylerde meydana geleceği varsayılmaktadır (Lourenço 1996).

Detaylı mikro modelleme, yığma yapıdaki derz zayıflığının öne çıktığı, düzlemsel bir modelleme türüdür. Titiz bir çalışmayla, tuğla veya taştan oluşan yığma birimler ile bu birimler arasındaki derzleri oluşturan harç ayrı olarak modellenir. Böylece malzemeler arası davranış farklılığı da dikkate alınmış olur. Hem taş/tuğla bloklar hem de harç için modelleme aracı olarak sonlu elemanlar kullanılır (FEM - kabuk ya da katı cisim elemanları). Derzdeki harcın yığma birimlere nazaran zayıf olması sebebiyle, derzlere yoğunlaşan bir model yaklaşımı olan detaylı mikro modelleme tekniği, daha çok küçük ölçekli yapılarda ve özellikle yapı elemanlarının veya yapıların bir bölümünün detaylı analiz edilmesinde tercih edilen bir tekniktir. Detaylı mikro modelleme yaklaşımında yığma yapı birimleriyle bağlayıcıların mekanik özellikleri tam olarak bilinmelidir. Dolayısıyla detaylı mikro modelleme öncesinde kapsamlı bir malzeme çalışması yapılması şarttır. Detaylı mikro modellemede, tüm doğrusal olmayan davranış, ara yüzlerde ve olası düşey kırılmalar ise birimin ortasında yoğunlaştırılabilir. Bu yaklaşımda doğal olarak büyük bir hesap yükü ile karşılaşılır. Bu sebepten detaylı mikro modelleme yaklaşımı yerel analizler için yaygın olarak kullanılırken, büyük ölçekli yapının bütünü değerlendirilen çalışmalarda tercih edilmemektedir.

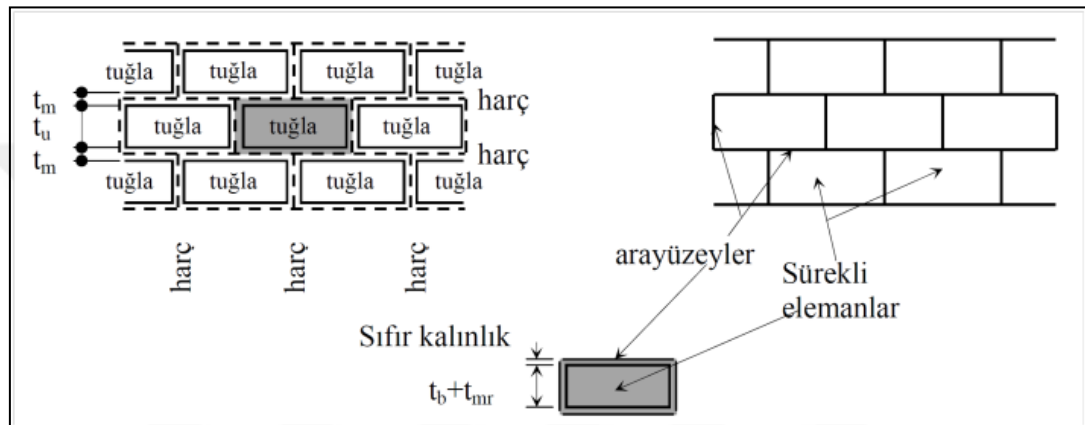
Tam bir detaylı mikro modelde bütün göçme mekanizmaları, yani birleşimdeki çatlaklar, derzde meydana gelebilen kaymalar, yığma birimin kırılması ve ezilmesi şeklinde sayılabilecek davranışlar bulunmalıdır (Lourenço 2000).

3.9.2. Basitleştirilmiş mikro modelleme

Detaylı mikro modelleme tekniği, yığma duvarların gerçek davranışlarının belirlenmesinde kullanılan en ideal modelleme tekniği olsa da, günümüzdeki bilgisayar teknolojisinin durumu da göz önüne alındığında büyük sistemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılamamaktadır. Çok büyük boyutlardaki sistem rijitlik matrisi çözüm süresini uzatmakta ve bilgisayarda büyük sonuç dosyaları üretmektedir. Bu sebepten dolayı daha basit modelleme teknikleri geliştirilmiş ve böylece yığma sistemlerin kısa zamanda daha düşük kapasiteli bilgisayarlarla çözümü mümkün kılınmıştır. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği de bu tekniklerden birisidir.

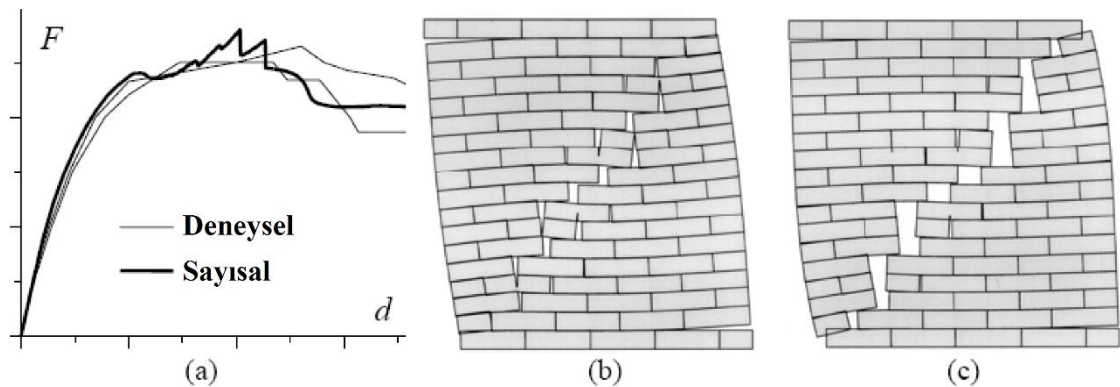
Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği kullanılarak yapılan modellemelerde, muhtemel göçme mekanizmalarının tümünün dikkate alınmamaktadır. Modellemede tanımlanacak olan ara yüzeylerde hem çekme hem de kayma davranışlarının birlikte tanımlanması gerekmektedir. Bu sebeple yapılan kabule göre; yığma duvarlarda meydana gelebilecek olan çekme ve kayma çatlaklarının ve tüm hasarın ara yüzeylerde oluşacağı ve tuğlalarda meydana gelebilecek olan potansiyel çatlakların ise tuğlanın orta kısmında düşey olarak gerçekleşeceği kabul edilmektedir (Ural 2009).

Bu yöntemde her bir bağlantı, birim ile harç arasındaki iki ara yüz ve derzin kendisiyle birlikte ortalama tek bir ara yüze dönüştürülür. Yığma birimler ise geometriyi korumak için genişlemiş kabul edilir. Böylece yapı potansiyel kayma ile kırılma yüzeylerini oluşturan ara yüzler ile birbirlerine bağlanmış elastik bloklardan oluşan bir model ile temsil edilmiş olur. Bu modelleme tekniğinde, yığma birimlerin boyutları, harç tabakası kalınlığının yarısı kadar genişletilerek harç tabakası ihmal edilmektedir. Bu basitleştirilmiş malzeme yaklaşımında, harcın poison oranı dikkate alınmadığından hassasiyet bir miktar kaybolur. Yığma birimler ortalama ara yüzey çizgisiyle birbirinden ayrılmaktadır. Meydana gelmesi muhtemel çatlakların bu ortalama ara yüzey çizgisinde meydana geleceği kabul edilmektedir (Lourenço 1996). Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği şematik olarak Şekil 3.41'de gösterilmiştir.



Şekil 3.41. Basitleştirilmiş mikro model tekniği

Basitleştirilmiş mikro modelleme; ayırık elemanlar (Discrete Elements - DE) veya limit analiz tekniği kullanılarak gerçekleştirilebilir. Ayırık eleman yönteminde, yapı ayrı blokların (katı ya da deforme olabilen) birleşimi olarak kabul edilir. Yöntem büyük yer değiştirme (derzler için) ve küçük şekil değiştirmeler (bloklar için) üzerine kuruludur. Her bir blok geometrik ve malzeme olarak modellendikten ve kuvvetler tanımlandıktan sonra, zamana bağlı hareket denklemleri sayısal olarak çözülür (Şekil 3.42).



Şekil 3.42. Yığma duvarın mikro model analizi: a) kuvvet- yer değiştirme diyagramı, b,c) maksimum ve nihai yüklerdeki deformasyonlar (Lourenço 2000)

Ayrık eleman metodunda rijit veya şekil değiştirebilen blokların kullanılabilmesi, yüzeyler ve köşe noktaları arasında bağlantı sağlanabilmesi, elemanların birbiri içine girebilme imkânının olması bu metodun en çok dikkat çeken karakteristik özellikleridir. Bu tekniğin önemli bir avantajı ise büyük yer değiştirmelerin yeterli bir yaklaşımla formülize edilebilmesi, sistem elemanlarına bağımsız hareket yapabilme kabiliyeti kazandırır. Olumsuz tarafları ise birim elemanlar arası karşılıklı etkileşimin doğru bir biçimde temsil edilmesi için çok sayıda temas yüzeyi gerektirmesi ve üç boyutlu problemler için çok zaman harcanması şeklinde sayılabilir (Lourenço 2000).

Sonlu elemanlar yöntemiyle ayrık eleman yöntemi birlikte de kullanılabilir. Katı birim elemanlar (tuğla, taş, vb.) sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenirken bağlayıcı harçlar için ise ayrık elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Büyük yer değiştirmeler olduğunda bu yöntemi kullanmak zorlaşır. Bu yöntemdeki en büyük zorluk, uygun malzeme parametrelerini, belirlemektir. Tuğla / taş blok ve harç bağlayıcının malzeme özelliklerinin tespit edilmesinde pratikte zorluklar bulunur. Çünkü örme yapıları elemanlar genellikle alçı, sıva gibi malzemeler ile kapatılmaktadır (Saraç 2003).

Limit analiz yaklaşımında ise, rijit blokların kullanılması, blokların birbirinin içerisine girmesine izin verilmemesi, optimizasyon sağlayan bir matematik yöntem kullanılması bu yöntemin en çok dikkat çeken özellikleridir. Limit analiz yönteminin avantajları, hızlı analiz yapma imkânı ve tasarımda kullanılabilmesidir. Bu yöntemin olumsuz tarafları ise sadece göçme yükü ve mekanizmanın tespit edilebilir olması ve çekme gerilmelerinin modele dâhil edilmemesidir. Ayrıca yükleme geçmişinin tanıtılması da zorluklar arasında yer alır.

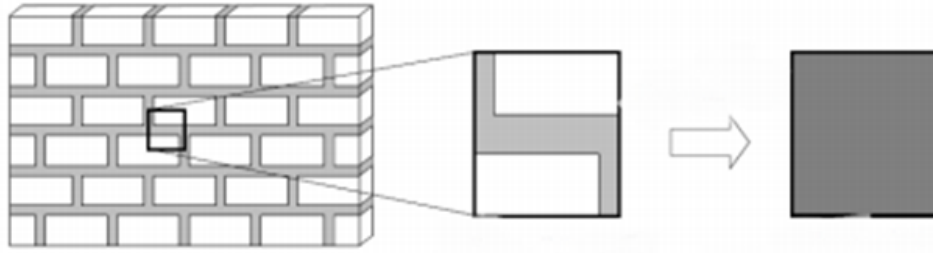
3.9.3. Makro modelleme

Makro modelleme tekniği, mikro modelleme tekniklerinde kullanılan düğüm ve eleman sayısından çok daha az sayıda sonlu eleman gerektiği için büyük yapı sistemlerinin analizlerinde tercih edilmektedir. Bu yaklaşım genellikle karmaşık sistemli yığma yapıların duvar, ayak, payanda, kemer ve tonozlarının modellenmesinde kullanılmaktadır. Ancak bu yaklaşımda çatlak geometrisi, yayılımı ve göçme davranışı hakkında detaylı bir bilgi elde edilememektedir.

Uygulamaya yönelik çalışmalarda, büyük sistemlerin analizinin gerekli olduğu durumlarda tüm sistem modellenirken yığma birimler ile harç arasındaki etkileşim ihmal edilmektedir. 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 modelledir. Bu yaklaşım, verim ve hassasiyet kavramları uzlaştığında, en değerli yöntemdir. Kabul edilebilir bir hassasiyet tanımlanabiliyor ve bu hassasiyet makro modellemeye imkân tanıyacak kompozit malzeme idealleştirmesini yapmaya elverişli oluyorsa, bundan daha verimli ve değerli bir yöntem yoktur.

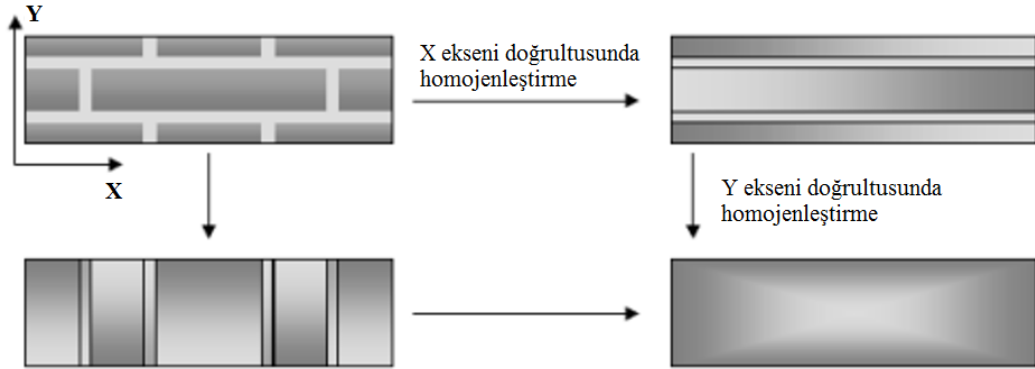
Bu yaklaşımda, malzeme kompozit kabul edilmekte olup taş / tuğla ve harç homojenleştirilerek tek bir malzeme özelliğine dönüştürülmektedir (Lourenço 1998). Taş,

tuğla ve harç arasında bir ayrım ve farklılık gözlemlenmeden yığma yapıyı homojen bir anizotrop ortam kabulüyle modelleme esasına dayanır. Aynı zamanda kompozit malzeme teorisi kullanılarak yığma birimin homojen ve izotrop bir malzeme özelliğine sahip olduğu kabul edilerek homojenleştirme işlemi yapılmaktadır (Proske ve Gelder 2009). Bunların yanı sıra Lourenço ve arkadaşları Şekil 3.43'te görüldüğü gibi “Birim hücre metodu” adını verdikleri bir homojenleştirme yöntemi ile yığma birimlerin nümerik modellemesini yapmıştır.



Şekil 3.43. Birim hücre yöntemi ile homojenleştirme işlemi

Yukarıdaki şekilde (Şekil 3.43) görüldüğü gibi; yığma duvardan alınan basit bir hücre incelendiğinde, harç ve tuğlanın katılım oranları dikkate alınarak malzeme parametrelerinde kullanılır ve tek bir malzeme olarak kabul edilebilir. Homojen malzeme tanımları doğrultuya göre de seçilebilir. Aşağıdaki şekilde yatay ve düşey doğrultuda yapılmış homojenleştirme işlemi görülmektedir (Şekil 3.44).



Şekil 3.44. İki adımlı homojenleştirme işlemi (Schueremans, 2001)

Lourenço, çalışmasında tuğla ve harç için elastisite modülü başta olmak üzere diğer malzeme parametrelerinin hesabı için;

$$E_k = (t_h + t_t) / [(t_h/E_h) + (t_t/E_t)] \times \rho_k \quad (3.1)$$

ifadeleriyle verilen bağıntıyı önermektedir. Bu bağıntıda kullanılan E_k , elde edilen kompozit malzeme için eşdeğer elastisite modülü, t_h , harç kalınlığı, t_t , tuğla kalınlığı, E_h , harçın elastisite modülü, E_t , tuğlanın elastisite modülüdür. ρ_k ise tuğla ile harç arasındaki bağın veya aderansın etkinliğini ifade eden, 0-1 arasında değişen bir katsayı olup ortalama bir yapı için 0.5 kabul edilebilir.

Taş duvarlar için de, bu yöntemle hesap yapılabildiği gibi değişik araştırmacılar farklı yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler farklı elemanların geometrisi ve malzeme özelliklerini dikkate alan eşdeğer malzeme özelliklerinin belirlenmesine dayanmaktadır. Eurocode8’de ise tuğla ve harçtan oluşan kompozit malzemenin mukavemeti;

$$f_{bk} = K \times f_{tuğla/taş}^{0.65} \times f_{harç}^{0.25} \quad (3.2)$$

bağıntısı ile verilmiştir. Burada K, 0.4 ile 0.6 arasında 0.05 adımlarla değişen bir sabiti ifade eder ki bu katsayı yığma yapının morfolojisine bağlıdır (Lourenço, Vasconcelos ve Ramos, 2001).

3.10. Tarihi Yapılarda Modelleme Araçları

Yapı mekaniğinde kullanılan modelleme araçları sonlu eleman olarak adlandırılır. Sonlu elemanların meydana getirdiği yapıya ağ (mesh) adı verilir. Eleman üzerindeki alan değişkeninin değişimi polinom gibi basit fonksiyonlar kullanılarak yaklaşım yapılır. Elemanın gerçekte yapmış olduğu davranış daha karmaşık olmasına rağmen sonlu elemanlar yöntemi ile bir yaklaşım yapılmaktadır. Yaklaşımın hassasiyeti ise yapıyı temsil eden eleman sayısını veya kullanılan fonksiyon derecesini büyütülerek artırılır. Elemanları birbirine bağlayan noktalara düğüm noktası adı verilir. Alan değişkenleri ve onun türevleri bilinmeyen olarak belirtilir. Sonlu elemanlar yöntemi yapıya ait kısmi türevli diferansiyel denklemi lineer cebrik denklemlere dönüştürmektedir. Sonlu elemanlar analiz programında kullanılan bazı kavramlar;

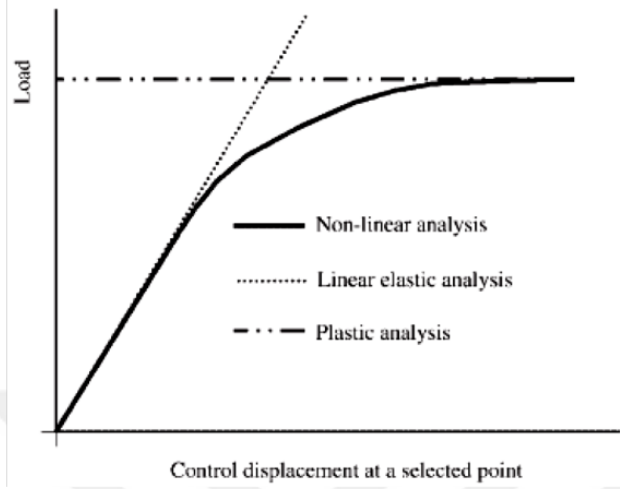
- Düğüm noktası (Joint): Sistemin dış ortam ile birleştiği veya elemanların birbirleriyle birleştiği noktalar.
- Çubuk eleman (Frame): Gerçek sistemde kesit boyutları uzunluğuna göre küçük olan elemana çubuk eleman adı verilir.
- Kabuk eleman (Shell): Yüzeysel taşıyıcı elemanları modellemek için kullanılan elemandır. Kabuk elemanlar, düzlemine dik ve paralel olan bütün kuvvetleri aktarabilme özelliğine sahiptirler. Bu şekilde, kabuk elemanlar üzerinde kuvvet ve gerilme okumaları yapılabilir. Modellemede, kabuk elemanlar mümkün olan en uygun sayıda bölünmek zorundadır. Bu işlem yapılmadığı takdirde yük aktarımı süreksiz olur ve kesin sonuçtan uzaklaşılır. Bu nedenle, kabuk elemanlar sonlu sayıda elemanlar ile temsil edilmelidir.
- Ara yüz bağlantı elemanı (Link): Elemanlar arası etkileşime belirli bir özellik tanımlanması gerektiğinde kullanılan etkileşim elemanlarıdır. Boşluk, hareket sınırlayıcı, dinamik sönümleyici, sürtünme elemanı gibi çeşitleri vardır.

3.11. Tarihi Yapılarda Analiz Yöntemleri

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

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

yapıda meydana gelen tedrici çatlak ve hasarların incelenmesiyle kullanılabilirlik sınırları da elde edilebilmektedir. Çatlamış elemanların rijitliklerinde azaltmalar yaparak yeniden gerilmelerin dağılımı yardımıyla limit yük analizi de yapılmaktadır. Aşağıdaki şekilde analiz yöntemleri grafik olarak gösterilmiştir (Şekil 3.45).



Şekil 3.45. Analiz tiplerinin karşılaştırılması (Şen, 2003)

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

Plastik Analiz: Yapının plastik bir davranış gösterdiği esasına dayanan ve limit yük analizinde kullanılan bir yöntemdir. Genellikle doğrulama çalışmalarında kullanılır. Plastik mafsallara dayanan bir yapısal davranış modelidir. Plastik analizde önceki yüklemelerin etkisi göz önüne alınmazken, yüklerin yoğunlaşması dikkate alınabilir ve yüklerin monoton artış gösterdiği kabul edilir. Bu metod alt sınır veya üst sınır teoremlerinin birine göre uygulanabilir. İtke çizgisi analizi statik bir alt sınır teoremi uygulamasıdır. Plastik mafsalları da kinematik bir üst sınır uygulaması olarak karşımıza çıkmaktadır. Plastik davranış, çekme gerilmeleri sıfır kabul edilirse, tarihi yığılma yapılar için yeterli bir yaklaşım olabilmektedir (Şen 2003).

Bütün analiz metotları birbirinden malzeme davranışı ve sonuçlar açısından farklılıklar gösterir. Basit yapılar için çekme mukavemeti sıfır kabul edilmek kaydıyla non-linear analiz ile limit yük analizi benzer göçme mekanizmalarıyla sonuçlanır. Fakat karmaşık yapılar için limit yük analizini yapmak zordur ve sonuçlar yanlışlıklar içerebilmektedir. Çekme mukavemeti tarihi yapıların analizinde önemli bir meseleyi oluşturur. Sıfırdan farklı, düşük veya azalan çekme mukavemeti analizde dikkate alınırsa sonuçların güvenilirliği artmaktadır. Bununla beraber çekme gerilmelerini değerlendirmek kolay değildir. Çizelge 3.5'te analiz yöntemleri ile giriş ve sonuç verileri toplu olarak gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. Analiz Tiplerinin Karşılaştırılması (Şen 2003)

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

3.11.1. Düşey Yükler Altında Statik Analiz

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

3.11.2. Serbest Titreşim Analizi (Modal Analiz)

Modal analiz yönteminde, yapının serbest titreşim periyotları, mod şekilleri ve kütle katılım oranları belirlenir. Yapı sisteminin davranışına, yapıya ait her bir serbest titreşim modunun katkısının bulunduğu, bu katkıların ayrı ayrı belirlenip, her bir moda ait katkının birleştirilmesi yoluyla yapının dinamik davranışın belirlenmesi esasına dayanan davranış spektrumu analizi, mod birleştirme esasına dayanır. Bu yöntemde yapı kütlelerinin, belirli seviyelerde toplandığı kabulüyle, iki ötelenme ve bir dönme hareketine bağlı olarak yapının davranışı ifade edilir. Matematik olarak sağlam bir temele dayanmasına rağmen, gerçek taşıyıcı sistem davranışını temsil etmek ve açıklamadaki eksiklikleri nedeniyle dikkatli kullanılması önerilen bir yöntemdir. Çoğu zaman modal analiz sonuçlarının, lineer statik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması önerilir.

3.11.3. Davranış Spektrumu Analizi

Zaman alanında sayısal çözümleme, yer değiştirme veya kesit etkisi gibi bir sistem parametresini zamana bağlı olan değişimini verir. Ancak, taşıyıcı sistemin güvenilirliğinin belirlenmesinde genel olarak bu parametrenin en büyük değeri etkili olur. Bu nedenle, uzun ve yorucu olan sayısal çözümlemeye ihtiyaç kalmadan, deprem hareketinin spektrumu kullanılarak, en elverişsiz değerlerin elde edilmesi önemli ölçüde kolaylık sağlar. Spektral eğriler sadece en büyük değeri verecek şekilde hazırlandıkları ve belirli bir anda çeşitli modların katkılarının bulunmasında yeterli olmadığı için, matematiksel bir yaklaşıklığın yapılması gerekli olur. Matematik yaklaşımlardan biri olan Mutlak Değerlerin Toplamı (ABS) yönteminde, bütün modların en büyük katkılarının

aynı zamanda olduğu kabul edilerek, incelenen parametrenin meydana gelebilecek en büyük değerlerinin üst sınırını elde edilir, ancak bu değer abartılı biçimde büyük çıktığı için genellikle kullanılmaz. Bunun yerine Karelerinin Toplamının Karekökü (SRSS) yöntemiyle elde edilen değer, serbest titreşim frekansları ayrı olan sistemlerde, zaman tanım alanında çözümleme ile elde edilen sonuçlara oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu kuralın sınırlamasını kaldıran Tam Karesel Birleştirme (CQC) ise çok daha kapsamlı olup, serbest titreşim frekansları yakın olan sistemler için de kullanılabilir. Modların karşılıklı etkileşimi ihmal edilirse Tam Karesel Birleştirme ile Karelerin Toplamının Karekökü Kuralı üst üste düşer (Celep ve Kumbasar 2004).

Matematik birleştirme yöntemlerinin kullanılmasıyla, sistemin zaman alanında dinamik bir çözümünün yapılmasına ihtiyaç kalmaz. Ancak Modal Spektral Çözümleme Yöntemi'nde de sistemin periyot, sönüm ve mod şekilleri gibi sistemin dinamik özellikleri yanında, depremin dinamik özelliklerini içeren spektrum eğrileri kullanıldığı için, bu yöntem de dinamik bir yöntemdir. Daha önceki deprem kayıtları değerlendirilerek spektrum eğrilerinin hazırlanması ile Modal Spektral Çözümleme Yöntemi'nin başlangıcını teşkil etmek ve böylece zaman tanım alanında adım adım sayısal çözüme göre büyük bir kolaylık sağlamaktadır (Celep ve Kumbasar 2004).

3.11.4. Zaman Tanım Alanında Analiz

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

3.12. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

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

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

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Patara Antik Tiyatrosu Sahne Yapısının Modellenmesi

4.1.1. Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısının geometrik özellikleri

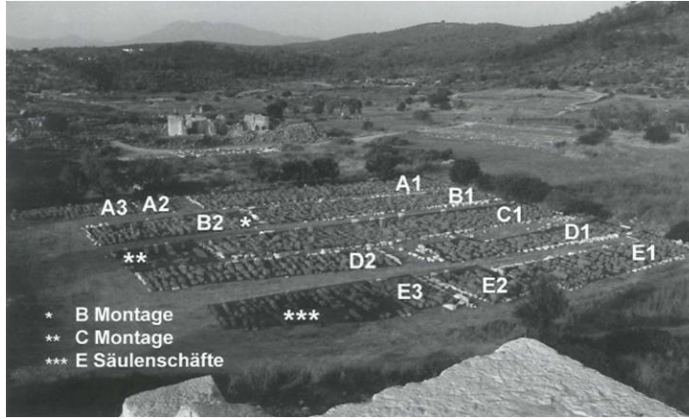
Patara Antik Kenti'nin birçok kısmı tarih boyunca oluşan doğal koşullar ve afetler neticesinde toprak altında kalmış ve yapılan kazı çalışmaları ile belirli bir seviyeye kadar gün yüzüne çıkarılmıştır. Antik kent tiyatrosu da bu yapılardan birisidir. Tiyatronun mevcut genel durumu Şekil 4.1'de görüldüğü gibidir (Piesker ve Ganzert 2012). Büyük oranda hasar gören yapıya ait taş bloklar numaralandırılarak tiyatro yapısının yakınındaki arazi üzerine istiflenmiştir (Şekil 4.2-3). Yapının restorasyon çalışmaları günümüzde sürdürülmektedir.



Şekil 4.1. Patara Antik Tiyatrosu genel görünümü

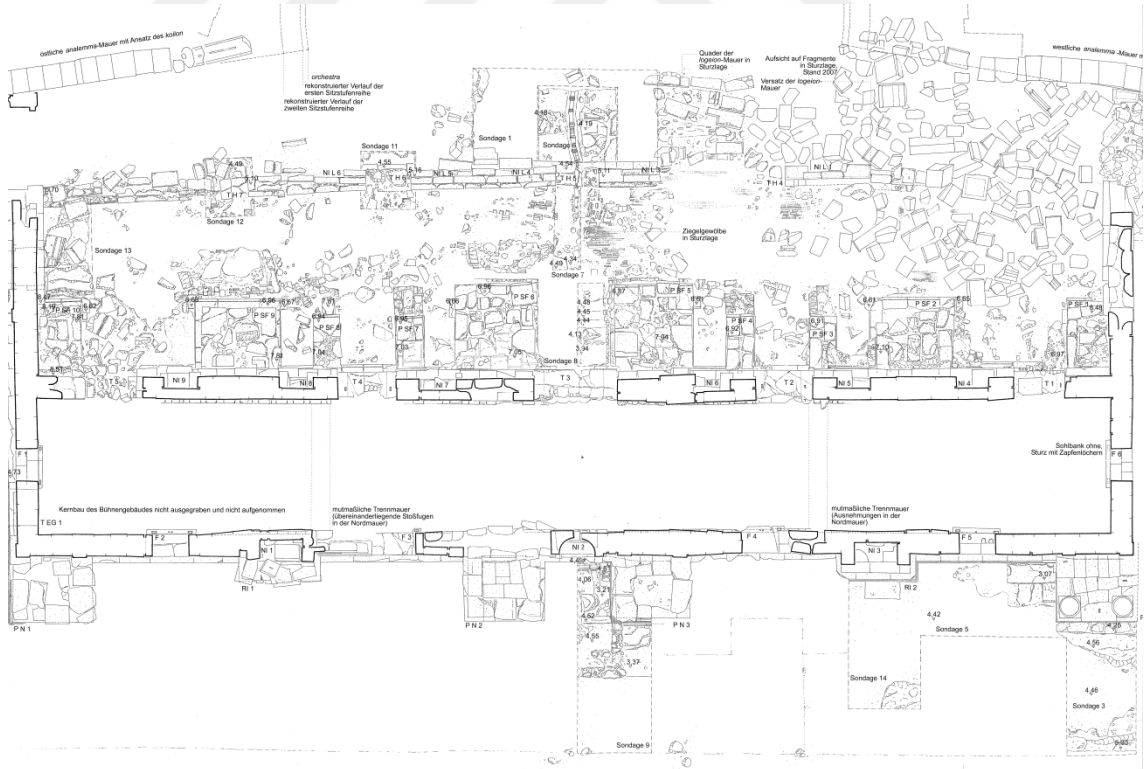


Şekil 4.2. Pantik Antik Tiyatrosu sahne yapısının görünümü

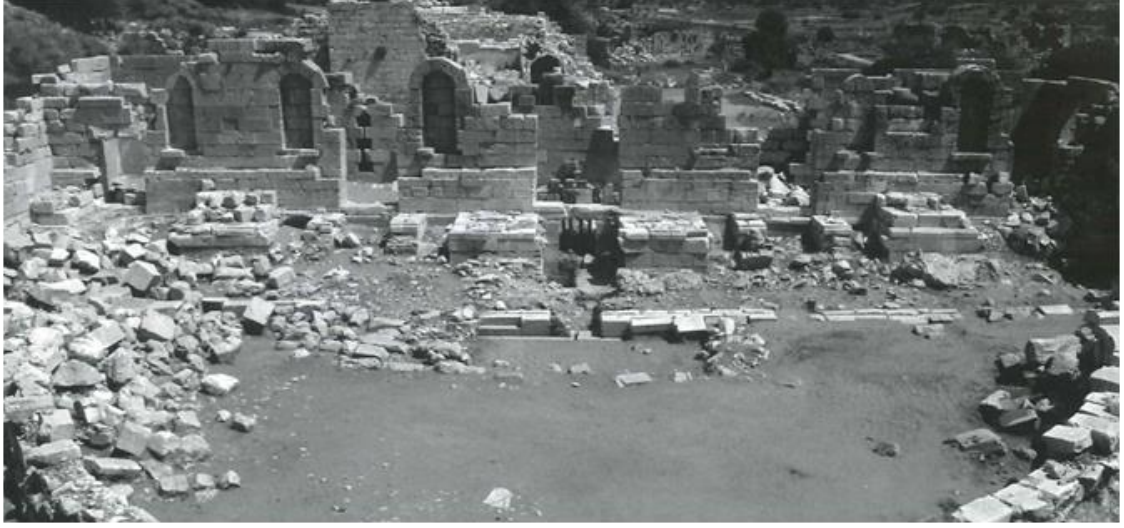


Şekil 4.3. Patara Antik Tiyatrosu'na ait istiflenen taş bloklar

Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısı yaklaşık olarak $41.05 \text{ m} \times 6.579 \text{ m}$ boyutlu bir dikdörtgen oturum alanına sahiptir. Doğu cephesinde 6.91 m , batı cephesinde 6.97 m çıkma mevcuttur. Yapının vaziyet planı Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Yapının mevcut durumu zemin ve birinci kat olmak üzere iki katlıdır. Ancak zemin katın neredeyse tamamı yaşanan doğal afetler neticesinde kumla kaplanmış durumda olup güncel fotoğraflardaki görüntüler birinci kata aittir (Şekil 4.5-12). Birinci katın da önemli bir bölümü hasar görmüş haldedir. Ancak yapının genel hatları belirgin durumdadır.



Şekil 4.4. Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısı vaziyet planı



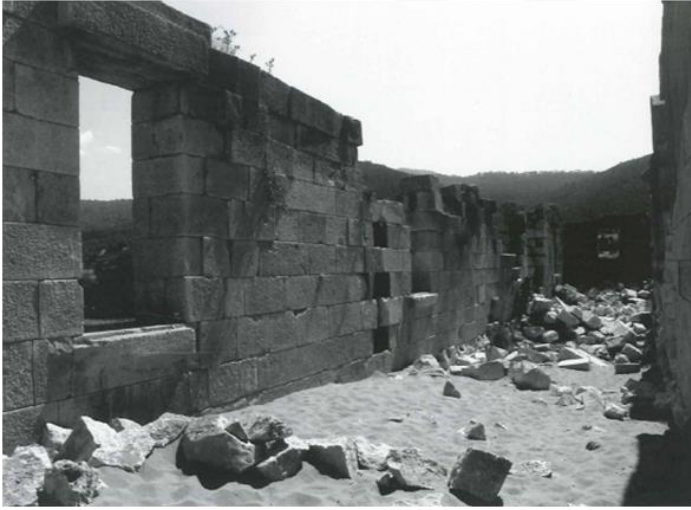
Şekil 4.5. Sahne yapısı güney cephesi dış görünüm



Şekil 4.6. Sahne yapısı güney cephesi iç görünüm



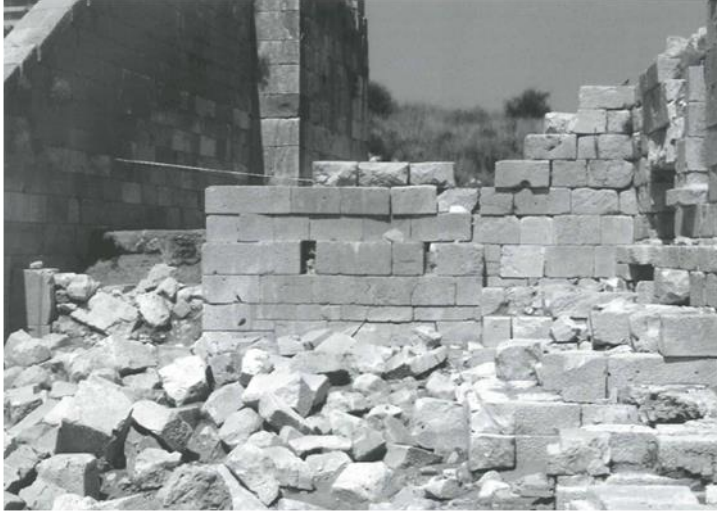
Şekil 4.7. Sahne yapısı kuzey cephesi dış görünüm



Şekil 4.8. Sahne yapısı kuzey cephesi iç görünüm



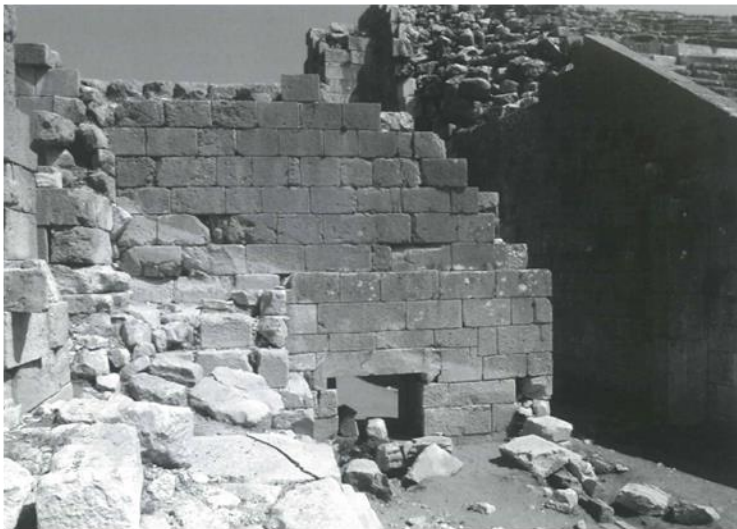
Şekil 4.9. Sahne yapısı batı cephesi dış görünüm



Şekil 4.10. Sahne yapısı batı cephesi iç görünüm

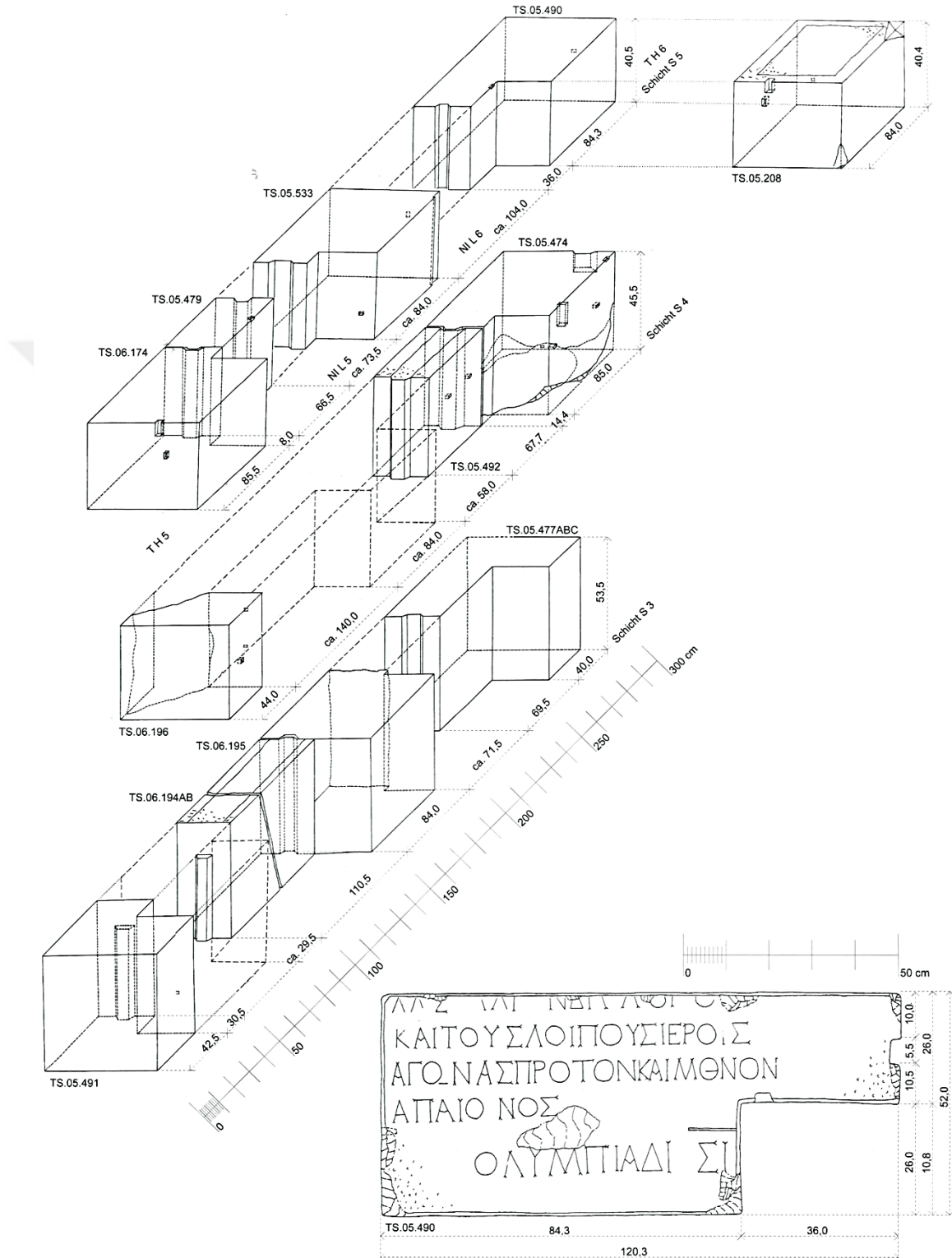


Şekil 4.11. Sahne yapısı doğu cephesi dış görünüm



Şekil 4.12. Sahne yapısı doğu cephesi iç görünüm

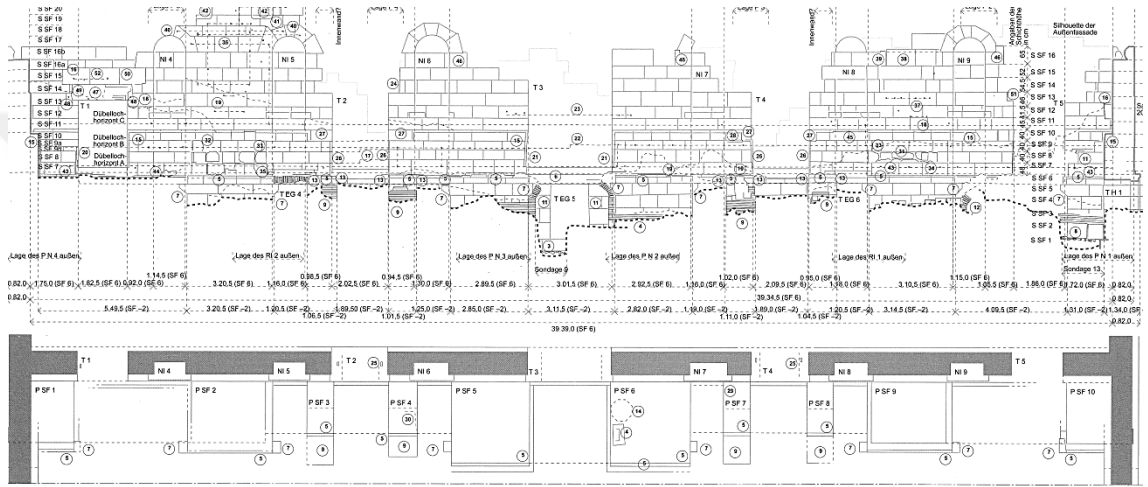
Sahne yapısı dönemin özelliklerine göre harçsız duvar örüm tekniklerinden isodom tekniğiyle yığma yapı olarak inşa edilmiştir. Şekil 4.13'te bu tekniğin duvar örneği gösterilmektedir.



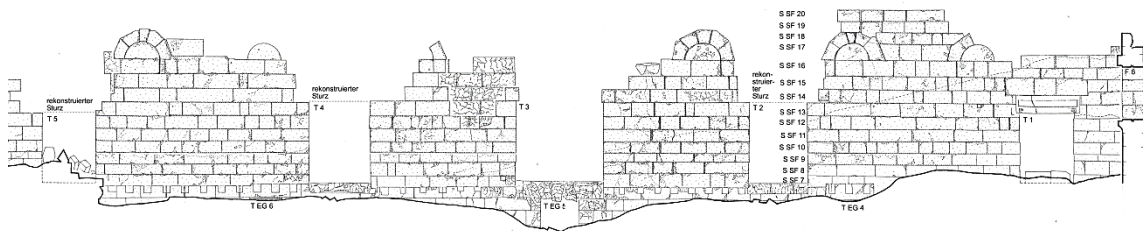
Şekil 4.13. Patara Antik Tiyatrosu duvar örüm tekniği (Niescken ve Piesker 2008)

Yapının mevcut durumuna ait detay çizimleri ve taş ölçüleri Piesker ve Ganzert (2012) tarafından yayınlanan kitapta yer almaktadır. Bu tez çalışmasında, sahne yapısının bilgisayar modelini oluşturabilmek amacıyla bu detay çizimlerinden faydalanılmıştır.

Yapının güney cephesi en hareketli ve gösterişli cephedir. Cephenin uzunluğu 41.05 m olup yapı mevcut haliyle zemin ve birinci kat olmak üzere iki katlıdır. Şekil 4.14-15'te cephenin iç ve dış kısım görüntüsünden anlaşılabileceği üzere zemin kat kumlarla kaplı, birinci katında bir kısım duvarları dökülmüş haldedir. Yapı modellenirken bu cephe için Şekil 4.13'te gösterilen yapının dış kısmına ait çizim dikkate alınmıştır. Cephenin mevcut durumuna göre en büyük duvar yüksekliği 5.25 m'dir. Cephe duvarı içerisinde yaklaşık olarak 1.80 m × 3.45 m ebadında bir adet boşluk ve bir kısmı dökülmüş halde bulunan 5 adet yaklaşık açıklığı 1.15 m olan tonozlu birleşimler bulunmaktadır.

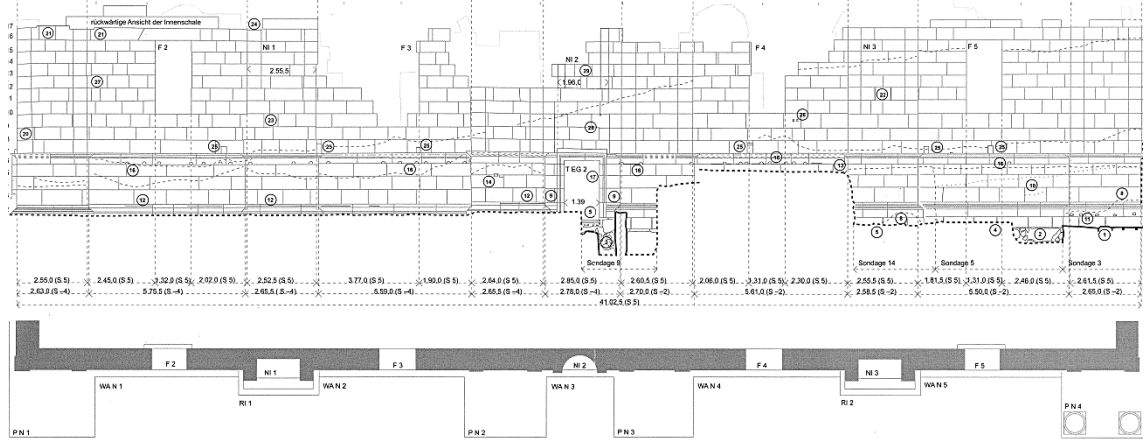


Şekil 4.14. Sahne yapısı güney cephesi dış kısmına ait çizim

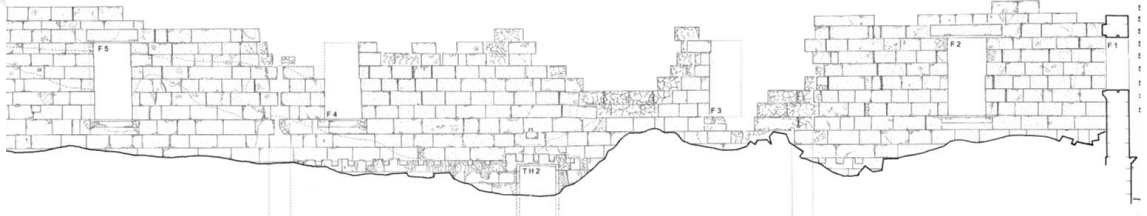


Şekil 4.15. Sahne yapısı güney cephesi iç kısmına ait çizim

Yapının kuzey cephesi güney cephesine göre daha sade bir mimariye sahiptir. Şekil 4.16-17'de gösterilen şekline göre uzunluğu 41.05 m olup, yapı modellenirken bu cephe için Şekil 4.16'da gösterilen dış kısma ait çizim dikkate alınmıştır. En büyük duvar yüksekliği 5.60 m değeri tespit edilmiştir. Cephede yaklaşık olarak 1.30m × 3.80 m ebadında iki adet pencere boşluğu bulunmaktadır.

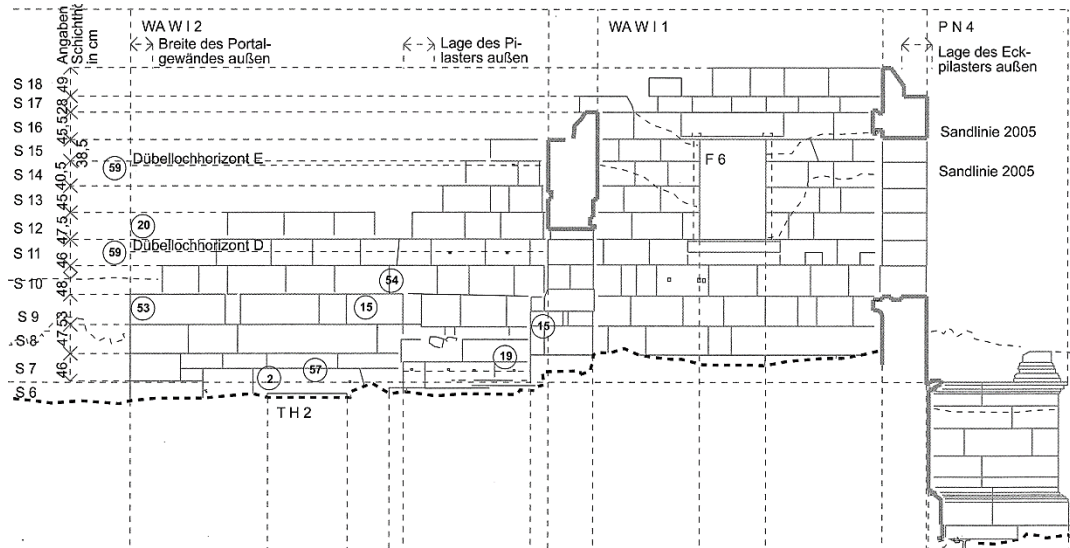


Şekil 4.16. Sahne yapısı kuzey cephesi dış kısmına ait çizim

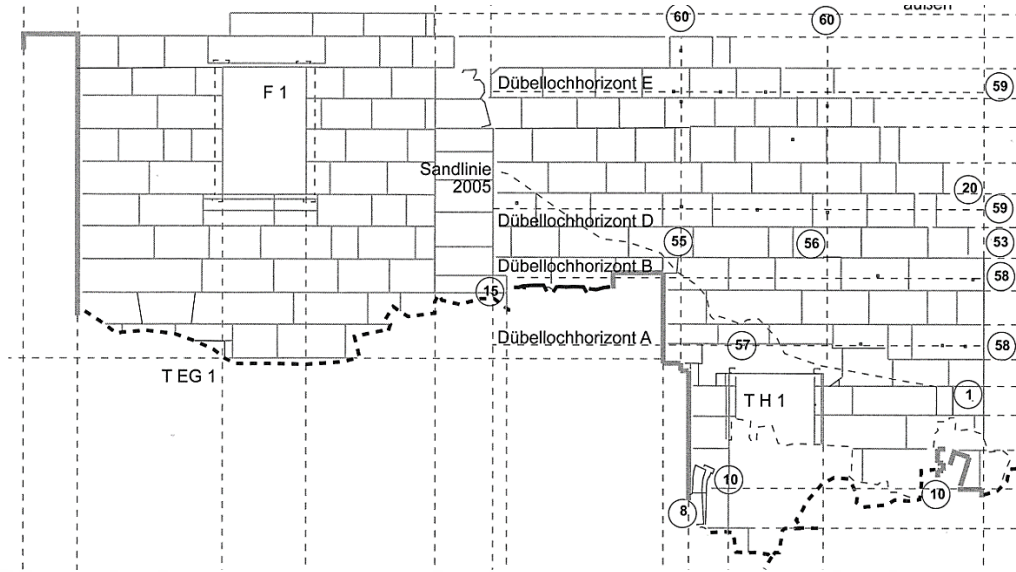


Şekil 4.17. Sahne yapısı kuzey cephesi iç kısmına ait çizim

Yapının batı cephesine ait çizimler Şekil 4.18-19'da görülmekte ve uzunluğu 13.55 m'dir. Yapı modellemesinde bu cephe için Şekil 4.19'da gösterilen iç kısma ait çizimden yararlanılmıştır. Cephede yaklaşık 1.17 m × 2.40 m ebadında bir adet pencere boşluğu vardır.

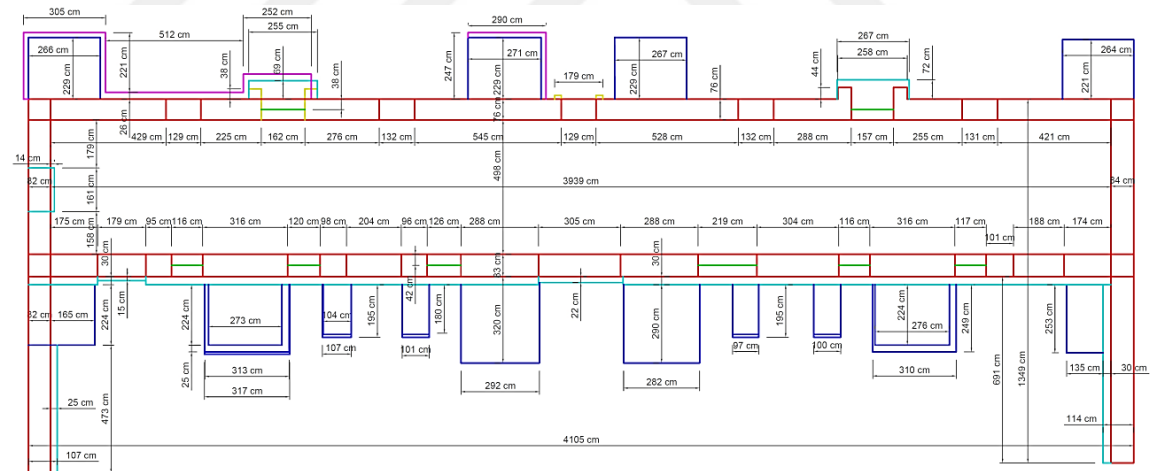


Şekil 4.18. Sahne yapısı batı cephesi iç kısmına ait çizim



Şekil 4.21. Sahne yapısı doğu cephesi iç kısmına ait çizim

Yapının mevcut durumu göz önünde bulundurularak yapılan modelleme çalışmasında cephelerin mimari özelliklerine göre farklı duvar kalınlıkları tespit edilmiş ve AutoCAD (AutoDesk 2018) programında her bir duvar kalınlığı için farklı renk verilerek ölçülendirilmiştir ve Şekil 4.22’de sunulmuştur.



Şekil 4.22. Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısı duvar kalınlıklarının ölçülendirilmesi

4.1.2. Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısının malzeme özellikleri

Patara Antik Tiyatrosu'na ait sahne yapısının yapısal davranışını tespit edebilmek için öncelikle özgün malzeme özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Yapının koruma altına alınması ve mevcut yapıya ait tüm taş elemanların numaralandırılarak sınıflandırılmış olması nedenleriyle analiz için ihtiyaç olan malzeme özelliklerinin, bölgede daha önce yapılmış olan önceki çalışmalardan temin edilmesi yoluna gidilmiştir. Yapılan araştırmalar neticesinde, yapısal ve dönemsel olarak benzer özelliğe sahip olan Patara Antik Kenti Deniz Feneri yapısı hakkında Koçkal ve Dipova tarafından birçok

malzeme çalışmasının Akdeniz Üniversitesi laboratuvarlarında yapılmış ve bu konuda resmi bir teknik rapor hazırlanmış olduğu görülmüştür. Patara Antik Kenti Deniz Feneri örneğinde üç adet taş numunenin ortalama özgül ağırlık, su emme ve porozite değerleri TS 3624'e uygun olacak şekilde tespit edilmiş ve Çizelge 4.1'de sunulmuştur (Koçkal ve Dipova 2011).

Çizelge 4.1. Taş numunelerin ortalama su emme, özgül ağırlık ve boşluk oranı değerleri

Numune adı	Su emme (%)	Kuru özgül ağırlık (t/m^3)	DKY özgül ağırlığı (t/m^3)	Görünür özgül ağırlık (t/m^3)	Boşluk oranı (%)
Taş	0.34	2.67	2.68	2.69	0.92

Patara Antik Kenti Deniz Feneri örneğinde üç adet taş numunenin ortalama elastisite modülü ve tek eksenli basınç dayanım değerleri, ASTM C 469'a göre malzemenin basınç altında birim boy değişiminin ölçülmesi yoluyla tespit edilmiştir (Koçkal ve Dipova 2011).

Çizelge 4.2. Taş numunelerin ortalama basınç dayanımı ve elastisite modülü

Numune adı	A uzunluğu (mm)	L uzunluğu (mm)	H yüksekliği (mm)	Basınç dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (MPa)
Taş	53	61	103	80.7	20490

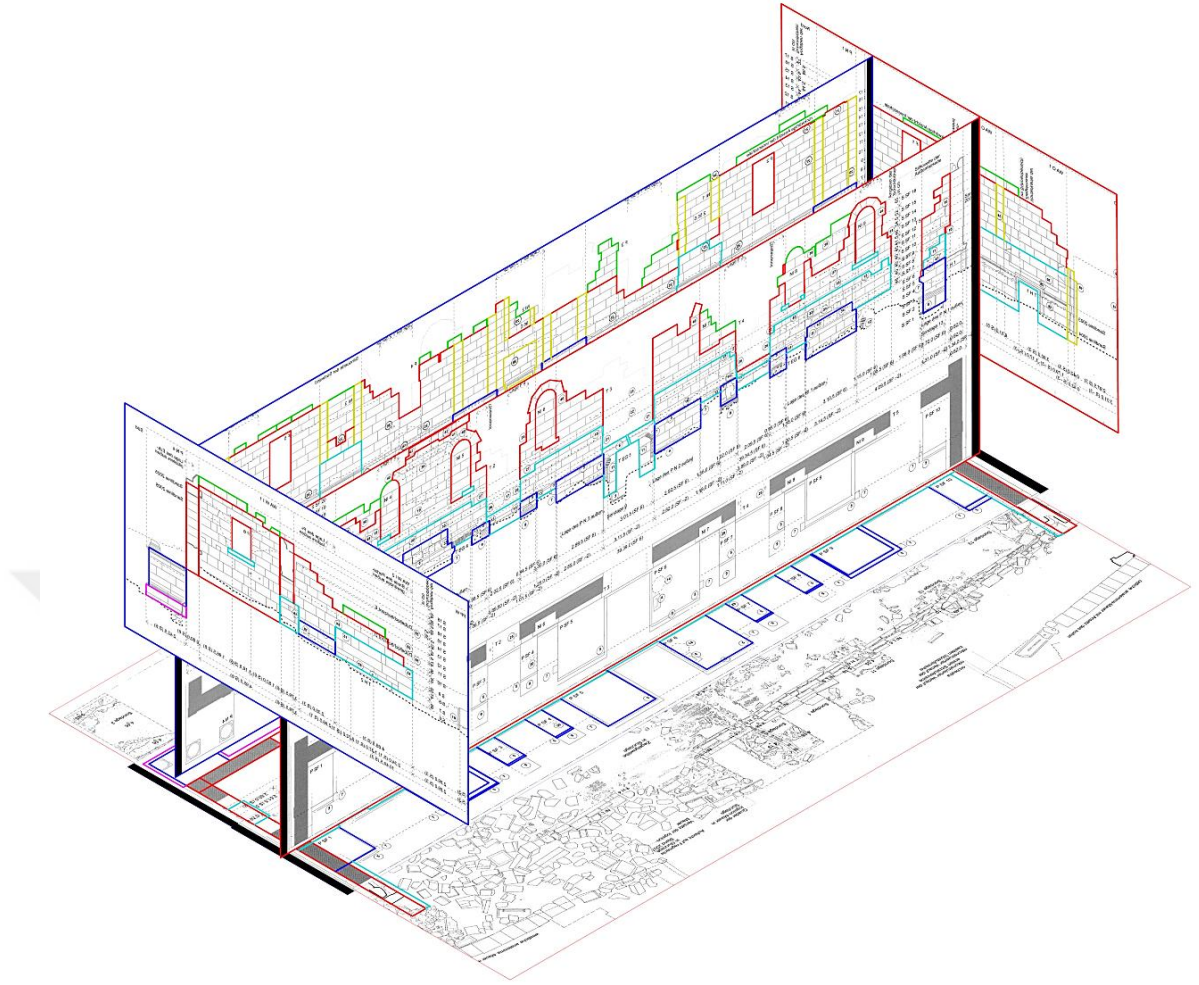
Sahne yapısını oluşturan duvarların bütünleşik (makro) modelini hazırlarken duvara ait malzeme özelliklerinin homojenleştirilmesi gerekmektedir. Ancak taş bloklar arasında harç bulunmaması nedeniyle duvara ait elastisite modülü değeri, E_k , (3.1) ifadesi kullanıldığında doğrudan taş elemanın elastisite modülü, E_t , ile orantılı olarak hesaplanmaktadır ($E_k = E_t \times \rho_k$). İfadede yer alan ρ_k değeri analizlerde "1" olarak dikkate alınmıştır. Bu veriler ışında Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısı modellemesinde kullanılan homojen malzeme özellikleri Çizelge 4.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.3. Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısının homojen malzeme özellikleri

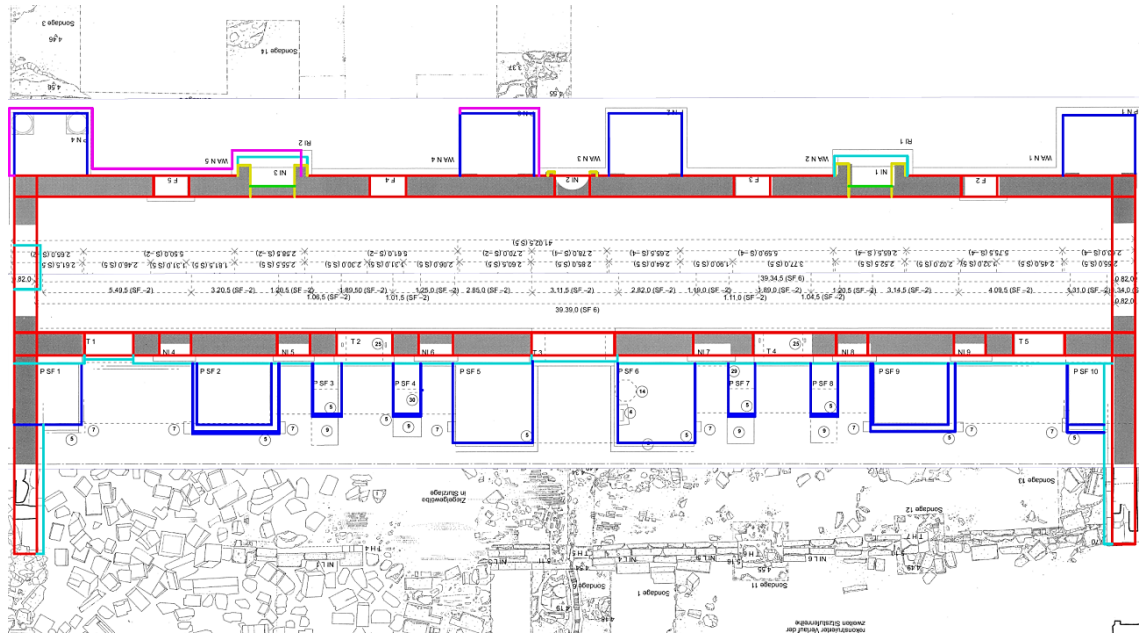
Elastisite modülü (MPa)	Özgül ağırlığı (t/m^3)	Poisson oranı
20490	2.69	0.15

4.1.3. Bütünleşik (makro) modelleme için ön çalışma

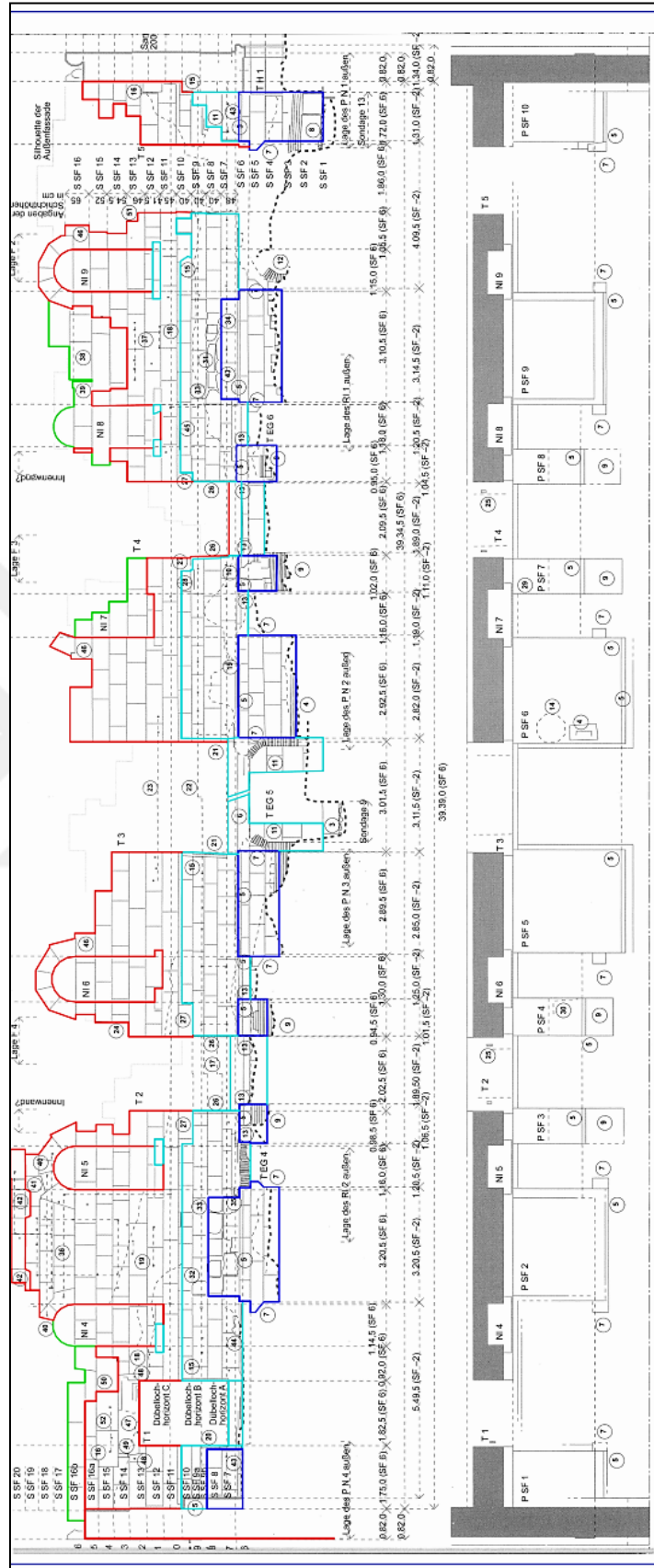
Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısının bütünleşik modelini oluştururken gerekli geometrik özellikler için Şekil 4.14-22'deki detay çizimlerden faydalanılmıştır (Piesker ve Ganzert 2012). Bu çizimleri AutoCAD programında üç boyutlu olarak birleştirildikten sonra duvar sınırlarını belirlemek amacıyla yardımcı çizgiler oluşturulmuştur (Şekil 4.23-28). Çizgi rengi ilgili duvarın kalınlığı ile değişmektedir.



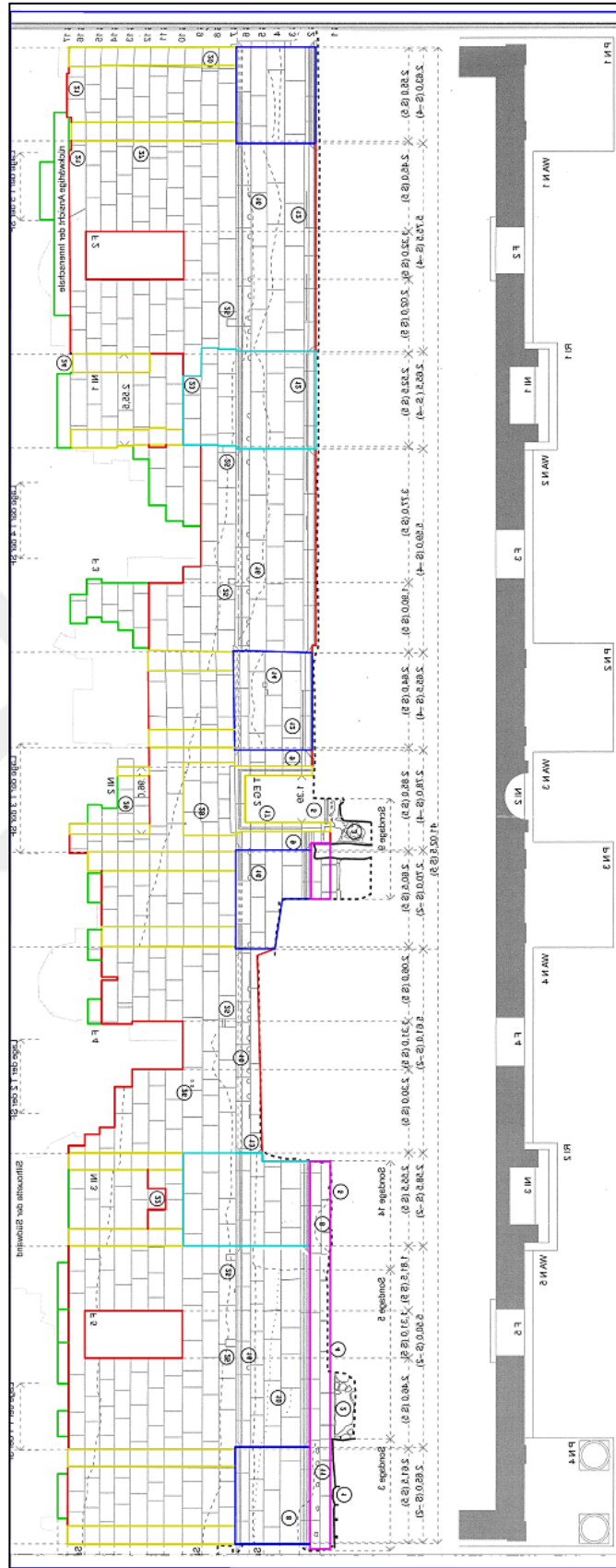
Şekil 4.23. Sahne yapısının bütünleşik modelleme için hazırlanan üç boyutlu görünümü



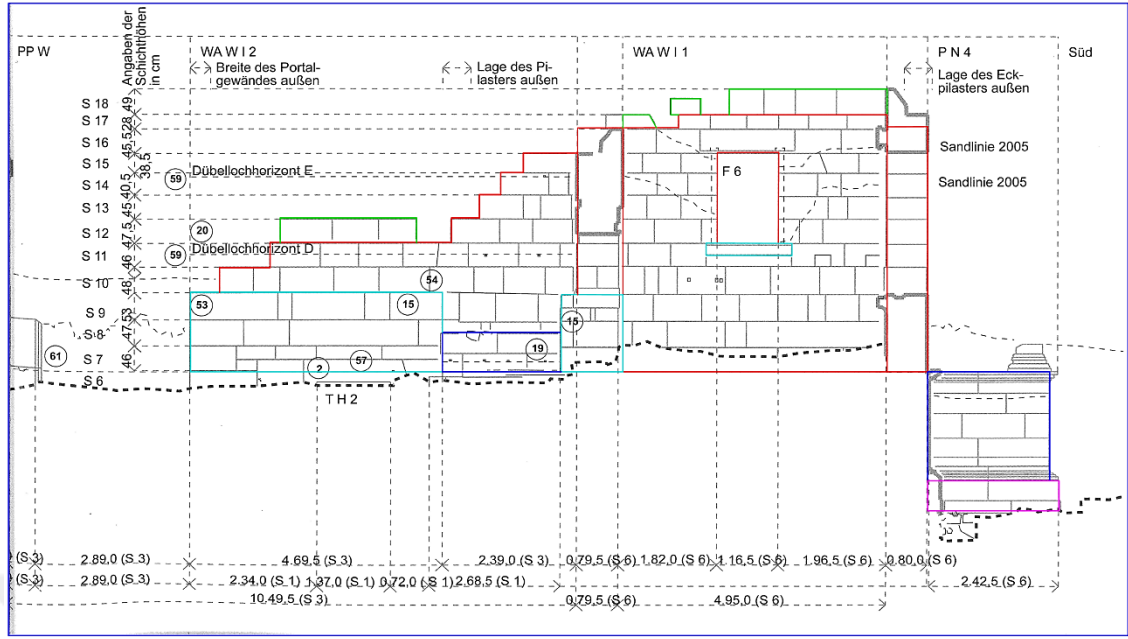
Şekil 4.24. Sahne yapısının bütünleşik model için hazırlanan plan görünümü



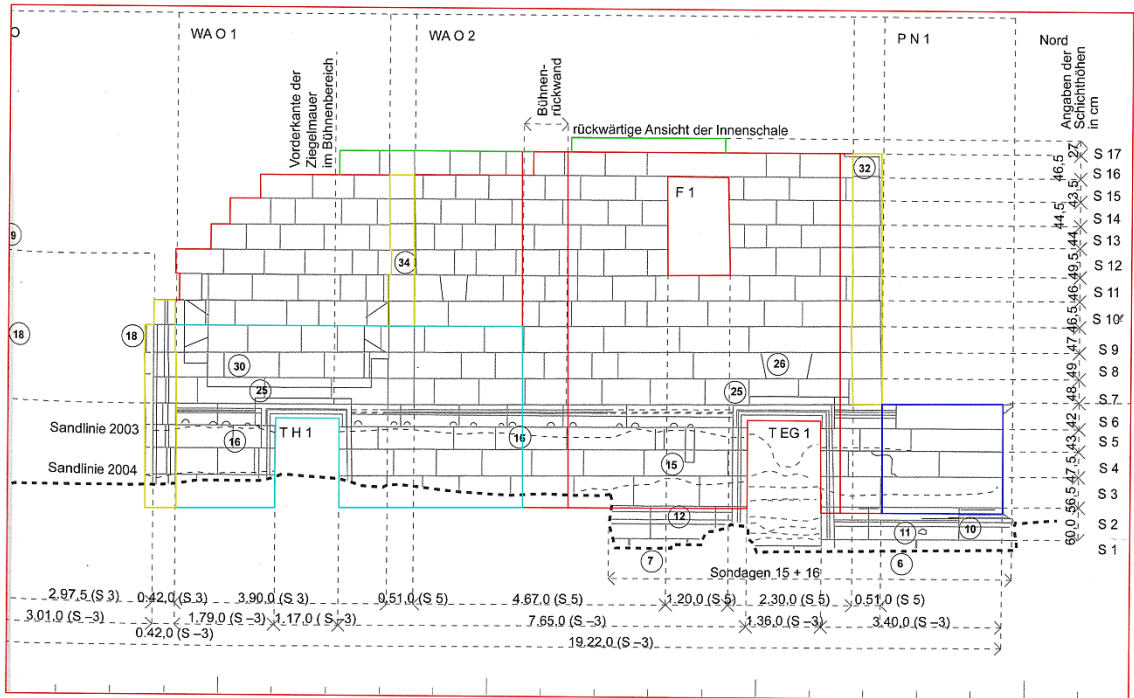
Şekil 4.25. Bütünleşik model için hazırlanan güney cephesinin detay çizimi



Şekil 4.26. Bütünleşik model için hazırlanan kuzey cephesinin detay çizimi



Şekil 4.27. Bütünleşik model için hazırlanan batı cephesinin detay çizimi

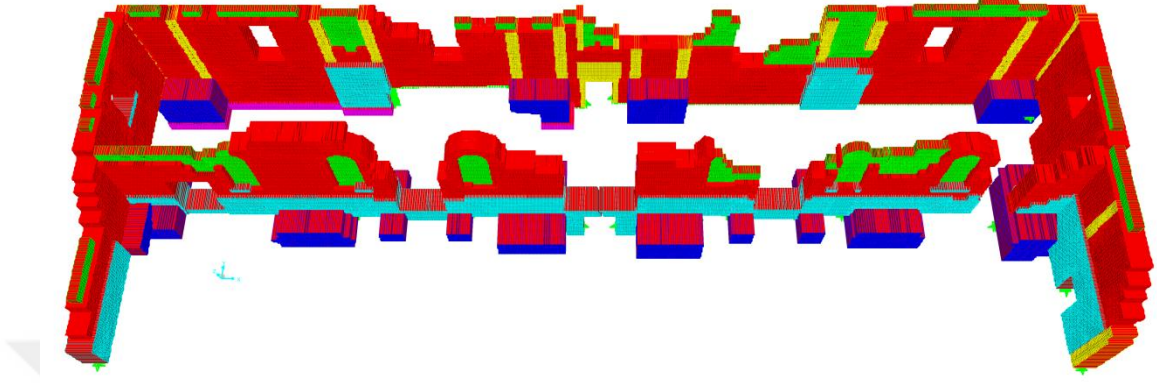


Şekil 4.28. Bütünleşik model için hazırlanan doğu cephesinin detay çizimi

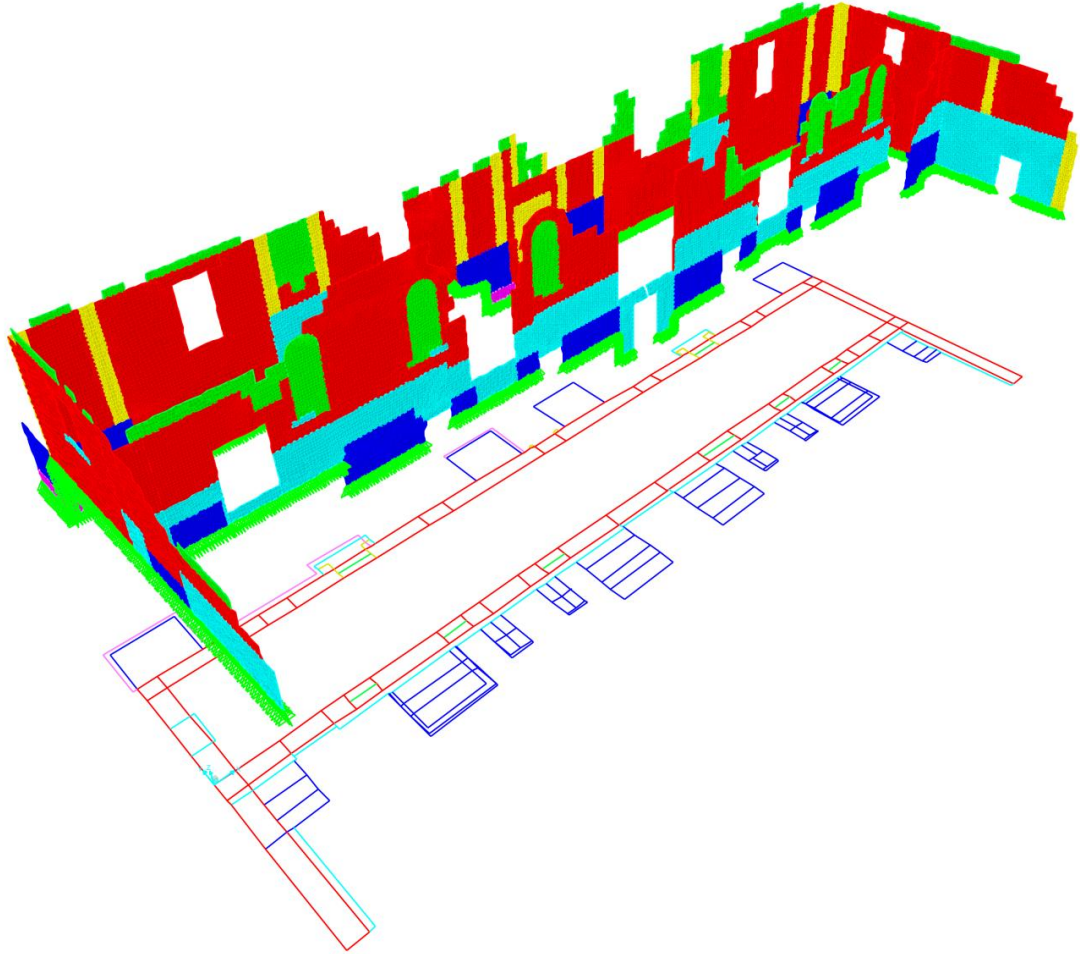
4.1.4. Bütünleşik (makro) model ile yapısal analiz

Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısının sayısal analizini gerçekleştirmek amacıyla yapının geometrik özelliklerinin belirlenerek detay çizimlerin hazırlanması ve malzeme özelliklerinin belirlenmesinden sonra SAP2000 (Wilson 2018) analiz programında kabuk

elemanlar kullanılarak yapının bütünleşik (makro) modeli hazırlanmıştır. Bu amaçla daha önce AutoCAD ortamında duvar sınırlarını belirtmek için tanımlanan çizgiler, SAP2000 programına çubuk olarak çağırılmış ve elemanlar arasına duvar yüzeyini oluşturan düzlemsel kabuk elemanlar tanımlanmıştır. Hazırlanan bütünleşik modelin üç boyutlu görünümü Şekil 4.29-30'da verilmiştir.

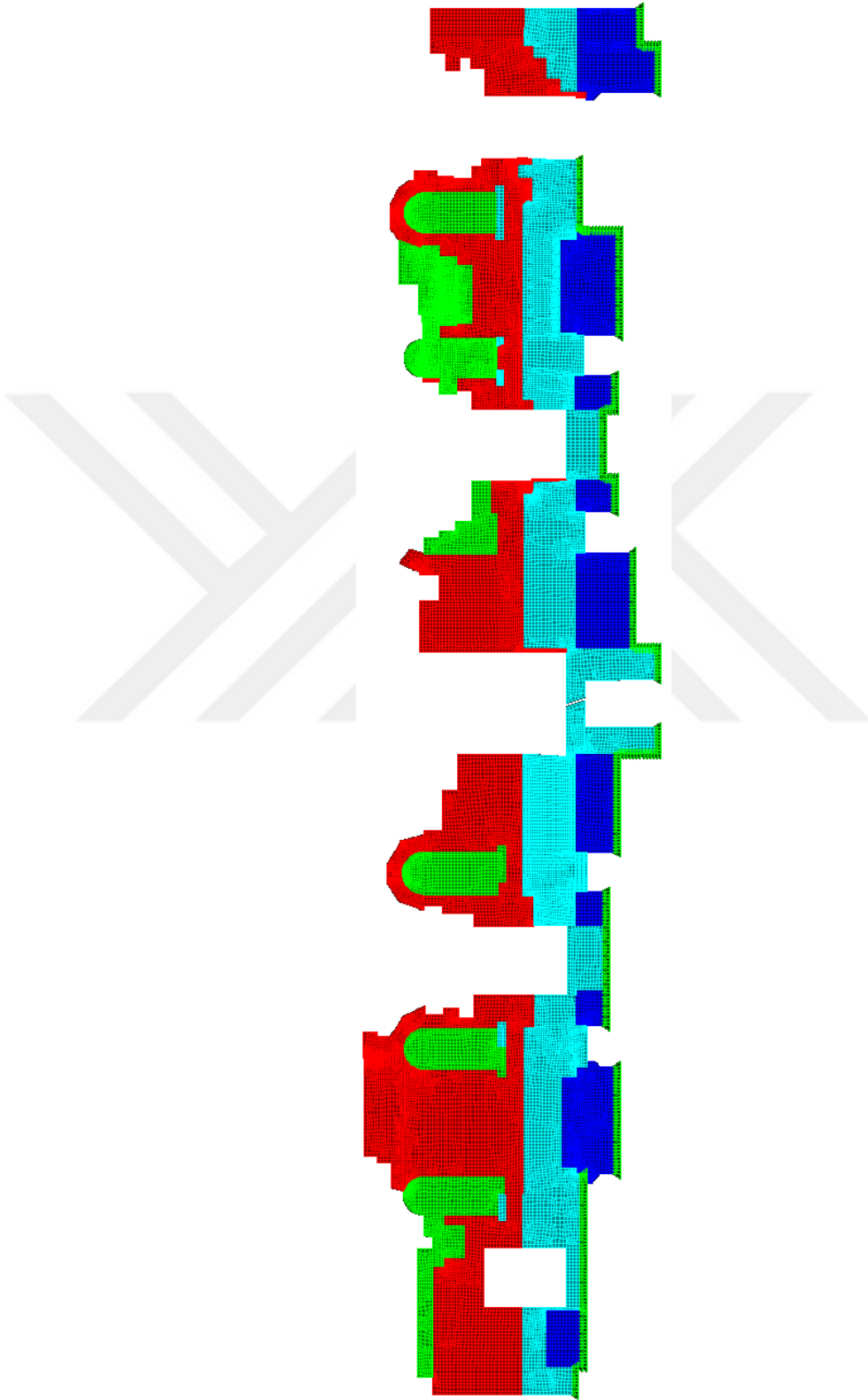


Şekil 4.29. Sahne yapısına ait bütünleşik (makro) modelin perspektif görüntüsü

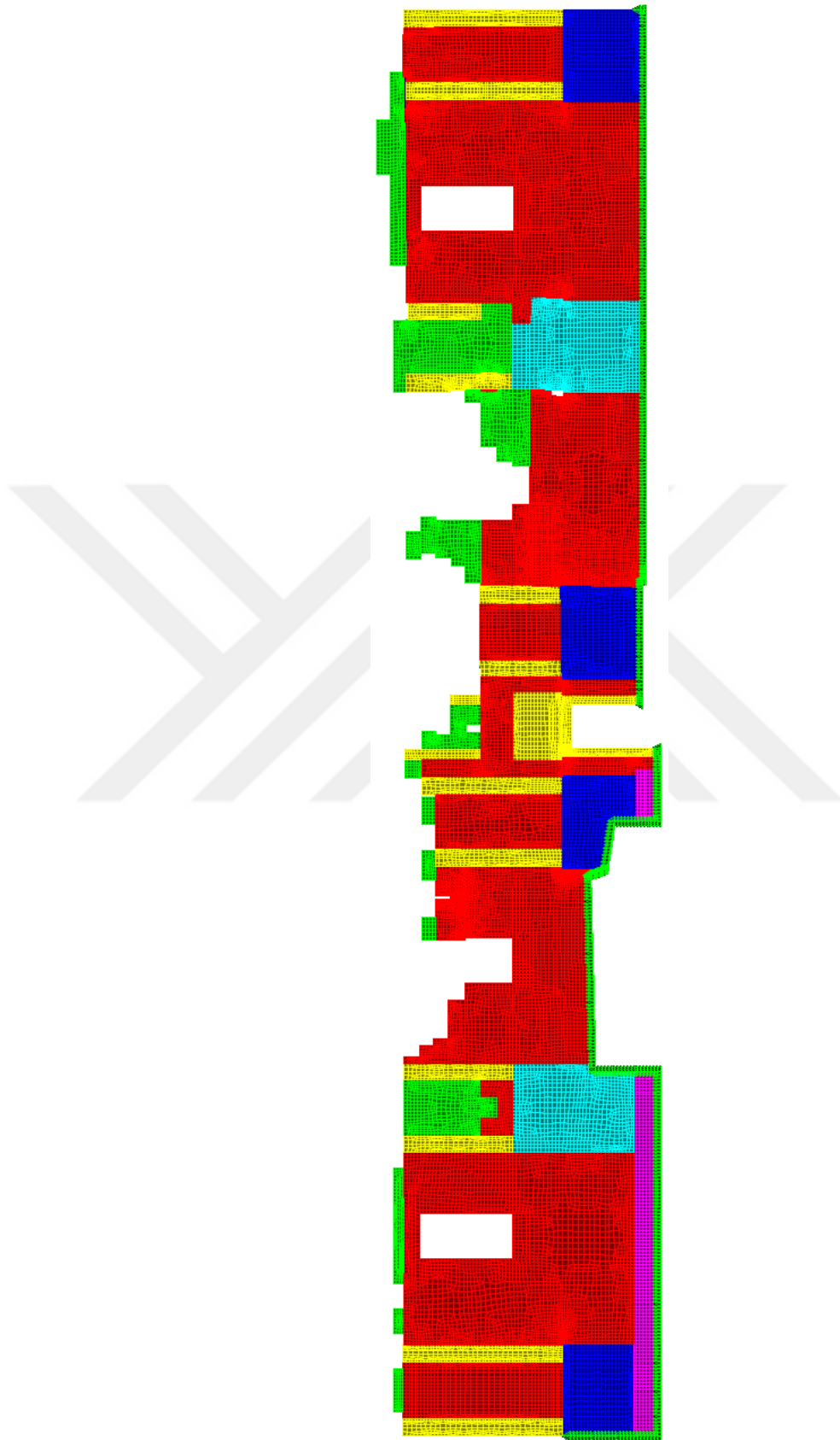


Şekil 4.30. Sahne yapısına ait bütünleşik (makro) modelin düşey izdüşümü

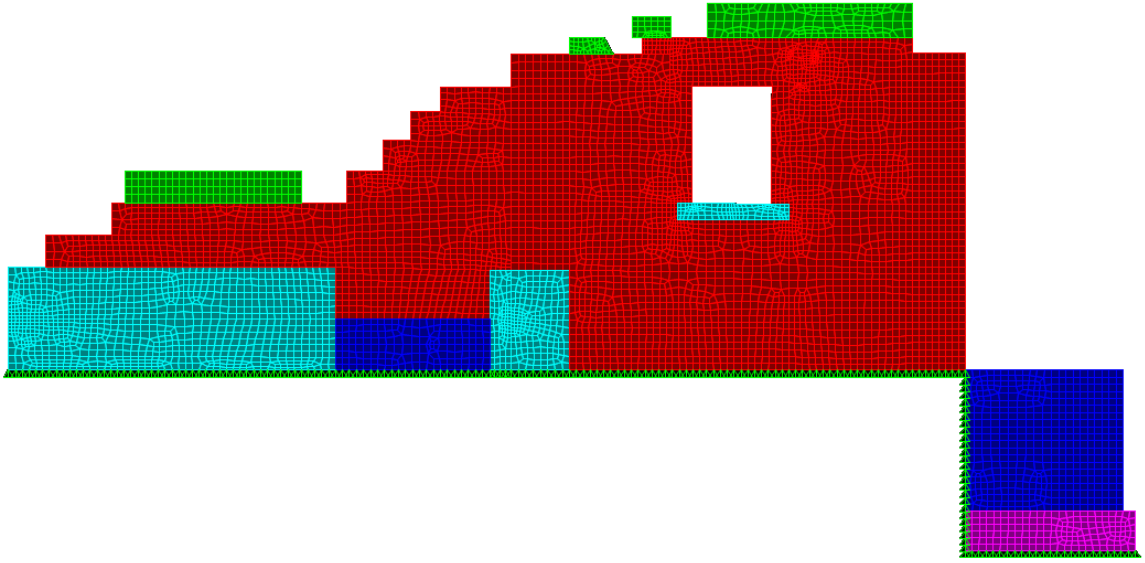
Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısı bütünleşik (makro) modelinin analiz öncesi kuzey, güney, doğu ve batı cephelerini görünümü Şekil 4.31-34'te gösterilmektedir.



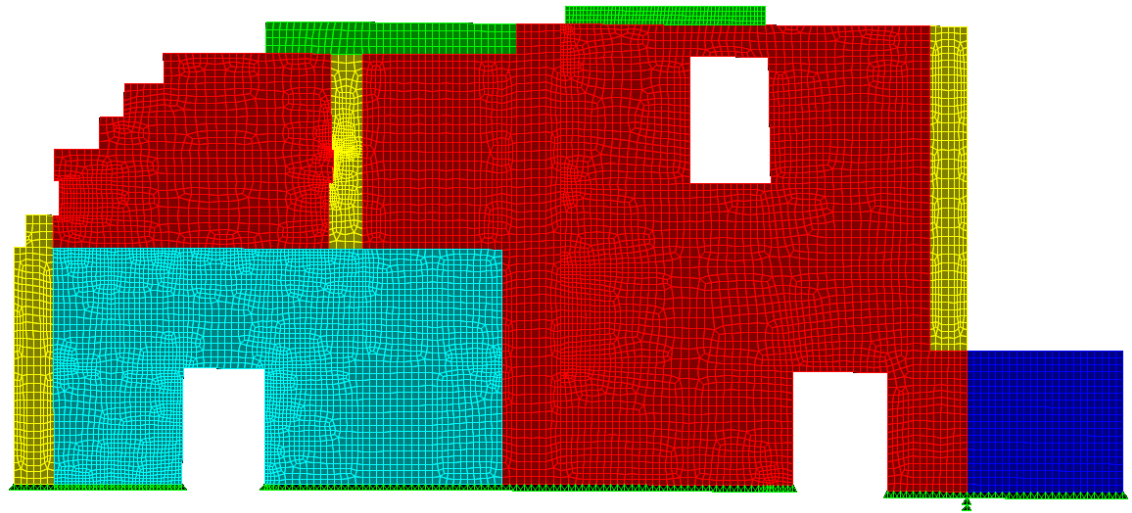
Şekil 4.31. Sahne yapısı bütünleşik (makro) modelinin güney cephesi görüntüsü



Şekil 4.32. Sahne yapısı bütünleşik (makro) modelinin kuzey cephesi görüntüsü



Şekil 4.33. Sahne yapısı bütünleşik (makro) modelinin batı cephesi görüntüsü

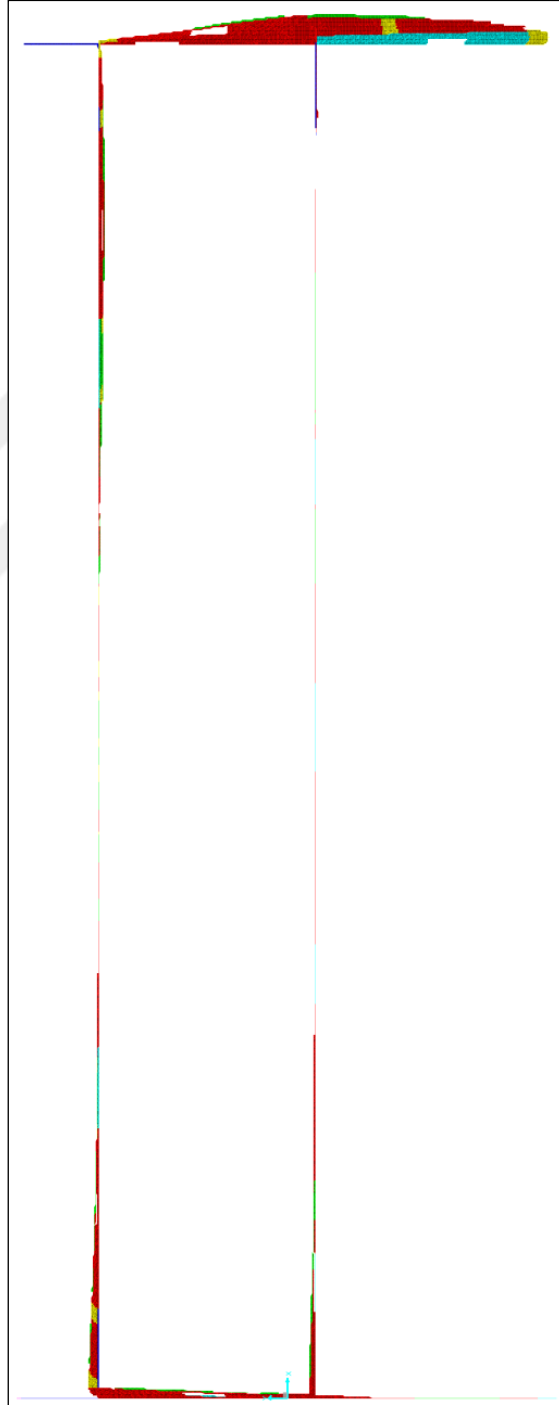


Şekil 4.34. Sahne yapısı bütünleşik (makro) modelinin doğu cephesi görüntüsü

Hazırlanan bütünleşik (makro) modelde kullanılan ve duvar kalınlıklarına göre ayrı olarak renklendirilen büyük kabuk elemanları, analiz öncesinde uygun sayıda dört düğümlü (kuadratik) birim kabuk elemanlara (mesh) bölünmüştür. Her bir birim elemanın en büyük kenar uzunluğu 20 cm olacak şekilde bölme işlemi gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan modelin tabanında bulunan düğüm noktalarına sabit mesnet tanımlaması yapılmış olup düğümlerin yalnız ötelemeleri tutulu hale getirilmiştir. Bu çalışmada sahne yapısının sırasıyla; düşey yük analizi, serbest titreşim (modal) analizi ve davranış spektrum analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir.

4.1.4.1. Düşey yük analizi

Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısının bütünleşik (makro) modeli ile düşey yük (yapının kendi ağırlığı) altında analizi yapılmış ve tüm yapının planda oluşan şekil değiştirmesi Şekil 4.35’te verilmiştir. Bununla birlikte, duvarların düzlem içi şekil değiştirmesi ve aynı düzlemde oluşan asal normal gerilme ve kayma gerilmesi dağılımları grafik olarak EK-1-6’da görölmektedir.



Şekil 4.35. Bütünleşik modellemeyeyle düşey yük altında planda oluşan şekil değiştirme

4.1.4.2. Serbest titreşim analizi (Modal analiz)

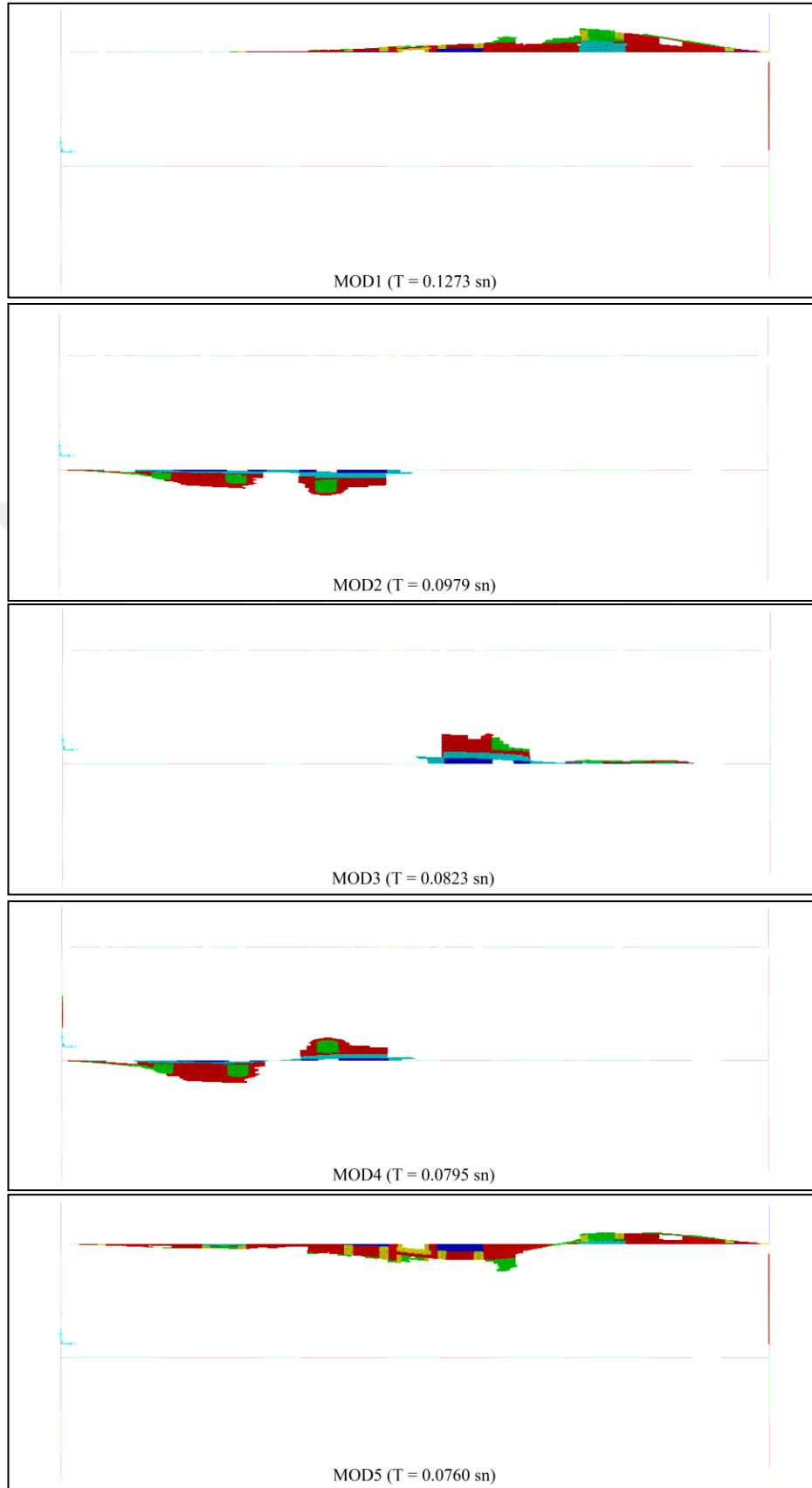
Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısının serbest titreşim özellikleri bütünleşik modelleme yöntemiyle belirlenmiştir. Yapının davranış spektrum analizine yönelik olarak uygun sayıda mod şekil vektörünün dikkate alınması gerekir. Bu amaçla yapının global doğrultularda kütle katılım oranlarına bakarak ilk 500 adet modun dikkate alınmasının yeterli olacağı anlaşılmıştır (Çizelge 4.4). Yapının serbest titreşim özellikleri Çizelge 4.5'te ve ilgili mod şekilleri Şekil 4.36-39'da sunulmuştur. Mod şekillerinin ağırlıklı olarak planda gerçekleştiği görülmektedir. Planda değil de duvar düzleminde şekli gösteren modlar da ilgili duvar düzlemi içerisinde gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Yapının global doğrultudaki kütle katılım oranları

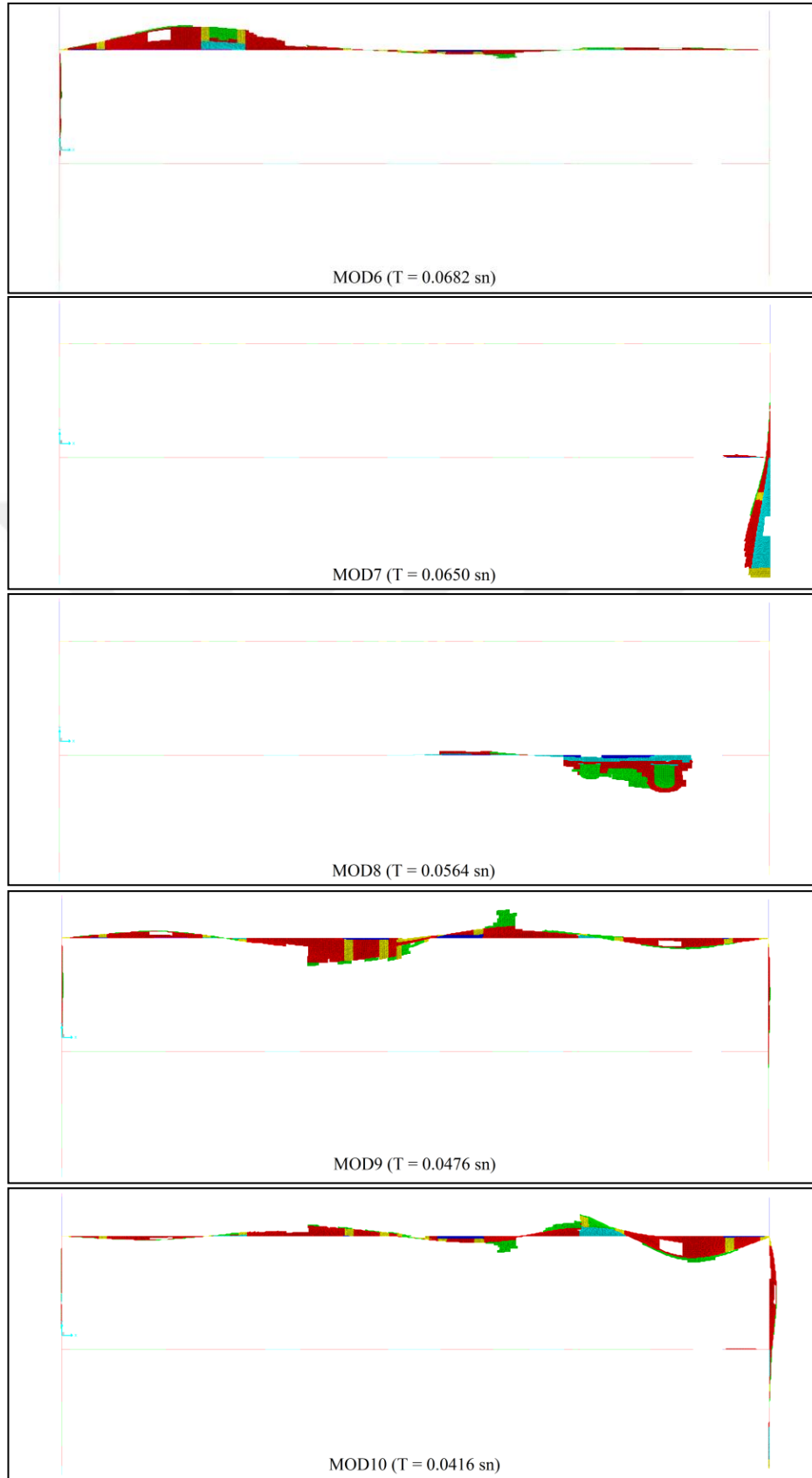
Model adı	Toplam mod sayısı	Öteleme (%)			Dönme (%)		
		ΣU_x	ΣU_y	ΣU_z	ΣR_x	ΣR_y	ΣR_z
Bütünleşik (makro)	500	86.62	88.15	78.88	80.35	80.06	87.08

Çizelge 4.5. Yapının bütünleşik (makro) modellemeye modal periyotları ve frekansları

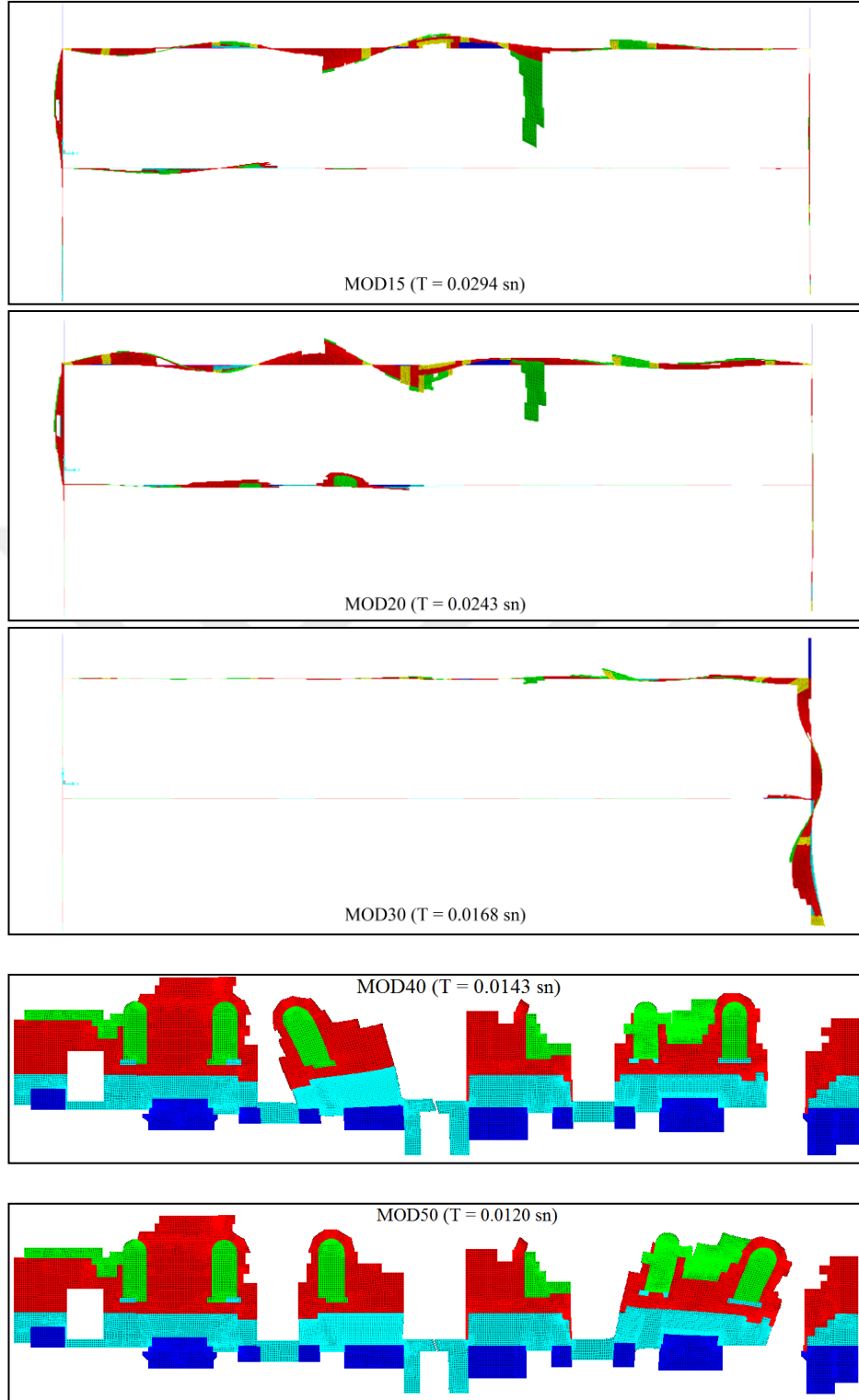
Mod No	Periyot (sn)	Frekans (devir/sn)
1	0.12729	7.86
2	0.09791	10.21
3	0.08226	12.16
4	0.07949	12.58
5	0.07597	13.16
6	0.06819	14.67
7	0.06501	15.38
8	0.05636	17.74
9	0.04757	21.02
10	0.04163	24.02
15	0.02936	34.06
20	0.02430	41.15
30	0.01684	59.38
40	0.01431	69.89
50	0.01201	83.30
100	0.00712	140.45
200	0.00431	232.13
300	0.00319	313.91
400	0.002622	381.44
500	0.002233	447.75



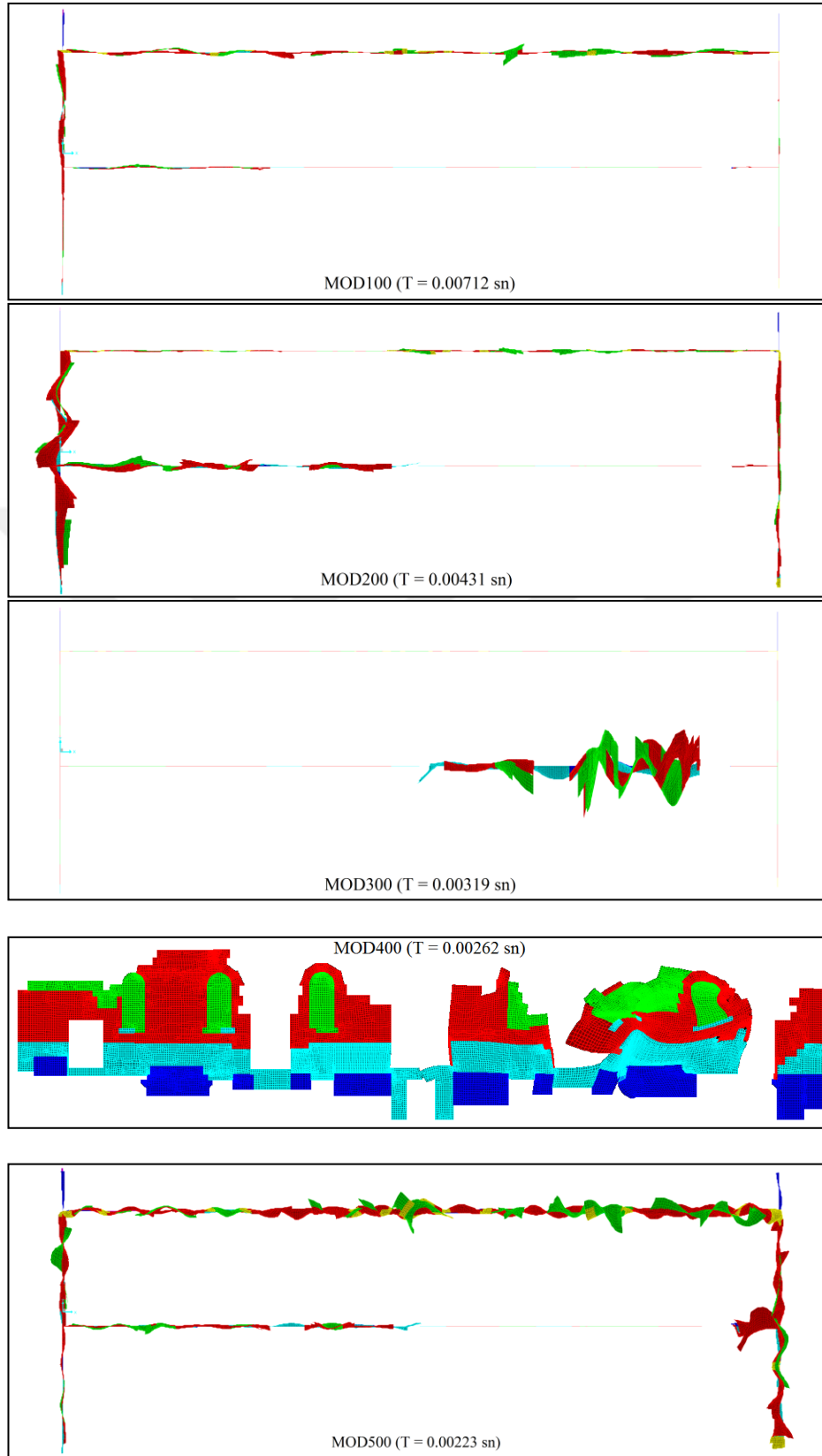
şekil 4.36. Yapının serbest titreşim mod şekilleri (Mod1-5)



şekil 4.37. Yapının serbest titreşim mod şekilleri (Mod6-10)



Şekil 4.38. Yapının serbest titreşim mod şekilleri (Mod15-50)



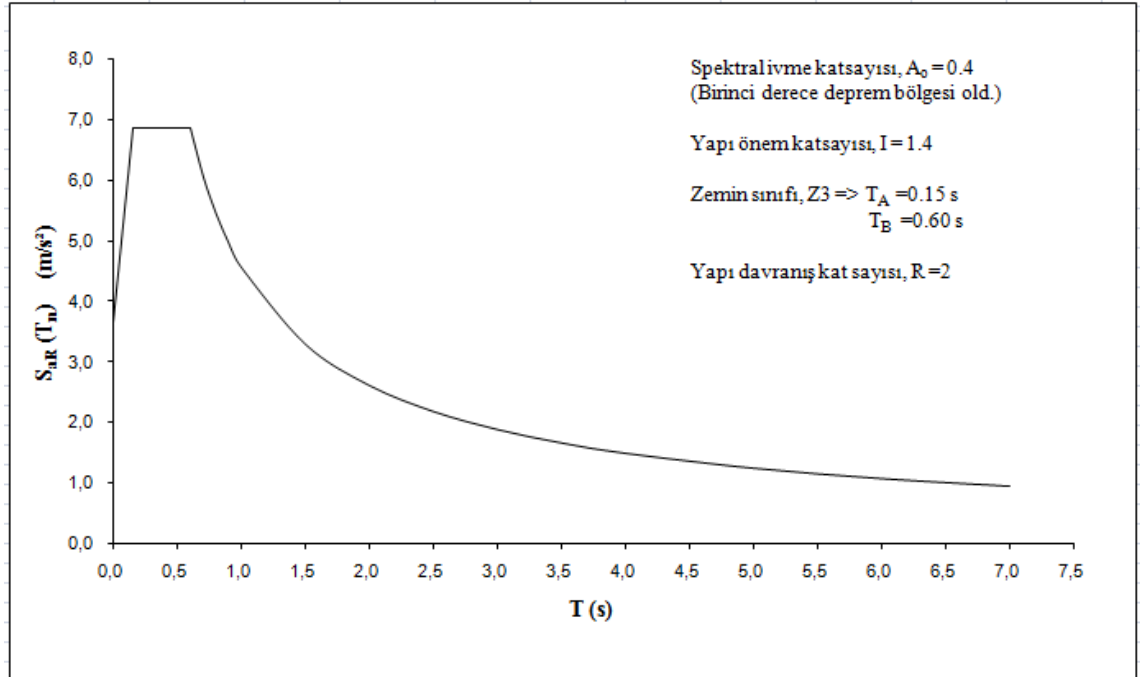
Şekil 4.39. Yapının serbest titreşim mod şekilleri (Mod100-500)

4.1.4.3. Davranış spektrum analizi

Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısının bütünleşik (makro) modellemeyeyle global doğrultularda davranış spektrum analizi yapılmıştır. Deprem spektrum grafiğini oluşturmak için (DBYBHY 2007)'de yer alan (2.1), (2.2), (2.3) ve (2.13) ifadelerinden faydalanılmıştır:

$$\begin{aligned}
 A(T) &= A_0 \times I \times S(T) \\
 S_{ac}(T) &= A(T) \times g \\
 S(T) &= 1 + 1.5 \times (T/T_A) \\
 S(T) &= 2.5 \\
 S(T) &= 2.5 \times (T_B/T)^{0.8} \quad (0 \leq T \leq T_A) \quad (4.1) \\
 R_a(T) &= 1.5 + (R - 1.5) \times (T/T_A) \\
 R_a(T) &= R \\
 S_{aR}(T_n) &= S_{ac}(T_n) / R_a(T_n)
 \end{aligned}$$

Bölgenin depremselliği hakkında literatürde detaylı bir çalışma mevcuttur (Dipova ve Cangir 2011). Bu çalışmadan edinilen bilgiler ve DBYBHY 2007'de yer alan (4.1) ifadeleri ile ortaya çıkan tepki spektrum grafiği Şekil 4.40'ta gösterilmiştir.



Şekil 4.40. DBYBHY-2007'ye göre deprem spektrum grafiği

Global eksen orijini yapının güney ve batı duvarlarının kesişim noktası olarak belirlenmiş ve yapının ağırlık merkezi bu referans noktasına göre Çizelge 4.6’da görülmektedir. Bu aşamada yapılan bütünleşik (makro) model üzerinde, öz yükler (G) ve global X ve Y doğrultusunda ayrı olarak yapılan spektrum analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucu, elde edilen yapının toplam taban kesme kuvvet değerleri ve yapının rijitlik merkezi ile ağırlık merkezi arasındaki fark nedeniyle oluşan burulma momenti değeri Çizelge 4.7’de sunulmuştur.

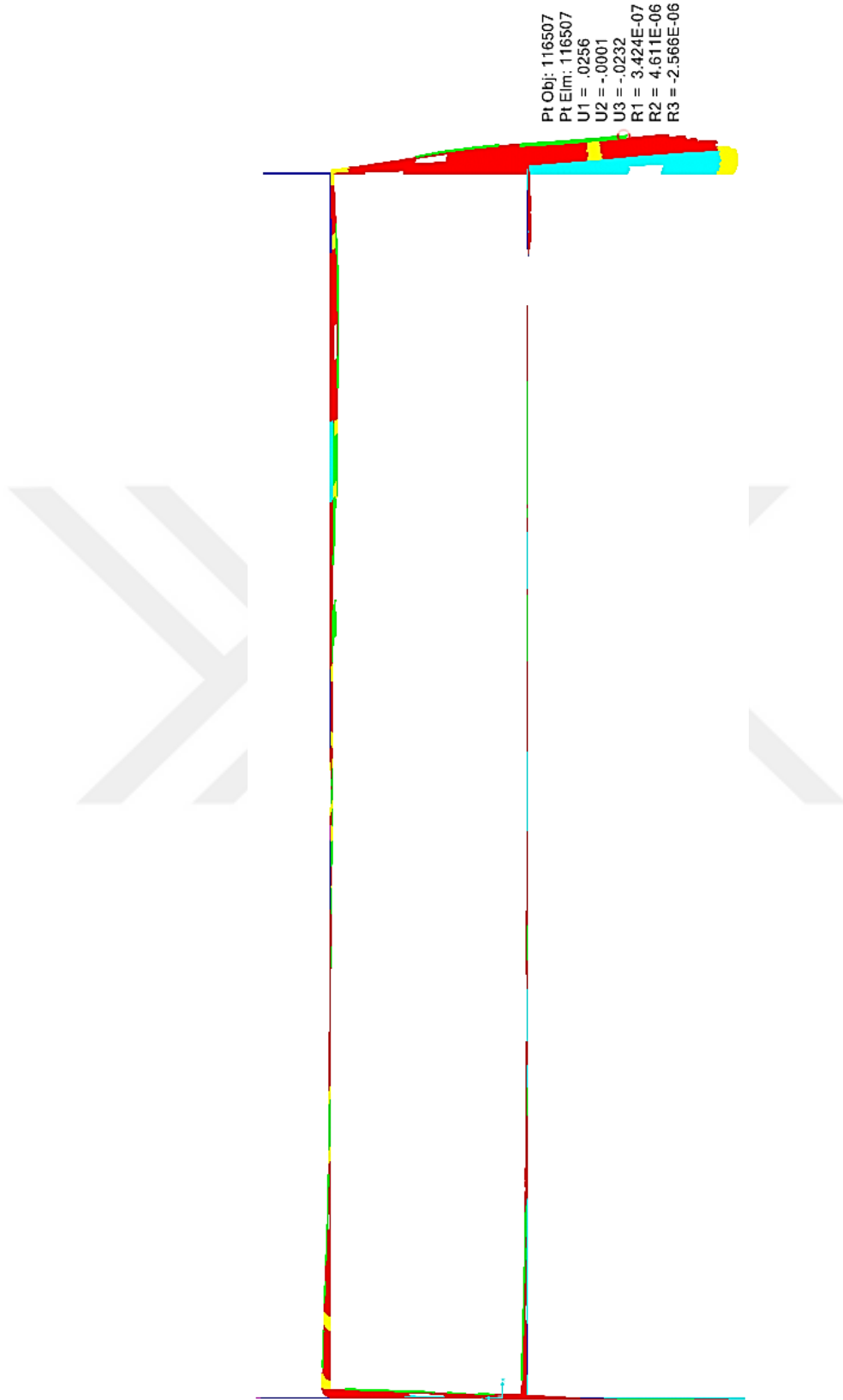
Çizelge 4.6. Yapının ağırlık merkezi

Model adı	X (m)	Y (m)	Z (m)
Bütünleşik (makro)	21.23	2.08	9.93

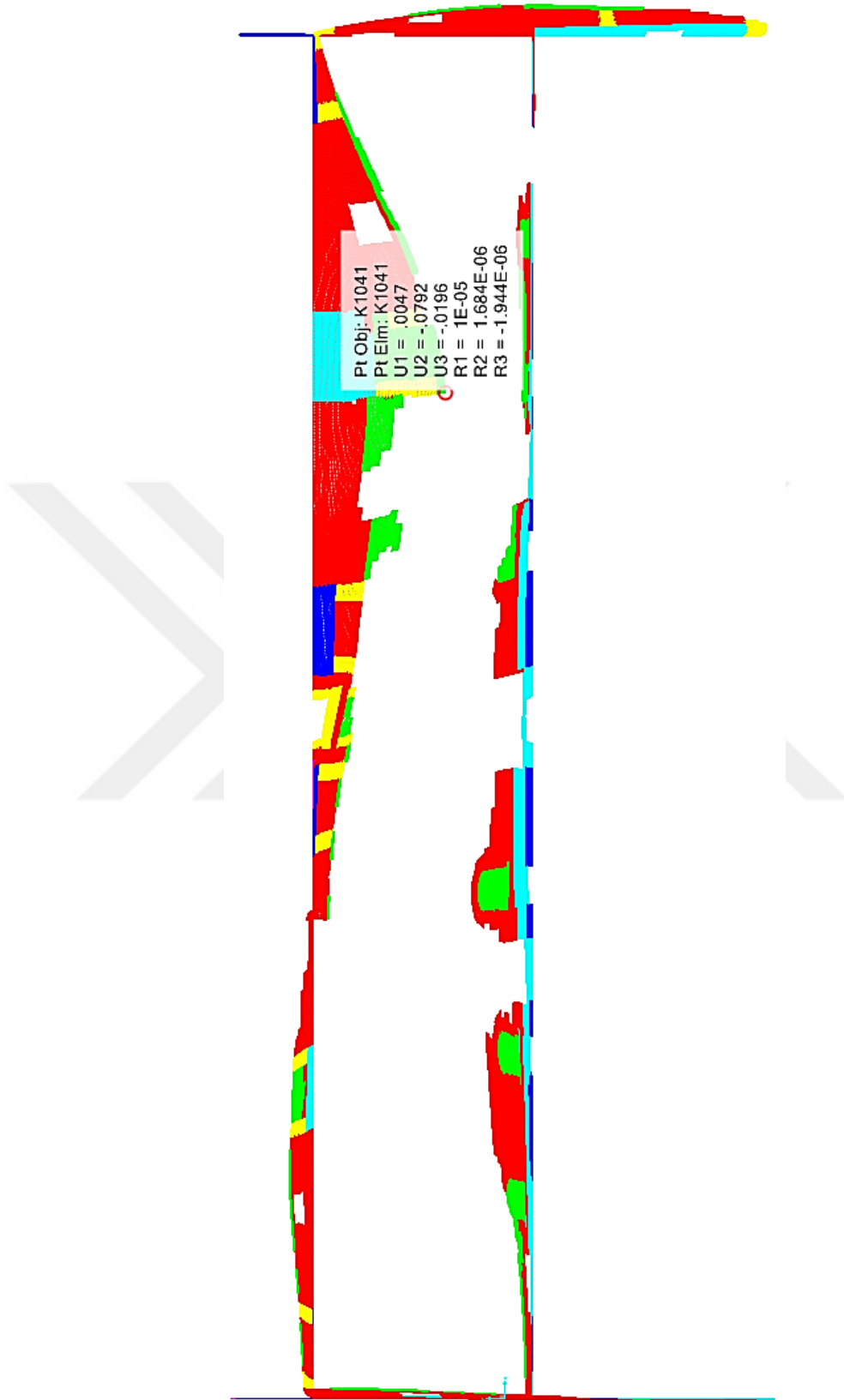
Çizelge 4.7. Yapının global doğrultuda oluşan taban reaksiyonları

Model adı	Yüklemesi adı	Analiz tipi	F _x (kN)	F _y (kN)	F _z (kN)	M _z (kN-m)
Bütünleşik (makro)	G (düşey öz yük)	Doğrusal Statik	0.00	0.00	16328.56	0.00
	SPCX	Doğrusal Spektrum	19.99	1.54	2.23	77.47
	SPCY	Doğrusal Spektrum	1.54	22.57	0.93	553.64

Analizde her yüklemesi durumu için ayrı olarak elde edilen iç kuvvet ve şekil değiştirme değerlerine göre G + SPCX (Sabit yükler ve global X eksen doğrultusunda deprem yüklemesi) ve G + SPCY (Sabit yükler ve global Y eksen doğrultusunda deprem yüklemesi) şeklinde iki farklı yük kombinasyon tanımı yapılmıştır. Bu kombinasyonlar sonucu global X ve Y doğrultusunda ayrı olarak belirlenen planda maksimum yer değiştirme değerleri Şekil 4.41-42’de görülmektedir.



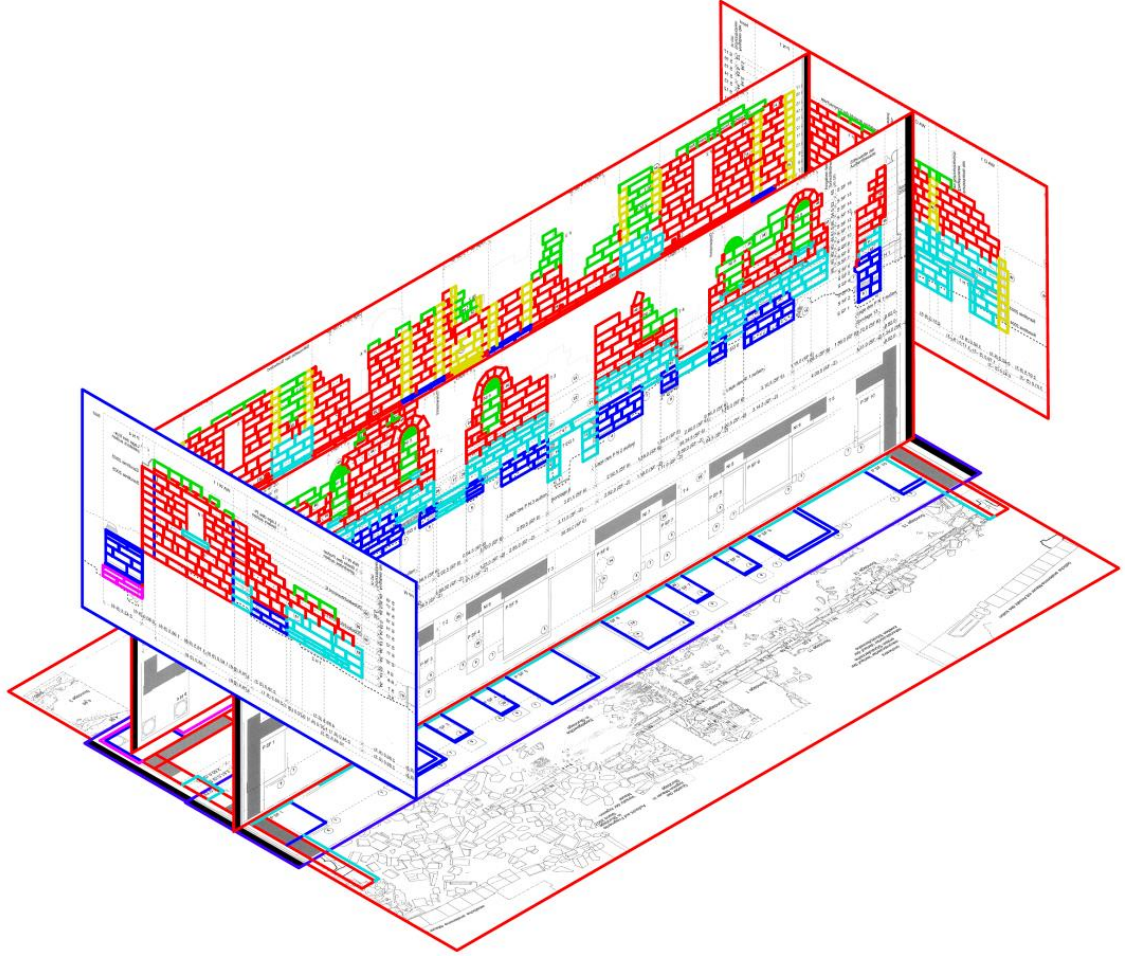
Şekil 4.41. Bütünleşik (makro) modellemeye elde edilen maksimum yer değıştirme değeri (G + SPCX yüklemesi)



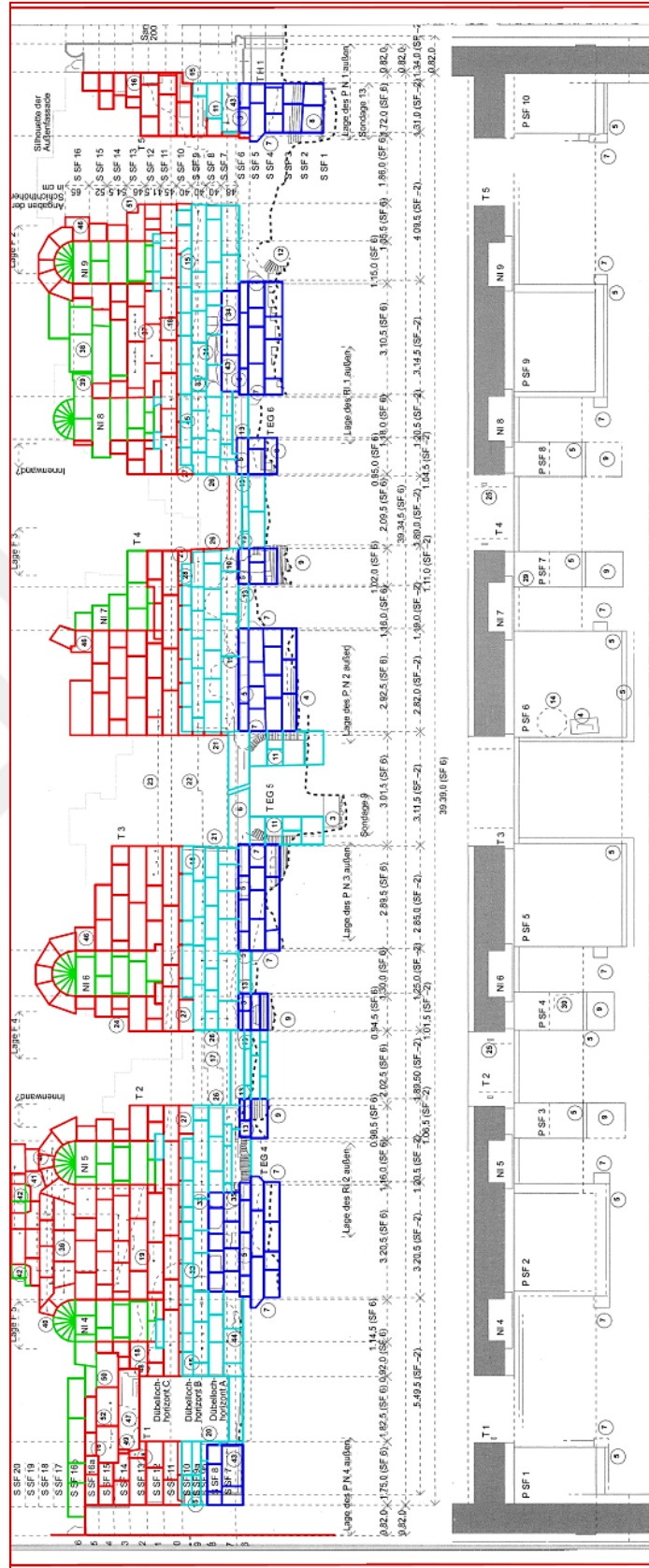
Şekil 4.42. Bütünleşik (makro) modellemeyeyle elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri (G + SPCY yüklemesi)

4.1.5. Ayırık (mikro benzeri) modelleme için ön çalışma

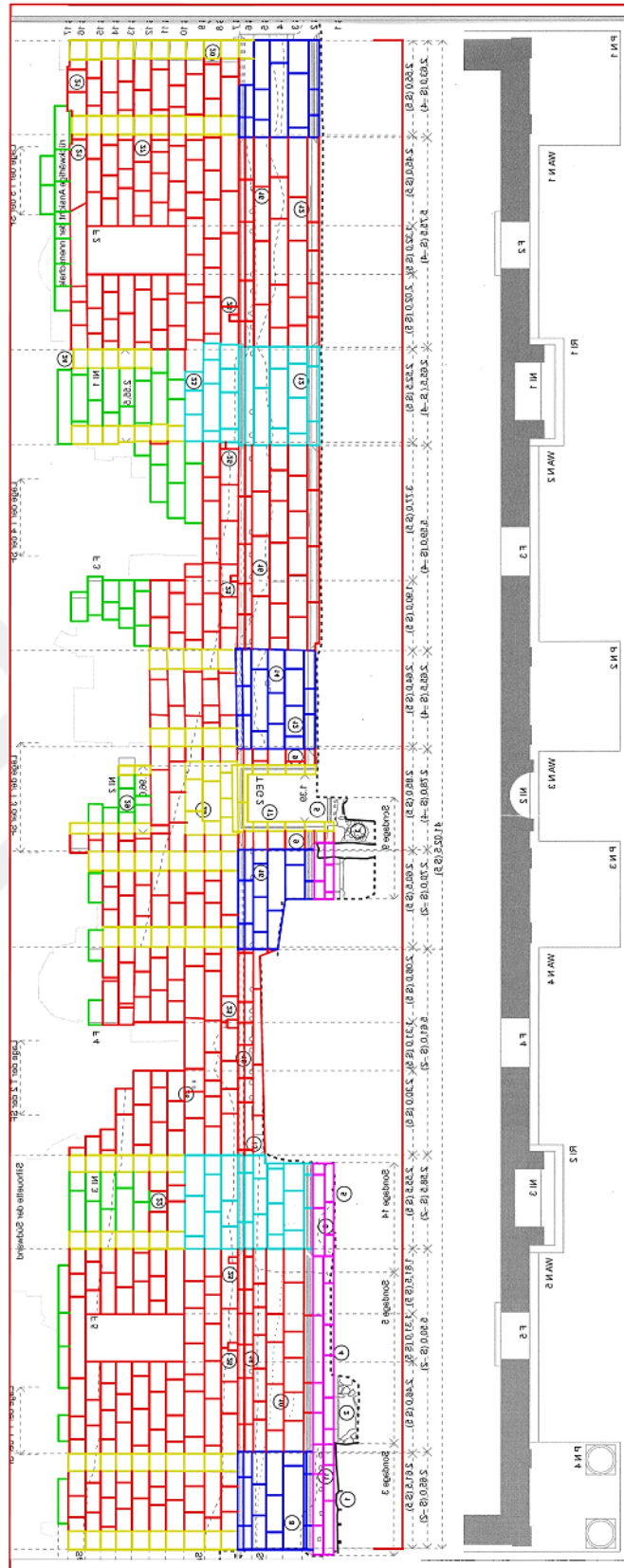
Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısının ayırık (mikro benzeri) modelini oluşturmak için, bütünleşik (makro) modelde olduğu gibi gerekli geometrik özellikler için Şekil 4.14-22'deki detay çizimlerden faydalanılmıştır (Piesker ve Ganzert 2012). Bu çizimleri AutoCAD programında üç boyutlu olarak birleştirildikten sonra duvar sınırları ile birlikte tüm taş blokların ara yüzeyini belirlemek amacıyla yardımcı çizgiler oluşturulmuştur (Şekil 4.43-47). Çizgi rengi ilgili duvarın kalınlığı ile değişmektedir.



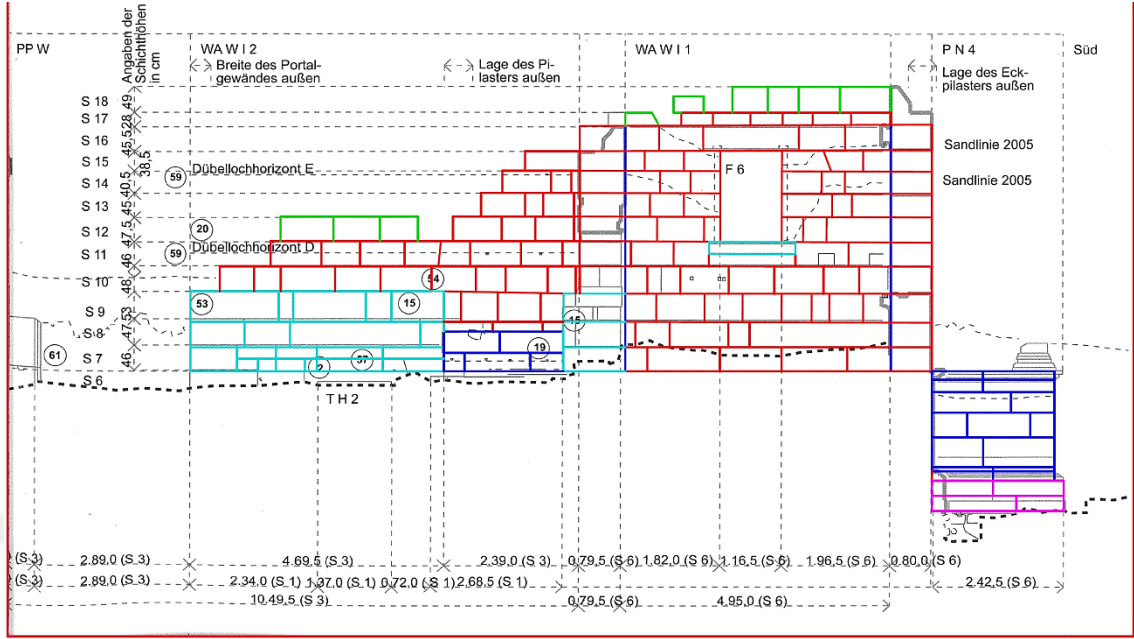
Şekil 4.43. Sahne yapısının ayırık modelleme için hazırlanan üç boyutlu görünümü



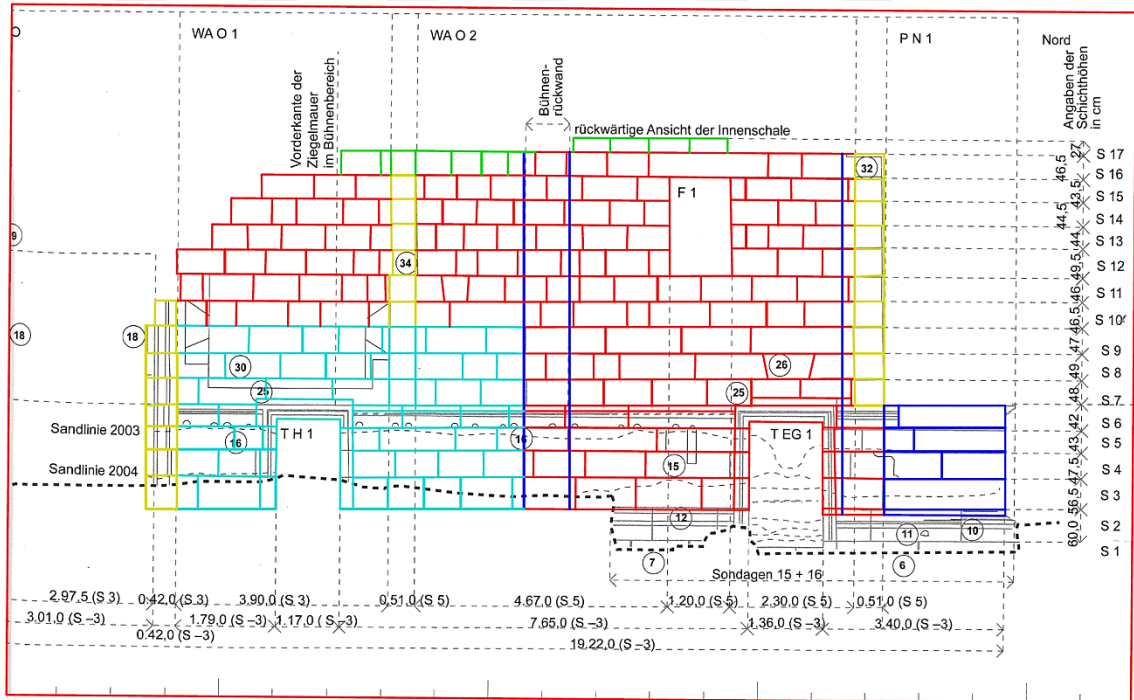
Şekil 4.44. Ayırık model için hazırlanan güney cephesinin detay çizimi



Şekil 4.45. Ayırık model için hazırlanan kuzey cephesinin detay çizimi



Şekil 4.46. Ayırık model için hazırlanan batı cephesinin detay çizimi



Şekil 4.47. Ayırık model için hazırlanan doğu cephesinin detay çizimi

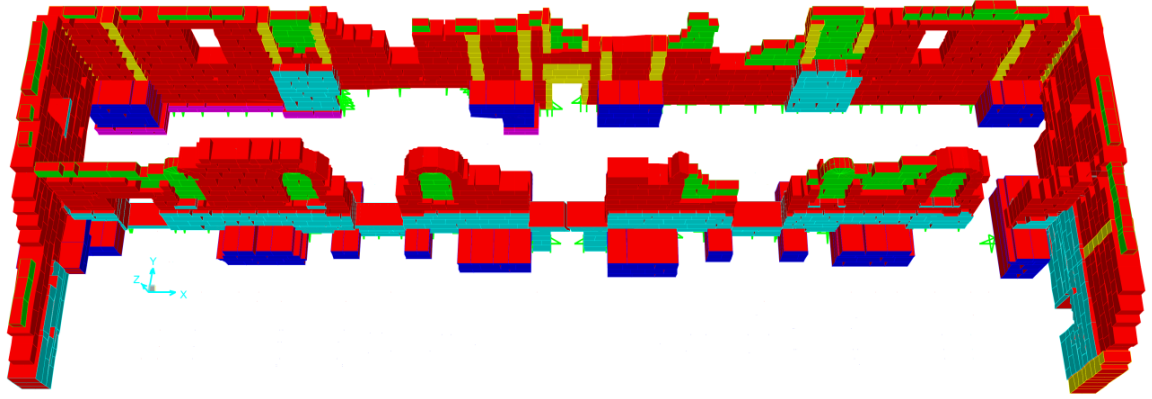
4.1.6. Ayırık (mikro benzeri) modelleme denemesi

Tarihi yapıların detaylı olarak analizi, mikro modelleme teknikleriyle mümkün olup bu sayede analiz sonrası yapının yük taşıma kapasitesi, göçme mekanizması, hasar görebilme olasılığı gibi doğrusal ötesi davranış özelliklerinin belirlenmesi mümkün olmaktadır. Ancak bu analiz tipinin sonuç verebilmesi, kullanılan bilgisayar yazılımının kabiliyetine, davranışa uygun birim ve ara yüz eleman seçimine ve analizin yapıldığı bilgisayar sistemini gücüne doğrudan bağlıdır. Bu nedenlerle, her yapı büyüklüğü ve davranışı için mikro yöntemlerle efektif sonuçlar alınamamaktadır. Bu bağlamda, Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısı örneğinin büyük ölçekli yapı statüsünde olması nedeniyle bütünselik (makro) modelleme yöntemiyle analizinin yapılması daha uygun gözükmektedir.

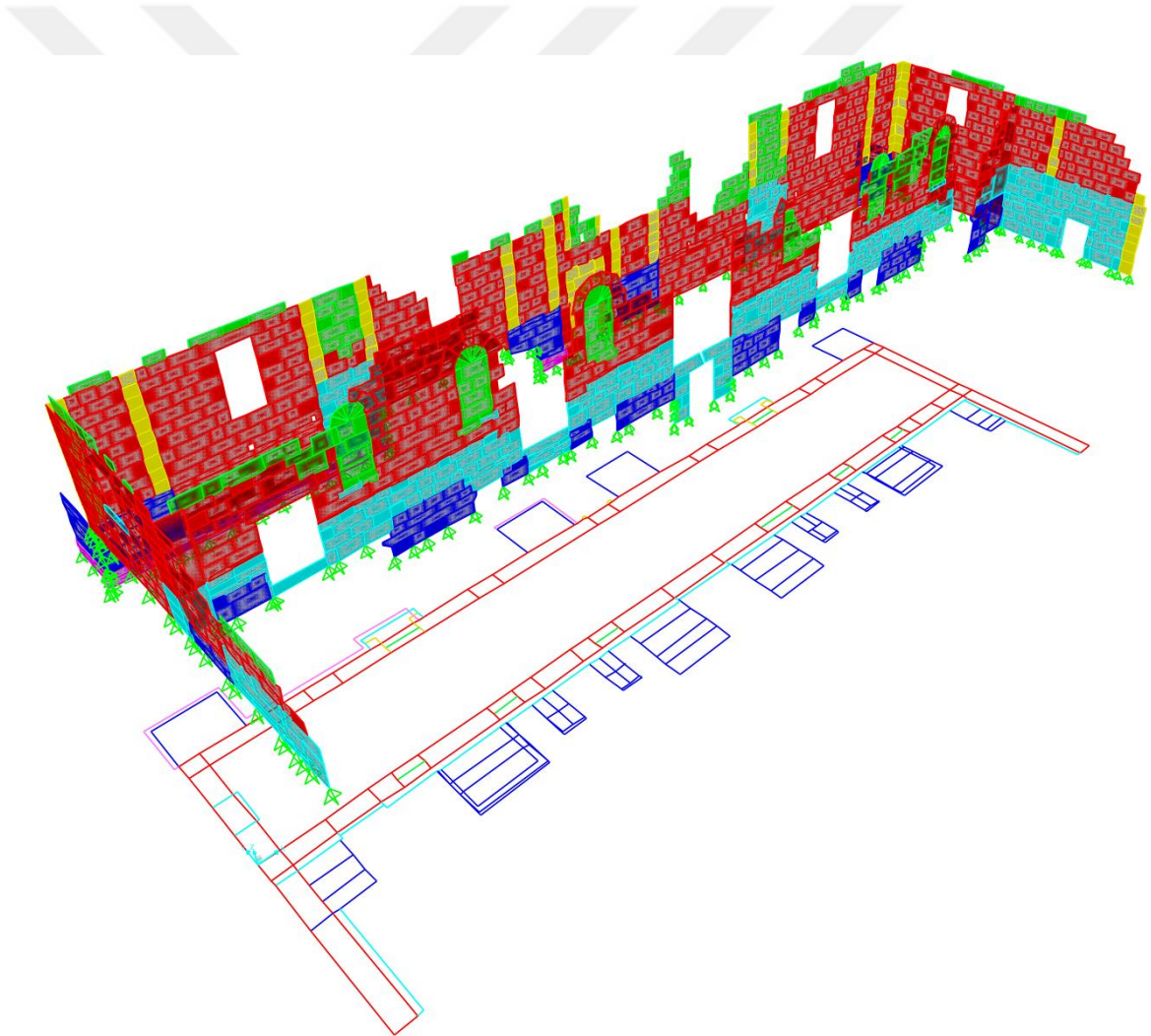
Bu çalışmada, büyük yapı ölçeğinde mikro ve makro modelleme yöntemleriyle elde edilen sonuçların karşılaştırılması hedefiyle yola çıkılmıştır. Mikro modelleme aşamasında her ne kadar taş birim elemanların modellenmesi tamamlanmış olsa da bu tip modelleme için önemli olan ve taş bloklar arası etkileşimin tanımlandığı uygun ara yüz elemanlarının belirlenmesinde tatmin edici bir sonuç alınamadığı için istenen kıyaslama yapılamamıştır. Ancak bununla birlikte analiz öncesi yapı geometrisinin bilgisayar ortamına aktarılması ve taş birim elemanların modellenmesi aşamalarında önemli derecede yol alınmış olup okuyucu açısından faydalı olabilecek bazı bilgi birikimi bu alt bölümde paylaşılacak istenmiştir.

Ayrık modelleme SAP2000 (Wilson 2018) analiz programında gerçekleştirilmiş olup taş bloklar kabuk (Area-Shell) elemanlar ile tanımlanmıştır. Bu tanımlama için öncelikle, Bölüm 4.1.5'te anlatıldığı şekliyle, referans kitaptan edinilen ve el ile çizilmiş olan yapı detay çizimleri üzerine AutoCad ortamında her bir taş blok kenarları çizgisel olarak belirlenmiştir. Bu çizgiler ilgili taş kalınlığına göre de renklendirilmiştir. Daha sonra çizim dosyası SAP2000 programına çağırılmış ve çizgiler yalnız uzunluk boyutu olan çubuk (Frame) elemanlara dönüştürülmüştür. Son olarak taş kenarların belirleyen çubuklar arasına kabuk elemanlar yerleştirilmiştir. Bu işlem esnasında kabuklar arasına boşluk tanımlaması yapılmamıştır ancak komşu kabukların köşeleri ve kenarları boyunca da ortak düğüm paylaşımı bulunmamaktadır. Bu sayede ayırık modelleme yapılmak istenmiştir. Harçsız birleşen taşlar gerçeğe uygun olarak birbirine yalnız basınç ve kayma (sürtünme kaynaklı) etkisi aktaracağı öngörülmüş ve bu etkileşim kabuklar arasında tanımlanan ara yüz elemanı ile sağlanmak istenmiştir. Ara yüz elemanı olarak "Link" adı altında birçok eleman tipi ve konum özelliği literatürden de faydalanılarak denenmiş ancak davranışa uygun sonuç henüz alınamamıştır. Bu konudaki çalışmalar devam etmektedir.

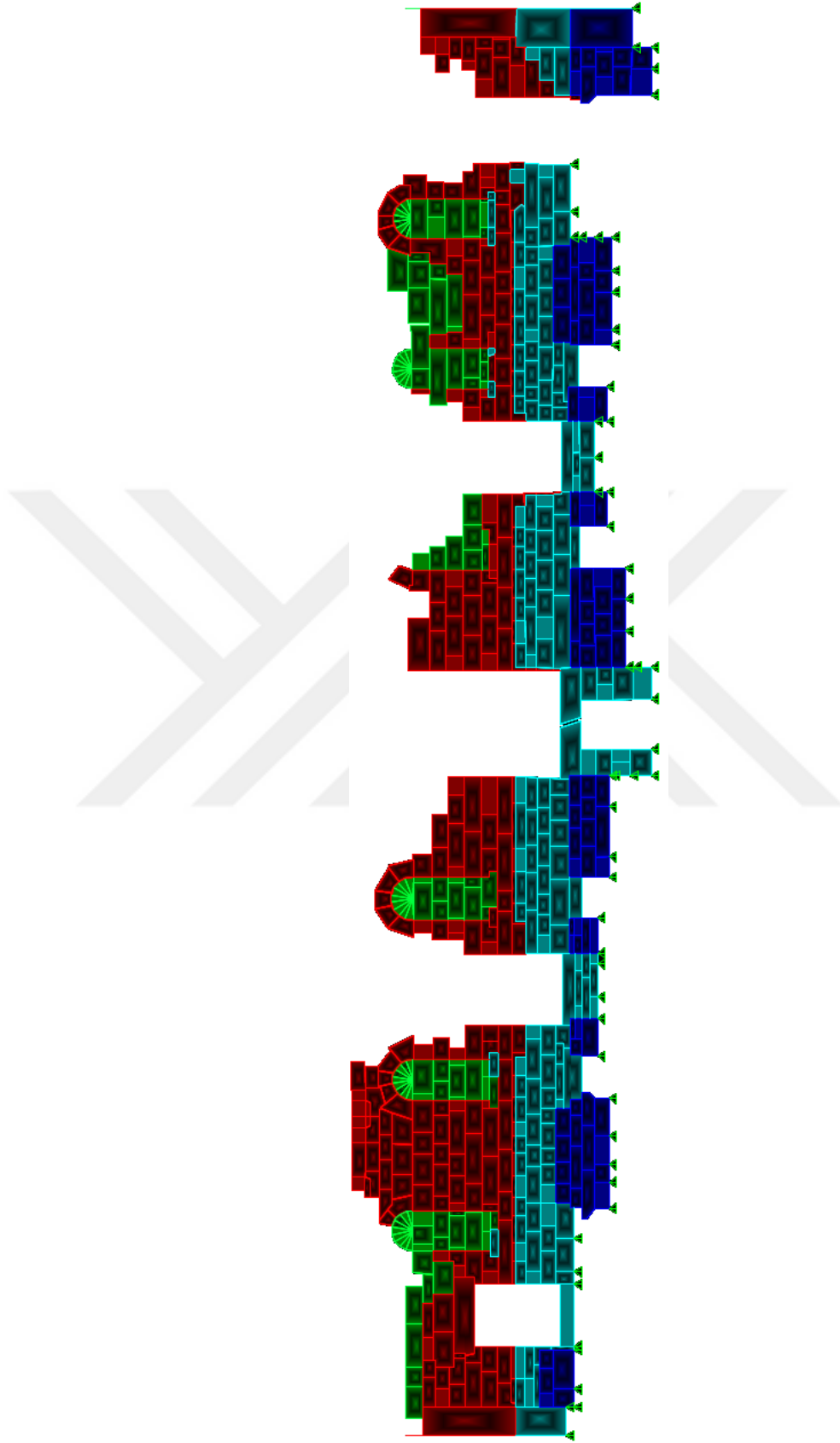
Patara Antik Tiyatrosu sahne yapısı için hazırlanan ayırık (mikro benzeri) modelin üç boyutlu görünümü Şekil 4.48-49'da ve kuzey, güney, doğu ve batı cephelerini görünimleri Şekil 4.50-53'te sunulmuştur.



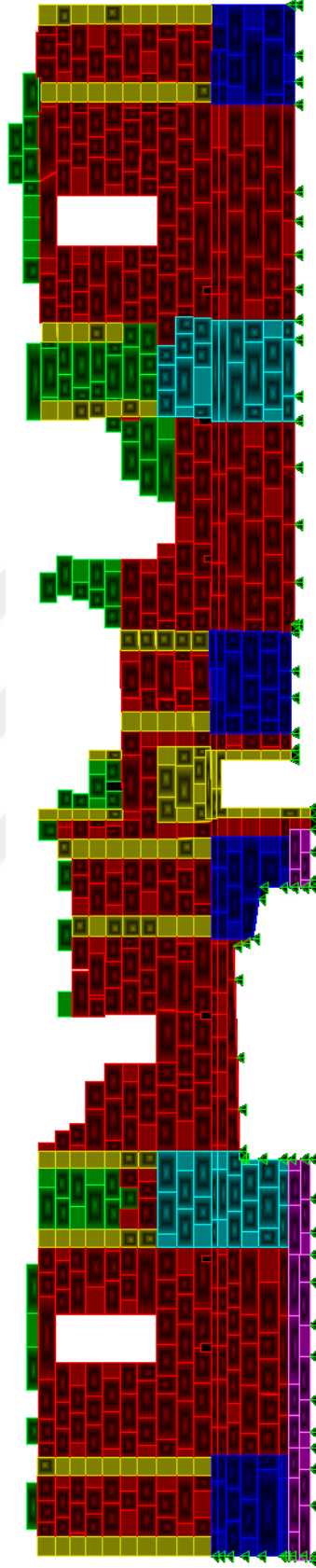
Şekil 4.48. Ayırık mikro modeli oluşturan kabukların üçboyutlu görünümü



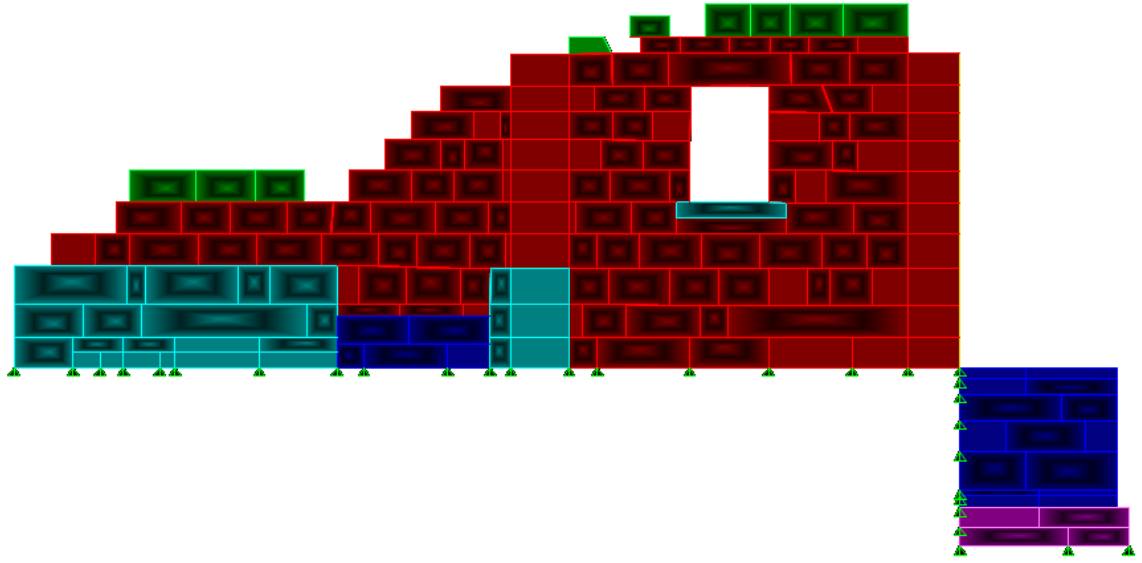
Şekil 4.49. Ayırık mikro modeli oluşturan kabukların perspektif görüntüsü



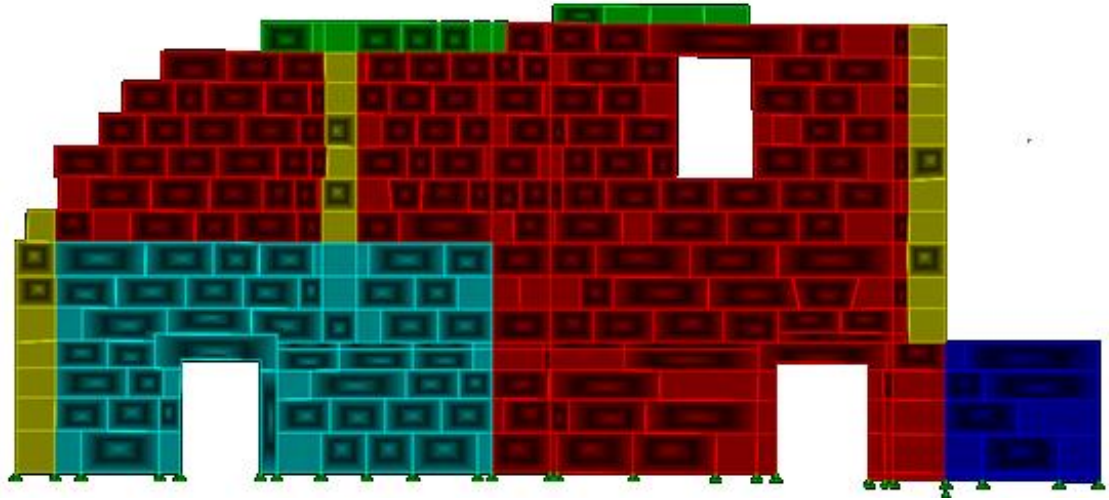
şekil 4.50. Ayrık mikro modeli oluşturan kabukların gőney cephe gőrőntőřő



şekil 4.51. Ayırık mikro modeli oluşturan kabukların kuzey cephe görüntüsü



şekil 4.52. Ayrık mikro modeli oluşturan kabukların batı cephe görüntüsü



şekil 4.53. Ayrık mikro modeli oluşturan kabukların doğu cephe görüntüsü

4.2. Tartışma

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar örnek yapının bütünleşik (makro) modeli ile elde edilmiştir. Bu yöntemde taşıyıcı duvarı oluşturan taşlar bir bütün halinde ele alınmakta olup taşlar arası etkileşim, kayma, hasar, ayrışma, vb. gibi doğrusal ötesi durumlar dikkate alınamamaktadır. Dolayısıyla bu yöntemde yapı gerçekte olduğuna göre daha rijit davranış gösterebilmektedir. Bu çalışmada elde edilen şekil değiştirmelerin ve modal periyotların gerçeğe göre bir miktar daha düşük olacağı dikkate alınmalıdır.

Yığma taş yapının gerçek davranışına en uygun modelleme yöntemi, taşlar arası etkileşimle birlikte bu taşların birbiri üzerinden kayarak dökülmesine imkân sağlayan ayırık (mikro) modelleme tekniğidir. Ancak, bu yöntemin uygulanabilmesi yapı ölçeğine ve kullanılan bilgisayar kapasitesine bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada ele alınan sahne yapısının makro modelinin yanı sıra ayırık (mikro) modeli de hazırlanmak istenmiş ve bu konuda bir ön çalışma yürütülmüştür (Bölüm 4.1.5-6). Mikro modelleme aşamasında her ne kadar taş birim elemanların modellenmesi tamamlanmış olsa da bu tip modelleme için önemli olan ve taş bloklar arası etkileşimin tanımlandığı uygun ara yüz elemanlarının belirlenmesinde tatmin edici bir sonuç alınmadığı için istenen kıyaslama yapılamamıştır. Ancak bununla birlikte analiz öncesi yapı geometrisinin bilgisayar ortamına aktarılması ve taş birim elemanların modellenmesi aşamalarında önemli derecede yol alınmış olup okuyucu açısından faydalı olabilecek bazı bilgi birikimi bu alt bölümde paylaşılacak istenmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada Patara Antik Kent Tiyatrosu sahne yapısının düşey ve yatay yükler altında yapısal analizi ele alınmıştır. Öncelikle yapıyla ilgili tarihsel süreç araştırılmış, yığma yapının malzeme ve taşıyıcı sistem özellikleri belirlenmiş, zemin durumuna bakılmış, bölgenin depremselliği hakkında bilgi toplanmış, tarihi yapıların sayısal modelleme ve analiz metotları üzerine araştırma yapılmıştır. Daha sonra bu bilgi birikimine dayanarak sahne yapısının SAP2000 analiz programında üç boyutlu makro modeli hazırlanmıştır. Model üzerinde düşey yük analizi, modal analiz ve spektrum analizi denenmiş ve bu analizler sonucunda elde edilen gerilme ve şekil değiştirme değerlerine bakılarak yapının durumu ve davranışı hakkında yorum yapılmıştır.

Patara Antik Kenti sahne yapısı bugüne kadar yaşadığı doğal afetler neticesinde önemli bir kısmı hasar görmüş ve yapı kumlar altında kalmıştır. Kum temizleme ve restorasyon çalışmaları günümüzde devam etmektedir. Ancak zemin katın neredeyse tamamı halen kum altındadır. Bu çalışmada yapının görünen ve bilinen kısmının mevcut haliyle yapısal analizi gerçekleştirilmiş olup temizleme çalışmalarının tamamlanması sonrasında oluşacak yeni geometriye göre analizin tekrarlanması uygun olacaktır.

Tarihi yapıların günümüzdeki yapılardan farklı olan özellikleri yapısal analizi zorlaştırmaktadır. Taş, tuğla ve harçtan oluşan yapı elemanlarının değişik fiziksel ve mekanik özellikler göstermesi analiz sırasında gerçek malzeme özelliklerinin tanımlanmasını zorlaştırmaktadır (Ünay 2002). Dolayısıyla malzeme özelliklerinin tam olarak belirlenebilmesi imkânsız olduğundan bu değerler analiz sırasında doğrusal elastik olarak kabul edilmiştir.

Toplam yapı ağırlığının 1600 ton civarında olduğu hesaplanmıştır. Bu kütleyle göre yapıya etki edecek en büyük yatay taban kesme kuvvetlerinin; global X doğrultusunda (yapının uzun kenarı) 1.99 ton ve global Y doğrultusunda (yapının kısa kenarı) 2.26 ton seviyelerinde olduğu spektrum analiziyle belirlenmiştir (Çizelge 4.7).

Elde edilen analiz sonuçları yapının geometrik özellikleri bakımından beklenen deprem davranışını yansıtmaktadır. Yapının kendi ağırlığı ile oluşan düşey yükler ve bildirinin çalışma konusu olan deprem yüklerine karşı dayanımı konusunda şu değerlendirmeler yapılabilir. Pek çok yığma taş yapıda olduğu gibi düşey yükler altında yapının dayanımı yeterlidir. Serbest titreşim periyotlarına ve mod şekillerine bakıldığında hareketin çoğunlukla duvar düzlemi dışına doğru gerçekleştiği görülmüştür. Bu nedenle yapının düzlem içi rijitliğinin oldukça fazla olduğu söylenebilir.

Yapılan analizler neticesinde ortaya çıkan sonuçlar; yapının kendi ağırlığı ve Deprem Yönetmeliğine göre belirlenen yatay yükler altında oluşan asal basınç gerilmelerinin, yapıya hasar verecek düzeyde olmadığı yönündedir. Bunun nedeni malzeme olarak bulunan mevcut taş birim elemanların oldukça yüksek basınç dayanımına sahip olmasıdır. Ancak yapının dinamik özelliklerinden mod şekillerine bakıldığında olası bir deprem esnasında duvarların çoğunlukla devrilme yönünde eğilim göstereceği anlaşılmaktadır. Bunun nedeni yapıyı oluşturan tüm duvarların düzlem içi rijitliği oldukça yüksek olmasına rağmen düzlem dışı rijitliğin yetersiz kalmasıdır.

Yapı tümüyle değerlendirildiğinde rijitlik ve kütle merkezlerinin çakışmamasından dolayı düşey eksen etrafında burulma momentinin olduğu görülmektedir (Çizelge 4.7). Bu durum özellikle global Y doğrultusunda etkiyen deprem yüklemesi için oldukça büyüktür. Bu burulma neticesinde yapının rijitlik merkezine (dönme eksenine) en uzak duvarların birleşim bölgelerinde (köşeler) hasar oluşturma potansiyeli mevcuttur.

Analizden edinilen bilgiler doğrultusunda, sahne yapısına ait taşıyıcı duvarların özellikle düzlem dışı hareketini önleyici tedbirlerin en kısa zamanda alınması uygun olacaktır. Bu duvarların olası bir depremde devrilme potansiyeli mevcuttur. Kültürel mirasın korunması adına yapının korunması önemlidir.



6. KAYNAKLAR

- Akan, A. ve Özen, Ö. 2005. Bursa Yeşil Türbe'nin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Deprem Analizi. Deprem Sempozyumu, ss. 758-762, 23-25 Mart, Kocaeli.
- Akhan, M. 2001. İstanbul Üniversitesi Rektörlük binası örneğindeki kagir yapılarda deprem etkileri. Yüksek lisans tezi, İ. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 164 s.
- Aköz, F. 2005. Yığma Kagir Yapılarda Hasar Tespiti. Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı, 17 Şubat, Ankara, ODTÜ.
- Aköz, F. vd. 2001. AkInvestigation of material properties of Dolmabahçe Palace reception (Muayede) Hall's dome and vaults. Studies in Ancient Structures, İstanbul, pp. 659-669.
- Alanyalı, H. S. 2005. Patara tiyatrosu 2004 çalışmaları. Anadolu/Anatolia-29, 1-12.
- Arun, G. 2005. Yığma Kagir Yapı Davranışı. Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı, 17 Şubat, Ankara, ODTÜ.
- Asteris, P. G. and Tzamtzis, A. D. 2003. On the use of a regular yield surface for the analysis of unreinforced masonry walls. Electronic Journal of Structural Engineering 3, pp. 23-42.
- ASTM C 1196-92. 1997. Standart test method for in situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flatjack measurements.
- ASTM C 1531-03.1997. Standart test method for in situ measurement of masonry joint shear Strength index.
- Atalay, G. 2010. Antik devirde mimari kurallar ve inşaat teknikleri. Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Konya, 98 s.
- AutoDesk. 2018. AutoCad. <https://knowledge.autodesk.com> [Son erişim tarihi: 03/05/2018].
- Aydın, E. Ö., Fahjan, Y. M. ve Çömlekçiöğlu, R. 2007. Deprem Bölgelerindeki Tarihi Kagir Yapıların Güçlendirilmesinde Kullanılan Yeni Teknikler. International Earthquake Symposium, ss. 636-644, 22-26 Ocak, Kocaeli.
- Aytekin, İ. 2006. Donatısız ve sarılmış yığma yapıların deprem davranışlarının incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 114 s.
- Batur, A. 1999. Donatısız yığma binaların yatay yükler altındaki davranışı ve bazı ülkelerin şartnamelerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 79 s.

- Bayburtluoğlu, C. 2003. Yüksek Kayalığın Yanındaki Yer Arycanda. Homer Kitabevi: 2003, İstanbul, 204 s.
- Bayraktar, A. 2005. Tarihi Yığma Yapıların Depreme Karşı Güçlendirilmesi. Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı, 17 Şubat, Ankara, ODTÜ.
- Bayraktar, A. 2006. Tarihi Yapıların Analitik İncelenmesi ve Sismik Güçlendirme Metotları. İstanbul: Beta Yayınlar:1, İstanbul, 145 s.
- Bayülke, N. 1984. Depremlerde Hasar Gören Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesi. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Yapı Malzemesi ve Deprem Araştırma Genel Müdürlüğü, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, ss. 21-22.
- Bayülke, N. 1992. Yığma Yapılar. İnşaat Mühendisleri Odası Yayını, Ankara, 279 s.
- Bayülke, N. 1999. Depremde Hasar Gören Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesi. İnşaat Mühendisleri Odası Yayını, İzmir, 95 s.
- Bean, G. E. 1978. Lycian Turkey: An archaeological guide. London: Benn and Norton Publications, pp. 197.
- Benndorf, O. and Niemann, G. 1884. Reisen in Lykien und Karien. HathiTrust Digital Library, pp. 59.
- Bilgin, H. 2005. Sinan Kubbeli Yapılarında Mekan Örtü Sistemlerinin Yapısal Davranışı. Deprem Sempozyumu, ss. 771-777, 23-25 Mart, Kocaeli.
- Böke, H., Akkurt, S. ve İpekoğlu, B. 2004. Tarihi yapılarda kullanılan horasan harcı ve sıvalarının özellikleri. Mühendislik Dergisi, 34322:387- 398.
- Carino, N. J. 1991. Nondestructive Testing Of Concrete: History and Challenges, Concrete Technology Past, Present and Future, Proceeding of. V. Mohan Malhotra Symposium, sp. 144-30, pp. 623-678.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N. 2004. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı. Beta Yayınları, İstanbul, 739 s.
- Chen, W. F. and Mizuno, E. 1990. Nonlinear Analysis in Soil Mechanics, Published Amsterdam Elsevier, pp. 661.
- Çamlıbel, N. 2000. Yapıların Taşıma Gücünün İyileştirilmesi. Birsen yayınevi, İstanbul, 258 s.
- Çelebi, R. 2001. Yapı Bilgisi. İstanbul Kültür Üniversitesi Yayınları, 251 s.
- Çıllı, F. ve Sesigür, H. 2007. Tarihi Yapıların Onarımı/Güçlendirilmesi. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Seminer Notları.

- Çöğürtücü, M. T. 2007. Yığma yapıların yatay derz güçlendirme yöntemiyle güçlendirilmesi. Doktora tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 205 s.
- Dabanlı, M. Ö. 2008. Tarihi yığma yapıların deprem performansının belirlenmesi. Yüksek lisans tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 170 s.
- DBYBHY. 2007. Deprem bölgelerin yapılacak binalar hakkında yönetmelik. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- Dipova, N. ve Cihangir, B. 2011. Antalya ili yerleşim alanının depremselliğinin araştırılması. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 35 (2):93-114.
- Duggan, T. M. 2004. A short account of recorded calamities (Earthquakes and plagues) in Antalya province and adjacent and related areas over the past 2,300 years an incomplete list commentsand observations ADALYA VII, ss. 123-170.
- Duggan, T. M. 2005. Supplementary data to be added to the chronology of plague and earthquakes in Antalya province and in adjacent and related areas. Adalya, ss. 357- 391.
- Ercan, E., Kırılı, O., Nuhoğlu, A. ve Arısoy, B. 2006. Antik Yapılarda Sütun-Kiriş Taşıyıcı Sistemlerin Sonlu Elemanlarla Yapısal Analizi. 7. Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Konferansı, 11-13 Ekim, İstanbul.
- Ferrero, B. 1969. Teatri Classici in Asia Minore II. Editore: L'Erma di Bretschneider, pp. 264.
- Guiooni, E. etc. 1994. Catalogue of Ancient Earthquakes in the Mediterranean Area up to the 10th Century. Istituto Nazionale di Geofisica, Rome, pp. 504.
- Hanson, J. 1959. Roman Theater-Temples. New Jersey Pricenton Universty Press, pp. 152.
- Işık, F. 2000. Patara The History and Ruiens of the Capital City of Lycian League. Universal Holding A.Ş. pp. 173.
- Koçkal, N. U. ve Dipova, N. 2011. Antik Patara deniz feneri restorasyonu malzeme özelliklerinin belirlenmesi konulu rapor. Akeniz Üniversitesi İnşaat Mühendisliğ Bölümü, Antalya.
- Kömürcüoğlu, E. A. 1962. Yapı Malzemesi Olarak Kerpiç ve Kerpiç İnşaat Sistemleri. İTÜ Matbaası, İstanbul, 135 s.
- Köseoğlu, S. 1986. Temeller Statiği ve Konstrüksiyonu II Yüzeysel Temeller. Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul, 408 s.
- Küban, D. 1998. Mimarlık Kavramları. Yapı Endüstri Merkezi Yayınları, İstanbul, 91 s.

- Lourenço, P. B. 1996. Computational strategies for masonry structures, delft,. PhD Thesis, Delft University of Technology, The Netherland.
- Lourenço, P. B. 1998. Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behaviour of masonry. structural analysis of historical constructions II. Universidade do Minho, Portugal, pp. 57-91.
- Lourenço, P. B. 2000. Current experimental and numerical issues in masonry research. Universidade do Minho, Portugal, pp. 119-136.
- Lourenço, P. B. 2002. Computational strategies for masonry structures. University of Minho, Portugal, pp. 301-319.
- Lourenço, P. B., Vasconcelos, G. ve Ramos, L. 2001. Assessment of the stability conditions of acistercian cloister. Universidade do Minho, Department of Civil Engineering, Guimaraes, Portugal.
- Luciano, R., Marfia, S. and Sacco, E. 2002. Reinforcement of masonry arches by FRP materials: Experimental tests and numerical investigations. University of Cassino, Italy, 12 s.
- Namlı, M. 2001. Tarihi yapıların temel sistemleri ve temel takviyesi yöntemleri. Yüksek lisans tezi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul, 182 s.
- Oğuzmert, M. 2002. Dynamic behaviour of masonry minarets. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 100 s.
- Olatunji, T. M., Warwaruk, J. and Longworth, L. 1986. Behavior and stength of masonry wall/slab joints. Report No: 139, University of Alberta, Canada.
- Öner, E. 1998. Eşen delta ovasının alüvyal jeomorfolojisi ve Antik Patara limanı. Adalya III. ss. 207-220.
- Ötüken, S. Y. 1996. Lykia ortaçağ araştırmaları ve Demre Aziz Nicolas kilisesi kazısı. Adalya I. ss. 73-78.
- Özcan, Z. ve Yılmaz, P. 2006. Tarihi Sapanca Rahime Sultan Cami Dinamik Davranışı Belirlenmesi. 7. Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Konferansı, 11-13 Ekim, İstanbul.
- Özdilek, B. 2016. Lykia tiytrolarına genel bakış. Cedrus the Journal of MCRI, ss. 139-185.
- Özen, G. Ö. 2006. Comparison of elastic and inelastic behavior of historic masonry structeres at the low load levels. Yüksek lisans tezi, OTDÜ, Ankara, 111 s.
- Özer, S. 2006. Geleneksel yığma yapılarda srüktürel elemanların analizi. Yüksek lisans tezi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 108 s.

- Öztürk, T. and Mahberel, H. A. 2006. Tarihi Yapıların Mevcut Güvenliğinin Belirlenmesi Onarım ve Güçlendirilmesi. 7. Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Konferansı, 11-13 Ekim, İstanbul.
- Paulay, T. and Priestley, M. J. 1992. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. John Wiley and Sons Inc, NewYork, pp.768.
- Piesker, K. and Ganzert, J. 2012. PATARA II. - Das Theater Von Patara Ergebnisse der Untersuchungen 2004 bis 2008. Ege Yayınları, pp. 308.
- Postacıoğlu, B. 1981. Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri; İç Yapı ve Mekanik Özellikler, Cilt 1, İTÜ Matbaası, İstanbul, 614 s.
- Proske, D. and Gelder, P. 2009. Safety of Historical Stone Arch Bridges. Britain, pp. 366.
- Saraç, M. 2003. Tarihi yığma kârgir yapıların güçlendirilmesi. Yüksek lisans tezi, İTÜ İstanbul, 155 s.
- Schueremans, L. 2001. Probabilistic evaluation of structural unreinforced masonry. Doctoral thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Heverlee (Belgium), pp. 329.
- Softa, M., Turan, M. ve Sözbilir, H. 2018. Jeolojik, arkeolojik ve arkeosismolojik veriler ışığında Myra Antik Kenti'nde tarihsel depremlere ait deformasyon verileri, GB Anadolu. *Geological Bulletin of Turkey*, 61:51-74.
- Soygeniş, M. 1999. Yapı 2. Birsen Yayınevi, İstanbul, 254 s.
- Şen, B. 2003. Modeling and analysis of historical masonry structures. Yüksek lisans tezi. ODTÜ, Ankara, 150 s.
- Texier, C. 1849. Description de L'Asie Mineure.
- TS2510. 1977. Kargir Duvarlar Hesap ve Yapım Kuralları. Türk Standardı, ss.1-28, Nisan 1997, Ankara.
- TS704. 1979. Harman Tuğlası. Türk Standardı, 11 Ocak, Bilim ve Sanayi Bakanlığı, Ankara.
- Türkçü, Ç. 1997. Yapım. Mimarlar Odası İzmir Şubesi Yayınları, İzmir, 340 s.
- Türkçü, Ç. 2000. Yapım. Birsen Yayınevi, İstanbul, 340 s.
- Türker, B. 2007. Taş yapıların onarımı hesap esasları yönetmelik önerileri ve depreme karşı güçlendirilmesi. Lisans bitirme ödevi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Ural, A. 2009. Yığma yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi. Doktora tezi, Trabzon: K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 185 s.

- Ural, A. ve Doğangün, A. 2007. Mikro Modelleme Tekniği Kullanılarak Yığma Yapıların Deprem Performansının İncelenmesi. International Earthquake Symposium, ss. 323-331, 22-26 Ocak, Kocaeli.
- Ülkay, S. 1978. Yapı Bilgisi. YTÜ Mimarlık Fakültesi Baskı İşliği, İstanbul 170 s.
- Ünay, A. G. 2002. Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı. ODTÜ Mimarlık Fakültesi Yayınları, Ders Kitabı, Ankara, 172 s.
- Wilson, E. L. 2018. Analysis Reference Manual for SAP2000. Berkeley, CA, USA: CSI, Computers and Structures.
- Yorulmaz, M., Vintzeleou, E. and Convenour, F. 1984. Design and construction of stone and brick masonry buildings. Building construction unde seismic conditions in the Balkan region project. United Nations Development Programme. Rapor No: 22834, Viyana.

7. EKLER

EK-1. Sahne yapısının bütünlüştik (makro) modelleme yöntemiyle düşey yük altında güney cephesinde oluşan şekil değıştirme dağılımı

EK-2. Sahne yapısının bütünlüştik (makro) modelleme yöntemiyle düşey yük altında güney cephesinde oluşan asal normal gerilmele ve kayma gerilmesi dağılımı

EK-3. Sahne yapısının bütünlüştik (makro) modelleme yöntemiyle düşey yük altında kuzey cephesinde oluşan şekil değıştirme dağılımı

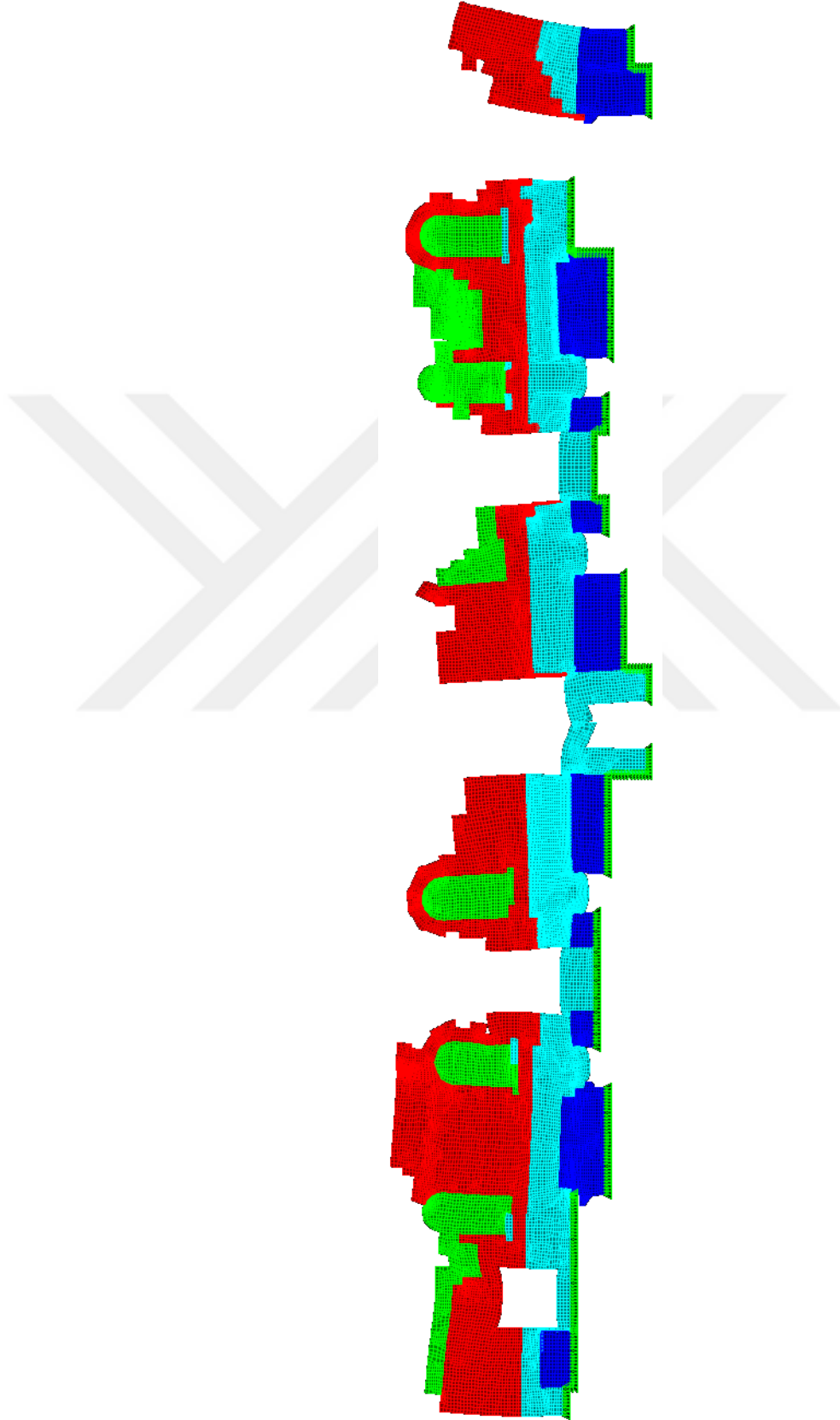
EK-4. Sahne yapısının bütünlüştik (makro) modelleme yöntemiyle düşey yük altında kuzey cephesinde oluşan asal normal gerilmele ve kayma gerilmesi dağılımı

EK-5. Sahne yapısının bütünlüştik (makro) modelleme yöntemiyle düşey yük altında doğu cephesinin şekil değıştirme, asal normal gerilme ve kayma gerilmesi dağılımı

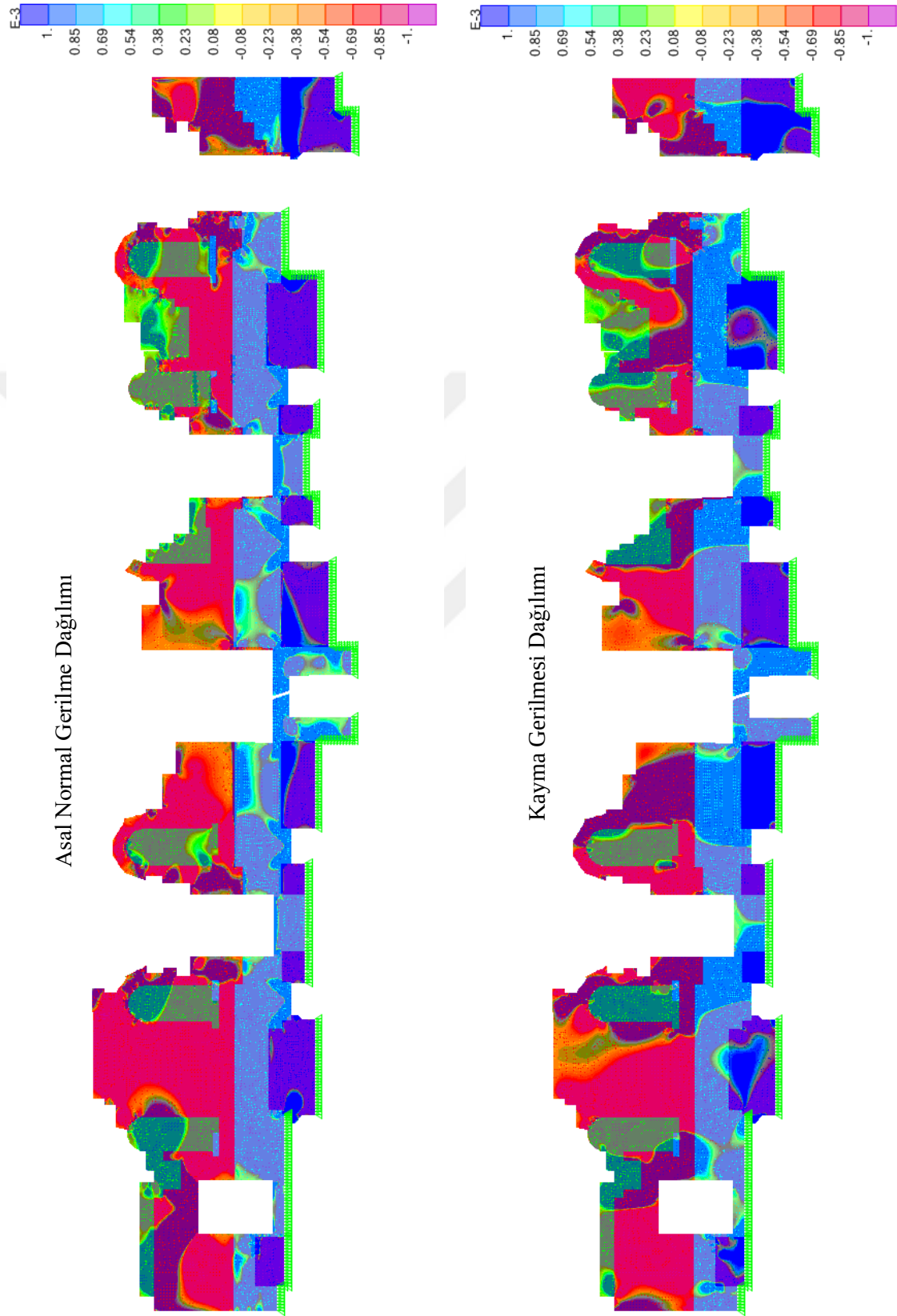
EK-6. Sahne yapısının bütünlüştik (makro) modelleme yöntemiyle düşey yük altında batı cephesinin şekil değıştirme, asal normal gerilme ve kayma gerilmesi dağılımı

EK-7. Sahne yapısıyla ilgili çeşitli görseller

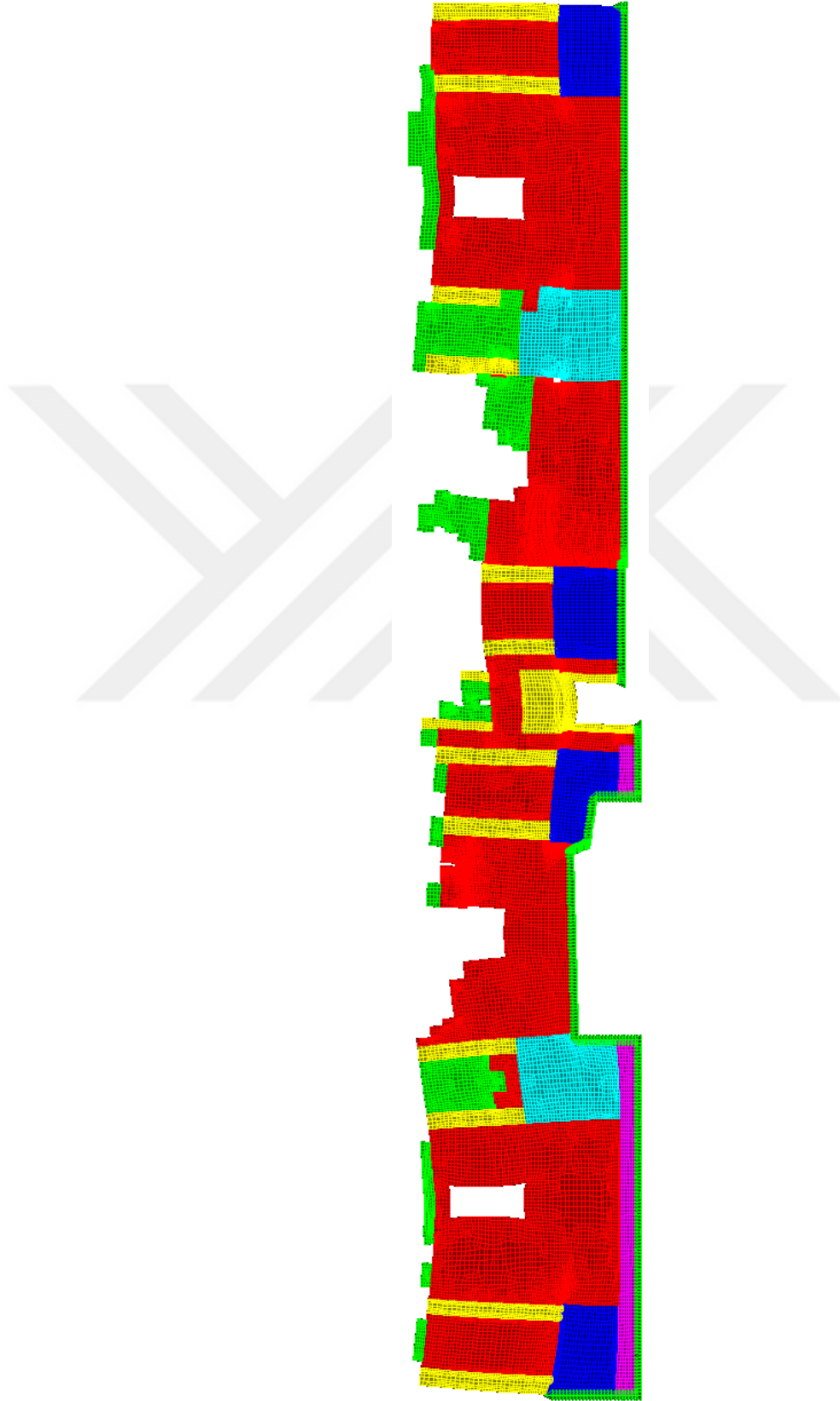
EK-1. Sahne yapısının bütünleşik (makro) modelleme yöntemiyle düşey yük altında güney cephesinde oluşan şekil değiştirme dağılımı



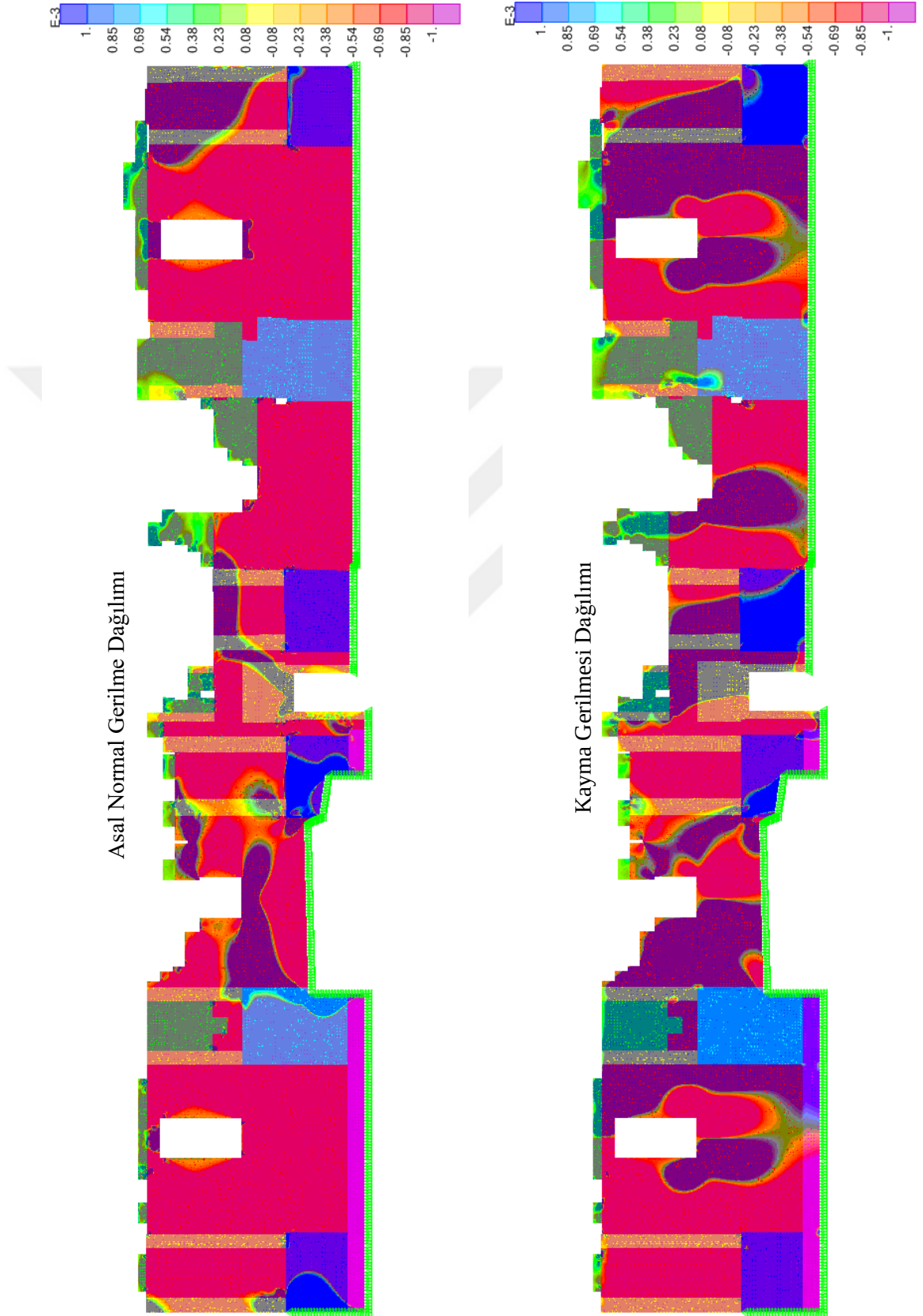
EK-2. Sahne yapısının bütünleşik (makro) modelleme yöntemiyle düşey yük altında güney cephesinde oluşan asal normal gerilme ve kayma gerilmesi dağılımı



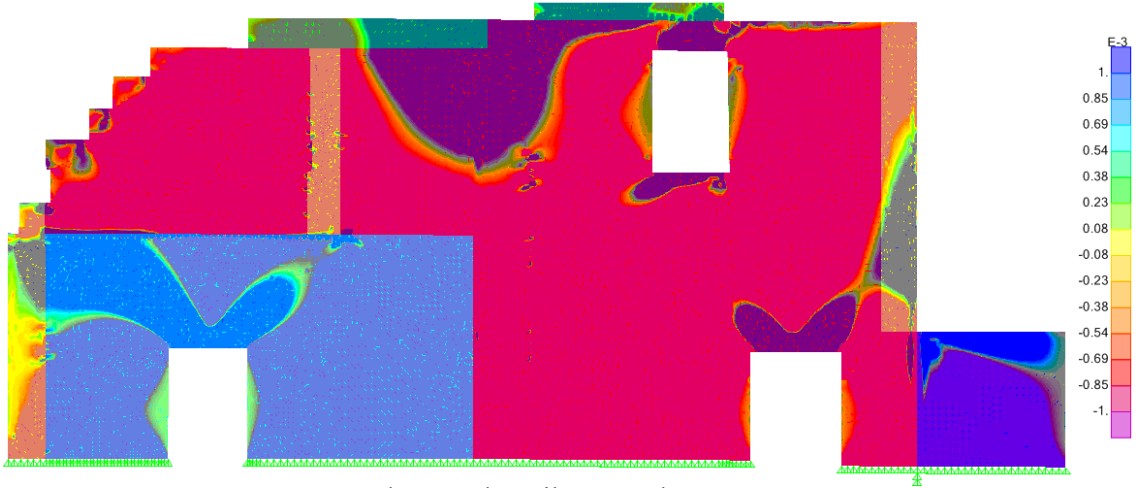
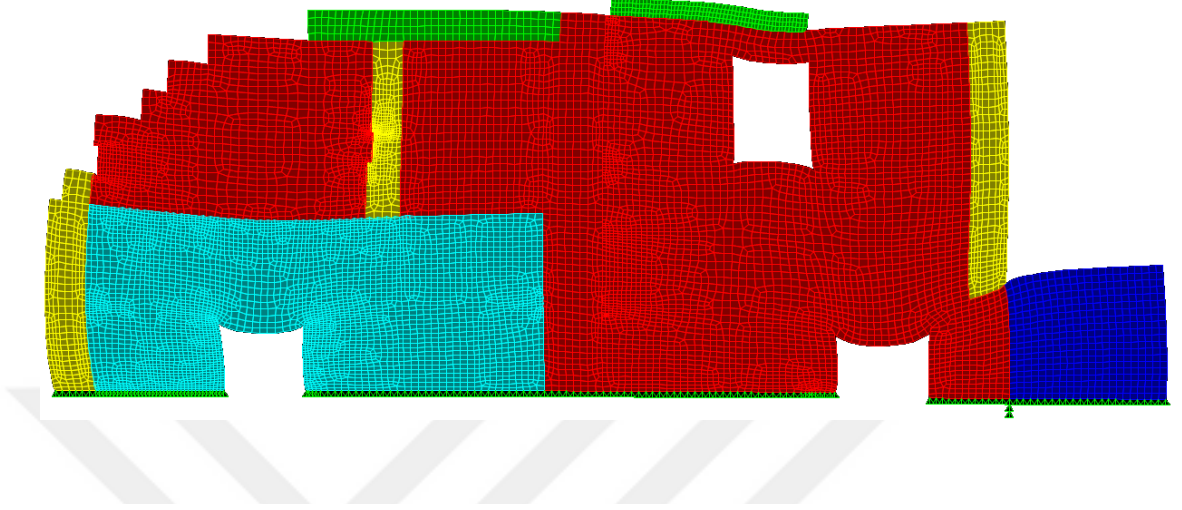
EK-3. Sahne yapısının bütünleşik (makro) modelleme yöntemiyle düşey yük altında kuzey cephesinde oluşan şekil değiştirme dağılımı



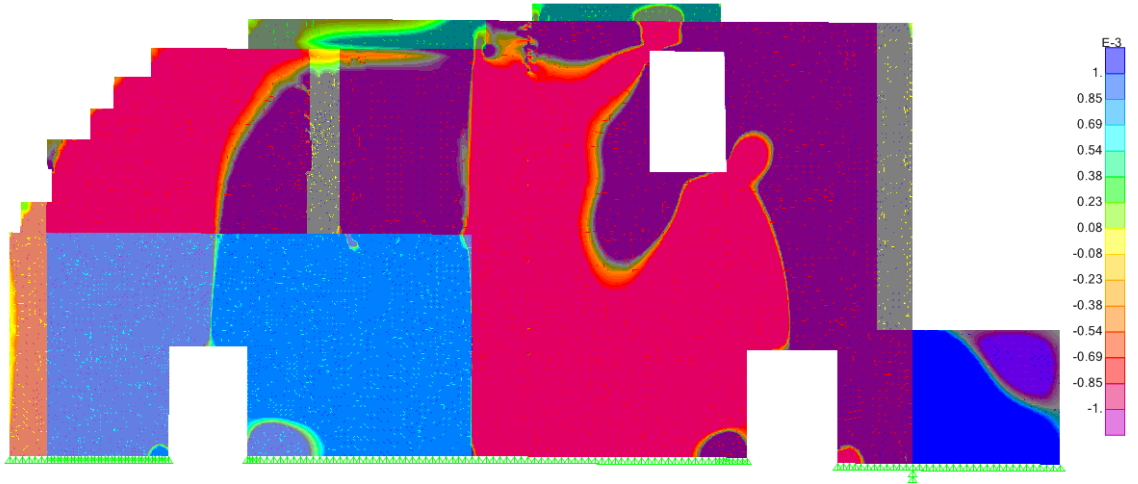
EK-4. Sahne yapısının bütünleşik (makro) modelleme yöntemiyle düşey yük altında kuzey cephesinde oluşan asal normal gerilme ve kayma gerilmesi dağılımı



EK-5. Sahne yapısının bütünleşik (makro) modelleme yöntemiyle düşey yük altında doğu cephesinin şekil değiştirme, asal normal gerilme ve kayma gerilmesi dağılımı

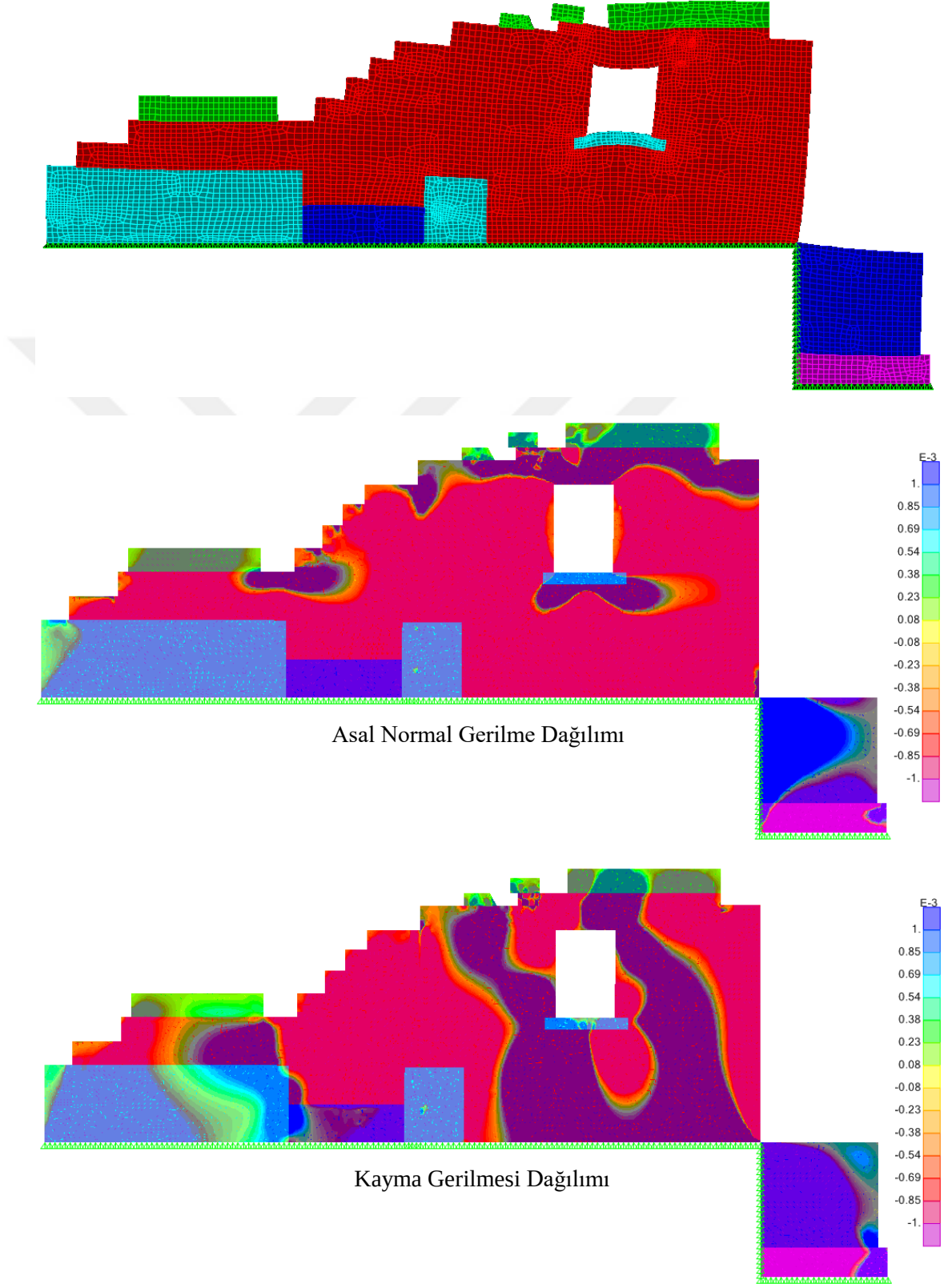


Asal Normal Gerilme Dağılımı

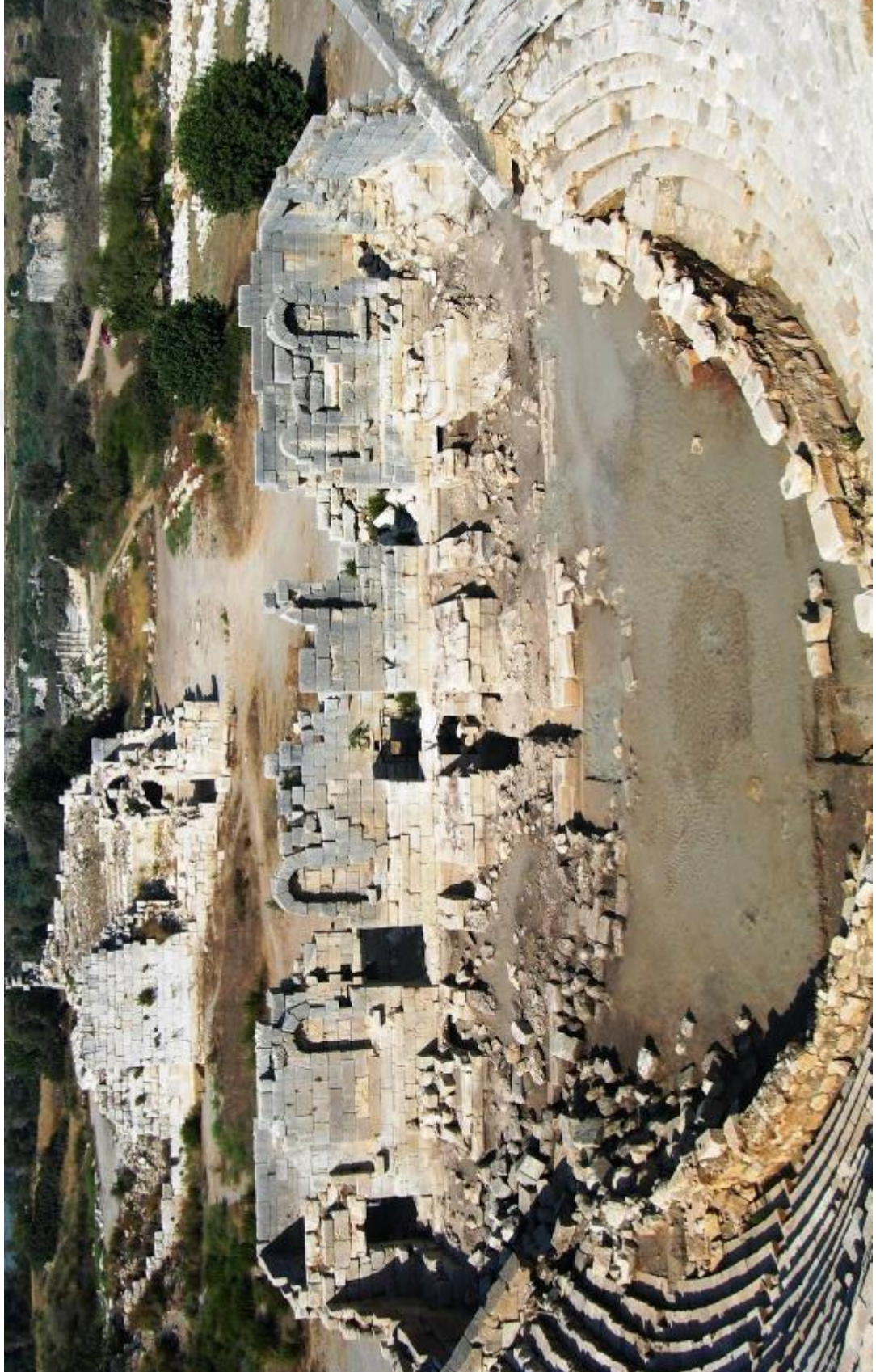


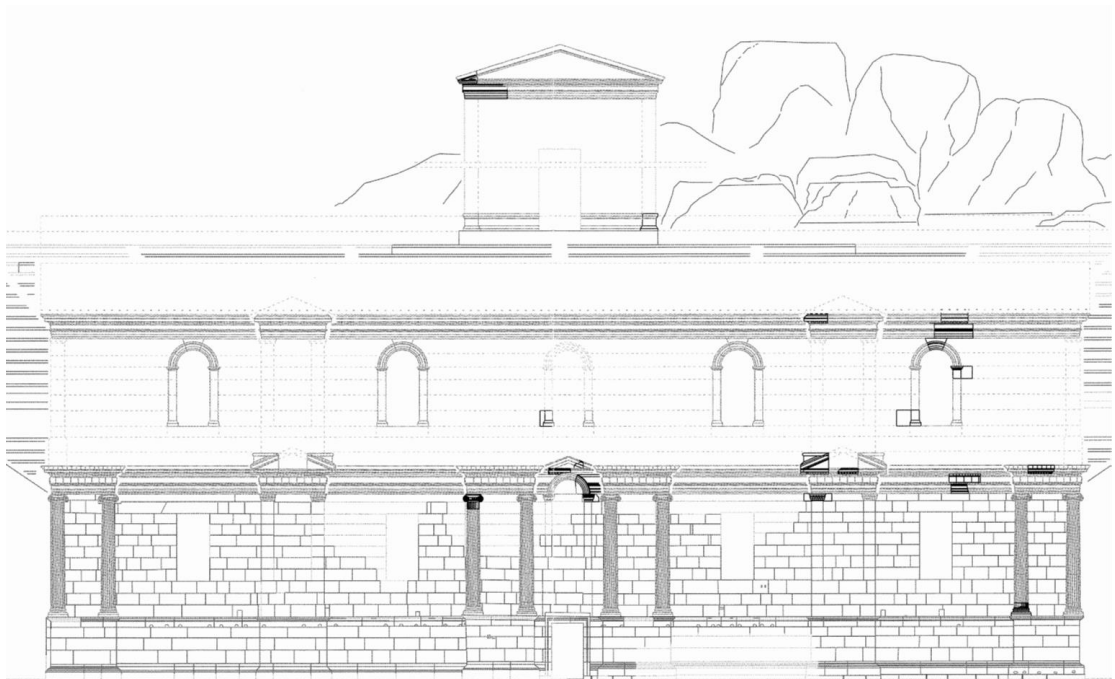
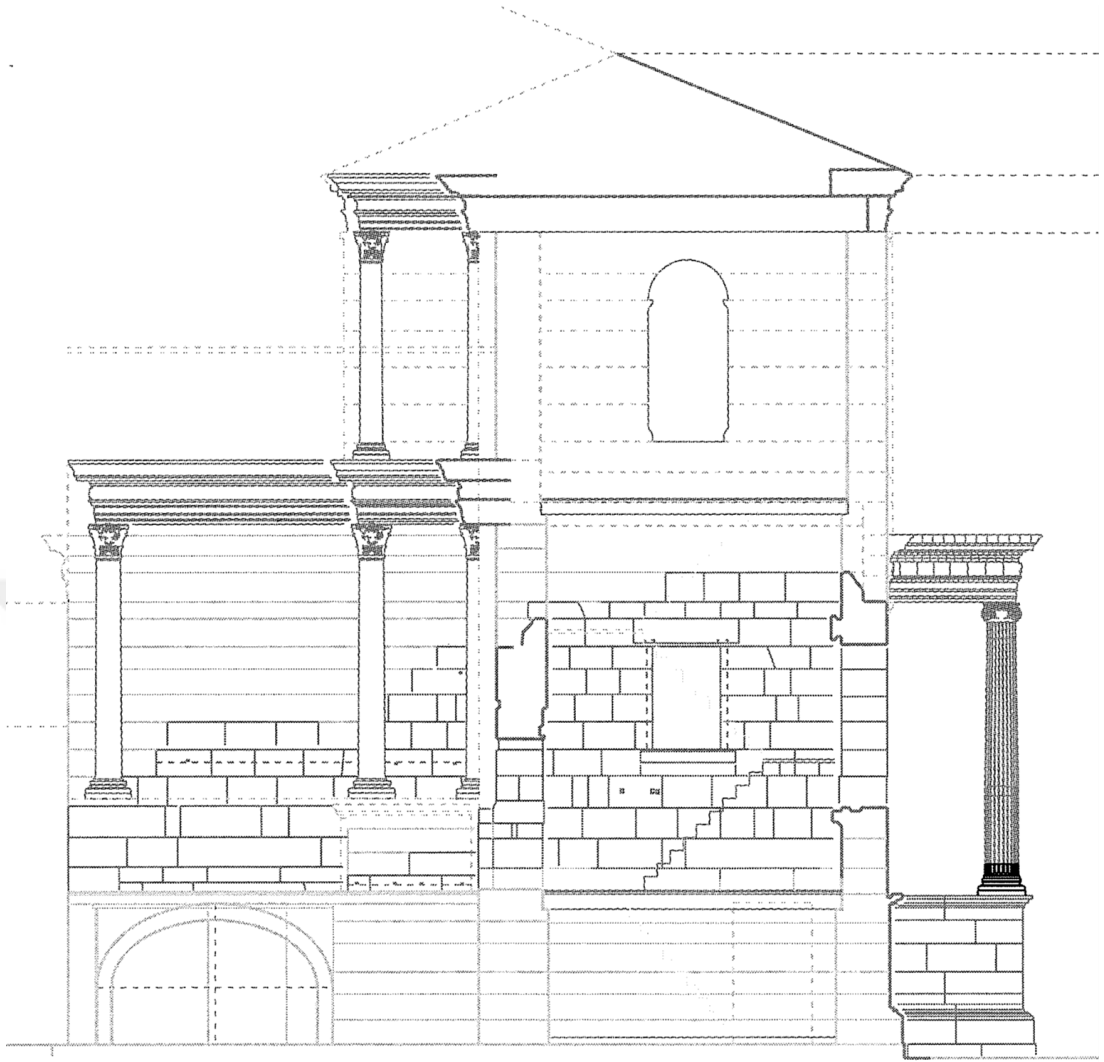
Kayma Gerilmesi Dağılımı

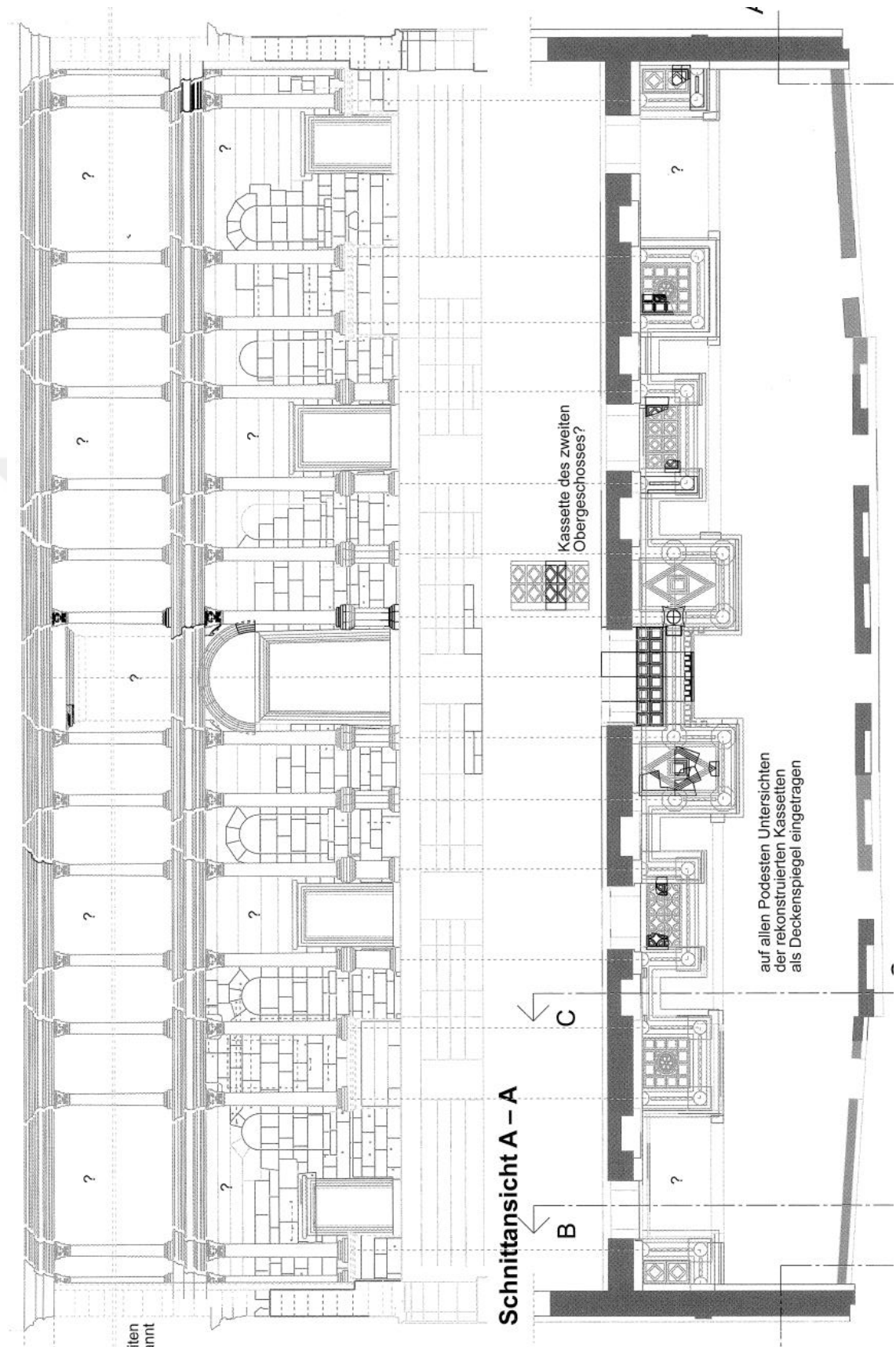
EK-6. Sahne yapısının bütünleşik (makro) modelleme yöntemiyle düşey yük altında batı cephesinin şekil değiştirme, asal normal gerilme ve kayma gerilmesi dağılımı



EK-7. Sahne yapısıyla ilgili çeşitli görseller







ÖZGEÇMİŞ

Habibe ÖZDEMİR
habibe_003@windowlive.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2014-2018	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans 2010-2014	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Serbest Mühendis
2014 - Devam Ediyor

Antalya