

**TARİHİ YAPILARDA ÜST ÖRTÜLERİN ÇELİK MALZEME İLE
SAĞLAMLAŞTIRILMASININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE
MODELLENMESİ**

MURAT ÇAVUŞ

**DOKTORA TEZİ
YAPI EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2011

A N K A R A

Murat ÇAVUŞ tarafından hazırlanan TARİHİ YAPILARDA ÜST ÖRTÜLERİN ÇELİK MALZEME İLE SAĞLAMLAŞTIRILMASININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof Dr. Metin ARSLAN
Tez Danışmanı, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. A. İhsan ÜNAY
Mimarlık Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof Dr. Metin ARSLAN
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. B. Işık AKSULU
Mimarlık Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. Hanifi TOKGÖZ
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. Ayşe TAVUKÇUOĞLU
Yapı Bilimleri Anabilim Dalı, ODTÜ

Tarih:16/09/2011

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Murat ÇAVUŞ

**TARİHİ YAPILARDA ÜST ÖRTÜLERİN ÇELİK MALZEME İLE
SAĞLAMLAŞTIRILMASININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE
MODELLENMESİ
(Doktora Tezi)**

Murat ÇAVUŞ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Eylül 2011**

ÖZET

Tarihi yapıların restorasyonunda genellikle tarihi yapı malzemesiyle uyumlu geleneksel malzeme kullanılmaktadır. Ancak geleneksel malzemenin elde edilemediği veya bazı yapısal sorunlar nedeniyle geleneksel malzemeyle restorasyonun yapılamadığı durumlar söz konusu olabilir. Bu durumda, çağdaş malzemeler tarihi yapıların restorasyonunda kullanılabilmektedir. Bu amaçla bu tez çalışmasında hasar görmüş prototip tonoz modelleri üretilmiş; üzerinde farklı hasar durumlarına göre üç farklı çelik konstrüksiyon ile sağlamlaştırma önerisi hazırlanmıştır. Bu öneriler, SAP2000 programında sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek analiz edilmiştir. Analizlerin değerlendirme sonuçları doğrultusunda üst yapıda benzer sorunu olan bir tarihi yapının (Tokat Deveci Hanı) yapısal modelleri üretilmiş ve çelik ile üst örtü sağlamlaştırma önerileri hazırlanmış ve analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda, yapısal davranış ve malzeme gerilmeleri açısından, örnek yapının çelikle sağlamlaştırılmasında geleneksel malzemeye göre daha olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 714.1.085
Anahtar Kelimeler : Restorasyon, Sonlu elemanlar yöntemi, Tarihi yapılar
Sayfa Adedi :99
Tez Yöneticisi :Prof. Dr. Metin ARSLAN

**MODELLING THE STRENGTHENING OF TOP COVERINGS OF
HISTORICAL STRUCTURES WITH STEEL MATERIAL BY FINITE
ELEMENTS METHOD**

(Ph.D Thesis)

Murat ÇAVUŞ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

September 2011

ABSTRACT

Conventional materials compatible with historical construction materials are usually used for restoration of historical structures. However, in some cases the conventional materials cannot be obtained, or the structure cannot be restored by conventional materials due to some structural problems. In this case, modern materials may be used in the restoration of historical structures. For this purpose, damaged prototype vault models were produced in this thesis, and three different strengthening proposals were prepared for these models according to various damage situations by using steel structure. These proposals were analyzed and evaluated in SAP2000 program by modeling with finite elements method. Structural models of a historical structure (Tokat Deveci Hanı) with the similar problem on the top covering were produced in accordance with the assessment results of the analysis, and strengthening proposals of the top covering by steel were prepared and analyzed. As a result of this analysis, more favorable results were obtained in strengthening the sample structure by steel rather than a conventional material in terms of structural behavior and material stresses.

Science Code	: 714.1.085
Key Words	: Restoration, Finite element method, Historical structures
Page Number	: 99
Adviser	: Prof. Dr. Metin ARSLAN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli hocam Prof. Dr. Metin ARSLAN'a, bu tez vesilesiyle tanıştığım ve tanışmaktan mutlu olduğum, tezim boyunca değerli katkı ve yardımlarını içtenlikle sunan değerli hocam Prof. Dr. A. İhsan ÜNAY'a, Gazi Üniversitesi'nde geçirdiğim akademik hayatım boyunca değerli tecrübelerinden yararlandığım hocam Prof. Dr. Türkay TÜDEŞ'e, her türlü katkılarından dolayı Prof. Dr. B. Işık AKSULU'ya, değerli katkılarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Hanifi TOKGÖZ ve Yrd. Doç. Dr. Ayşe TAVUKÇUOĞLU'na, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen değerli arkadaşım Arş. Gör. Mustafa DAYI'ya, birlikte çalışmaktan mutlu olduğum Yrd. Doç. Dr. A. Burcu GÜLTEKİN'e, Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ'a, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli eşim Melek Meltem ÇAVUŞ ve tüm aileme tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR TARAMASI	4
2. 1. Tarihi Yapılarda Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	6
2.1.1.Harç	6
2.1.2.Tuğla.....	9
2.1.3.Doğal taş.....	11
2. 2. Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Elemanları	12
2.2.1.Kemer	13
2.2.2.Tonoz.....	17
2.2.3.Kubbe	19
2.2.4.Pendantif.....	20
2. 3. Tarihi Yığma Yapıların Hasar Görmesinin Nedenleri	22

Sayfa

2.3.1.Zeminden kaynaklanan hasarlar	23
2.3.2.Strüktür tasarımındaki hatalar	24
2.3.3.Hatalı malzeme kullanımı	24
2.3.4.Kötü işçilik ve detay kullanımı	25
2.3.5.Uzun süreli doğal etkenler.....	26
2.3.6.Doğal afetler	27
2.3.7.Yapının terk edilmesi	27
2.3.8.Kötü kullanım ve onarımlar	28
2.3.9.Yangınlar	28
2.3.10.Savaşlar	28
2.3.11.Vandalizm	29
2.3.12.Hava kirliliği	29
2.3.13.Trafik.....	30
2. 4. Koruma ve Restorasyon	30
3. TARİHİ YIĞMA YAPI MODELLEME VE ANALİZ YÖNTEMLERİ	33
3.1. Modelleme Yöntemleri	33
3.1.1.Detaylı mikro modelleme.....	33
3.1.2.Basitleştirilmiş mikro modelleme	33
3.1.3.Makro modelleme	34
3.2. Analiz Yöntemleri	35
3.2.1.Doğrusal elastik analiz	35

Sayfa

3.2.2.Doğrusal olmayan elastik analiz	35
3.2.3.Sonlu elemanlar yöntemi ve tarihi yığma yapı analizinde kullanılması	35
4. TARİHİ YAPILARDA TONOZLARIN HASARLI BÖLÜMÜNÜN ÇELİK KULLANILARAK MODELLENMESİ VE ANALİZİ	41
4.1.Örnek Tonozun Geometrisi ve Malzeme Özellikleri	41
4.2. Örnek Tonozun Modellenmesi ve Analiz Yöntemi	43
4.3. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilme Yöntemi	47
4.4. Elde edilen Analiz Sonuçları ve Değerlendirilmesi	49
5. ÖRNEK YAPI ÇALIŞMASI (TOKAT DEVECİ HANI)	67
5.1.Yapının Mimari ve Strüktürel Özellikleri	67
5.2. Tonozların Onarımında Çelik Kullanılarak Yapının Modellenmesi ve Analiz Yöntemi.....	70
5.3. Analiz sonuçlarının Değerlendirilme Yöntemi.....	76
5.4. Elde edilen Analiz Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	77
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	88
KAYNAKLAR	93
ÖZGEÇMİŞ	98

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Yapısal analiz çalışmalarında kullanılan tuğlaların ortalama mekanik özellikleri	11
Çizelge 4.1. Tonoza ait sonlu elemanlar modelindeki malzeme özellikleri	42
Çizelge 4.2. Tonoz onarımında kullanılan çelik profil ölçüleri	42
Çizelge 4.3. Eşit kalıntı yüksekliğine göre analizi yapılan tonoz modelleri ve kısaltma kodları.....	45
Çizelge 4.4. Farklı kalıntı yüksekliğine göre analizi yapılan tonoz modelleri ve kısaltma kodları.....	46
Çizelge 4.5. Malzeme grupları için ABYYH' ye göre hesaplan emniyet gerilmeleri	49
Çizelge 4.6. Eşit kalıntı yüksekliğine göre onarımı yapılan tonozların modal analiz sonucunda 1. MOD, 2. MOD ve 3. MOD değerleri	50
Çizelge 4.7. Farklı kalıntı yüksekliğine göre onarımı yapılan tonozların modal analiz sonucunda 1. MOD, 2. MOD ve 3. MOD değerleri	53
Çizelge 4.8. Eşit kalıntı yüksekliğine göre onarımı yapılan tonozların üç farklı yükleme türüne göre X, Y ve Z yönünde oluşan maksimum deplasman değerleri	56
Çizelge 4.9. Farklı kalıntı yüksekliğine göre onarımı yapılan tonozların üç farklı yükleme türüne göre X, Y ve Z yönünde oluşan maksimum deplasman değerleri	57
Çizelge 4.10. Eşit kalıntı yüksekliğine göre onarımı yapılan tonozların üç farklı yükleme türüne göre kabuk (SHELL) elamanlarda meydana gelen basınç ve çekme gerilmeleri	58
Çizelge 4.11. Farklı kalıntı yüksekliğine göre onarımı yapılan tonozların üç farklı yükleme türüne göre kabuk (SHELL) elamanlarda meydana gelen basınç ve çekme gerilmeleri	62
Çizelge 5.1. Yapıya ait sonlu elemanlar modelindeki malzeme özellikleri.....	72
Çizelge 5.2. Yapıya ait tonozun onarımında kullanılan çelik profil ölçüleri	73

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Mesnetlerinden gergili (a) ve gergisiz (b) olarak yapılan kemerler.....	15
Şekil 2.2. Kemerini oluşturan kısımlar	16
Şekil 2.3. Kemer çeşitleri	17
Şekil 2.4. Tarihi yapılarda sıklıkla kullanılan tonoz çeşitleri.....	18
Şekil 2.5. Tarihi yapılarda kullanılan pandantif çeşitleri (a)kubbenin çapıyla aynı çapta, (b) kubbenin örttüğü karenin dışına çizilen daire çapında	22
Şekil 3.1. Detaylı mikro modelleme	33
Şekil 3.2. Basit mikro modelleme	34
Şekil 3.3. Makro modelleme	34
Şekil 4.1. Analizde kullanılan tonozun gerçek boyutlu modeli	42
Şekil 4.2. Analizde kullanılan spektrum eğrisi	44
Şekil 4.3 Farklı kalıntı yüksekliğine göre modellenen tonozların yer değiştirme değerlerinde dikkate alınan noktalar.....	55
Şekil 5.1. Zemin kat planı krokisi	68
Şekil 5.2. 1. kat planı krokisi	69
Şekil 5.3. Çatı katı planı krokisi.....	70
Şekil 5.4. Analizde kullanılan spektrum eğrisi	73
Şekil 5.5. İkinci aks tonozunun da yıkıldığı varsayılan ve modellemede kullanılan yapının sonlu elemanlar modeli.....	75
Şekil 5.6. Revakların geleneksel malzemeyle, develik kısmındaki tonozların çelikle onarım modeli.....	75
Şekil 5.7. Kendi ağırlığı (GRAVITY) altında elde edilen yer değiştirmeler	79
Şekil 5.8. X yönündeki deprem yüklemesi altında elde edilen yer değiştirmeler.....	79
Şekil 5.9. Y yönündeki deprem yüklemesi altında elde edilen yer değiştirmeler.....	79

Şekil	Sayfa
Şekil 5.10. Kendi ağırlığı (GRAVITY) sonucunda elde edilen eksensel gerilmeler .	81
Şekil 5.11. G+EQx yüklemesi sonucunda elde edilen eksensel gerilmeler	81
Şekil 5.12. G+EQy yüklemesi sonucunda elde edilen eksensel gerilmeler	81
Şekil 5.13. Yapının tamamının G+EQy yükleme analizi yapıldıktan sonra develik kısmında oluşan gerilmeler	82
Şekil 5.14. Yapının tamamının geleneksel malzemeyle onarımı modeli.....	83
Şekil 5.15. Kendi ağırlığı (GRAVITY) altında elde edilen yer değiştirmeler	84
Şekil 5.16. X yönündeki deprem yüklemesi altında elde edilen yer değiştirmeler....	84
Şekil 5.17. Y yönündeki deprem yüklemesi altında elde edilen yer değiştirmeler....	84
Şekil 5.18. Kendi ağırlığı (GRAVITY) sonucunda elde edilen eksensel gerilmeler	86
Şekil 5.19. G+EQx yüklemesi sonucunda elde edilen eksensel gerilmeler	86
Şekil 5.20. G+EQy yüklemesi sonucunda elde edilen eksensel gerilmeler	86

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Harcın duvar örülmesinde ve kemer yapımında kullanılması (Tokat Hatuniye Medresesinde tuğla ve harç görüntüsüne ait bir kesit)	7
Resim 2.2. Horasan harcının makro yapısını gösteren kesit görüntüsü, harç içindeki tuğla kırığı ve doğal agrega birlikte kullanılmıştır	8
Resim 2.3. Harman tuğlası ve uygulama örneği (Niksar Kırkkızlar Türbesi)	10
Resim 2.4. Segovia/İtalya (128 Gözlü Su Kemer).....	14
Resim 2.5. Üç farklı kemer konfigürasyonundan oluşan Pont du Gard.....	14
Resim 2.6. Kubbenin örttüğü karenin dışına oturan kubbede pendentif uygulaması	21
Resim 2.7. Kethüda Yahya Ağa Çeşmesi	24
Resim 5.1. Deveci Hanı avludan görünüşü.....	67
Resim 5.2. Yapının tamamen çökmüş birinci aksı(a) ve çökmemesi için alttan yapılan desteklerle ayakta duran ikinci aksı (b).....	74

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
Ca(OH)_2	Sönmüş kireç
CaCO_3	Kalsiyum karbonat
EQ_x	X yönünde tanımlanmış deprem yükü
EQ_y	Y yönünde tanımlanmış deprem yükü
F_m	Basınç emniyet gerilmesi
F_m	Taşıma gerilmesi
$F_{m(\text{çek})}$	Çekme emniyet gerilmesi
τ_m	Kayma sınır gerilmesi
τ_o	Çatlama emniyet gerilmesi
μ	Sürtünme katsayısı
σ	Gerilme
G	Yapının kendi ağırlığı
R	Yapı önem katsayısı
SiO_2	Silisyum oksit
T	Period
Z_2	Zemin sınıfı

Kısaltmalar	Açıklama
ABYYHY 2007	Afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmelik
EUROCODE8	Design of structures for earthquake resistance
FEM	Finite Element Method
ICOMOS	International Council on Monumentsand Sites
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

1. GİRİŞ

İnsanlığın dünyadaki varlığına ve gelişimine paralel olarak ürettiği ürünlerde gelişmiştir. Yapılar bu ürünlerin günümüze ulaşan en önemli örnekleridir. Çoğunlukla kagir malzemeyle, yığma yapım tekniğine göre inşa edilmişlerdir [1,2]. Kullanılan malzemenin mekanik özelliklerine ve yapım tekniğine bağlı olarak bu yapılar yüzlerce yıl ayakta kalarak günümüze ulaşmıştır. Geçmişten günümüze ulaşan bu yapıların sonraki nesillere aktarılabilmesi de bizlerin sorumluluğundadır.

Tarihi yapıların korunması ve gelecek nesillere güvenle aktarılması, insanlık tarihinin gelişimindeki verilerin saklanması açısından önemli bir olgudur. Bu yapılar yapıldıkları dönemin yapım teknikleri, kültürleri, inanışları ve sosyolojik yapıları hakkında bilgiler barındırırlar. Bu bilgi akışının sürdürülebilirliği insanlık için önemlidir.

Tarihi yapıların onarımında esas olan üzerinde barındırdığı tarihsel dönemlere ait verilerin kaybolmadan onarılmasıdır [3]. Ancak bu kuralın ülkemizde son yıllarda yapılan onarımlarda pek fazla dikkate alınmadığı görülmektedir. Bu durum ülkemizdeki tarihi ve kültürel mirasın onarım yoluyla korunmasını sağlamaktan ziyade, tarihi yapılara geri dönülemez hasarlar verilmesine neden olmaktadır.

Bu çalışmanın çıkış noktası bu tür uygulamalarla tarihi yapının özgün yapısına zarar vermeden yapılacak çağdaş müdahalelerin mühendislik açısından incelenmesini içermektedir. Bunun içinde Venedik Tüzüğü'nün (1964) 10. maddesindeki *“Geleneksel tekniklerin yetersiz kaldığı yerlerde, koruma ve inşa için bilimsel verilerle ve deneylerle geçerliliği saptanmış herhangi çağdaş bir teknik kullanılarak anıt sağlamlaştırılabilir”* ifadesi dikkate alınmıştır.

Kültür mirasımızın önemli bir parçası olan tarihi yapıların ve anıtların, deprem ve diğer çevresel etkilere karşı yapısal korunması için son yıllarda azımsanmayacak sayıda bilimsel araştırma yapılmıştır. Taş veya tuğla taşıyıcı sisteme sahip tarihi

binaların özellikle sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan hesaplarında önemli gelişmeler elde edilmiştir [4].

Tarihi binaların yapısal analizi günümüzün modern yapım tekniklerine göre üretilen yapıların yapısal analizinden farklıdır [5]. Modelleme aşamasında eleman boyutlarının tam olarak belirlenememesi, birleşim detaylarının tanımlanamaması, malzemelerin gerçek mekanik özellikleri ve sınır gerilme değerlerinin elde edilememesi gibi belirsizlikler nedeniyle hesap sonuçlarının yorumlanmasında benzer binaların yapısal davranışlarında gözlenen deneyimler ön plana çıkmaktadır [6]. Bu çalışmalar yapılırken ya literatürde kullanılan malzeme değerleri ya da yapı üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen veriler dikkate alınmaktadır. Ayrıca bu çalışmaların genel özelliği analizi yapılan yapının davranışı hakkında bilgi sahibi olmayı sağlamasıdır.

Bu çalışma ile de tarihi yapılarda hasar görmüş tonozların çelik malzeme ile onarımına yönelik hazırlanan bazı konstrüksiyon önerilerinin yapısal performansının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla farklı hasar senaryolarına göre seçilen tonoz örnekleri üzerinde çeşitli çelik konstrüksiyonlar kullanılarak onarım modelleri hazırlanmış ve bu yapılar sonlu elemanlar metoduyla analiz edilmiştir. Ayrıca ortaya çıkan yeni konstrüksiyonun mevcut yapıda meydana getireceği mekanik etkiler incelenmiştir.

Çalışmada öncelikle tarihi yapıların taşıyıcı sistemlerinin genel mimari ve strüktürel özellikleri, tarihi yapılardaki yük taşıma prensipleri ve kapasiteleri incelenmektedir. Öncelikle tarihi yapılar çalışma kapsamına göre incelenmektedir. Bu amaçla tarihi yapılarda kullanılan malzemeler ve strüktürel sistemler incelenmektedir. Bu yapılarda ortaya çıkan hasarlar irdelenmekte ve sebepleri anlatılmaktadır. Daha sonra tarihi yağma yapıların modelleme ve analiz yöntemleri hakkında bilgi verilmektedir.

Daha sonra hasar görmüş bir tonoz üzerinde çelik konstrüksiyon kullanılarak restorasyon önerileri hazırlanmıştır. Bu örneklerin her biri SAP2000 de sonlu

elemanlar metoduyla modellenerek analizleri yapılmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar karşılaştırmalı tablolarla değerlendirilmiştir.

Son olarak prototip tonoz modellerinde denenen uygulamalar seçilen hasarlı bir yapıda (Tokat Deveci Hanı) sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiş analizi yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR TARAMASI

Arkeologlar insanoğlunun kültürel evrimini üç ana düzeyde tanımlarlar. Bunlar ; Taş Devri, Bronz Devri ve Demir Devridir. Bu tanımlamayı insanoğlunun savaşlarda kullandıkları silahlar ve günlük hayatlarında kullandıkları araç gereçlerin malzeme kökenine göre yaparlar [7]. İnsanoğlu ilk yapı yapma eylemi, doğanın olumsuz koşullarından ve vahşi hayvanlardan korunmak ve hayatta kalabilmek için kendisine küçük barınak inşa etme isteğinden doğmuştur.

İnsanoğlu önceleri kendiliğinden oluşmuş mağaralarda yaşamaya başlamıştır. Mağaranın sınırladığı alanlar yeterli gelmemeye başladığında, bu mekanları geliştirmişler ve fonksiyonlarını arttırmışlardır. Zaman ilerledikçe ve aletler geliştirildikçe çevrelerinde buldukları malzemelerle yapılar inşa etmeye başlamışlardır. Öncelikle ahşap ve taş kullanılırken, taşın bulunmadığı bölgelerde kerpiç ve ahşap birlikte kullanılmıştır. İnsanların doğadaki malzemeleri tanımaya ve işlemeye başladıkça yapım teknikleri ve kullandıkları malzemelerde gelişmiştir. Böylece, tarih öncesi insanının sığındığı yeri ya da mağarasını bırakıp kendine daha rahat ve sağlam barınak yapmaya başlamasıyla yapı inşa etme süreci başlamıştır [8,9].

Şüphesiz ki hangi malzeme çevresinde bol miktarda ise, o malzemeye bağlı yapım teknikleri geliştirmiştir. Örneğin ilkel dönemde insanlar, çevresinde bulabildiği ağaç dalları ya da kamışları çatarak oluşturduğu mekânları hayvan postlarıyla örtmüşlerdir [7]. Mısır'da bolca bulunan taş, yapıların ana malzemesi olmuş, Mezopotamya'da çok fazla taş bulunmamasından dolayı yapı malzemesi olarak kerpiç kullanılmıştır. Kerpiç, önceleri güneşte kurutularak, sonraları daha dayanıklı olması için pişirilerek tuğla elde edilmiştir. Çevrede bulunan malzemeye bağlı olarak yapım teknikleri ve mimari gelişmiştir. İnsanın sosyal ve kültürel gelişmesi, ihtiyacı olan yapıların da çeşitlilik göstermesini gerektirmiş ve mimarlık, basit yapılardan daha karmaşık yapılara doğru uzanan bir gelişme göstermiştir. İnsanoğlu zamanla becerisini temel strüktürel formlar üzerinde geliştirip taş, tuğla ya da ahşabı üst üste yığarak kendi eliyle mekânlar biçimlendirmiş, biçimlendirdiği mekânlara karşı daha duyarlı hale

gelmiş ve gitgide daha geniş mekânlar oluşturmak istemiştir. Bu nedenle geniş açıklık geçme sorunu, yeni örtü sistemleri arayışını da beraberinde getirmiştir.

İnsan, zamanla yapı yapma eyleminde kendisini geliştirip, taşları ve pişmiş kerpiçten oluşturduğu tuğlaları üst üste koyarak ve aralarını toprak, su ve çeşitli malzemeleri karıştırarak elde ettiği harçla bağlayarak yığma duvarlar elde etmiş, mekân oluşturmak için de örtü sistemleri geliştirmiştir. Önceleri düz dam biçiminde olan tavan örtüsü geniş mekânlarda yetersiz kalmış, ancak tonoz ve kubbelerle geniş açıklıkların geçilebilmesi mümkün olabilmektedir. Strüktür, yeni malzemeler ve teknolojik gelişmelere paralel olarak gelişme göstermiştir.

Yapının biçimlendirilebilmesi için, teknik sorunların tasarım aşamasında çözülmesi ve mekân kuruluşunda en etkin rolü oynayan “yapısal strüktür”ün belirlenmesi gerekmektedir. Bundan dolayı strüktürel kurgu ve bu kurguyu oluşturan strüktürel elemanların birbiriyle ilişkisi önemlidir.

Strüktür, yapı yapma eyleminin başlangıcından itibaren yapı biçimini etkilemesinin ötesinde, çoğu zaman doğrudan biçimi oluşturmuştur. Örneğin sazlardan oluşturulan ilkel kulübeler, strüktürün getirdiği zorunluluktan dolayı dairesel planlıdır. Tarımın başlamasıyla birlikte yerleşmelerin nehir kenarlarında ve ovalarda gelişmesi, ilk inşaat malzemesi olarak insanların çevresinde bolca bulunduğu sazları kullanması fikrini oluşturmuş olmalıdır. Strüktür, yapım yöntemleri ve malzemeden tamamen bağımsız değildir. Her malzemeden istenilen strüktür ve biçim elde edilemeyeceği gibi farklı malzemelerden aynı tür strüktörü elde etme olasılığı da sınırlıdır. Örneğin betonarme ya da çelikten yapılan bir strüktür kerpiçten yapılamaz [10].

Geleneksel strüktür, çağdaş malzeme ve teknikler (betonarme, çelik, v. b.) geliştirilmeden önce, doğal malzemelerin olanakları ile gerçekleştirilmiş strüktürdür. Mimarlığın ilk örneklerinden başlayarak, çağdaş strüktür sistemlerinin başlangıcı olarak kabul edilen çeliğin yapılarda kullanılması ve betonarme iskelet sistemlerin yapımına kadar uzanan süreci kapsar. İnsanoğlu, bu süreçte doğadan elde ettiği malzemelerle ve bu malzemelerden kendi eliyle ürettikleriyle yapılar

biçimlendirmiştir. İlk barınaklar mağaralar iken, sonraları çatdığı ağaç dalları, üst üste yığıldığı taş bloklar ilk mimari strüktürler olmuştur.

2. 1. Tarihi Yapılarda Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Tarihi yapılarda kullanılan ve günümüze kadar ulaşan malzemeler genellikle; taş, tuğla, ahşap ve harç olarak dört ana grupta toplanabilir. Bu malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, yığma yapıların yük taşıma performansını çok yakından etkiler. Bu özellikler; dayanıklılık, su emme katsayısı, basınç dayanımı, çekme dayanımı, kayma dayanımı ve ısı genleşme özellikleridir [11].

Geçmişten günümüze kadar ulaşmış tarihi yapılar incelendiğinde, bu yapılarda kullanılan taş, tuğla ve harç özelliklerinin çok fazla çeşitlilik gösterdiği görülmektedir. Bazen aynı yapı içinde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri bile değişiklik göstermektedir. Örneğin tarihi yapılarda kullanılan harç yapının yapıldığı döneme, yapıldığı yere ve bölgenin iklim durumuna göre farklılıklar göstermektedir.

2.1.1. Harç

Bağlayıcı malzeme, dolgu malzemesi ve suyun belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen, şekil verilebilen, yapışma ve katılaşma özelliği olan malzemeye harç denir. Harçlar, içinde kullanılan bağlayıcı malzemelere göre alçı harcı, kireç harcı, çimento harcı vb. harçları olarak ya da kullanıldıkları yere göre duvar harcı ve sıva harcı olarak adlandırılırlar [12].

Yapıda harç kullanımının temel amacı, taş, tuğla, kerpiç gibi belirli büyüklükteki yapı bileşenlerinin birbirileri ile oluşturduğu derzleri doldurarak bir yığma yapı elemanı oluşturmak ve bu elemanın bütün olarak davranmasını sağlamaktır (Resim 2.1). Böylece harç, her bir elemana gelen yüklerin birbirlerine aktarımında köprü vazifesi görmektedir.



Resim 2.1. Harcın duvar örülmesinde ve kemer yapımında kullanılması (Tokat Hatuniye Medresesinde tuğla ve harç görüntüsüne ait bir kesit)

İlk kullanılan harç, çamurdur. Çamurun güçlü bir duvar yapısı için elverişli olmadığı açıktır. Toprakten elde edilen kerpiç ve tuğlanın yapı malzemesi olarak kullanılması harcın doğmasına neden olmuştur. Kireç, kum ve su karışımından oluşan bu bağlayıcı, taş ve tuğla duvar yapımında kullanılmaya Roma döneminde başlamıştır [13]. Kum ve kireç karışımı içinde pişmiş kilin veya doğal puzolan olarak bilinen volkanik tüfün suyla karıştırılmasıyla zamanla sertleşen bir bağlayıcı elde edilmiştir. Kirecin iyi pişirilmesi ve puzolan maddesinin kimyasal bileşenlerinin oranına göre bu bağlayıcının dayanımı ve dayanıklılığı değişmektedir [14].

Tuğla kırığı ve kireç kullanılarak hazırlanan harç tarihi yapıların inşasında kullanılan en önemli bağlayıcı malzemelerindendir. Bazı uygulamalarda harcın içerisine kum katılırken, bazılarında nohut büyüklüğünde parçalar halinde tuğla veya kiremit kırıkları gibi seramik malzemelere rastlanmaktadır (Resim 2.2) [15]. İçine tuğla veya kiremit kırıklarının katıldığı harç karışımları, çimento harçlarından farklı bir yapıya sahiptir. Bu harçlar tuğla ve doğal taşlarla yaptığı aderans sayesinde kompozit ve dayanımı yüksek taşıyıcı bir yapı taşını meydana getirmektedir



Resim 2.2. Horasan harcının makro yapısını gösteren kesit görüntüsü, harç içindeki tuğla kırığı ve doğal agrega birlikte kullanılmıştır [18]

Tarihi yapılarda kullanılan harçların fiziksel özelliklerinin ve hammadde bileşimlerinin belirlenmesi yeni hazırlanacak onarım harçlarında aranacak özellikleri belirlemek açısından önemlidir. Bu nedenle, tarihi harçların bu özelliklerinin belirlendiği çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bunlardan, örneğin Orta Çağ'da Pisa'da inşa edilen tarihi yapılarda kullanılan bazı kireç harçlarında gözenekliliğin yaklaşık olarak %35 – %55, yoğunluklarının ise 1,10 – 1,70 gr/cm³ arasında değiştiği tespit edilmiştir [16]. Benzer olarak, Anadolu'da, bazı Selçuklu dönemi yapılarında kullanılan kireç ve hidrolik harçlarında gözeneklilik ve yoğunluk değerleri de yukarıda verilen sınırlar arasında bulunmuştur [17].

Tarihi harçlardan olan horasan harcı ve sıvaları hidrolik özelliklerinden dolayı suya karşı dayanıklıdır. Hamam yapılarındaki sıvalar, su ile doğrudan veya yüksek nemin yoğunlaşması nedeni ile sürekli temas halindedir. Sıvanın yapısında bulunan kalkerleşmiş kireç (CaCO₃) gözenek suyunun içinde çözülmemekte ve yeniden çökelmektedir. Bu süreçte sıva tabakası bozulmaya uğrayarak tabakalara ayrılmış olmasına karşın, çöken kalsiyum karbonat sayesinde kopmamaktadır. Bu durum sıvaların iç kısmında da gözlenmektedir. Yer yer çözünen kalsiyum karbonat, harç

içindeki tuğlaların gözeneklerinde yeniden çökelip sıvanın dağılmasını önleyerek onları dayanıklı hale getirmektedir. Bu gözlemler horasan harcı ve sıvalarının ıslak mekânlar için kullanılabilecek en uygun malzemeler olduğunu göstermektedir [18].

Tarihi yapıların korunması, onarımı ve güçlendirilmesi çalışmalarında harç ve sıva malzemelerin özelliklerinin ve harç karışımlarında kullanılan malzemelerin bilinmesi yapının mevcut durumunun değerlendirilmesi ve onarımda kullanılacak yeni malzemelerin seçimi açısından çok önemlidir. Bu amaçla, restorasyon çalışmalarında, özgün malzeme özellikleri deneysel olarak belirlenmeli, yeni kullanılacak malzemelerin bu özelliklere sahip olmasına özen gösterilmelidir [19].

2.1.2. Tuğla

Tuğlalar, ilkel örneklerde güneşte kurutulmuş kerpiçten yapılmıştır. Fakat bu şekilde üretilen tuğlaların yağmura karşı mukavemeti olmadığından daha sonraları 1000°C'ye kadar pişirilerek dayanımı artırılmıştır. Ana malzemesi kil olan bu tuğlalar, ilk prefabrike elemanları temsil eder [20].

Esası kildir fakat içerisinde kum, kireç, alçı, demir birleşikleri, organik maddeler de bulunur. Diğer maddelerle karışmış olan kil taneleri yüksek ısıda pişirilince kaynaşır ve taşlaşmış kütle olur. İçerisinde fazla kum bulunursa mukavemetsiz olur. Kil fazla olursa kuruma esnasında çatlamalar olur. Kil içerisinde bulunan diğer minerallerle birleşir ve asit karakterinde tuzlar meydana getirir. Pişmede çatlamaya yol açar, tuğla yüzeyinde çiçeklenmelere yol açar [21].

Yapılan araştırmalar sonucu tuğlanın önemli bir yığma elemanı olarak Roma döneminden çok önceleri kullanıldığı görülmüştür. Tarihi yapılarda, pişmiş kilden üretilen tuğlayı oluşturan malzemeler genellikle dere yataklarında yüzeysel olarak biriken kum taslarının kalıntılarından elde edilirdi.

Pişmiş kilden üretilen tuğlalar, görünümleri ve işlevlerine göre sınıflandırılabilir. Tarihi yapılarda kullanılan tuğlalar saf kaolin ve kil karışımının fırınlarda yüksek

ateş altında pişirilmesiyle elde edilir. Fırın teknolojisinin bulunmadığı yerlerde, bazı tarihi yapılarda kullanılan tuğlaların doğrudan güneş ısısı altında üretildiğine de rastlanmaktadır [4,22].

Tuğla, ahşap ve taşın zor elde edildiği bölgelerde, yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır (Şekil 2.3). Geleneksel büyük örtü sistemlerinin esas elemanlarını oluşturan kemer, tonoz ve kubbe, kerpiç ve tuğlanın ana malzemesi olduğu bölgelerde ortaya çıkmıştır. Her yerde kolay bulunup üretilmesi ve ucuz olması, yapının ana malzemesi olma niteliğini kazandırmıştır. Tuğlanın taş gibi yalnız basınca dayanıklı bir malzeme olması nedeni ile yapı taşıyıcı sistemi basınç alacak şekilde biçimlendirilmiştir. Böylece kütsel (masif) bir yapı biçimi doğmuştur [13].



Resim 2.3. Harman tuğlası ve uygulama örneği (Niksar Kırkkızlar Türbesi)

Tuğlayı oluşturan malzemenin kalitesi, tuğlanın örülme şekli, kullanılan bağlayıcı harç ve tuğlanın iyi fırınlanıp fırınlanmadığı; tuğlanın dayanımını etkileyen faktörlerdir [4].

Tuğlaların mekanik özellikleri imal edildiği döneme, yapıldığı malzemeye, yapım tekniğine ve imal edilen tarihlere göre farklı mekanik özellikler gösterebilir [23]. Ancak tarihi yapılarla ilgili yapılan analiz çalışmalarında yaklaşık değer olarak Çizelge 2.1'deki veriler kullanılmaktadır. Bu çalışmada bu değerler referans alınmıştır.

Çizelge 2.1. Yapısal analiz çalışmalarında kullanılan tuğlaların ortalama mekanik özellikleri [4,24,25]

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

2.1.3. Doğal taş

Taş en eski yapı malzemelerinden biridir ve kalıcı olması düşünülen yapıların inşaatında özellikle tercih edilmiştir. Taşın tarihi yapılarda yaygın olarak kullanılmasının nedeni; hemen hemen her yerde ve arazi koşullarında kolaylıkla bulunabilmesinin getirdiği avantajdır. Taşın yapısal dayanıklılığı, jeolojik ve kimyasal özellikleri ile incelenebilir. Taş basınç kuvvetlerine karşı çok dayanıklı, çekme kuvvetlerine karşı ise oldukça zayıftır [4,26].

Doğada bulunan ya da taş ocaklarından çıkarılan, homojen yapılı, atmosfer etkilerine dayanıklı olan doğal taş, akıcı kıvamdaki magma tabakasının zamanla soğuması ve sertleşmesi sonucunda oluşan bir malzemedir [27].

Basınç kuvvetine karşı dayanıklı, çekme kuvvetine karşı zayıf bir malzeme olan taş, bu özelliklerinden dolayı kusursuz bir yığma yapı elemanı malzemesidir. Doğada da bolca bulunmasından dolayı basınca çalışan kemer, kubbe ve tonozlu yapılarda sıklıkla kullanılmıştır. Taştan yapılmış yapı elemanlarının dayanımını genellikle taş ve harç birleşiminin ortak davranışı belirler [4,28].

Taşın sağlam ve doğa koşullarına karşı en dayanıklı malzeme olmasına karşın taşla çalışılması zordur ve daha çok işçilik gerektirir. Hitit, Asur ve Mısırlılar granit, kireç taşı ve kum taşını başlıca tapınaklarının strüktüründe kullanmışlar ve yüzeyini mermerle kaplamışlardır.

Büyük açıklıkların geçilmesinde, kemer, tonoz ve kubbe yapımında, basınç yüklerini taşıyan duvarlar ve ayaklarda kullanılmıştır. Tarihi yapılarda kullanılan taş yığma

yapı elemanları büyük dayanım değeri göstermektedir. Tas yığma yapı elemanlarının kayma dayanımı genel olarak basınç dayanımının %25'i kadardır [29].

2. 2. Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Elemanları

Tarih sürecinde çok farklı uygulamalar sergileyen geleneksel yığma yapılarda strüktürel elemanların irdelenebilmesi için öncelikle yığma yapı kavramına değinmek gerekmektedir. Taş, tuğla, kerpiç ve ahşap gibi yapı malzemelerinin üst üste yerleştirilip kendi ağırlıkları ile ya da harç ile birleştirilerek duvar, kemer, kubbe, tonoz, sütun gibi taşıyıcı elemanlar oluşturması şeklindeki yapı yapımına yığma sistem denir [30,31,32].

Yığma yapılar, dış yüklere duvar, kemer, tonoz, kubbe, lento gibi elemanları ile karşı koyarlar. Bu strüktürel elemanlar; çekme, basınç, kesme, eğilme, burulma gibi kuvvetlerle karşı karşıyadırlar. Yapı elemanları geometrik biçimleri ve üretilmiş oldukları malzemenin özelliklerine bağlı olarak yukarıdaki zorlanma biçimlerinden yalnızca birine ya da tümüne birden dayanıklı olabilirler. Örneğin kemerli ve kubbeli bir yapıda bütün elemanlar basınç kuvvetiyle zorlanır. Bu teknik sayesinde taş ve tuğla, binlerce yıldan bu yana yapılarda çok yaygın bir kullanım alanı bulmuştur [33].

Statik hesaplar bilinmeden önceki dönemlerde bu elemanların kalınlıkları, oluşturuldukları malzemenin sertliğine ve geometrik şekline göre belirlenmiştir. Bu malzemelerin çekmeye karşı direnci düşük olduğundan eleman kesitleri arttırılarak eğilme etkisi azaltılmaya çalışılmıştır.

Strüktürel elemanların boyutu ve oranı, üstlenmiş oldukları strüktürel görevle doğrudan ilintilidir, bundan dolayı içinde bulundukları mekânın boyut ve ölçeğinde görsel bir belirleyici görev de görürler. Taşıyıcı duvar, dikme, kubbe gibi strüktürel biçimlerin oranları, bu elemanların strüktürel kurgudaki önemini ve yapıldığı malzemenin özelliklerini yansıtır. Sıkıştırılmaya dayanıklı ancak eğilme bakımından

zayıf olan yığma duvar, aynı işi yapan güçlendirilmiş bir beton duvardan daha kalın yapılırken, çelik bir kolon da aynı yükü taşıyan ahşap dikmeden daha ince olur [34].

2.2.1. Kemer

Kemerler tuğla ya da taş parçalarının yan yana yay şeklinde dizilmesiyle yalnız basınca çalışarak üzerine gelen yükleri yanlardaki iki mesnede ileten yığma yapı elemanlarıdır [11]. Kemerler, yığma yapı duvarlarında boşluk oluşturmak için doğrusal elemanların yetersiz kaldığı durumlarda kullanılmıştır. İlk kemer örneği olarak birbirine dayanarak açıklığı örten iki taş parçası kullanıldığı bilinmektedir. Bu yapı bundan sonra yapılacak pek çok kemere ilk örnek oluşturduğu düşünülmektedir.

Kemer formu, yığma yapılarda hem yapısal hem de estetik kaygılara yönelik olarak sıkça kullanılmaktadır. Geniş açıklıkları geçmek için oldukça uygun olan bu form, geometrik biçiminden dolayı genellikle basınç kuvvetlerinin etkisinde kalır. Taş ve tuğla gibi yapı malzemeleri oldukça büyük basınç dayanımına sahip olduklarından, kemer formunun temel yapı malzemeleri olmuşlardır. Zaman içerisinde kullanılan malzeme ve inşaat tekniklerinde önemli bir değişiklik olmamasına rağmen kemer tiplerinde büyük gelişmeler gözlenmiştir. Değişik kültür ve uygarlıklarda, hem işlevsel hem de dekoratif amaçlı çok farklı kemer formları kullanılmıştır [35].

Kemer formunun ilk örnekleri M.Ö. 3000 yıllarında Mezopotamya’da Sümerlere ait yeraltı mezarlarında görülmüştür. Mısırlılara ait olan örnekler, bu uygarlığın da aynı dönemlerde kemer formunun yapısal potansiyeli hakkında bilgi sahibi olduklarını göstermektedir. Ancak, kemer formunu bulanlar her ne kadar Sümerler ya da Mısırlılar olsa da, en etkin ve göz alıcı şekilde kullanmayı başaranlar Romalılar olmuştur. Milattan önceki son yüzyıllarda kemer, cephelerde, portik girişlerin üzerlerinde ve kent giriş kapılarında yaygın bir şekilde kullanılarak bu uygarlığın geleneksel yapısal formu haline gelmiştir. Geniş ve dik vadilerden şehirlere su getirmek amacıyla inşa edilen Roma sukemerleri, kemer formunun kamu mimarisindeki kullanımında önemli bir devrim olmuştur. İlk örnekleri yeraltı yapıları olarak inşa edilen sukemerlerinin en iyi korunmuş ve bilinen örnekleri Segovia’daki

iki katlı su kemeri ve üç farklı kemer konfigürasyonundan oluşan Pont du Gard'dır (Resim 2.4, Resim 2.5), [35].



Resim 2.4. Segovia/İtalya (128 Gözlü Su Kemerleri)

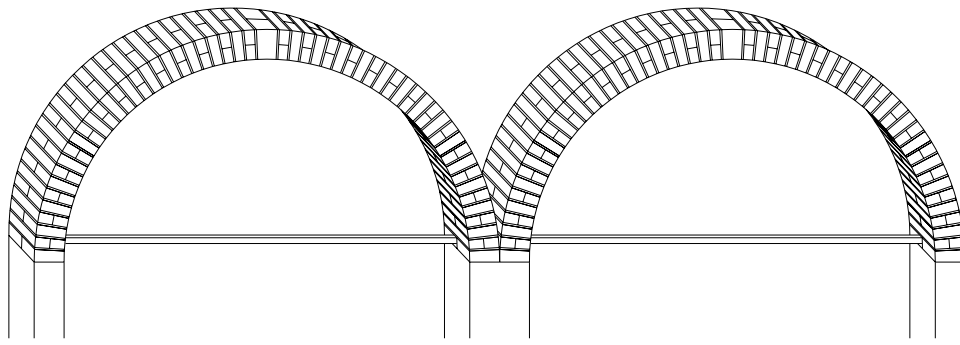


Resim 2.5. Üç farklı kemer konfigürasyonundan oluşan Pont du Gard

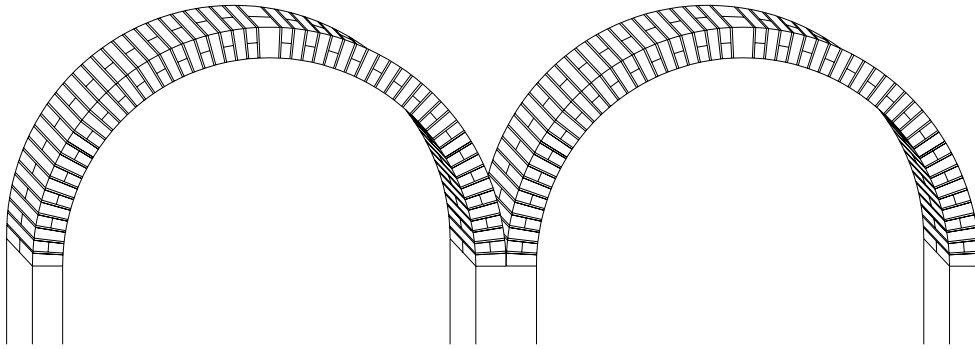
Kemerler kesit özellikleri üzerine etki eden yüklerden dolayı oluşan iç kuvvetler ve yük taşıma prensiplerinden dolayı çerçeve sistemlerinin strüktürel elemanlarına benzerlik gösterirler. Kuvvetler kemerlerin içinde, eğrisel geometrilerinden dolayı herhangi bir köşe yada birleşim noktasında yoğunlaşmadan düzgün bir şekilde

mesnetlere aktarılırlar. Kemerlerin bu geometrik formu eğilme momentlerinin çok küçük olmasını yada hiç eğilme momenti olmamasını sağlar [4].

Kemerler, yalnızca duvar boşluklarının geçişlerinde değil aynı zamanda iki sütun veya ayak arasındaki açıklığı geçmek için de yapılmaktadır. Mesnetlerinde gergi çubuklu yada gergi çubuksuz olarak yapılırlar (Şekil 2.1).



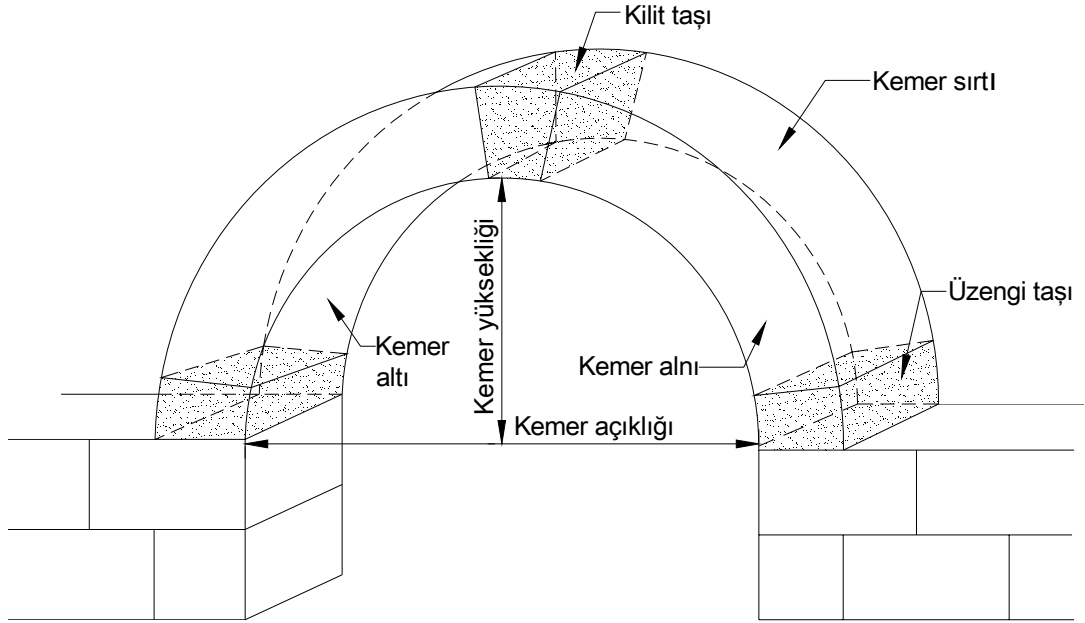
(a)



(b)

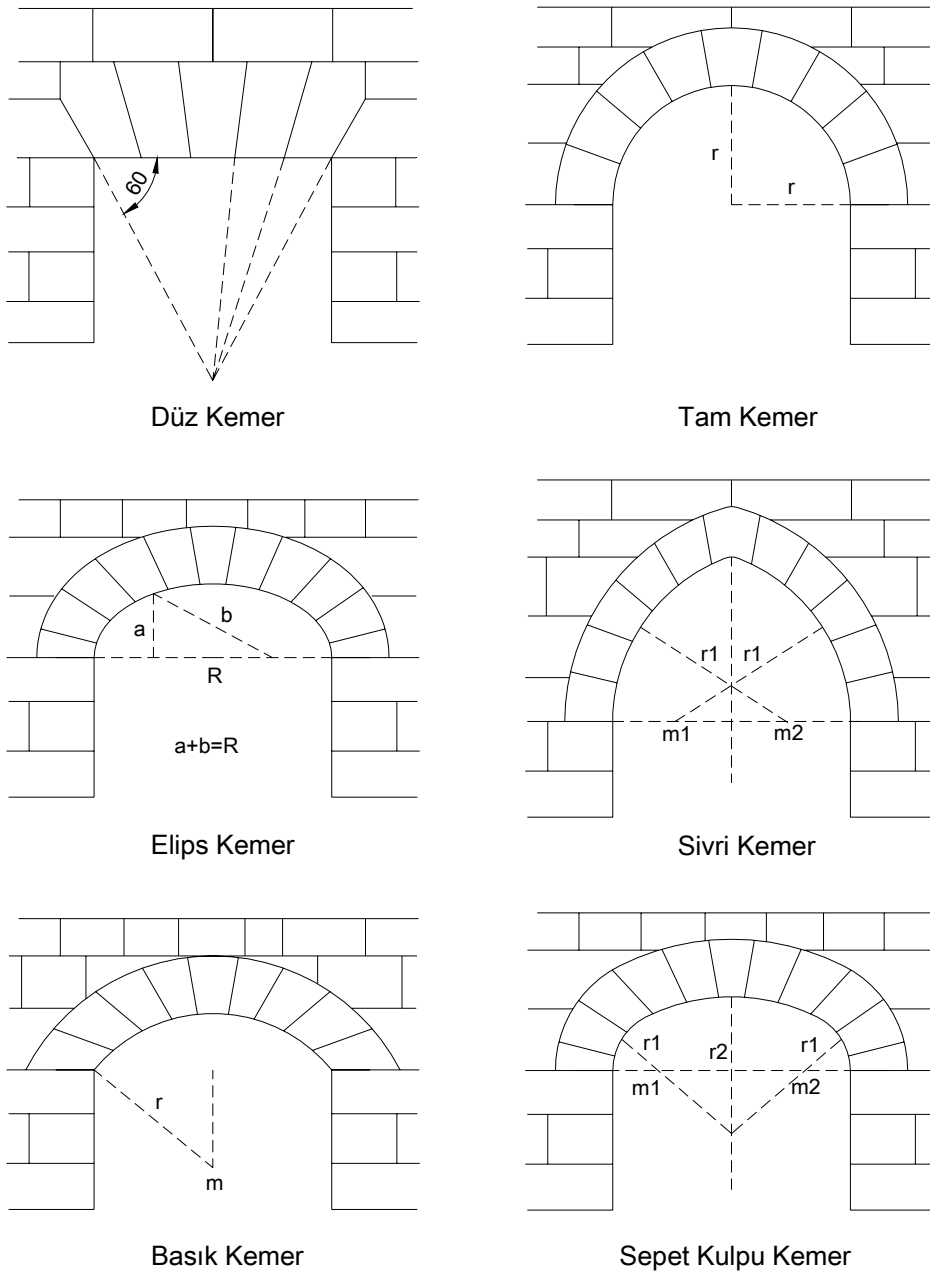
Şekil 2.1. Mesnetlerinden gergili (a) ve gergisiz (b) olarak yapılan kemerler

Kemerin tam ortasında bulunan taşa kilit taşı, oturduğu yere ayak veya mesnet, kemerin ayağa oturan kısmına üzengi, üzengiler arasındaki mesafeye kemer açıklığı, üzengi düzleminin kilit taşı altına kadar olan mesafeye kemer yüksekliği, yüksekliğin açıklığına oranına basıklık, kemerin alt yüzüne karın, üst yüzüne sırt ve cephesine alın denir (Şekil 2.2) [36].



Şekil 2.2. Kemerli oluşturan kısımlar

Kemerler farklı tarihsel dönemlerde ve medeniyetlerde çeşitli formlarda yapılmışlardır. Bu formların oluşumunda açıklığın büyüklüğü kullanıldığı yer ve yapının genel formuyla bütünlük oluşturacak şekilde ortaya çıkmıştır. Bu konuda tarihi yapılarda sık kullanılan kemer formları Şekil 2.3’de [37] verilmiştir.



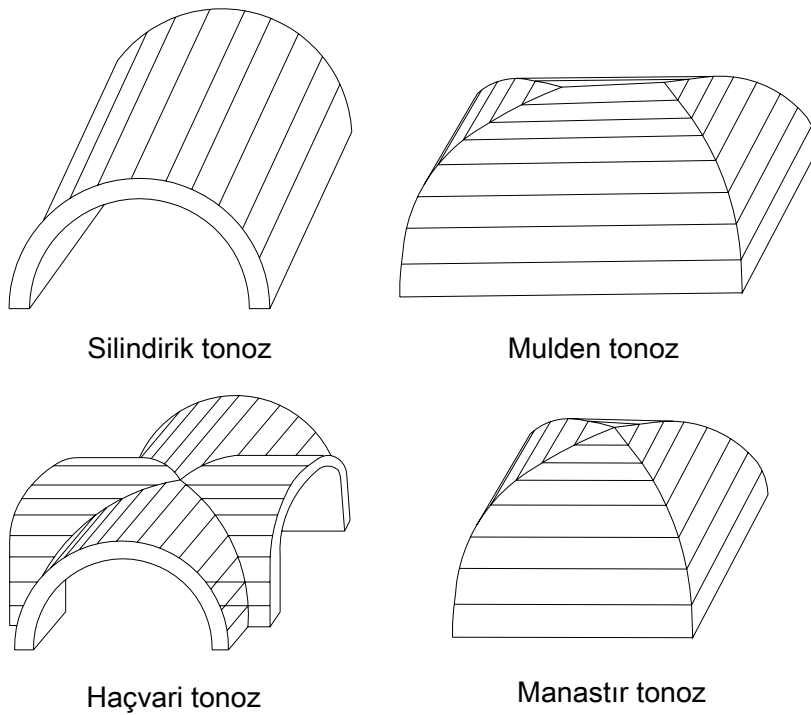
Şekil 2.3. Kemer türleri

2.2.2. Tonoz

Tonoz bir kemerin kendi düzlemine dik doğrultusunda ötelenmesi sonucu meydana gelen ve yüklerini kemerlerdeki gibi taşıyan, aynı zamanda da kabuk özelliği gösteren tek eğrilikli yapı elemanıdır. Üzerine etki eden yükleri birçok yönde tek veya çift eğrilikli bir düzlem içinde taşıyan yapısal sistemlere kabuk denir. Kabuklar,

genellikle kalınlığı diğer boyutlarına göre çok küçük olan eğrisel yapı elemanlardır. Tonzlarda, basınç kuvvetinden dolayı basınç gerilmeleri oluşur.

Tonozun mesnet noktalarında sürekli bir taşıyıcı düzlem gereklidir. Çapraz ve Haçvari tonoz, iki beşik tonozun dik olarak kesişmesinden meydana gelir. Sekil 3.3.'de tonoz çeşitleri görülmektedir [13].



Şekil 2.4. Tarihi yapılarda sıklıkla kullanılan tonoz çeşitleri

Tonozların en ilkelleri, Mezopotamya ve Mısır'da, bir duvara eğri yaslanan kemere bitişik olarak örülen birbirinden bağımsız kemerlerden oluşmuştur. Gerçek tonozun strüktürel özelliği, dayanak noktasında sürekli taşıyıcı düzlem gerektirmesidir. Örneğin Mezopotamya'da tekniğin fazla gelişmemesinden dolayı beşik tonoz, masif bir alt yapı gerektirmiştir. Bundan dolayı tonozu taşıyan duvarlar çok geniştir. Sasani döneminde, taşıyıcı duvar biraz daha hafiflemiş ve iç mekan düzeni daha gelişmiştir [38].

Roma’da tek hacimli mekânlardan birkaç bölümü olan mekânlara doğru bir gelişme olur. Bu gelişmeyi sağlayan örtü elemanı, iki beşik tonozun dik açıyla birleşmesiyle oluşan, çoğu zaman sütun ve ayaklarla taşınan çapraz tonozdur. Çapraz tonoz duvarlarla taşındığında, itme kuvvetleri duvarın dört köşesinde toplandığından, dört köşedeki payandalardan başka diğer kuvvetler kaldırabilmiş, böylece kemerlerin altında büyük pencereler açılabilmiştir. Tonozun, zor taş yontma işleri olmadan inşa edilebilmesi için, tonoz inşaatlarında taştan çok beton kullanılmış, tonozlar tuğla kaburgalar arasına beton dolgu ile inşa edilmiştir [8].

2.2.3. Kubbe

Kubbeler, kemerin simetri eksenini etrafında dönmesiyle oluşan kabuklardır. Kubbe yükü, kubbe ayakları ile mesnet yükünün düşey bileşenini kemerler, yanal bileşenleri ise kemer düzlemlerine dik doğrultudaki yarım kemerler ve gergilerle alır.

Asırlar boyunca insanoğlu kemer, tonoz ve özellikle kubbelerden etkilenmiş; mekan örtüleri, bölgesel farklılıklara ve buna bağlı olarak sosyal, teknik, kültürel ve tinsel inançlara göre çeşitli biçimler almıştır. Çoğu kültürde kemer, tonoz ve özellikle kubbe, kozmik ya da ilahi oranları ve ruhsal açıklamaları içeren geniş, sembolik anlam taşır.

Kubbenin ilk örneklerine Mezopotamya’da rastlanmakla birlikte kubbe, Roma, ilk Hristiyan, Sasani, Ermeni, Bizans ve İslam mimarilerinde de strüktürel eleman olarak kullanılmıştır. Tarihteki ilk kubbesel yapılar, göçebe çadırlardır. Göçebe toplumların olduğu ilkel dönemlerde, yıldızlı gökyüzü ve kozmosla olan bağlantılar önemliydi. Bundan dolayı barınakları daireseldi. Örtülecek mekânın dairesel olması, kubbe fikrini doğurmuş olmalıdır. Önceleri koni biçiminde oluşturulan sazdan kubbeler, yarım daire kubbeye doğru bir gelişim göstermiştir. Bu kulübeler Somali gibi göçebe toplumlarda hala görülmektedir. Sazdan ve ağaçtan yapılan konik ya da küresel biçimdeki basit göçebe kulübeleri, marangozluğa dayalı birleşimlerle daha dayanıklı, geniş açıklıklı ve yüksek yapılara dönüştü. Önceleri hafifliği, esnekliği ve depreme dayanıklılığı açısından ahşap kubbeler tercih edildi. Fakat ahşap kubbeler,

dini yapılarda sonsuzluk duygusunu veremiyordu. Böylece kubbe yapımında taş ve tuğla kullanıldı. Ahşap kubbelerden daha uzun ömürlü olmakla birlikte daha ağır olan taş ve tuğla kubbenin oturduğu duvar, itkiler sonucu eğiliyordu. Ucuz ve kolay elde edilebilen bir malzeme olan kerpiç ile tonoz ve kubbe konstrüksiyonunun gelişimi; Mezopotamya, İran ve Orta Asya'da kubbeli yapı tarihinin ilk aşaması olmuştur [38].

Osmanlı dini mimarisinde, mekânsal gereklilik sonucu merkezi planlı yapılar ortaya çıkmış, bunun sonucunda da kubbe ve yarım kubbeler, en çok kullanılan strüktürel elemanlar olmuştur. Erken dönemlerde, duvarlar tarafından taşınan kubbenin bulunduğu dörtgen mekânlar, duvardan kubbeye geçişi sağlayan kasnaklar yardımıyla oluşturulup yapı, kasnak dayanaklarıyla desteklenmiştir. Sonraları daha aydınlık ve geniş mekan arayışları, tek kubbenin oturduğu duvarlarla sınırlandırılmış mekan yerine merkezi kubbenin yanlara doğru çeşitli öğelerle genişletilmesini zorunlu kılmıştır. Bu nedenle orta mekânı oluşturan merkezi kubbe, duvarlar yerine ayaklara oturtularak 'kubbeli çardak' denilen çekirdek oluşturulurken yarım kubbeler, strüktürel ve mekânsal gelişime katkı sağlamıştır. Yarım kubbenin oturduğu duvar, diğer duvarlara göre daha kalın yapılı ve payandalar belirginleşir. Böylece diğer duvarların taşıyıcılığı azaltılır [39].

Osmanlı döneminde kubbe yapımında farklı teknikler geliştirilmiş, kare dışında altıgen ve sekizgen üzerine de kubbe oluşturulmuştur.

2.2.4. Pandantif

Tromp'a göre daha gelişmiş bir geçit elemanıdır. Kubbeyi taşıyan kemer ile kubbe kaidesinin arasını kapatan küresel üçgendir. Alt yapıdan çok, örtünün biçimine bağlı olan pandantifin geometrik tasarımı iki şekilde olabilir:

Kubbenin çapı ile aynı çaplı bir küresel üçgen, Kubbenin örttüğü karenin dışına çizilen daire çapında bir küresel üçgen.

Birinci durumda, pandantif ile kubbe sürekli bir yüzey oluştururlar. Pandantife kubbeli örtünün bir parçası olarak bakılabilir. İkinci durumda, pandantif örtüden ayrılmış alt yapının bir uzantısı olarak görülür. Tarihi yapılarda küresel üçgen bu ikinci tarzda kullanılmıştır.

Kare plandan küresel üst örtüye geçişteki zorluklar Romalılar için hep bir sorun olmuştur. Bu sorunun üstesinden ilk olarak Bizanslılar gelmiş ve pandantifi bulmuşlardır. Pandantifin kullanıldığı ilk yapı İstanbul'daki Ayasofya'dır. Pandantif, Ayasofya'dan sonra Selçuklu ve Osmanlı'lardaki camilerde kullanılmıştır. İlk tromplu kubbeleri ise İran'da Sasaniler uygulamıştır.

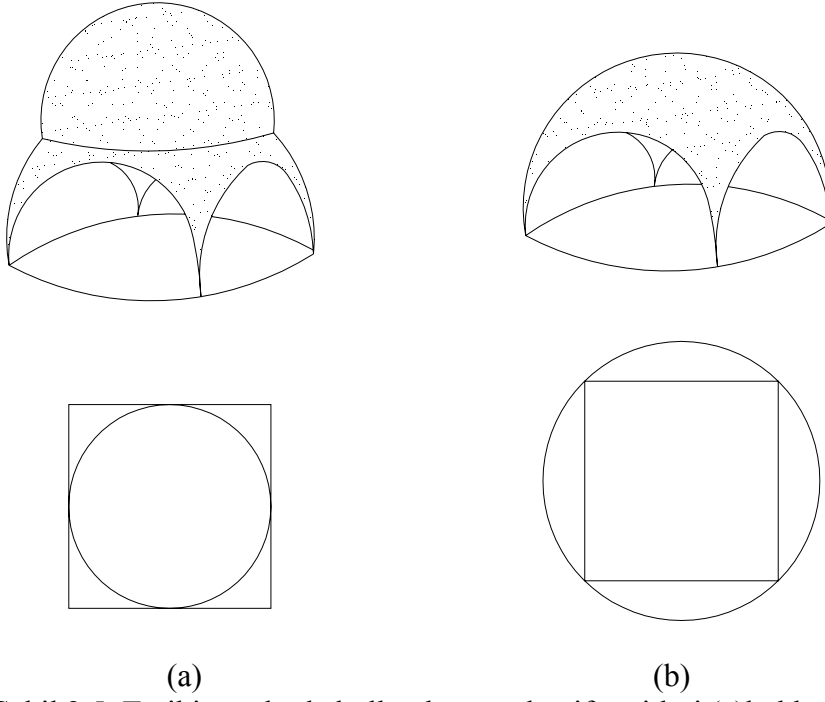


Resim 2.6. Kubbenin örttüğü karenin dışına oturan kubbede pandantif uygulaması

Bir kubbeyi taşıyan kemerler ile kubbe kaidesinin arasını kapatan ve kare bir plandan kubbenin dairesel kaidesine geçmeyi sağlayan küresel üçgendir [40]. Trompun daha gelişmiş olan pandantif, Yakınoğu'nun çeşitli ülkelerindeki ilkel denemelerde görülür. Pandantifin bulunması, küçük çaplı kubbelerde taşıma tekniğinde geçiş öğelerinin denenmesinden doğmuş olabilir. Küresel bingi olarak da adlandırılan pandantif, örtü biçimine bağlı olarak iki şekilde uygulanabilir:

1. *Kubbenin çapı ile aynı çapta (yelken tonoz):* Örtünün bir parçası gibi sürekli yüzey oluşturur.

2. *Kubbenin örttüğü karenin dışına çizilen daire çapında:* Pendantifin en çok kullanıldığı şekil budur. Örtüden ayrılmıştır, taşıyıcıların parçasıymış gibi görülebilir [10]. (Şekil 3. 23)



Şekil 2.5. Tarihi yapılarda kullanılan pendantif çeşitleri (a)kubbenin çapıyla aynı çapta, (b) kubbenin örttüğü karenin dışına çizilen daire çapında

2. 3. Tarihi Yığma Yapıların Hasar Görmesinin Nedenleri

Yığma yapılarda hemen tüm duvarlar taşıyıcı olduğu için duvarlardaki her türlü hasar doğrudan taşıyıcı sistemi etkiler ve bu açıdan betonarme yapılardaki gibi taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan bölüm hasarı gibi bir ayırım yapılamaz. Yığma yapıların duvarları oturmalarla karşı çok duyarlıdır. En küçük temel oturması duvarlarda hemen gözlenir. Bunun nedeni yığma duvarın gevrek nitelikli olması ve çatlamadan dayanabileceği elastik gerilim ya da yüklerin çok düşük olmasıdır. Dayanımı zayıf bir malzeme olduğu için kolayca hasar görür.

2.3.1. Zeminden kaynaklanan hasarlar

Yapının üzerine oturduğu zeminin mukavemetinin düşük olması, ya da homojen olmaması zamanla yapıda bazı hareketlerin oluşmasına, dönme, farklı oturma gibi gözle görülebilen bozulmalara neden olabilir. Temel altındaki zemin homojen olmadığında yapıda çatlamlar görülür. Çatlakların yapıdaki yerlerine, doğrultularına bakılarak hasar nedeninin zeminden kaynaklanıp kaynaklanmadığı hakkında kabaca fikir edinmek mümkündür [41].

Bir yapının fay hattı üzerinde yer alması, ya da oluşumunda çatlaklar bulunan bir kaya üzerinde yapılmış olması da onun bozulma, yok olma riskini arttıran etkenlerdir [41].

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 itkisiyle sıkışması sonucu oluşur. Yatay kuvvetler de oturmalarla neden olabilir. Düzgün oturmalar, yapının stabilitesini ve kullanım süresini genellikle tehlikeye sokmaz ve hiçbir oturma hasarı da doğurmaz. 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 artırır [42].

Temel oturmalarının başlıca nedenlerini şöyle sıralayabiliriz.

1. Yer altı suyunun alçalıp yükselmesi
2. Yapıdaki yük sisteminin değişmesi veya yapıda yapılacak değişiklikler
3. Kazıkların deformasyonu, hava ile teması veya çevre faktörleri sonucu çürümesi
4. Yapı çevresinde yapılan kazılar, etrafında bırakılan çukurlar
5. Dinamik etkiler, titreşimler vs [13].



Resim 2.7. Kethüda Yahya Ağa Çeşmesi

2.3.2. Strüktür tasarımındaki hatalar

Binaların ilk tasarımından kaynaklı, taşıyıcı sistemleriyle alakalı boyutlandırma hataları varsa; örneğin duvar, ayak, payanda gibi taşıyıcılar yatay ve düşey yükleri karşılayacak kesitlerde yapılmamışlarsa ciddi hasarlar ortaya çıkabilir. Kesitleri yetersiz bir duvar zamanla bel verir, aynı durum payandalarda da ortaya çıkarsa destek verdiği kemer, tonoz ve kubbede açılmalara, hatta sistemde yıkılmalara neden olabilir. Taşıyıcı sistemi hatalı tasarlanmış olan anıtların belki de en görkemlisi İstanbul Ayasofya'sıdır. İlk tasarımında şimdiki kubbesinden çok alçak bir yelken tonozla örtülen bina, 31 m. açıklığında bir kubbeyi destekleyecek payanda düzenine sahip olmadığı ve çok hızlı inşa edildiği için kubbenin itkisiyle yan duvarlarda açılmalar olmuş ve kubbe geçirdiği ilk deprem sonrasında çökmüştür [41].

2.3.3. Hatalı malzeme kullanımı

Antik dönemden günümüze, önemli yapıtların özenle seçilen malzemelerle yapılması mimarlık geleneğidir. Anadolu'nun birçok ören yerinde rastlanan tapınak, tiyatro gibi anıtlar iri boyutlu, dayanıklı taşlarla yapıldıkları için günümüze kadar

gelebilmişlerdir. Mimar Sinan İstanbul'un genel görünümünü etkileyen Şehzade, Süleymaniye, Mihrimah Sultan külliyelerini, Osmanlı döneminde Bakırköy çevresinde çıkarılan küfeki taşının yoğun ve homojen tabakalarından hazırlanan bloklarla inşa etmiştir.

Ahşap strüktürlerde sert ağaç kullanılması yapının ömrünü uzatır. Türkiye'de ise çoğu yumuşak ağaçlarla yapılan ahşap çatkılar daha kısa ömürlü olmakta, harap strüktürlerle birlikte bir yaşam kültürünün izleri de ortadan kalkmaktadır [41].

Kullanılan malzemelerin (taş, tuğla, kerpiç, ağaç) iyi nitelikli olmaması, yapıların bozulmasını hızlandırmaktadır. Örnek olarak, taşın muhteviyatında kil tabakasının bulunması hızlı aşınmaya yol açar. Taşın binada doğadaki tabakalaşmasına uygun olarak yer alması da önemlidir. İşlenmeleri sırasında cepheye gelecek kısımlarına dikkat edilmeli, tabakasına başka bir deyişle suyuna göre biçimlendirilmelidir. Eğer blok, taşın suyuna ters olarak hazırlanır ve tabakalaşmasına dikkat edilmeden yerine konursa, bozulma tabakaların cepheden geriye doğru katman katman dökülmesi şeklinde olur. Tuğla yapılarda da tuğlanın iyi pişirilmiş olması yapının dayanımını arttıran önemli bir etkidir. Kötü tuğlalardan yapılan duvarlarda hızlı aşınma, dökülme, çukur oluşumu biçiminde yüzey kayıpları, ayrışma, dağılma şeklinde hasarlar gözlenir.

2.3.4. Kötü işçilik ve detay kullanımı

Yapıyı oluşturan bileşenlerin dayanımları açısından uygun bir bağlayıcı malzeme ve teknikle birleştirilmeleri önemlidir. Kenet ve mil gibi kesme taş yapılarda blokları birleştirmek için kullanılan elemanların iyi izole edilmemeleri nedeniyle, derzlerden içeri giren su, demirden yapılmış bu malzemelerin paslanmasına neden olmaktadır. Paslanma sırasında hacmi büyüyen kenet ve miller, yarattıkları iç gerilimle birleştirdikleri duvar bloğunu veya sütun başlığı gibi mimari bileşenleri çatlatmakta, müdahale edilmeyip bozulma ilerlediğinde, mimari öge parçalanmaktadır [41].

İlk tasarım hatalarını düzeltmek bazen çok zor olabilir, hasarlar sürekli bakım ile giderilmeye çalışılır. Görünüş açısından bir sakınca olmadığı durumlarda daha uygun bir malzeme kullanımına gidilebilir: örneğin demir mil ve kenetleri paslanmaz çelik ya da titanyum ile yenilemek uygun bir çözümdür [41].

2.3.5. Uzun süreli doğal etkenler

Doğanın değişik etkileri altında, tarihi özelliğe sahip yapıların rutin bakımlarının aksatılmasının bu yapılarda oluşacak hasarları tetikler. Isı farkları, donma çözünme döngüleriyle malzemeler yorulur, yıpranır; sıcak yaz günlerinde aşırı sıcak karşısında genişleyen malzemeler, soğuk kış günlerinde dona maruz kalır.

Suyun, kapilarite ile bina içindeki hareketi de yapı malzemelerinde hasara neden olmaktadır. Zeminden yükselen nem taşıyıcı sisteme gelen yükü fazlalaştırdığı gibi, ayrıca içinde taşıdığı tuzların duvar yüzeyinde buharlaşması sonucu çiçeklenmelere, duvarın fiziksel ve kimyasal yapısını bozucu etkilere neden olabilmektedir. Yağmur sularının bozulan bir çatı kaplaması veya deresinden dolayı binadan hızla uzaklaştırılamaması, yosun ve otların gelişmesine uygun ortamı hazırlar. Bozuk olan ayrıntı çevresinde yosunlar yerleşir, ahşap çatı ve döşemelerde mantarlar gelişir. Ciddi hasarların başlangıcı olabilecek bu bozulmaların sürekli bakımla giderilmesi gerekir.

Rüzgarın taşıyarak getirdiği ve çatılara, duvar oyuklarına, boşalmış derzlere yerleştirdiği tohumların gelişmesiyle birçok bakımsız binanın cephesinde, üstünde incir, aylandız gibi ağaçların kök salıp geliştiği gözlenmektedir. Rüzgar, özellikle deniz tuzu ve kumlarla birlikte etkiğinde hızlı ve ciddi yüzey aşınmalarına neden olabilmektedir.

Kuşlar, böcekler, fareler gibi hayvanlar da anıtlara zarar veren etkinliklerde bulunur. Liken ve mikroorganizmalar taşların üzerine yerleşerek onların bozulmasına neden olurlar [41].

2.3.6. Doğal afetler

Tarihi yapıların kütlece ağır ve sistem özellikleri bakımından rijit olmaları, deprem etkilerine karşı rijit cisim davranışı göstermelerine sebebiyet verir. Yatay zemin hareketleri sonucu her bir nokta yaklaşık aynı deplasmanı yapar. Titreşim periyotları $T = 0,15 - 0,45$ sn. arasında değişir. Ağır olmaları neticesinde etkiyen deprem kuvvetleri de çok büyük olur. Zemin hakim periyodunun yapının titreşim periyoduna yakın olduğu durumlarda rezonans söz konusu olur, özellikle ağırlık merkezi ile rijitlik merkezinin üst üste çakışmaması ve binadaki asimetrik özellikler depremin etkisiyle oluşacak burulma etkilerine davetiye çıkarır.

Depremin tarihi yapılar üzerindeki ikinci şok etkisi ise, deprem dalgalarının zemin boşluk suyu basıncını arttırması, çok ince daneli ve üniform kum zeminlerinin sıvı gibi davranmasıdır. Bu olaya sıvılaşma (liquefaction) adı verilmektedir. Sıvılaşmış zemin yapıyı taşıyamaz ve göçer [43].

Toprak kayması, sel, tayfun, yanardağ patlaması gibi olaylar da tarihi çevrelerin, anıtların hasar görmesine neden olmaktadır. Akarsu yanında kurulmuş tarihi yerleşimlerin uğradığı afetlerin başında seller gelir. Edirne, Amasya gibi tarihi kentlerimizde anıtlar yüzyıllar boyunca bahar dönemlerinde taşkınlardan etkilenmişlerdir. Hızlı, güçlü akıntılar, seller köprü ayaklarında hasarlara neden olurlar.

2.3.7. Yapının terk edilmesi

Bakımsızlık, terk etme, kasıtlı tahrip gibi eylemlerle insanlar da tarihi yapıların hasar görmelerine hatta yok olmalarına sebebiyet verirler. Kötü kullanım, yapının harap olma sürecini hızlandıran önemli bir etkindir. Tarihi yapılarda bilinçsizce yapılan değişiklikler, taşıyıcı sistem düzeninde aşırı yükleme veya süreksizliklere neden olmaktadır.

2.3.8. Kötü kullanım ve onarımlar

Kötü kullanım, harabiyeti hızlandıran önemli bir etkidir. Asıl sahipleri farklı yerlere göçtüğünde, eski konutlar kira evi olarak çeşitli ailelerin kullanımına verilmekte ve yeni kullanıcıların isteklerine göre gelişigüzel eklenen ara kat, bölme duvarları, sokak cephesine açılan vitrin, ayrı giriş ve benzeri öğelerle hızla değişime uğramaktadır. Safranbolu evlerinin veya İstanbul'da Zeyrek ve Süleymaniye'deki ahşap evlerin kötü kullanımıyla ilgili sorunlar birbirine çok benzemektedir. Tarihi yapılarda bilinçsizce yapılan değişiklikler strüktür düzeninde aşırı yükleme veya süreksizliklere neden olmaktadır.

Venedik Tüzüğü'nün 9. maddesinde de belirtildiği gibi, onarım uzmanlık gerektiren bir iştir. iyi yetişmiş mimar ve restoratörler tarafından, uygun malzeme ve teknik kullanılarak gerçekleştirilmeyen onarımlar kaba tamirden öte geçememektedir. Anıtların tarihi, estetik değerlerini, yapılacak müdahale sınırlarını tanımlayan koruma kurullarının anıtların koruma derecelerini belirlerken hata yapmaları da anıtların zarar görmesine neden olmaktadır.

2.3.9. Yangınlar

Ülkemizde ve tüm dünyada sıkça görülen yangınlar, özellikle ahşap strüktürlü konutların ve yerleşim bölgelerinin tahrip olmasında önemli bir etkidir. Bu durum tarihte özellikle İstanbul'da yapılan yapıların kagir yapılardan teşekkül etmesi gerektiği konusunda fermanlar yayınlanmıştır. Günümüzde bu yangınların bir kısmı da kasıtlı olarak çıkarılmakta ve tarihi yapıların kullanılamaz hale gelerek yıkılması sağlanmaktadır. Ancak yapılan yasal düzenlemelerle mevcut yapı tamamen yansa da yerine eldeki verilere göre aynı ölçülerde yapılması öngörülmektedir [41].

2.3.10. Savaşlar

Savaşlar tarihi yapıların ve kentlerin yıkımında en önemli etkenlerden biridir. II. Dünya savaşı sırasında Avrupa'nın birçok kenti harabeye dönüşmüştür. Silah ve savaş teknolojisi geliştikçe yıkım gücü de artmaktadır. Günümüz savaşlarında

kullanılan silahlar eskiye oranla daha yıkıcı ve yok edicidirler. Yakın tarihimizde yaşanan Bosna iç savaşında birçok yapı tahrip olmuştur. Günümüzde hala Irak'ta ve Libya'daki savaşlar bunun en canlı örnekleridir.

2.3.11. Vandalizm

Vandalizm kasıtlı tahrip anlamına gelen ve anıtların yakılıp yıkılmasını açıklamak için kullanılan bir terimdir. Bir düşüncenin simgesi veya hatırlanmak istenmeyen bir egemenliğin izi olarak değerlendirilen anıtlar, bir devlet politikası yada halkın galeyana gelmesiyle bilinçli olarak ortadan kaldırılabilir. Sovyet sosyalist cumhuriyet birliğinin yıkılışından sonra eski rejimi simgeleyen anıtlar ortadan kaldırılmak istenmiştir. Benzer biçimde Bosna Hersek'te Osmanlı egemenliğinin izlerini taşıyan camiler ve köprüler yok edilmek istenmiştir [41].

2.3.12. Hava kirliliği

Atmosferi kirleten sanayi atıkları, ısınma sistemleri, kömürle çalışan vapurlar, motorlu taşıtlardan çıkan zararlı gazlar, yapıların üzerinde kirli bir tabakanın oluşmasına, ayrıca taşları eriten asit yağmuruna neden olmaktadır. Havadaki karbondioksit, kükürt dioksit ve kükürt trioksit gazlarının yağmur suyunda erimesiyle taşları eriten asitler oluşmaktadır. Islanan yüzeylerdeki bezemeler asidin aşındırıcı etkisiyle ayrıntılarını yitirmektedir. Arada sırada ıslanan cephelerde ise kara, geçirimsiz bir tabaka oluşur.

Cephelerde biriken kurum mimari ayrıntıların algılanmasını engellemekte, bu kir tabakası altında kalan taşlar özelliklerini yitirerek erimekteirler. Zamanla kabaran, dökülen kabuklar sülfatlaşma belirtisi gösterir. Gözenekleri kalsiyum sülfatla dolan taşlar, bozulma derinliğine bağlı olarak, yüzeyden ıslanma alanı sınırına kadar, tabaka halinde dökülür.

2.3.13. Trafik

Tarihi kentlerin insan ve at arabası trafiğine göre düzenlenmiş olan sokak dokusunun kamyon ve benzeri ağır taşıt trafiğine açılması, bu yollar çevresindeki yapılarda titreşimler ve temellere yapılan baskı sonucu ortaya çıkan hasarlara neden olmaktadır. Dar sokakların köşeleri, tarihi kapılar da turist otobüslerinin veya kamyonların sürtünmeleri sonucu çizilmekte, zarar görmektedir. Korunması istenen kentsel dokularda gerekli plan kararları alınarak yayalaştırma bölgeleri oluşturmak, trafiği denetlemek, daha uygun yerlere kaydırmak gerekmektedir [41]

2. 4. Koruma ve Restorasyon

Mimari mirasın doku ve tek yapı ölçeğindeki örnekleri, gelecek nesillere kültürel mesajlar vermek üzere ilgi ve bakım gereksinimindedir. Mimari miras, geçirdiğimiz toplumsal, ekonomik, siyasal ve kültürel gelişmelerin bütünüdür. Yerleşim dokusunda birçok önemli tarihi yapılar ve özellikli evler bulunur. Yaşanan mekanlar yaşar. Bakımsızlık ve terk yapı ömrünün sonunu hazırlar. Her yapının çevresine ve geleceğe aktaracağı mimari, tarihi, kültürel mesajlar vardır. Ayrıca döneminin yapıım tekniği ve malzeme kullanımına ait teknik bilgileri aktaran örneklerdir [25]

Restorasyon bilimi, tek tek yapı elemanları ile ilgili olduğu gibi, yapı bütünü ve strüktürü ile de doğrudan ilgilidir. Geleneksel yapılarda strüktür (taşıyıcı sistem), biçimi ayakta tutan bir sistemdir. Taş, Ahşap ve her ikisinin birlikte kullanıldığı kısmen çelik elemanlarda barındıran Karma Yapılarda taşıyıcı sistemi, düşey, yatay ve örtü elemanları oluşturmaktadır. Zaman içerisinde bu yapı malzemelerinde ve strüktüründe çeşitli etkiler sonucunda bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple, yapılarda onarım ve güçlendirme faaliyetleri çerçevesinde tehdit altındaki tarihi kültür varlıklarının korunması ve ileriki nesiller aktarılması önem kazanmaktadır.

Tarihi ve anıtsal yapıların korunması çağdaş bir bilim dalı olarak Avrupa’da 19. yüzyılda başlamış, kuramsal gelişimi, kurumlaşması ve üniversitelerin ders programlarına girmesi yakın geçmişte gerçekleşmiş ve özellikle ikinci Dünya Savası’ndan sonra planlamada büyük bir önem kazanmıştır. Türkiye de ise yaklaşık

olarak yirmi yıldan bu yana mimar ve plancılar geleneksel çevrenin korunmasıyla içtenlikle ilgilenmektedirler [44].

Koruma fikri ve bununla birlikte eski eser hukuku batıda doğmuştur. Avrupa ülkelerinde, özellikle anıtsal nitelik taşıyan tarihi eserlerin korunması için ilk tedbirler 18.yy sonlarında başlamış, 19. yy. gelinceye dek tarihi yapılar estetik, işlevsel ve simgesel değerleriyle korunmuştur. 19. yy. tüm dünya büyük bir değişime sahne olmuş, Sanayi Devrimi başlamış ve bunun sonucunda endüstrileşmenin etkisiyle tarihi bölgelerde oluşan köhneleşmeyi önlemenin yolu olarak tarihi dokunun ortadan kaldırılması uygun bulunmuştur [45].

20. yüzyıla gelene dek tarihi ve anıtsal yapıların korunması yönünde çalışmalar, basta İtalya ve Fransa olmak üzere Avrupa da devam etti, 19. yüzyılın sonlarına doğru çıkarılan ve ülkemizde o dönemde başlayan koruma çabalarında etkisi büyük olan yasalar, uygulama ve yaptırım açısından ayrı bir önem taşır. İtalya ve Fransa'nın resmi yollarla oluşturmaya çalıştığı koruma ortamına karşın İngiltere'de özel kişiler ve kuruluşların çabaları ile kurulan dernekler tarihi yapılar ile ilgili bilincin yerleşmesine uğraşır.

1904 yılında Madrid'de toplanan 6. Uluslararası Mimarlar Kongresi'nde Mimari anıtların korunması ve onarımı için kararlar alınmıştır. Bu kararlar sonucu, anıtlar geçmiş uygarlıklara ait "ölü anıtlar" ile ilk yapım amaçlarına uygun olarak hizmetlerine devam eden "yaşayan anıtlar" olarak gruplandırılmıştır. Ölü anıtlar yok olmaları engellenecek şekilde sağlamlaştırılarak korunacak, yasayan anıtlar ise mimari bütünlüğü ve stili bozulmayacak şekilde onarılacaktır [46].

1931 yılında Atina konferansında ve aynı yıl İtalya'da çıkartılan Carter Del Restaura'da koruma ile ilgili benzerlik gösteren kararlar alınmıştır. Buna Göre;

- Anıtlar onarılırken mimari bir bütünlük içinde ele alınmalı, anıtın çevresinin görünümünün korunması, bozulmasına neden olacak düzenlemelerden kaçınılması gerekir.

- Yıpranan anıtların korunmasında farklı disiplinlerin (fizik, kimya) ve diğer bilim dallarının da görüşleri alınacak, bir işbirliğine gidilecektir.
- Sağlamaştırmada ise eski yöntemlerin yeterli olmadığı durumlarda yeni tekniklerden faydalanacaktır. Ancak bu müdahaleler son derece sade ve az olmalıdır.

1957 Paris kongresinde, 1972 “Dünya Mirası Antlaşması” ile sonuçlanan büyük anıtların korunması ve kültür mirasının bütün insanlığa ait olduğu ilkesidir. Devamında 1964 yılında Venedik Tüzüğü çıkartılmıştır. Anayasası niteliğini taşıyan Venedik Tüzüğü, özellikle 1.maddesiyle “korunması gerekli anıt” kavramını, anıt ve çevresinden çok daha geniş bir boyuta taşımıştır. "Tarihi anıt kavramı sadece bir mimari eseri içine almaz, bunun yanında belli bir uygarlığın, önemli bir gelişmenin, tarihi bir olayın tanıklığını yapan kentsel ya da kırsal bir yerleşmeyi de kapsar. Bu kavram yalnız büyük sanat eserlerini değil, ayrıca zamanın geçmesiyle kültürel anlam kazanmış daha basit eserleri de içine alır" demektedir. Bu tüzüğün ardından 1965 yılında kurulan “Uluslararası Anıtlar ve Sitler Konseyi “(ICOMOS) da, koruma konusunda alınan kararların takipçisi olan en önemli uluslar arası örgüttür. Kurulusunda 15 üyenin yer aldığı ICOMOS , bugün içinde Türkiye’nin de bulunduğu (1974’den bu yana) uluslararası görüş alış – verişlerinin yapıldığı bir ortam hazırlamaktadır. 1973 yılında alınan kararla, 1975 mimari miras yılı kutlamaları ve Amsterdam kongresi, Venedik tüzüğünün yerine geçmek üzere hazırlanmış bir çalışmadır. Burada Venedik tüzüğünden farklı olarak tek yapı yerine tarihi çevre ele alınmakta, ekonomik koşulların ve toplumsal yapının bütünlüğü gündeme getirilmiştir. ICOMOS’ UN uluslararası girişimlerinin yanında UNESCO da, Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Örgütü olarak konuyla ilgili önemli çabalarda bulunmaktadır [47].

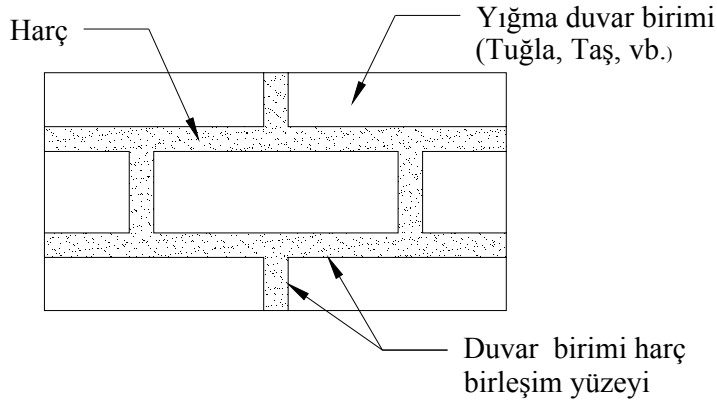
3. TARİHİ YIĞMA YAPI MODELLEME VE ANALİZ YÖNTEMLERİ

3.1. Modelleme Yöntemleri

Tarihi yığma yapıların analizinin yapılabilmesi için doğru bir modellemenin yapılması gerekmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda bu konuda üç yaklaşım olduğu vurgulanmıştır. Bunlar; Detaylı mikro modelleme, birleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme yöntemi.

3.1.1. Detaylı mikro modelleme

Bu modelleme tekniğinde yığma yapı elemanları olan taş, tuğla ve harç sistem içinde ayrı ayrı mekanik özellikleri belirlenerek tanımlanır(Şekil 3.1). Gelişmiş bir modelleme tekniği olmasına rağmen düzgün elemanlı (tuğla duvarlar gibi) duvarlarda uygulama mümkünken düzgün geometriye sahip olmayan duvarlarda zordur.

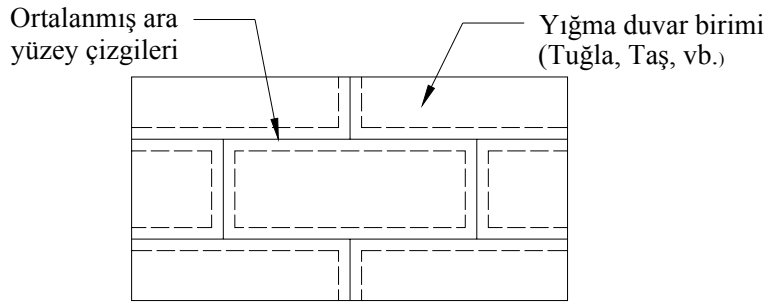


Şekil 3.1. Detaylı mikro modelleme

3.1.2. Basitleştirilmiş mikro modelleme

Yukarıda anlatılan modelleme tekniklerinden ilki olan detaylı mikro modelleme tekniği her ne kadar yığma duvarların gerçek davranışlarının anlaşılmasında kullanılan en iyi modelleme tekniklerinden biri olsa da, günümüzdeki bilgisayar teknolojisinin durumu da göz önüne alındığında büyük sistemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılamadığı görülmektedir. Çok büyük boyutlardaki sistem rijitlik

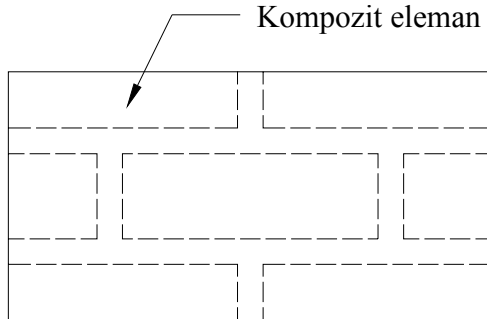
matrisi çözüm süresini uzatmakta ve bilgisayarlarda büyük sonuç dosyaları üretmektedir. Bu sebeplerden dolayı çeşitli modelleme teknikleri geliştirilmiş, daha büyük yığma sistemlerin daha kısa zamanda ve daha düşük kapasiteli bilgisayarlarda çözümü mümkün kılınmıştır [48]. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği de bu tekniklerden birisidir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Basit mikro modelleme

3.1.3. Makro modelleme

Makro modellemeye, yığma birim ve harcın özellikleri çeşitli homojenleştirme işlemlerine tabi tutulmak suretiyle yığma duvar kompozit bir malzeme olarak düşünülmektedir. Bu modelin mekanik özellikleri homojenleştirme işlemleri sonucunda elde edilmektedir (Şekil 3.3). Homojenleştirme teknikleri tezin kapsamında yer almamaktadır.



Şekil 3.3. Makro modelleme

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 modellemedir [48].

3.2. Analiz Yöntemleri

3.2.1. Doğrusal elastik analiz

Bu metotla yapının statik ve dinamik özellikleri belirlenebilir. Malzemenin Hook yasasına uyduğu kabul edilir ve yapı için global rijitlik matriksi bir defa hazırlanır. Bu analiz için malzemenin doğrusal elastisite özellikleri ve izin verilen maksimum stres dayanımı bilinmelidir. Bulunan stres dayanımları düşükken daha doğru sonuç verir. Yapının doğal periyodu ve mod şekilleri gibi dinamik özelliklerini belirlemek için serbest titreşim analizi uygulanabilir.

3.2.2. Doğrusal olmayan elastik analiz

Bu analiz yapıdaki malzemenin yumuşak davranışı, çatlak oluşumu, dayanım azalması gibi özellikleri göz önüne alınır. Malzemenin elastik bölge dışındaki davranışı ile ilgilenir. Malzeme elastik bölge dışında yumuşama veya sertleşme davranışı gösterebilir. Buna bağlı olarak uygun bir plastik model seçilmelidir [49].

3.2.3. Sonlu elemanlar yöntemi ve tarihi yığma yapı analizinde kullanılması

Yapının mimari bütünlemesine ait işlemlerden sonra, Yapı sonlu elemanlar metoduyla analiz edilecektir.

Sonlu elemanlar metodu, karmaşık geometrideki fiziksel sistemlerin tümünü bir bütün olarak incelemek yerine bu sistemi incelenmesi daha kolay olan elemanlara (Sonlu Elemanlar) ayırarak incelemek amacıyla kullanılan bir metottur.

Mühendislik uygulamalarında karşılaşılan problemler çoğu zaman doğrudan çözülemez. Problem, çözümü daha kolay olan alt problemlere ayrılarak daha anlaşılır hale getirilmeye çalışılır. Oluşturulan alt problemler çözülüp birleştirilerek esas problemin çözümü yapılabilir. Problemin tam çözümü yerine kabul edilebilir seviyede bir yaklaşık çözümü tercih edilir. Öyle problemler vardır ki, bunlarda yaklaşık çözüm tek yol olarak benimsenir. Örneğin, gerilme analizi üzerine çalışan mühendisler gerilme problemini basit kiriş, plak, silindir gibi geometrisi bilinen benzer şekillerle sınırlarlar. Bu çözümler çoğu kez gerçek problemin yaklaşık çözümüdür. Sonlu Elemanlar Metodu; bir nümerik teknik olup, özellikle katı mekaniği, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve titreşim gibi problemlerin bilgisayar yardımıyla çözümünde kullanılan çok gelişmiş bir tekniktir. Sonlu Elemanlar Metodunda (Finite Elements Method), (FEM) modeller sonlu sayıda elemanlara bölünür. Bu elemanlar belli noktalardan birbirleriyle bağlanır, buna düğüm denir. Katı modellerde her bir elemandaki yer değiştirmeler doğrudan düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerle ilişkilidir [50,51,52].

Düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler ise elemanların gerilmeleriyle ilişkilidir. Sonlu Elemanlar Yöntemi bu düğümlerdeki yer değiştirmeleri çözmeye çalışır. Böylece gerilme yaklaşık olarak uygulanan yüke eşit bulunur. Bu düğüm noktaları mutlaka belli noktalardan hareketsiz bir şekilde sabitlenmelidir.

Sonlu elemanlar metodunun uygulandığı yerler;

- 1) *Yapı mühendisliği*: Çubuk, plak, levha ve kabukların çözümünde,
- 2) *Zemin mekaniğinde*: Şevlerin gerilme analizlerinde, barajlarda ve tünellerde,
- 3) *Hidrolikte*: Viskoz akımda, sürtünme maddelerinin taşınmasında, dalga titreşiminde,
- 4) *Isı transferinde*: Isı iletiminde, ısı akımı taşınmasında,

5) *Nükleer enerji*: Reaktörün statik ve dinamik analizinde, ısı akımında,

6) *Elektrik mühendisliğinde*: Devre analizlerinde, manyetik potansiyel dağılımında kullanılabilir.

Yığma yapıların ayrıntılı yapısal analizlerinde genellikle sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılır. Yapısal analiz, yapının tamamı ya da belirli bir elemanın matematiksel modelinin hazırlanmasıyla başlar. Bu işleme yapının ayrıştırılması denir. Yapı, ayrıştırma sırasında, analizin amacına uygun bir şekilde ve sayıda sonlu elemanlara ayrılır. Yapıyı oluşturan strüktürel elemanlar, yapının geometrik boyutları, yapı üzerine etki eden yükler, mesnetlerin ve elemanların birleşim noktalarının hareket yetenekleri ve serbestlik derecesi göz önüne alınarak model içerisinde tanımlanır.

Matematiksel modellemenin amacı, yapının tamamının, belli bir bölümünün ya da strüktürel elemanlarının çeşitli yükler veya fiziksel etkiler altında gerçek davranışının gözlenmesini sağlamaktır. Yapının gerçek davranışı genellikle çok karmaşıktır. Bu nedenle, yapıyı modellemek için birçok sadeleştirmenin yapılması zorunludur. Yalın ve basit bir model elde etmek için, yapı elemanlarını oluşturan malzemenin mekanik özelliklerinin de uygun bir şekilde tanımlanması gereklidir [35].

1993 de yapılan bir çalışmada yaklaşık 15 yüzyıldır ayakta duran Ayasofya Müzesi incelenmiştir. Sap90 kullanılarak yapılan sonlu eleman modeli için 363 çerçeve elemanı, 720 kabuk elemanı, 2826 katı cisim elemanı kullanılmıştır. Tanımlanan 5000'e yakın düğüm noktası yaklaşık 17000 serbestlik dereceli bir sistem oluşturmuştur. Model yapıda gerçekleştirilen çevrel titreşim deneyleri sonuçları ışığında düzeltilmiştir. 1992 Karacabey depremi, Ayasofya'da bulunan ivmeölçer ile kayıt edilerek gerçek dinamik davranışın belirlenmesinde etkili olmuştur. Sonlu eleman modelinin analizi sayesinde Ayasofya'nın genel yapısal özellikleri ve yapısal elemanları arasındaki etkileşim belirlenmiştir. Modelin dinamik analizinin çevrel titreşim deneyleri ve deprem kayıtları sonuçlarıyla uyum içinde olması sayısal model çalışmalarının bu tip araştırmalarda önemli bir yeri olduğunu göstermiştir [53].

1994 de yapılan başka bir çalışmada yapılışından itibaren sekiz yüzyıl süre ile dünyanın en büyük kubbeli mekanlarından olan Ayasofya müzesinin mevcut durumundaki deprem davranışını incelenmiştir. Yapının sayısal modeli sonlu eleman yöntemiyle oluşturulmuştur. Disiplinler arası yaklaşım Ayasofya'nın dinamik davranışı ile ilgili çalışmalara uygulanarak, yapısal analiz, geoteknik ve malzemeye yönelik yapılan araştırmalarla birleştirilmiştir. Malzeme alanındaki çalışmalar yapıda kullanılan harcın karakteristikleri ve tuğla duvarın yoğunluk, rijitlik ve dayanımı hakkında fikir sahibi olunmasını sağlamıştır. Bu disiplinler arası çalışma Ayasofya'nın deprem davranışını kontrol etmek ve güçlendirmede yapılması gerekenleri detaylandırmak için önemlidir [54,29].

1549-1557 yılları arasında Mimar Sinan tarafından Kanuni Sultan Süleyman adına inşa edilmiş Süleymaniye Camii'ni incelenmiştir. 1993 yılında çevrel titreşim deneylerinden yapısal sistemin doğal titreşim frekanslarını saptamışlardır. Caminin taşıyıcı sistemi tümü ile sonlu elemanlar metodu kullanılarak modellenmiş ve serbest titreşim analizi yapılmıştır. 1994 yılında ise camiye dokuz adet kuvvetli yer hareketi kaydedicisi yerleştirilerek gerçek deprem kayıtlarından doğal titreşim frekanslarını elde etmişlerdir. Analiz sonucu bulunan değerlerle gerçek deprem kayıtlarından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen doğal titreşim frekansları, bazı küçük farklar dışında çevrel titreşim deneylerinde ulaşılan verilerle aynı olduğu görülmüştür. Bu sonuç, gerek yapılan çevrel titreşim deneylerinin ve gerekse uygulanan analiz yöntemlerinin sağlığı hakkında iyi bir fikir vermektedir [55,29].

M.S. 527 -536 yılları arasında inşa edilmiş ve İstanbul'da kullanılabılır durumdaki en eski yapılardan biri olan Küçük Ayasofya Cami'sini incelenmiştir. Duvar dayanımları belirlenerek sonlu eleman modellemesi yapılmıştır. Analiz neticesinde yer değiştirmelerin bir kısmına mesnet hareketi, bir kısmına da önceki yıllarda meydana gelen deprem kuvvetlerinin neden olduğu ortaya konmuştur [56,29].

1562 -1565 yılları arasında inşa edilmiş ve çeşitli depremlere maruz kalmış Edirnekapı Mihrimah Sultan Cami'sini incelenmiştir. Yapının serbest titreşim modalarını belirlemek amacı ile sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Hasar tespiti

yapıldıktan sonra, 1999 Marmara Depremine ait iki ayrı ivme kaydı kullanılarak analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre yapının kuzey cephesinin, güney cephesine oranla daha az yatay yer değiştirme yaptığı görülmüştür. Böylece bu cephenin daha rijit olduğu, güney cephesinin daha çok zorlandığı ve hasarın büyük kısmının burada oluştuğu görülmüştür [57,29].

MS. 558 -562 yılları arasında Sakarya nehrinin eski yatağı üzerine inşa edilen Tarihi Sangarius (Sakarya) Köprüsü incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan malzeme parametreleri yapıya ait tas ve bağlayıcı numuneler üzerinde yapılan basınç testlerinden belirlenmiştir. Yapının dinamik analizlerinde sonlu eleman yöntemi kullanılmıştır. Köprü gövdesinin 3 boyutlu modeli SAP2000 programı ile oluşturulmuştur. Yapının Sonlu Eleman yöntemi kullanılarak serbest titreşim periyotları ve 1999 Marmara depremine cevabı incelenmiştir [58].

Urla Kamanlı Camii üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Yapısal analizleri sonlu eleman yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Yapının test ve gözlemler sonucu elde edilen geometrik ve malzeme verileri bu modelde kullanılmıştır. Yapının sonlu eleman analizi, LUSAS programı ile yapılmıştır. Yapıya öz yük, sismik yükler ve olası oturma senaryoları için elastik lineer analizler uygulanmış ve yapıdaki sorunlu bölgeler irdelenmiştir. Ayrıca doğrusal olmayan analizler sayesinde yapıdaki mevcut durum açıklanmaya çalışılmıştır [59,29].

1421 yılında Yıldırım Beyazıt'ın oğlu Çelebi Sultan Mehmet tarafından yaptırılmış olan, sekizgen planlı Yeşil Türbe incelenmiştir. 1855 yılındaki depremde türbenin dış cephesi hasar görmüştür. Yeşil Türbe'nin deprem analizi Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. Hazırlanan sonlu eleman modelinde, 6384 adet solic elemanı oluşturmak için 8013 adet düğüm noktası kullanılmıştır. Elde edilen modelin mod biçimleri belirlenerek, uygulanacak olan deprem yüküne karar verilmiştir. Deprem davranışı EUROCODE8 tepki spektrumu kullanılarak belirlenmiştir. Yapı, analiz sonucunda basınç gerilmelerine karşı beklenen dayanımı göstermiştir. Çekme gerilmelerin kapı ve pencere boşluklarının köselerinde ve yatay yük cephesinde oluştuğu gözlenmiştir [24].

Taş kemerli köprülerin yapısal davranışını incelemek amacıyla Trabzon'un Maçka ilçesinde bulunan Cosandere (Kınalı) köprüsü SAP2000 yapısal analiz programında modellenmiştir. Hazırlanan modelde 4394 adet 3-boyutlu (solid) eleman kullanılmıştır. Yapı modelinin kendi ağırlığından meydana gelen davranışını belirlemek için statik analiz, mod şekillerinin ve yapı periyotlarını belirlemek içinde model analizleri yapılmıştır. Yapı Modeline 1940 - ELCENTRO depreminin kuzey güney bileşeni uygulanarak bu yapının dinamik etkiler altındaki davranışı izlenmiştir. Analiz sonucunda yapı, kendi ağırlığından meydana gelen gerilmeleri güvenle taşıyabildiği düşünülmektedir [21,29].

4. TARİHİ YAPILARDA TONOZLARIN HASARLI BÖLÜMÜNÜN ÇELİK KULLANILARAK MODELLENMESİ VE ANALİZİ

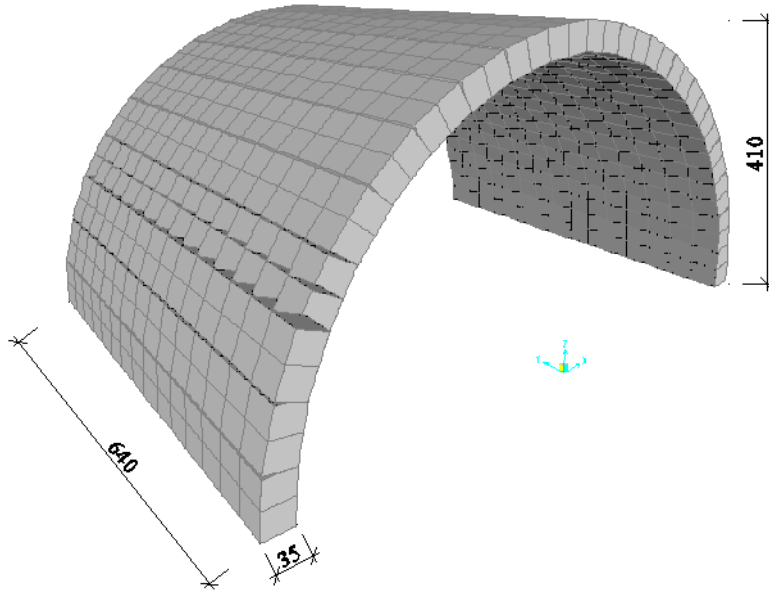
Bu bölümde hasar görmüş bir tonoz farklı hasar durumlarına göre çelik konstrüksiyonla onarıldığında ortaya çıkacak yeni sistemin sonlu elemanlar modeli oluşturularak analiz edilmiştir. Hasar senaryoları oluşturulurken tonozlarda oluşabilecek olası yıkılmalar göz önünde bulundurulmuştur. İki temel hasar modeli oluşturulmuştur. Birincisinde, tonozun her iki tarafı eşit yükseklikte kalıntı yüksekliğine sahiptir. İkincisinde ise tonozun bir kenarındaki kalıntı yüksekliği sabit tutularak diğer kenarında ki kalıntı yüksekliği değiştirilmiştir. Her iki model çelik kullanılarak onarılmıştır.

Onarımı yapılan bu modellerde çelik konstrüksiyonun mevcut yapıya etkisi incelenmiştir. Bu amaçla tonozun uzunluk, yarıçap, kalınlık ölçüleri ve malzeme özellikleri değiştirilmeden, farklı hasar durumlarına göre, üç farklı çelik konstrüksiyon modeli oluşturulmuştur.

4.1. Örnek Tonozun Geometrisi ve Malzeme Özellikleri

Modellemede seçilen tonozun geometrik ve malzeme özellikleri 5. bölümde analizi yapılmış olan Tokat Deveci Hanı'nın develik kısmında kullanılan tonoz boyutlarına yakın seçilmiştir. Yarıçapı 410 cm olan yarım daire formundaki tonozun kalınlığı 35 cm ve uzunluğu 640 cm olarak alınmıştır. Analizde kullanılan tonozun hasardan önceki durumu ve ölçüleri Şekil 4.1 de gösterilmiştir.

Tonozun malzeme özellikleri benzer yapılar için daha önce yapılan çalışmalar sonucu üretilmiş ve uluslararası literatürde önerilen bağıntılardan yararlanılarak, yürürlükte olan Türk Deprem Şartnamesinde yığma yapılar için önerilen değerler dikkate alınarak seçilmiştir.



Şekil 4.1. Analizde kullanılan tonozun gerçek boyutlu modeli

Tuğla yığma yapı elemanlarının, harç ile birlikte tek bir malzeme özelliği gösterdiği varsayılarak, elastisite modülü ve birim ağırlık kabulleri yapılmıştır (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Tonoza ait sonlu elemanlar modelindeki malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite modülü (MPa)	Özgül ağırlık (kN/m ³)	Poisson Oranı
Tuğla (harç ile birlikte)	400	18	0,2
Çelik	200 000	76,82	0,3

Modellemelerde kullanılan çelik elemanlar Borusan'ın ürettiği standart elemanlardan seçilmiştir. Modellemede iki farklı ölçüde profil kullanılmıştır (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. Tonoz onarımında kullanılan çelik profil ölçüleri

Profil Kodu	Dış Çap (mm)	Et Kalınlığı (mm)
Profil 1 (PIPE1)	159	6
Profil 2 (PIPE2)	76	3,2

4.2. Örnek Tonozun Modellenmesi ve Analiz Yöntemi

Tarihi yapıların korunması ve onarılması için öncelikle strüktürel davranışlarının tam olarak bilinmesi gereklidir. Yapıların davranışını gelişmiş hesap yöntemleriyle ayrıntılı bir şekilde incelemek mümkündür. Çoğu eğrisel geometrik formda olan yığma taş ve tuğla sistemli tarihi yapıların yük taşıyan elemanlarının 3-boyutlu yapısal davranış sergilemesi sonlu elemanlar analizini, tarihi yapıların davranışının incelenmesinde en elverişli hesap yöntemi haline getirmektedir [Toker ve Ünay, 2004].

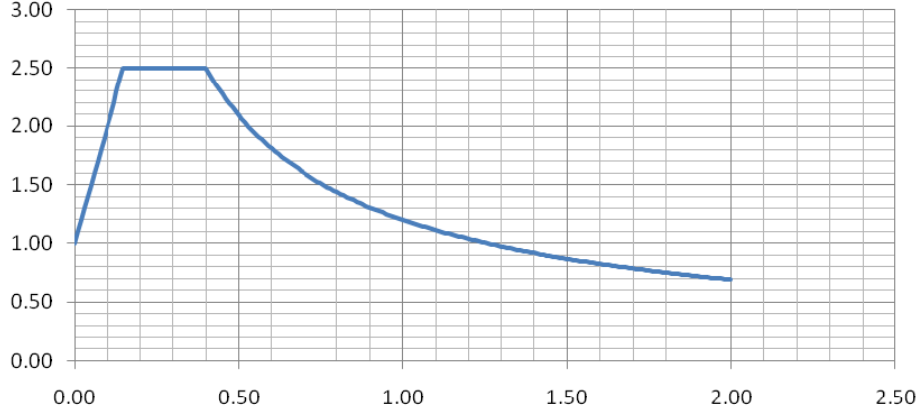
Tarihi yığma yapıların modelleme ve analizinin yapılması zor ve karmaşık bir iştir. Modelleme ve analiz prosedürleri, analizi yapılan yapının tarihi, malzeme ve yapının fiziksel ve mekaniksel özellikleri, yapının bugünkü durumu ve yapının kendi kapasitesi hakkında detaylı bilgiler edinilmesi vasıtasıyla yeterli bir biçimde tatbik edilebilir. Bu çalışmalar için genellikle sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmektedir.

Bu çalışmada da tonoz modelleri SAP2000 programında sonlu elemanlar yöntemiyle geliştirilmiştir. Bu modeller oluşturulurken kabuk (SHELL) elemanlar kullanılmıştır. Kabuk (SHELL) eleman ve nokta sayıları model tipine göre değişiklik göstermektedir. Modelleme Makro modelleme prensibine göre yapılmıştır.

Modelleme ve analiz yöntemine ait parametreler aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

- Tonoz analizlerinde 5. bölümde analizi yapılmış olan Tokat Deveci Hanı'nın bulunduğu bölge esas alınmıştır. Buna göre deprem bölgesi 1. bölge, yerel zemin sınıfı Z₂, bina önem katsayısı 1 ve R değeri 1 olarak alınmıştır. Bu verilere göre oluşturulan spektrum eğrisi Şekil 4.2. deki gibi oluşmuştur.
- Modellerde kullanılan tonozlar, eşit kalıntı yüksekliği ve farklı kalıntı yüksekliği durumuna göre iki farklı yapıda ele alınmıştır. Tonozların modellenmesinde her

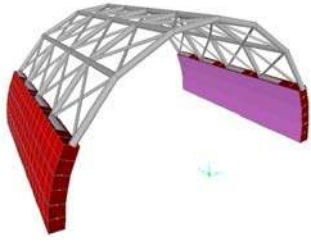
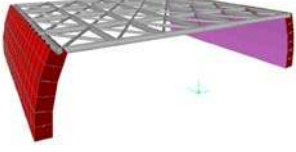
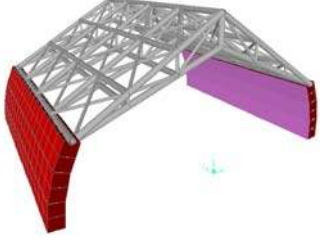
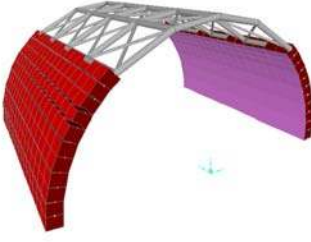
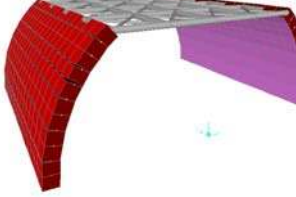
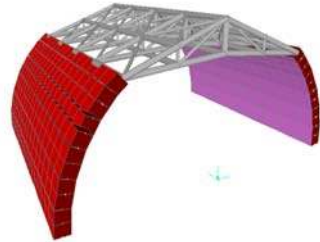
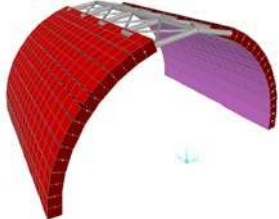
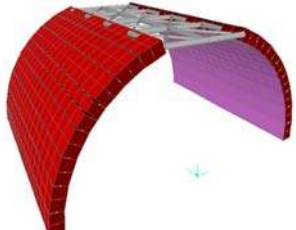
iki durum için çelik konstrüksiyon kullanılarak her durum için üçer onarım senaryosu hazırlanmıştır.



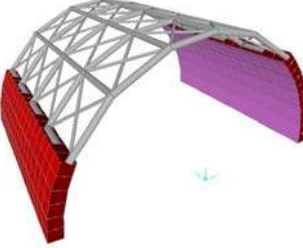
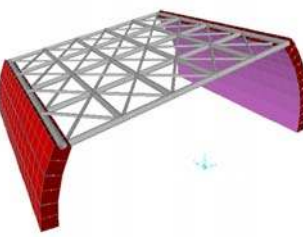
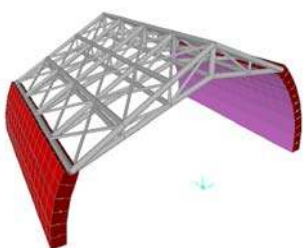
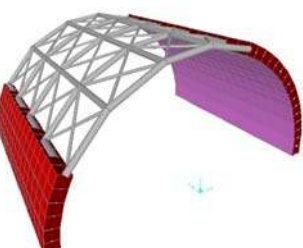
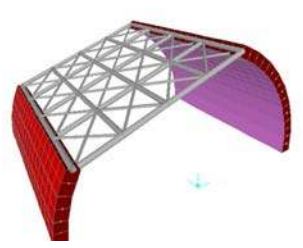
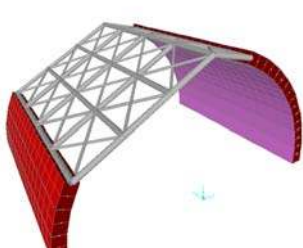
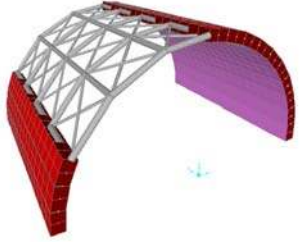
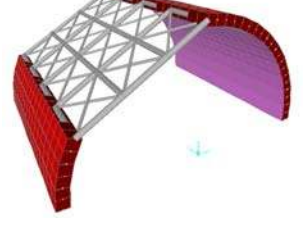
Şekil 4.2. Analizde kullanılan spektrum eğrisi

- Analizlerde kullanılan tonoz modellerinin hasarlı kısımları üç farklı çelik konstrüksiyon onarım modeline göre hazırlanmıştır. Toplam 16 adet model oluşturulmuştur. Modellerin isimlerinin uzun olmasından dolayı bazı kodlamalar yapılmıştır (Çizelge 4.3, Çizelge 4.4).
- Modellemede tonozların eleman kalınlığı 35 cm olduğu için programa kabuk (SHELL) eleman olarak tanımlanmıştır. Çelik elemanlar ise çubuk (FRAME) olarak tanımlanmıştır.
- Tuğla ve harç birlikte birim eleman özelliği gösterdiği varsayılarak, elastisite modülü ve birim ağırlık kabulleri yapılmıştır.
- Modellemesi yapılan tüm tonozlarda, malzemelerin mekanik özelliklerinde herhangi bir kayıp olmadığı varsayılmıştır.
- Çelik çubuk elemanlar kagir elemanlarla birleştirilirken moment aktarabilecek şekilde rijit olarak modellenmiştir.
- Tonoz kalıntılarının, kalıntı boyunca eşit yüksekliğe sahip olduğu kabul edilmiştir.

Çizelge 4.3. Eşit kalıntı yüksekliğine göre analizi yapılan tonoz modelleri ve kısaltma kodları

	Tonozun kendi eğriliğinde çelik konstrüksiyonla onarımı modeli	Tonozun düz olarak çelik konstrüksiyonla onarım modeli	Tonozun açısız olarak çelik konstrüksiyonla onarım modeli
Kalıntı yüksekliği 1.84 m			
Kodu	TK-EKY-1.84	TD-EKY-1.84	TA-EKY-1.84
Kalıntı yüksekliği 3.08 m			
Kodu	TK-EKY-3.08	TD-EKY-3.08	TA-EKY-3.08
Kalıntı yüksekliği 3.88 m			
Kodu	TK-EKY-3.88	TD-EKY-3.88	

Çizelge 4.4. Farklı kalıntı yüksekliğine göre analizi yapılan tonoz modelleri ve kısaltma kodları

	Tonozun kendi eğriliğinde çelik konstrüksiyonla onarılması modeli	Tonozun düz olarak çelik konstrüksiyonla onarılması modeli	Tonozun açısız olarak çelik konstrüksiyonla onarılması modeli
Kalıntı yüksekliği: 3.08 m			
Kodu	TK-FKY-3.08	TD-FKY-3.08	TA-FKY-3.08
Kalıntı yüksekliği 3.88 m			
Kodu	TK-FKY-3.88	TD-FKY-3.88	TA-FKY-3.88
Kalıntı yüksekliği: 4.10 m			
Kodu	TK-FKY-4.10	TD-FKY-4.10	

- Hazırlanan modellerde kaplama yükü dikkate alınmıştır. Analizi yapılan modele göre bu yükler çelik konstrüksiyona noktasal olarak etki ettirilmiştir.
- Hazırlanan hesap modeli üzerinde, sabit yükler ve deprem spektrumu ile tanımlanan yer hareketinin yol açtığı zorlamaların göz önüne alındığı iki ayrı yükleme durumu uygulanmıştır. Spektrum, EQx ve EQy yüklemesi olmak üzere ayrı ayrı iki asal doğrultuda uygulanmıştır.
- Sonuçların kolaylıkla değerlendirilebilmesi için, $G + EQ_x$ (Sabit yükler + x eksenli doğrultusundaki deprem yüklemesi) ve $G + EQ_y$ (Sabit yükler + y eksenli doğrultusundaki deprem yüklemesi) olmak üzere iki ayrı yük kombinasyonu tanımlanmıştır.
- Deprem etkilerinin belirlendiği spektral hesapta ilk 12 mod dikkate alınmıştır.

4.3. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilme Yöntemi

Seçilen bu modellerin tamamı SAP2000 programında sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek analizleri yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi yığma yapıların analizinde kullanılan yöntemlerden biridir. Bu çalışmada da bu yöntem kullanılmıştır.

16 ayrı modelleme yapılmıştır. Bu modeller üç ayrı yükleme türüne göre analiz edilmiştir.

- a. Kendi yükleri altında analiz
- b. Deprem yükleri altında analiz
- c. Modal analiz

Yürürlükte olan Deprem Yönetmeliğinde, tuğla yığma duvarlar için basınç emniyet gerilmesi $f_{em}=0,8$ MPa olarak önerilmektedir (ABYYHY,2007). Hesap sonucunda elde edilen kuvvetlerde herhangi bir azaltma yapılmamıştır ($R=1$). Buna karşılık,

emniyet gerilmeleri 3 katsayısı ile büyütülmüştür. Bu durumda, tuğla duvarlar için taşıma gerilmesi;

$$f_m = 0,8 \times 3 = 2,4 \text{ MPa} \quad (4.1)$$

olarak kabul edilmiştir.

Çekme emniyet gerilmeleri, basınç emniyet gerilmesi olarak belirlenen değerin %15'i olarak kabul edilebilir. Bu durumda, tuğla duvar için çekme emniyet gerilmesi;

$$f_{m(\text{çek})} = 2,4 \times 0,15 = 0,36 \text{ MPa} \quad (4.2)$$

olarak kabul edilmiştir.

Deprem hesabı sonucunda ortaya çıkan kayma gerilmeleri (Kabuk elemanlarındaki S12 gerilmeleri) aşağıdaki denkleme göre hesaplanan kayma sınır gerilmesi (τ_m) ile karşılaştırılmıştır.

$$\tau_m = \tau_o + \mu \sigma \quad (4.3)$$

Bu denklemde τ_m = kayma sınır gerilmesi , τ_o = çatlama emniyet gerilmesi, μ = sürtünme katsayısı, σ ise duvar düşey gerilmesidir. Tuğla duvarlar için çatlama gerilmesi;

$$\tau_o = 0,15 \times 3 = 0,45 \text{ MPa} \quad (4.4)$$

olarak kabul edilmiştir.

Deprem yönetmeliğinde önerildiği gibi duvar düşey gerilmelerinin ilgili yapı elemanları için belirlenen basınç emniyet gerilmelerinden büyük olmadığı varsayımı ile; tuğla duvarlar için kayma emniyet gerilmesi;

$$\tau_m = 0,45 + 0,5 (0,9/2) = 0,67 \text{ MPa} \quad (4.5)$$

olarak kabul edilmiştir. Hesaplamalar sonucunda çıkan değerler Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Malzeme grupları için ABYYH’ ye göre hesaplan emniyet gerilmeleri

Malzeme tipi	Basınç emniyet gerilmesi (MPa)	Çekme emniyet gerilmesi (MPa)	Kayma emniyet gerilmesi (MPa)
Tuğla(Harçla birlikte)	2,4	0,36	0,67

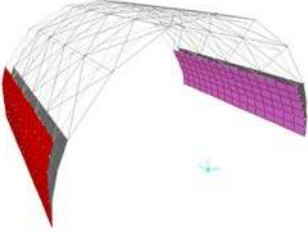
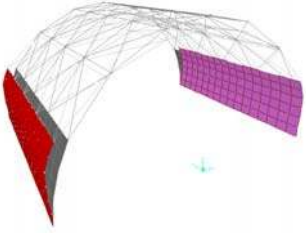
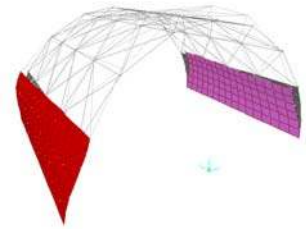
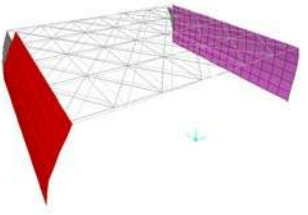
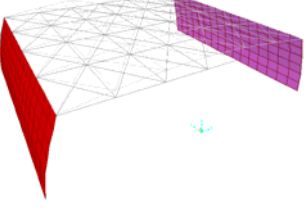
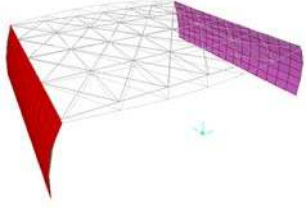
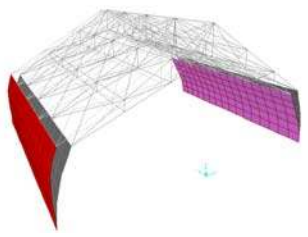
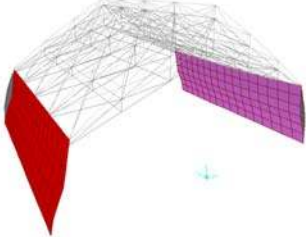
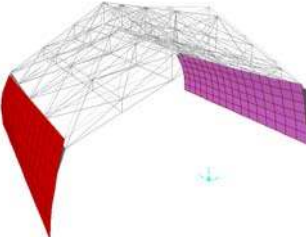
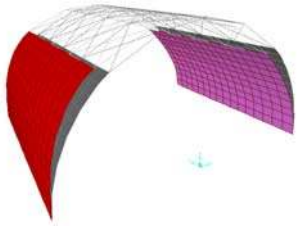
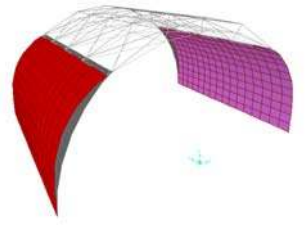
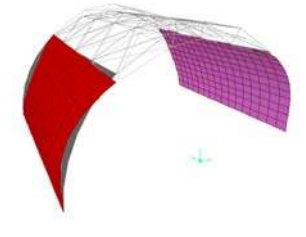
4.4. Elde edilen Analiz Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Farklı şekillerde onarımı yapılan tonozların yapısal analizi yukarıda belirtilen yük kombinasyonlarına göre SAP2000 sonlu eleman programı ile gerçekleştirilmiştir. Bütün düğüm noktaları ve taşıyıcı elemanlarda elde edilen ötelenme, kuvvetler ve gerilmelerin tek tek incelenerek yorumlanması neredeyse olanaksızdır. Bu nedenle, analiz sonuçlarının yorumu, SAP2000 programının ürettiği renk kodlu şekil ve gerilme haritaları kullanılarak en elverişsiz değerler dikkate alınarak yapılmıştır.

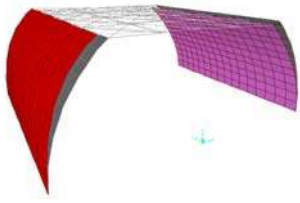
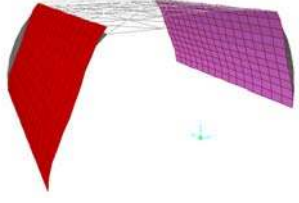
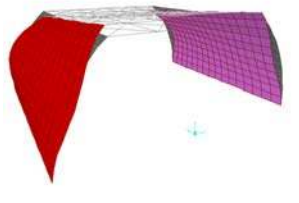
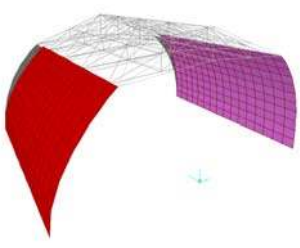
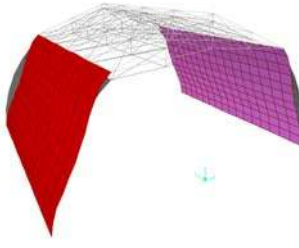
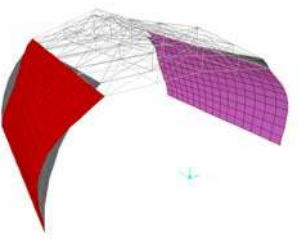
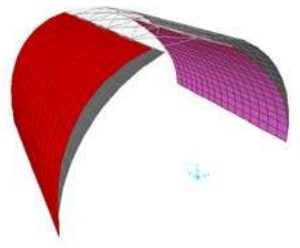
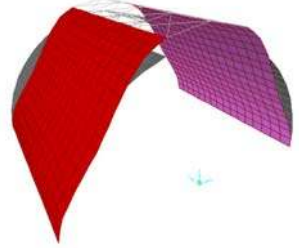
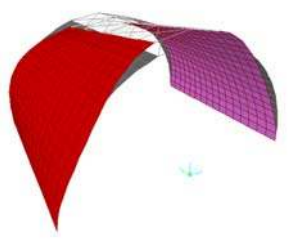
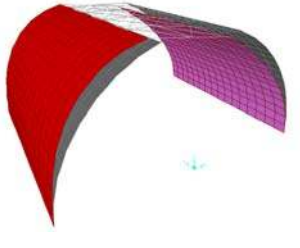
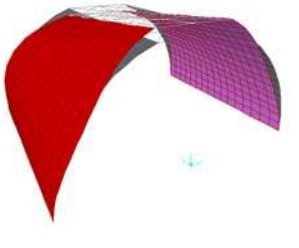
Yapılan tepki spektrumu analiz sonuçlarının değerlendirilmesine ilk olarak tonozların ilk üç modundaki deformasyonların incelenmesiyle başlanmıştır. Analiz sonucunda, tonozların periyotları Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de verildiği gibi gerçekleşmiştir. Bu değerler incelendiğinde:

- Eşit kalıntı yüksekliğine sahip tonoz modellerinin analizinde salınım değerleri 0,176 sn ile 1,328 sn arasında çıkmıştır. En büyük değer TD-EKY-3.88 koduyla anılan modelin 1. Mod’unda ortaya çıkmıştır.

Çizelge 4.6. Eşit kalınlı yüksekliğine göre onarımı yapılan tonozların modal analiz sonucunda 1. MOD, 2. MOD ve 3. MOD değerleri

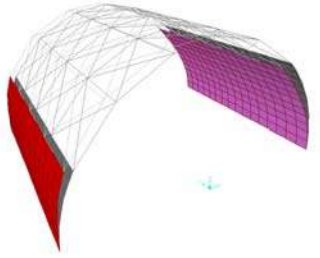
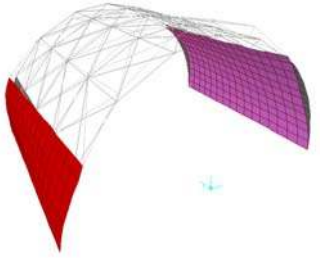
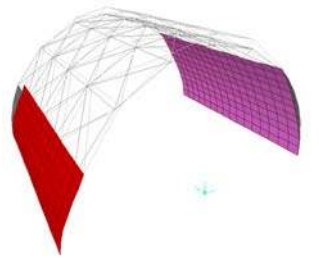
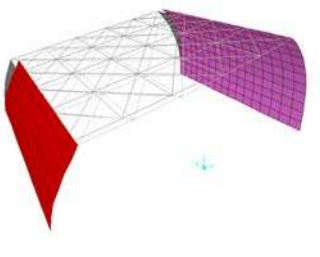
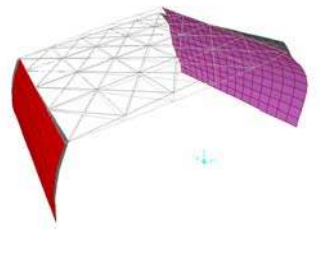
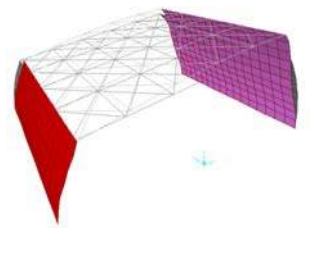
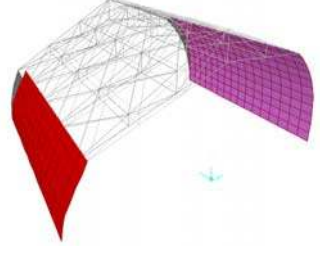
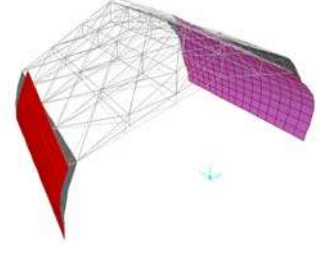
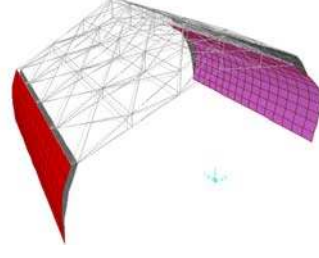
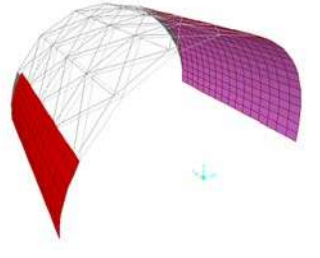
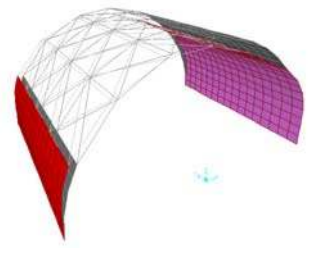
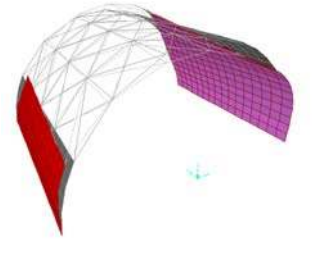
	1.MOD (sn)	2.MOD (sn)	3.MOD (sn)
TK-EKY-1.84			
	T=0,334	T=0,208	T=0,176
TD-EKY-1.84			
	T=0,327	T=0,181	T=0,125
TA-EKY-1.84			
	T=0,350	T=0,095	T=0,139
TK-EKY-3.08			
	T=0,442	T=0,183	T=0,219

Çizelge 4.6. (Devam) Eşit kalınlı yüksekliğine göre onarımı yapılan tonozların modal analiz sonucunda 1. MOD, 2. MOD ve 3. MOD değerleri

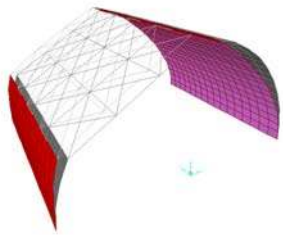
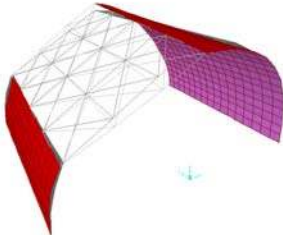
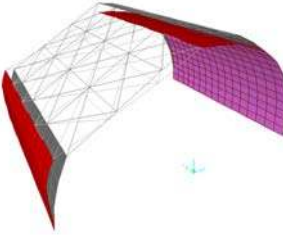
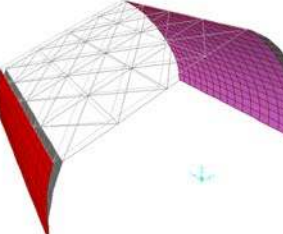
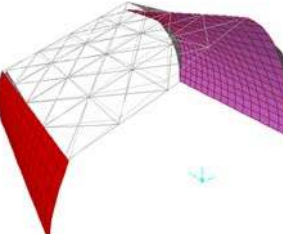
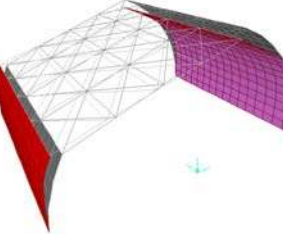
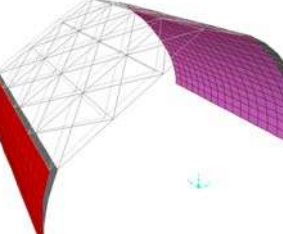
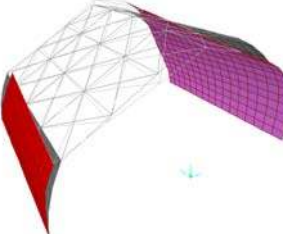
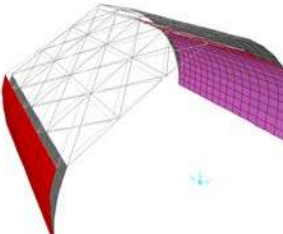
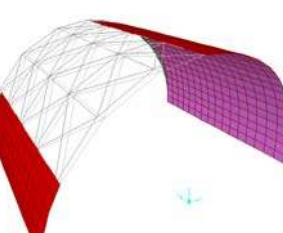
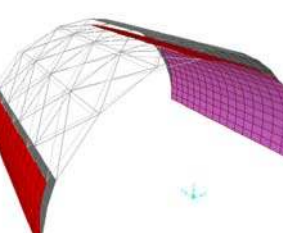
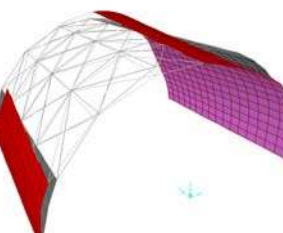
	1.MOD (sn)	2.MOD (sn)	3.MOD (sn)
TD-EKY-3.08			
	T=0,841	T=0,247	T=0,244
TA-EKY-3.08			
	T=0,864	T=0,227	T=0,256
TK-EKY-3.88			
	T=1,327	T=0,455	T=0,473
TD-EKY-3.88			
	T=1,328	T=0,453	T=0,471

- Farklı kalıntı yüksekliğine sahip tonoz modellerinin analizinde tüm salınım değerleri 1 saniyenin altında gerçekleşmiş ve en büyük değer 0,879 ile TK-FKY-4.10 koduyla anılan modelin 1. Modunda ortaya çıkmıştır.
- Eşit kalıntı yüksekliğinde farklı çelik konstrüksiyon modellerine göre bakıldığında en büyük fark 308 cm kalıntı yüksekliğine sahip modelde ortaya çıkmıştır. Burada TA-EKY-3.08, TD-EKY-3.08 olarak kodlanan modellerde 1. Mod değerleri sırasıyla 0,864 sn ve 0,841 sn olarak gerçekleşirken TK-EKY-3.08 kodlu modelde 0,442 sn olarak gerçekleşmiştir.
- Modellemelerde 3 farklı çelik konstrüksiyon kullanılmıştır. Bu modellerin tamamında kalıntı yüksekliği arttıkça salınım değerlerinin arttığı görülmüştür. Çelik konstrüksiyonun yapıyı daha rijit bir hale getirdiği görülmektedir.
- Tek başına salınım değerleri dikkate alındığında (gerilme ve deformasyonlar dikkate alınmadığında) bu tür hasarlı tonozlarda yapılacak onarım modellerinde çelik konstrüksiyonun tasarım şekli ortaya çıkan değerleri çok fazla değiştirmedeği görülmüştür.

Çizelge 4.7. Farklı kalıntı yüksekliğine göre onarımı yapılan tonozların modal analiz sonucunda 1. MOD, 2. MOD ve 3. MOD değerleri

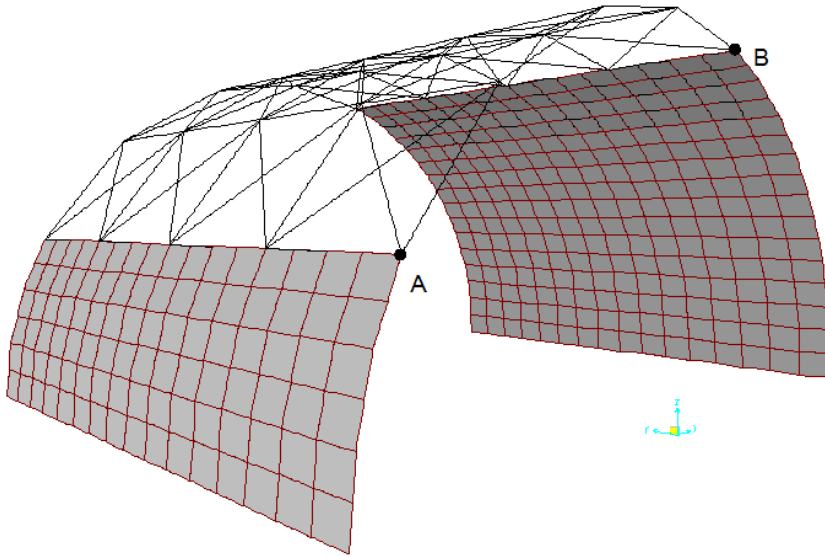
	1.MOD (sn)	2.MOD (sn)	3.MOD (sn)
TK-FKY-3.08			
	T=0,359	T=0,202	T=0,162
TD-FKY-3.08			
	T=0,484	T=0,223	T=0,216
TA-FKY-3.08			
	T=0,483	T=0,225	T=0,206
TK-FKY-3.88			
	T=0,740	T=0,362	T=0,350

Çizelge 4.7. (Devam) Farklı kalıntı yüksekliğine göre onarımı yapılan tonozların modal analiz sonucunda 1. MOD, 2. MOD ve 3. MOD değerleri

	1.MOD (sn)	2.MOD (sn)	3.MOD (sn)
TD-FKY-4.10			
	T=0,241	T=0,147	T=0,119
TD-FKY-3.88			
	T=0,630	T=0,387	T=0,355
TA-FKY-3.88			
	T=0,679	T=0,368	T=0,356
TK-FKY-4.10			
	T=0,879	T=0,454	T=0,441

Hesap spektrumu deprem yönetmeliğinin Tokat için önerdiği deprem etkisine göre yapılan analizler sonucunda elde edilen en büyük yer değiştirmeler Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8’de verilmiştir. Farklı kalıntı yüksekliğine sahip tonozlarda değerlendirme iki noktaya göre yapılmıştır. Kalıntı yüksekliği değiştiğinden her iki yüksekliğin yer değiştirmesinin maksimum olduğu noktalar seçilmiştir (Şekil 4.3). Çizelgeler incelendiğinde:

- Farklı kalıntı yüksekliğine sahip modellerde en büyük değerler TK-FKY-3.88, TD-FKY-3.88 kodlu tonozlarda ortaya çıkmıştır. Her iki modelde maksimum yer değiştirmeler G+EQx yüklemesinde ve Z yönünde meydana gelmiştir. Elde edilen değerler sırasıyla -7,88 cm ve -7,94 cm’dir.
- Değerler incelendiğinde yer değiştirmelerin kalıntı yüksekliği arttıkça arttığı görülmektedir. Ancak salınım değerlerinde olduğu gibi burada da 308 cm kalıntı yüksekliğine sahip tonozun her üç modeli (TK-FKY-3.08, TD-FKY-3.08, TA-FKY-3.08) incelendiğinde kendi açısında tamamlanan tonozdaki yer değiştirmenin diğerlerinden fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 4.3. Farklı kalıntı yüksekliğine göre modellenen tonozların yer değiştirme değerlerinde dikkate alınan noktalar

Buna göre A noktası sabit kalıntı yüksekliğini gösterirken B noktası modellere göre değişmektedir. Buna göre:

- Modellerde en büyük yer değiştirme TK-FKY-4.10 kodlu modelin B noktasında -11,02 cm olarak G+EQx yüklemesinde ortaya çıkmıştır.
- Modellerde yine kalıntı yüksekliği arttıkça yer değiştirmelerin arttığı görülmüştür.
- Modellerde Y yönünde ancak G+EQy yüklemesinde yer değiştirme oluşmaktadır. Ancak tonoz zaten bu yönde yükleri eksenel kuvvet gibi aldığından oluşan yer değiştirmeler düşük değerde kalmıştır.
- Ölü yükler (GRAVITY) altında sistemde oluşan yer değiştirmeler oldukça düşük çıkmıştır.

Çizelge 4.8. Eşit kalıntı yüksekliğine göre onarımı yapılan tonozların üç farklı yükleme türüne göre X, Y ve Z yönünde oluşan maksimum deplasman değerleri

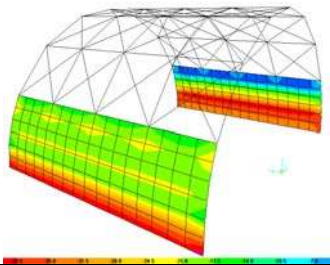
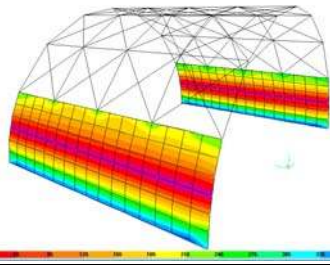
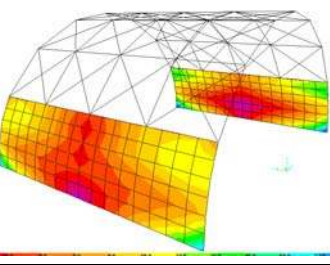
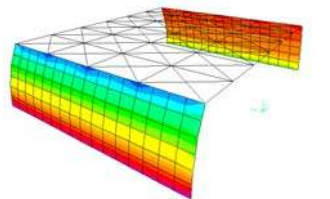
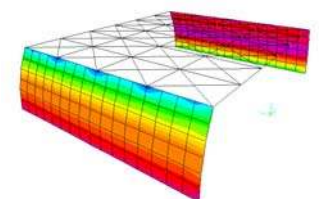
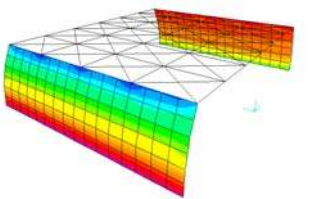
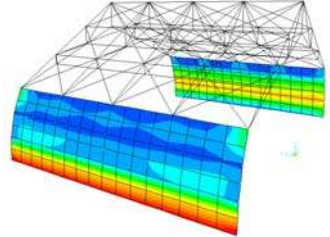
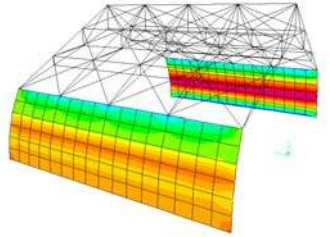
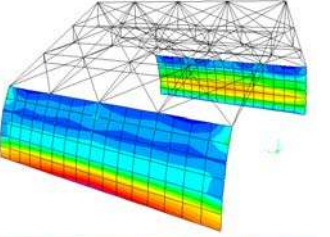
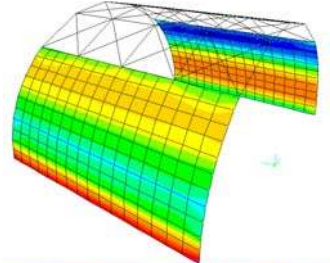
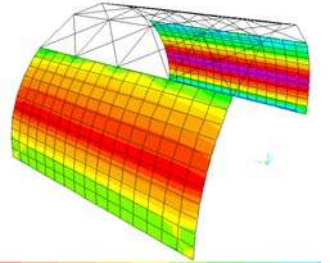
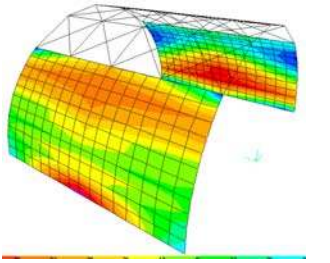
	GRAVITY (cm)			G+EQx (cm)			G+EQy (cm)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
TK-EKY-1.84	0,02	0,00	-0,11	3,29	0,00	- 0,89	0,39	- 0,22	- 0,28
TD-EKY-1.84	0,00	0,00	-0,15	0,32	0,00	-0,22	0,00	-0,02	-0,16
TA-EKY-1.84	-0,02	0,00	-0,16	-0,38	0,00	-0,24	-0,02	-0,03	-0,18
TK-EKY-3.08	0,21	0,00	-0,43	4,92	0,00	-2,34	0,44	-0,42	-0,92
TD-EKY-3.08	-0,01	0,00	-0,49	1,09	0,00	-0,91	0,01	-0,09	-0,59
TA-EKY-3.08	0,01	0,00	-0,53	1,12	0,00	-0,96	0,01	-0,11	-0,66
TK-EKY-3.88	0,04	0,00	-1,88	5,62	0,00	-7,88	0,11	-2,83	-6,40
TD-EKY-3.88	0,04	0,00	-1,94	5.66	0,00	-7,94	0,05	-2,82	-6,46

Çizelge 4.9. Farklı kalıntı yüksekliğine göre onarımı yapılan tonozların üç farklı yükleme türüne göre X, Y ve Z yönünde oluşan maksimum deplasman değerleri

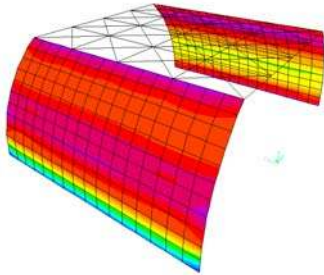
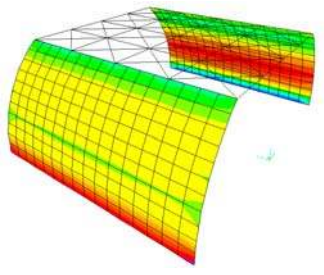
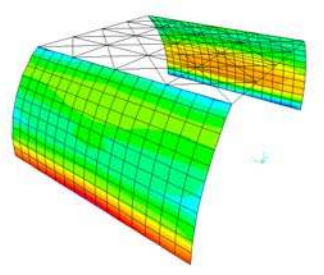
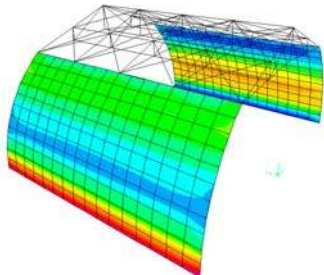
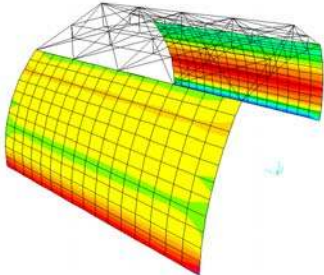
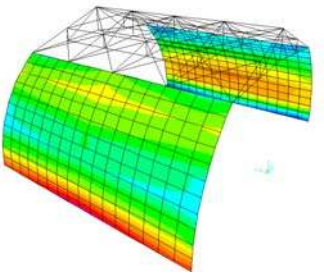
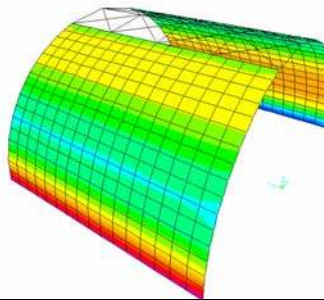
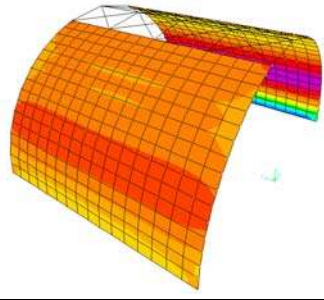
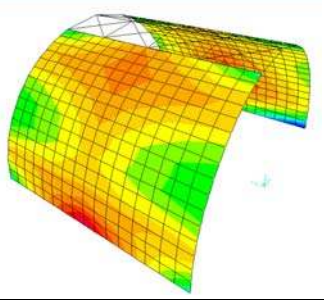
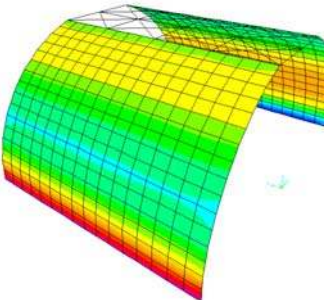
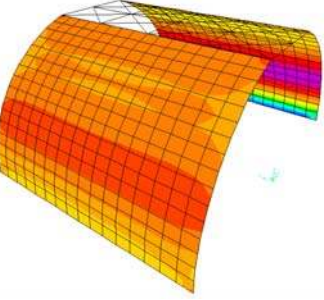
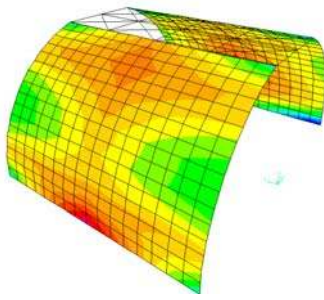
		GRAVITY (cm)			G+EQx (cm)			G+EQy (cm)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
TK-FKY-3.08	A	-0,84	0,00	0,10	-3,01	0,00	0,66	-1,42	-0,15	0,17
	B	-1,59	0,00	-0,96	-5,16	0,00	-2,19	-1,79	-0,37	-1,39
TD-FKY-3.08	A	-0,67	0,00	0,00	-1,25	0,00	0,13	-0,72	-0,02	0,02
	B	-0,54	0,00	-0,67	-1,06	0,00	-0,81	-0,57	0,02	-0,77
TA-FKY-3.08	A	-0,75	0,00	0,00	-1,34	0,00	0,13	-0,84	-0,03	-0,02
	B	-0,60	0,00	-0,73	-1,14	0,00	-0,89	-0,66	-0,10	-0,86
TK-FKY-3.88	A	-2,31	0,00	0,44	-7,80	0,00	1,83	-4,07	0,34	-0,72
	B	-2,76	0,00	-1,97	-10,54	0,00	-2,62	-3,54	-1,74	-4,83
TD-FKY-3.88	A	-1,79	0,00	0,23	-7,56	0,00	1,60	-3,13	-0,32	0,47
	B	-1,08	0,00	-1,43	-6,85	0,00	-2,81	-1,63	-2,19	-4,53
TA-FKY-3.88	A	-1,96	0,00	0,30	-7,45	0,00	1,64	-3,60	-0,34	0,54
	B	-1,65	0,00	-1,51	-8,24	0,00	-2,28	-2,25	-1,98	-4,44
TK-FKY-4.10	A	-3,09	0,00	0,57	-8,53	0,00	1,96	-5,61	0,45	0,85
	B	-2,50	0,00	-1,85	-11,02	0,00	-6,25	-3,29	2,44	-5,32
TD-FKY-4.10	A	-2,61	0,00	0,39	-3,48	0,00	0,64	-2,80	0,00	0,46
	B	-1,39	0,00	-1,55	-2,38	0,00	-2,05	-1,50	-0,27	-1,96

Yükler etkisi altında taşıyıcı elemanlarda oluşan maksimum basınç gerilmelerinin malzemenin basınç emniyet gerilmesini geçmemesi gerekir. Aynı zamanda taşıyıcı elemanlarda oluşan çekme gerilmelerinin çatlama oluşturacak mertebelere ulaşmamış olması gerekir. Tonozların analizi sonucu oluşan basınç ve çekme gerilme değerleri ve renk kodlu şekilleri Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Eşit kalınlı yüksekliğine göre onarımı yapılan tonozların üç farklı yükleme türüne göre kabuk (SHELL) elemanlarda meydana gelen basınç ve çekme gerilmeleri

	GRAVITY (MPa)	G+EQx (MPa)	G+EQy (MPa)
TK-EKY-1.84			
	MAX= 0,001 MİN= -0,047	MAX= 0,398 MİN= -0,015	MAX= 0,084 MİN= -0,043
TD-EKY-1.84			
	MAX= 0,044 MİN= -0,079	MAX= 0,074 MİN= -0,041	MAX= 0,044 MİN= -0,073
TA-EKY-1.84			
	MAX= 0,011 MİN= -0,072	MAX= 0,030 MİN= -0,041	MAX= -0,009 MİN= -0,067
TK-EKY-3.08			
	MAX= 0,027 MİN= -0,127	MAX= 0,225 MİN= -0,065	MAX= 0,069 MİN= -0,116

Çizelge 4.10. (Devam) Eşit kalınlı yüksekliğine göre onarımı yapılan tonozların üç farklı yükleme türüne göre kabuk (SHELL) elemanlarda meydana gelen basınç ve çekme gerilmeleri

	GRAVITY (MPa)	G+EQx (MPa)	G+EQy (MPa)
TD-EKY-3.08			
	MAX= 0,015 MİN= -0,154	MAX= 0,075 MİN= -0,103	MAX= 0,039 MİN= -0,145
TA-EKY-3.08			
	MAX= 0,021 MİN= -0,168	MAX= 0,085 MİN= -0,115	MAX= 0,049 MİN= -0,158
TK-EKY-3.88			
	MAX= 0,151 MİN= -0,339	MAX= 0,845 MİN= -0,039	MAX= 0,576 MİN= -0,378
TD-EKY-3.88			
	MAX= 0,153 MİN= -0,341	MAX= 0,848 MİN= -0,038	MAX= 0,579 MİN= -0,331

Bu durum taşıyıcı elemanın geometrisi ve doğru malzeme kullanılması ile ilgili bir özellik olup analiz sonuçlarından bulunan maksimum gerilmeler, emniyet gerilmeleri ile karşılaştırılmış; tonozların belli bir güvenliğe sahip olduğu görülmüştür. Genel olarak bakıldığında tonoz kalıntılarında oluşan maksimum basınç gerilmesi 1 MPa'nın altında kalmıştır. En büyük gerilme değeri 0,877 MPa ile TD-FKY-3.88 olarak kodlanan modelde oluşmuştur. Bu değer Çizelge 4.5'deki değerlerle karşılaştırıldığında oldukça emniyetli tarafta kalmıştır.

Sonuçlar iki bölümde incelenmiştir. Birinci bölümde eşit kalıntı yüksekliğine sahip tonoz modellerinin analiz sonuçları incelenmiştir. İkinci bölümde ise farklı kalıntı yüksekliğine sahip tonoz modellerinin analiz sonuçları incelenmiştir. İlk olarak eşit kalıntı yüksekliğine sahip tonozlar incelendiğinde:

TK-EKY-1.84, TD-EKY-1.84 ve TA-EKY-1.84 modellerinin sonuçları için:

Ölü (GRAVITY) yükler altında oluşan basınç gerilmeleri her üç model için birbirine yakın çıkmıştır. Tonoz boyu doğrultusunda (Sap2000 programında Y yönünde) uygulanan deprem kuvveti sonucu oluşan basınç gerilmeleri küçük ve her üç modelde birbirine yakın çıkmıştır. Ancak tonozla dik yönde (Sap2000 programında X yönünde) uygulanan deprem kuvveti sonucu oluşan basınç gerilme değerlerine bakıldığında, TK-EKY-1.84 modelinde oluşan değer diğerlerine oranla daha büyük çıktığı görülmüştür. Çekme ve kayma gerilmeleri incelendiğinde çıkan sonuçlar oldukça düşük düzeyde kalmıştır.

TK-EKY-3.08, TD-EKY-3.08 ve TA-EKY-3.08 modellerinin sonuçları için:

Ölü (GRAVITY) yükler altında oluşan basınç gerilmeleri her üç model için birbirine yakın ve oldukça küçük değerlerde ortaya çıkmıştır. Tonoz boyu doğrultusunda (Sap2000 programında Y yönünde) uygulanan deprem kuvveti sonucu oluşan basınç gerilmeleri küçük ve her üç modelde birbirine yakın çıkmıştır. Ancak tonozla dik yönde (Sap2000 programında X yönünde) uygulanan deprem kuvveti sonucu oluşan

basınç gerilme değerlerine bakıldığında, TK-EKY-3.08 modelinde oluşan değer diğerlerine oranla daha büyük çıktığı görülmüştür.

Bu üç modelde dikkat çeken nokta çekme gerilmelerinde görülmüştür. Bu modellerde oluşan gerilmeler önceki üç modeldekinden daha fazla çıkmıştır. Bu durumun kalıntı yüksekliğinin arttığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kayma gerilmeleri incelendiğinde çıkan sonuçların yine kabul Çizelge 4.5'e göre hesaplana değerlere oranla küçük çıktığı görülmüştür.

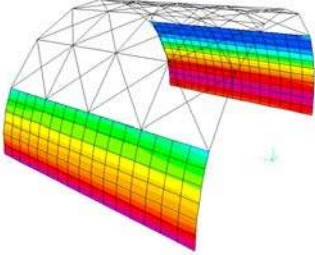
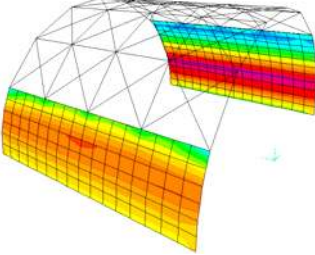
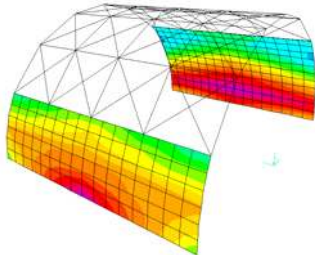
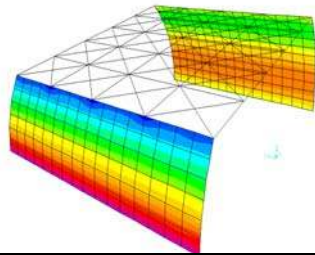
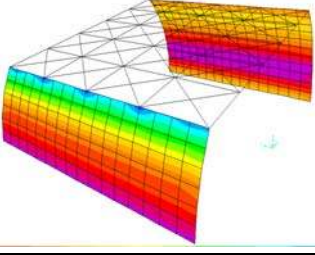
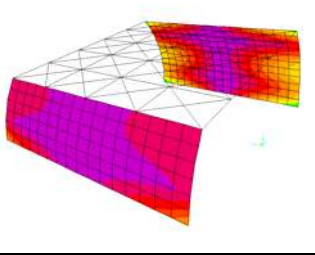
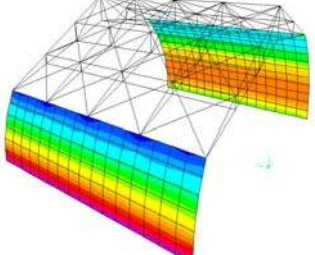
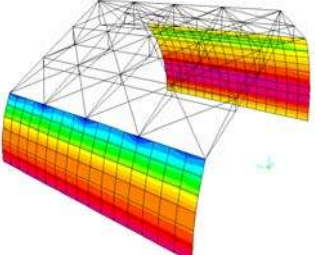
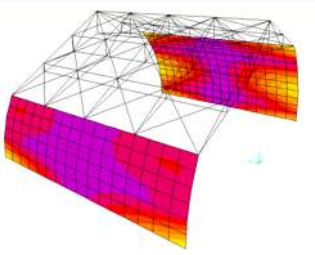
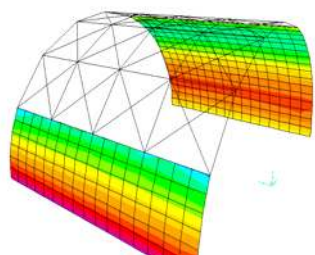
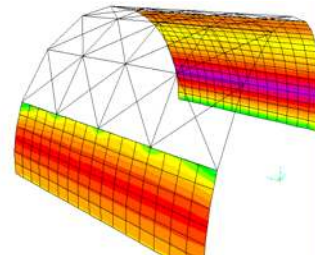
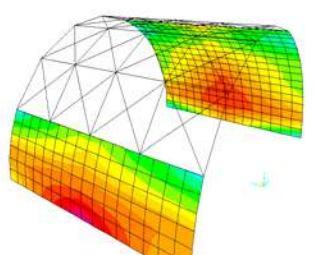
TK-EKY-3.88 ve TD-EKY-3.88 modellerinin sonuçları için:

Açısal olarak oluşturulacak konstrüksiyon ile kendi eğriliğinde oluşturulacak konstrüksiyon arasında tasarım olarak fazla bir fark oluşmadığından bu kalıntı yüksekliğinde iki model uygulanmıştır.

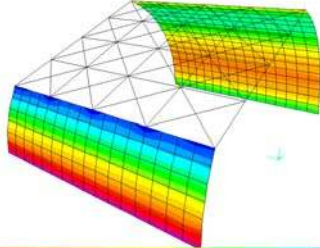
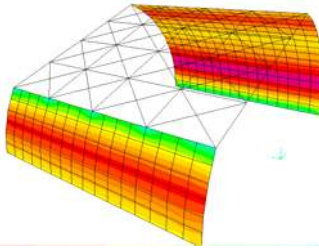
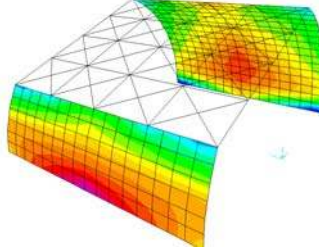
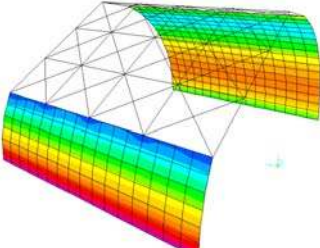
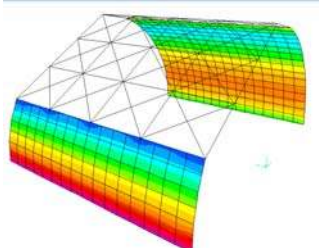
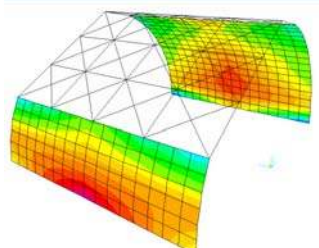
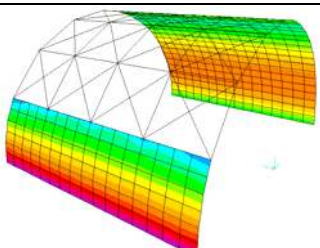
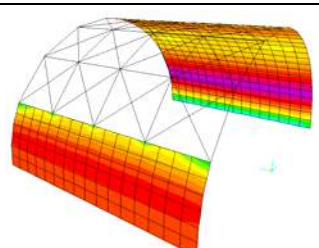
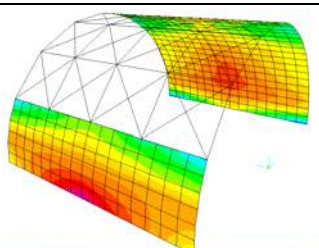
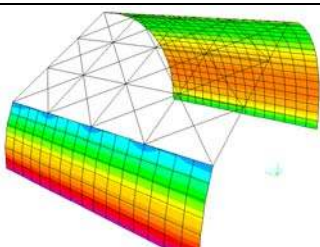
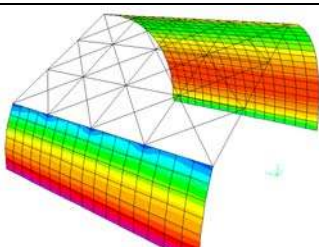
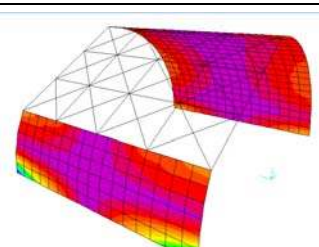
Ölü (GRAVITY) yükler altında oluşan basınç gerilmeleri her iki model için birbirine çok yakın değerlerde ortaya çıkmıştır. Tonoz boyu doğrultusunda (Sap2000 programında Y yönünde) uygulanan deprem kuvveti sonucu oluşan basınç gerilmeleri her iki modelde incelenen diğer iki gruba oranla büyük çıkmıştır. Yine tonozu dik yönde (Sap2000 programında X yönünde) uygulanan deprem kuvveti sonucu oluşan basınç gerilme değerlerine bakıldığında, her iki model için değerler (0,845-0,848 MPa) birbirine yakın ve incelenen diğer iki gruptaki modellere oranla oldukça büyük çıkmıştır.

Bu iki modelde dikkat çeken nokta çekme gerilmelerinde görülmüştür. Bu modellerde oluşan çekme gerilmeleri Y yönünde uygulanan deprem yüklemesinde çıkmıştır. Bu durumun kalıntı yüksekliği arttıkça yapının davranışının özgün haline daha yakın çıkmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kayma gerilmeleri incelendiğinde çıkan sonuçların yine kabul Çizelge 4.5'e göre hesaplana değerlere oranla küçük çıktığı görülmüştür.

Çizelge 4.11. Farklı kalıntı yüksekliğine göre onarımı yapılan tonozların üç farklı yükleme türüne göre kabuk (SHELL) elemanlarda meydana gelen basınç ve çekme gerilmeleri

	GRAVITY (MPa)	G+EQ _x (MPa)	G+EQ _y (MPa)
TK-FKY-3.08			
	MAX= 0,076 MİN= -0,129	MAX= 0,272 MİN= -0,086	MAX= 0,132 MİN= -0,127
TD-FKY-3.08			
	MAX= 0,101 MİN= -0,155	MAX= 0,154 MİN= -0,085	MAX= -0,104 MİN= 0,151
TA-FKY-3.08			
	MAX= 0,084 MİN= -0,169	MAX= 0,159 MİN= -0,095	MAX= 0,093 MİN= -0,166
TK-FKY-3.88			
	MAX= 0,217 MİN= -0,302	MAX= 0,799 MİN= -0,099	MAX= 0,473 MİN= -0,292

Çizelge 4.11. (Devam) Farklı kalınlı yüksekliğine göre onarımı yapılan tonozların üç farklı yükleme türüne göre kabuk (SHELL) elemanlarda meydana gelen basınç ve çekme gerilmeleri

	GRAVITY (MPa)	G+EQx (MPa)	G+EQy (MPa)
TD-FKY-3.88			
	MAX= 0,209 MIN= -0,302	MAX= 0,877 MIN= -0,088	MAX= 0,435 MIN= -0,293
TA-FKY-3.88			
	MAX= 0,209 MIN= -0,301	MAX= 0,823 MIN= -0,104	MAX= 0,451 MIN= -0,294
TK-FKY-4.10			
	MAX= 0,327 MIN= -0,429	MAX= 0,870 MIN= -0,140	MAX= 0,665 MIN= -0,414
TD-FKY-4.10			
	MAX= 0,308 MIN= -0,416	MAX= 0,395 MIN= -0,332	MAX= 0,334 MIN= -0,433

İkinci olarak farklı kalıntı yüksekliğine sahip tonozlar (buradaki tonoz kodlamalarında değişken kenarlarına göre kodlama yapılmış ve diğer kenar yüksekliği tüm modellerde 1,84 m alınmıştır) incelendiğinde:

TK-FKY-3.08, TD-FKY-3.08 ve TA-FKY-3.08 modellerinin sonuçları için:

Ölü (GRAVITY) yükler altında tonozun iki kolunun dış kesimlerinde farklı gerilmeler oluşmuştur. Kısa kenar dış kısmında basınç gerilmeleri meydana gelirken uzun kenarların dış kısımlarında çekme gerilmeleri meydana gelmiştir. Oluşan basınç ve çekme gerilmeleri her üç model için birbirine yakın çıkmıştır.

Tonoz boyu doğrultusunda (Sap2000 programında Y yönünde) uygulanan deprem kuvveti sonucu oluşan basınç gerilmeleri küçük ve her üç modelde birbirine yakın çıkmıştır. Ancak tonozu dik yönde (Sap2000 programında X yönünde) uygulanan deprem kuvveti sonucu oluşan gerilme değerlerine bakıldığında kalıntı yüksekliğinin az olduğu kısımlarda ki basınç gerilmelerinin arttığı, diğer kenarında ise çekme gerilmelerinin arttığı görülmüştür. Kayma gerilmeleri incelendiğinde çıkan sonuçların hesaplanan emniyetli gerilme değerlerinin oldukça altında kaldığı görülmüştür.

TK-FKY-3.88, TD-FKY-3.8 ve TA-FKY-3.88 modellerinin sonuçları için:

Ölü (GRAVITY) yükler altında tonozun iki kolunun dış kesimlerinde farklı gerilmeler oluşmuştur. Kısa kenar dış kısmında her üç model için ortalama 0,140 MPa basınç gerilmeleri meydana gelirken uzun kenarların dış kısımlarında 0,150 MPa çekme gerilmeleri meydana gelmiştir. Oluşan basınç ve çekme gerilmeleri her üç model için birbirine yakın çıkmıştır.

Tonoz boyu doğrultusunda (Sap2000 programında Y yönünde) uygulanan deprem kuvveti sonucu oluşan basınç gerilmelerinde artış gözlenmiştir. Özellikle tonoz uç bölgelerindeki gerilmeler 0,450 MPa'ya kadar çıkmıştır. Kalıntı yüksekliğinin fazla

olduğu bölgelerde çekme gerilmeleriyle birlikte basınç gerilmelerinde de artış olduğu görülmüştür.

Tonoza dik yönde (Sap2000 programında X yönünde) uygulanan deprem kuvveti sonucu oluşan gerilme değerlerine bakıldığında kalıntı yüksekliğinin az olduğu kısımlarda ki basınç gerilmelerinin arttığı ve 0,750 Mpa'ya ulaştığı, diğer kenarında ise çekme gerilmelerinin 0,090 MPa'ya kadar arttığı görülmüştür. Kayma gerilmeleri incelendiğinde çıkan sonuçların hesaplanan emniyetli gerilme değerlerinin altında 0,020 MPa düzeyinde kaldığı görülmüştür.

TK-FKY-4.10 ve TD-FKY-4.10 modellerinin sonuçları için:

Açısal olarak oluşturulacak konstrüksiyon ile kendi eğriliğinde oluşturulacak konstrüksiyon arasında tasarım olarak fazla bir fark oluşmadığından bu kalıntı yüksekliğinde iki model uygulanmıştır.

Ölü (GRAVITY) yükler altında tonozun iki kolunun dış kesimlerinde farklı gerilmeler oluşmuştur. Kısa kenar dış kısmında her iki model için ortalama 0,270 MPa basınç gerilmeleri meydana gelirken uzun kenarların dış kısımlarında 0,220 MPa çekme ve 0,100 MPa düzeyinde basınç gerilmeleri meydana gelmiştir. Her iki model incelendiğinde TK-FKY-4.10 kodlu modelde oluşan gerilmelerin bu yükleme türüne göre TD-FKY-4.10 kodlu modele oranla daha yüksek çıktığı görülmüştür.

Tonoz boyu doğrultusunda (Sap2000 programında Y yönünde) uygulanan deprem kuvveti sonucu oluşan basınç gerilmelerinde artış gözlenmiştir. Özellikle tonoz uç bölgelerindeki gerilmeler 0,550 MPa'ya kadar çıkmıştır. Kalıntı yüksekliğinin fazla olduğu bölgelerde çekme gerilmeleriyle birlikte basınç gerilmelerinde de artış olduğu görülmüştür.

Tonoza dik yönde (Sap2000 programında X yönünde) uygulanan deprem kuvveti sonucu oluşan gerilme değerlerine bakıldığında kalıntı yüksekliğinin az olduğu kısımlarda ki basınç gerilmelerinin arttığı ve 0,850 Mpa'ya ulaştığı, diğer kenarında

ise çekme gerilmelerinin 0,160 MPa'ya kadar arttığı görülmüştür. Kayma gerilmeleri incelendiğinde çıkan sonuçların hesaplanan emniyetli gerilme değerlerinin altında 0,070 MPa düzeyinde kaldığı görülmüştür. Bu gerilme değerlerinin Çizelge 4.5'e göre hesaplana değerlere oranla küçük çıktığı görülmüştür.

Yapısal analizler sonucunda elde edilen etkilerin incelenmesinde, tonozların Türk Deprem Yönetmeliğinde yığma yapılar için önerilen basınç ve kayma gerilmesi değerlerinin aşılmadığı gözlenmiştir. Kullanılan elemanların ağ yapısı ve mesnet şartları gereği yatay yüklemelerde bu gerilmelerin oluşması kabul edilebilir düzeydedir.

Yapılan gerilme hesapları sırasında, tonozun malzeme özelliklerinin literatür araştırması ve mevcut yönetmeliklerde önerilen değerler doğrultusunda belirlenmiş olduğu dikkate alınmalıdır. Bu durumda, tonozun belirli yerlerindeki olası malzeme bozulmalarının ya da taşıyıcı elemanlarda meydana gelebilecek malzeme kayıplarının tonozun davranışını etkileyebileceği söylenebilir. Ancak, elde edilen deplasmanlar ve gerilmeler kabul edilebilir sınırlar dahilinde olduğundan, bu tür bir varsayım sonucunda bile tonozların depreme karşı dayanımı ile ilgili bir olumsuzluğun meydana gelmediği görülmüştür.

5. ÖRNEK YAPI ÇALIŞMASI (TOKAT DEVECİ HANI)

5.1. Yapının Mimari ve Strüktürel Özellikleri

Bu çalışmada örnek yapı olarak, Osmanlı dönemi yapılarından Tokat Deveci Hanı seçilmiştir. Yapının seçilme nedeni; prototip modellerde denenilen tonoz hasarlarının bu yapıda mevcut olmasıdır. Tokat il merkezinde, Takkeçiler Camisi'nin güneyinde, Sulu Sokak'ta bulunan bu hanın kitabesi günümüze gelememiştir

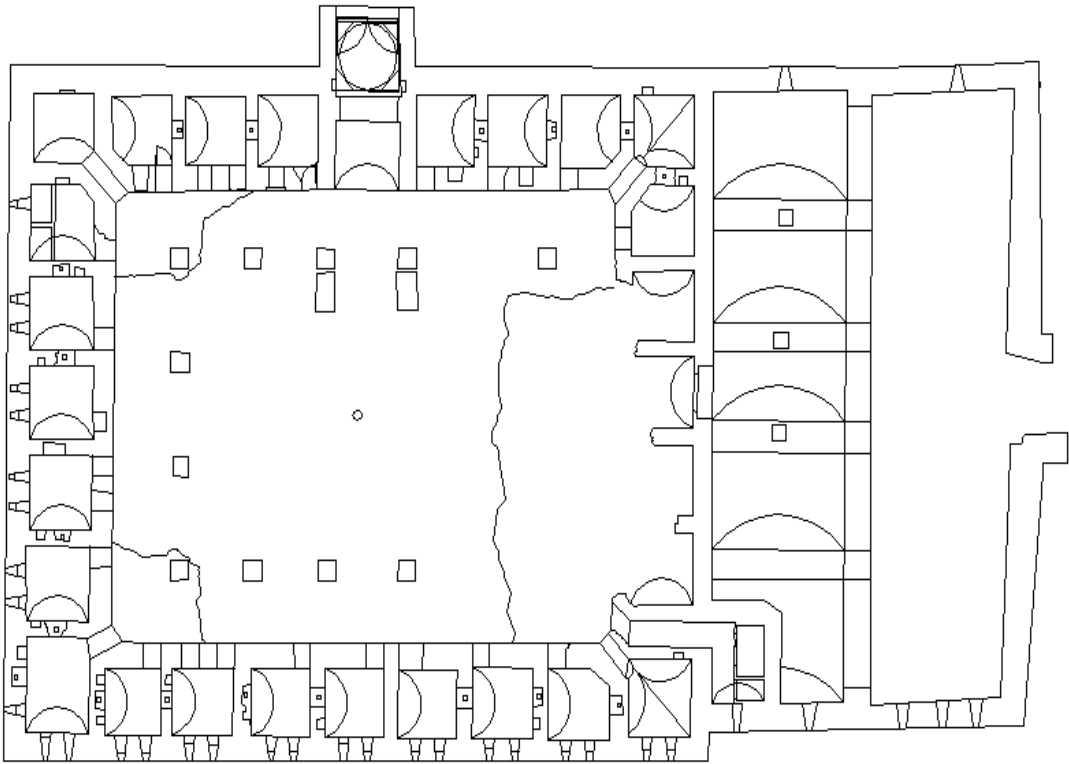
Yapılış tarihi ve kimin tarafından yaptırıldığı bilinmemekte olup, XV-XVI yüzyılda yapıldığı tahmin edilmektedir. Halk arasında Develik Hanı olarak ta adlandırılan bu yapı Tokat müzesinde görev yapmış olan Besim Karagülle tarafından yazılmış notlarda Deveci Hanı, Sivas Vakıflar Müdürlüğünde bulunan belgelerde Fatih Mehmet Paşa Hanı olarak geçmektedir. Ancak Hanın adı (EEMGM) Eski Eserler ve Müzeler Genel Müdürlüğü Doğal ve Kültürel Varlıkları Koruma envanterinde Deveci Hanı olarak geçmektedir [60].

Genel olarak çok hasarlı diyebileceğimiz yapı açık dikdörtgen bir avluya sahiptir (Resim 5.1). Giriş kare planlı olup üzeri kubbeyle örtülmüştür. Kubbeyle geçiş elemanı pandantiftir. Bu mekandan basık bir kemerle tonozlu ikinci mekana buradan da revaklar yıkıldığı için direk avluya geçilmektedir [60].



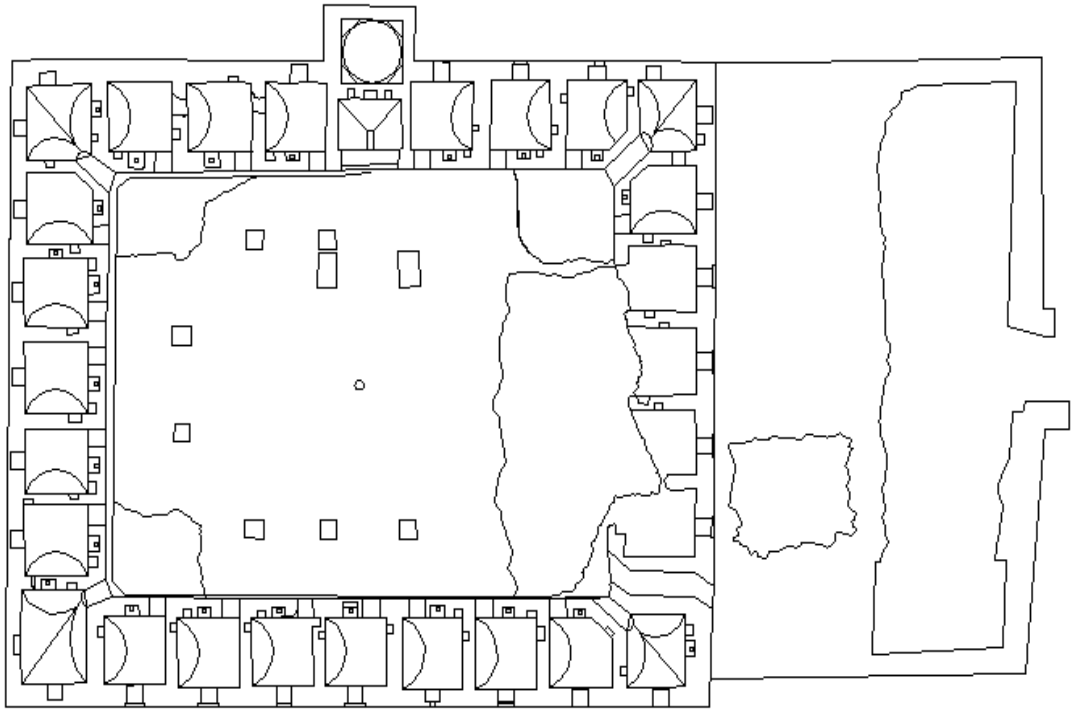
Resim 5.1. Deveci Hanının avludan görünüşü

Yapı doğu-batı yönünde ortalama 60 m, kuzey güney yönünde 35 m civarındadır. Yapıda açıklık geçmede genel olarak tonozlar kullanılmıştır. Sadece giriş mekanının üstü kubbeyle örtülmüştür. Yapı duvar kalınlıkları bölmelerde 0,80-0,90 m arasında, zemin katta beden duvarlarında 1,35-1,40 m, avluya bakan duvarlar ise ortalama 1,30 m civarındadır. Üst katta avluya bakan duvarlar 100-110 cm, kuzeye bakan duvar ise 1,20 m civarındadır [60].



Şekil 5.1. Zemin kat planı krokisi

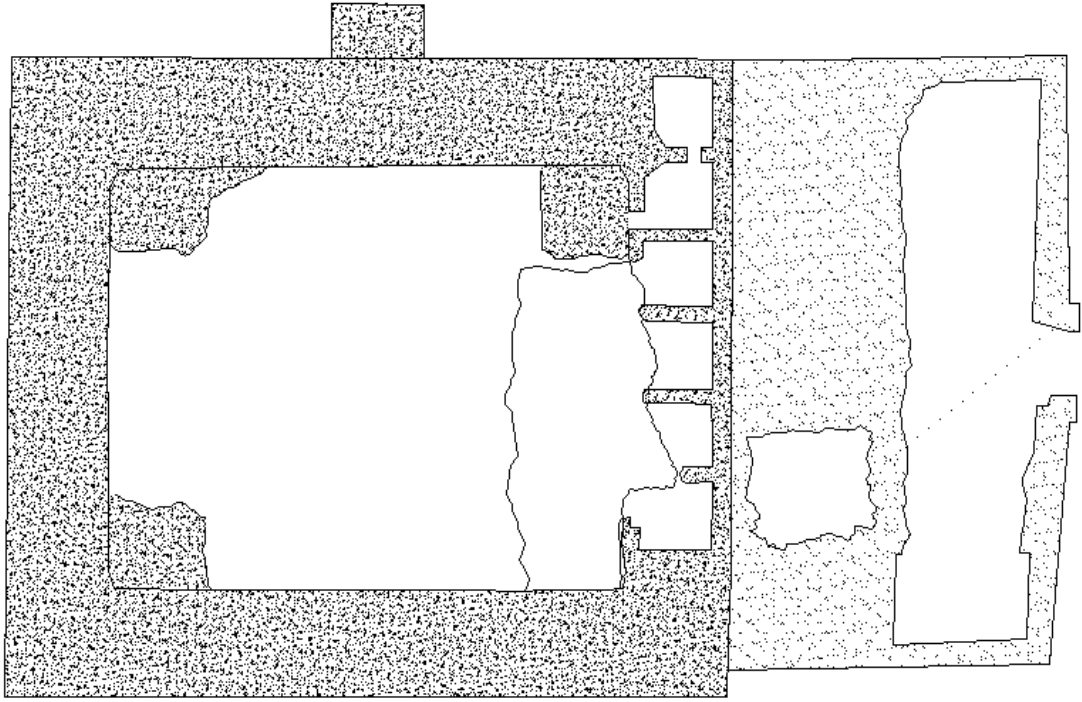
Avlu yaklaşık 15 x 21 metre büyüklüğündedir. Ancak revaklar yıkılmış olduğundan şu anki ölçüsü 22,5 x 29,5 metre civarındadır. Ana yapının kuzey, güney ve batı tarafındaki odalar iyi durumdadır. Ancak doğu kısmındaki odaların avluya bakan duvarları tamamen yıkılmıştır. Bu kısımda odaların üzerini örten tonozlarda yıkılmıştır [60].



Şekil 5.2. 1. kat planı krokisi

Doğu cephesinde ahır bulunmaktadır. Girişi doğu cephesinden verilmiştir. Ayrıca ahıra han içinden geçişte mevcuttur. Ahır beş kemer ve dört ayakla birbirinden ayrılan, kuzey-güney doğrultusunda uzanan iki bölümden oluşmuştur. Açıklıklar yaklaşık 9 metredir.

Yaklaşık 9 metre açıklıklı dış duvara bakan ikinci bölümde ise kemer ve tonozların büyük bir kısmı yıkılmıştır. İki bölümü birbirinden ayıran kemerlerden bir tanesi yıkılmak üzere olduğundan üzerine beton başlık yapılmış ahşap direklerle desteklenmiştir.



Şekil 5.3. Çatı katı planı krokisi

Han, kesme taş, moloz taş ve tuğladan iki katlı, dikdörtgen planlı olarak yapılmıştır. Ortadaki dikdörtgen avlunun etrafında hanın odaları sıralanmıştır. Yakın tarihlere kadar kalın çevre duvarları ayakta duran hanın diğer bölümleri depremlerden ötürü yıkılmıştır.

5.2. Tonozların Onarımında Çelik Kullanılarak Yapının Modellenmesi ve Analiz Yöntemi

Bilindiği gibi sonlu elemanlar metodu ile yapılan analizlerde, yapıların çeşitli yük ve çevresel etkilere göre deplasmanları, eğilme momenti, kesme kuvveti ve burulma momentleri hesaplanabilir [61]. Ancak analiz sonuçlarının hassasiyeti ve kapsamı, analiz için hazırlanan matematiksel modelin hassasiyeti ile doğru orantılıdır. Sonlu elemanlar analizinde yapının veya yapı elemanlarının geometrisi gerekli sayıda düğüm noktası ile belirlenmektedir. Düzgün betonarme veya çelik çerçevelerden oluşan bir yapıda, yapının geometrisini tanımlamak daha kolaydır. Kolon, kiriş gibi davranışı özellikleri daha iyi bilinen elemanlar için çok sayıda düğüm noktası kullanılmasına gerek yoktur. Tokat Deveci Hanı gibi çok karmaşık ve alışılmışın

dışında eleman ve malzemenin kullanıldığı bir yapının sonlu elemanlar analizinde, yapının davranışının sağlıklı bir şekilde belirlenebilmesi için, çok sayıda düğüm noktasının kullanılması gerekir [45].

Matematiksel model hazırlanırken öncelikle yapının depreme karşı davranışını tam olarak yansıtabilecek unsurlar ele alınmıştır. Bu nedenle, yapının gerçekte görünen geometrik boyutları tam olarak modelde görünmese de, deprem kuvvetlerini oluşturan kütle ve genel boyutlar modele doğru bir biçimde aktarılmıştır.

Matematiksel modelde kullanılan elemanların seçimi, yapının depreme karşı davranışı açısından oldukça önemlidir. Yapının geometrik formunu belirleyen bütün unsurların matematiksel modele yansıtılması öncelikle yapının kütle ve rijitliğinin doğru olarak hesaplanması açısından önemlidir [61,62]. Bu nedenle yapının geometrisini tamamlayan diğer yapı elemanlarının boyutları da rölöveler kullanılarak hesaplanmış, yerinde yapılan inceleme ve gözlemler sonucunda hangi malzeme özelliklerinin kullanılacağına karar verilmiştir.

Yığma tuğla veya taştan yapılmış tarihi yapıların büyük bir çoğunluğu, günümüzün teknolojisi ile yapılmış betonarme yapılarla karşılaştırıldığında, taşıyıcı elemanlarının çok büyük kesitlere sahip olduğu görülür. Ayrıca ana taşıyıcı elemanlarla, yüzeyleri kaplamak için kullanılmış diğer elemanları ayırmak oldukça güçtür. Genellikle taşıyıcı elemanlarla, taşıyıcı olmayan elemanlarda aynı tür veya benzer malzemeler kullanıldığından, yapının taşıyıcı iskeletini belirlemek bazen çok zor olmaktadır.

Tokat Deveci Hanı'nın depreme karşı davranışının incelenmesi amacıyla yapılan sonlu elemanlar modeli hazırlanırken yerinde yapılan incelemeler ve daha önce hazırlanmış rölöveler kullanılarak, yapının taşıyıcı sistemini oluşturan önemli elemanların boyutları belirlenmiştir. Yapının modellenmesinde genel formu ve yıkıntılar yine yerinde yapılan incelemeler ve rölövelerden faydalanılarak yapılmıştır. Yapıda açıklık geçmede genellikle tonoz kullanılmıştır. Yalnız giriş kısmında kubbeli bir taşıyıcı sistem vardır.

Tokat Deveci Hanı'nın sonlu elemanlar analiz modeli yapılırken, taşıyıcı elemanların bu özellikleri göz önünde bulundurulmuştur. Özellikle revak yapı birleşimleri son derece karmaşık geometrik yapıya sahip yapının, sonlu elemanlar analizi için yapılan matematiksel modelleme sırasında aşağıda belirtilen kabuller yapılmıştır:

- Yapıda kullanılan malzemelerin doğrusal elastik özelliklere sahip olduğu kabul edilmiştir.
- Yapıyı oluşturan dış duvarların iç kısımlarının malzeme özelliklerini belirlemek mümkün olmadığından, elemanların dış yüzeylerindeki malzeme özelliklerinin, kesitin her yerinde aynı olduğu kabul edilmiştir.
- Yine duvarların temel durumu belirlenemediği için, tam ankastre olduğu kabul edilmiştir.

Yapının modellenmesinde duvarlar, kubbeler ve tonozlarda kabuk (SHELL) elemanlar kullanılmıştır. Revaklarda bulunan kolonlar ise çubuk (FRAME) eleman olarak tanımlanmıştır. Yapının kubbe ve tonozları tuğla ile yapılmış geri kalan kısımlarında ise taş kullanılmıştır. Tonoz kalınlıkları develik kısmında 35 cm olarak alınmıştır. Yapı beş farklı duvar kalınlığından meydana gelmiştir. Analizlerde daha önceki çalışmalardan alınan Çizelge 5.1'deki malzeme değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 5.1. Yapıya ait sonlu elemanlar modelindeki malzeme özellikleri

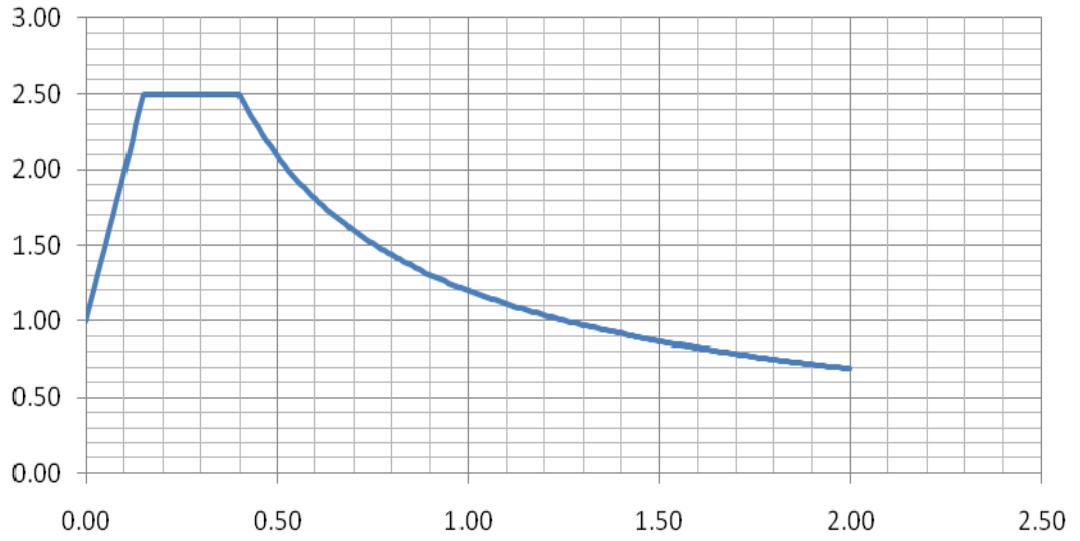
Malzeme	Elastisite modülü (MPa)	Özgül ağırlık (kN/m ³)	Poisson Oranı
Tuğla tonoz ve kubbeler (harç ile birlikte)	400	18	0,2
Taş duvarlar (harç ile birlikte)	450	24	0,2
Çelik	200 000	76,82	0,3

Modellemelerde kullanılan çelik elemanlar Borusan'ın ürettiği standart elemanlardan seçilmiştir. Modellemede iki farklı ölçüde profil kullanılmıştır(Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2. Yapıya ait tonozun onarımında kullanılan çelik profil ölçüleri

Profil Kodu	Dış Çap (mm)	Et Kalınlığı (mm)
Profil 1 (PIPE1)	159	6
Profil 2 (PIPE2)	76	3,2

Analizlerde deprem yönetmeliğinde de önerilen normalize edilmiş ivme spektrumu kullanılmıştır. Buna göre Tokat Deveci Hanı'nın bulunduğu deprem bölgesi 1. bölge, yerel zemin sınıfı Z₂, etkin yer ivme katsayısı A₀=0,40, bina önem katsayısı 1 ve R değeri 1 olarak alınmıştır. Bu verilere göre oluşturulan spektrum eğrisi Şekil 4.2.'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 5.4. Analizde kullanılan spektrum eğrisi

Yapının develik kısmındaki birinci aks tonozu tamamen çökmüştür. İkinci aks tonozu ise alttan yapılan desteklerle ayakta kalmaktadır (Resim 5.2). Bu durum göz önüne alındığında modelleme ve analiz işlemlerinde bu akstaki tonozunda çöktüğü kabul edilmiştir (Şekil 5.5).

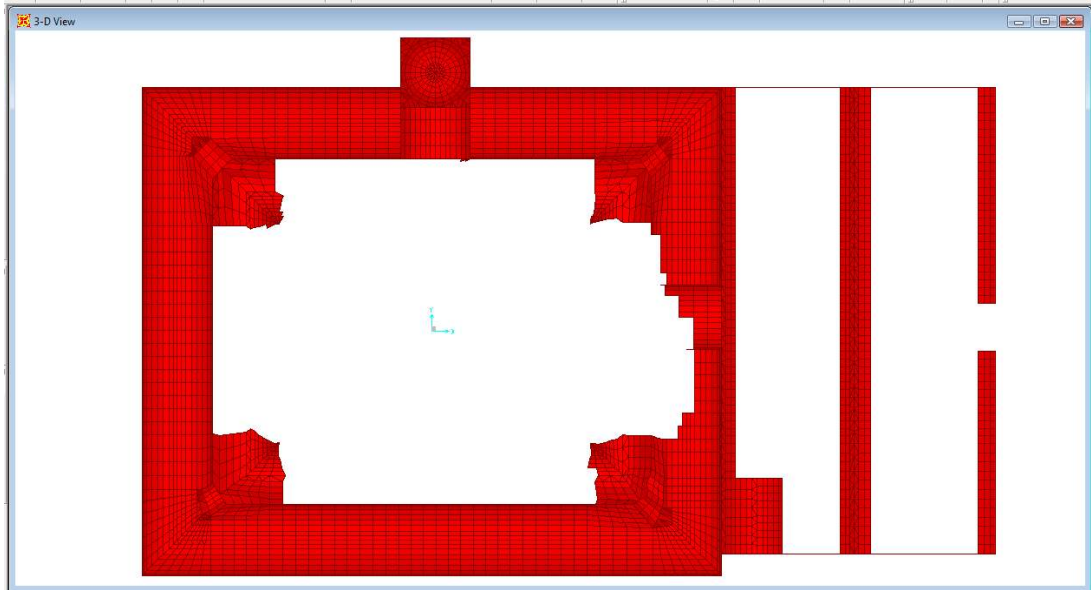


(a)



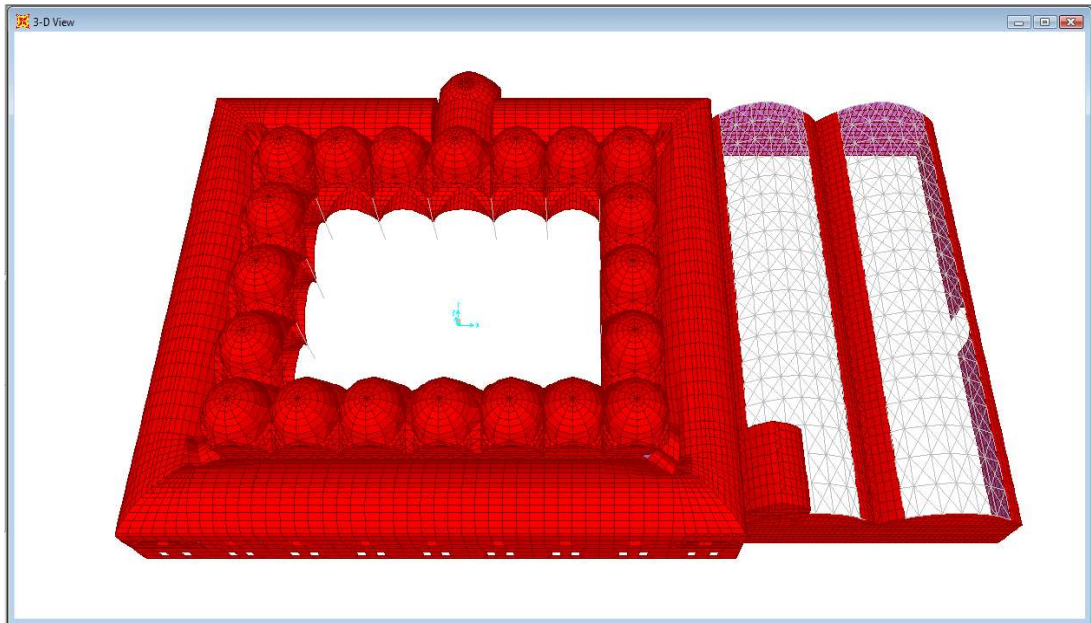
(b)

Resim 5.2. Yapının tamamen çökmüş birinci aksı(a) ve çökmemesi için alttan yapılan desteklerle ayakta duran ikinci aksı (b)



Şekil 5.5. İkinci aks tonozunun da yıkıldığı varsayılan ve modellemede kullanılan yapının sonlu elemanlar modeli

Çöken tonoz kısımları Şekil 5.6'da olduğu gibi çelikle onarılarak yeni model oluşturulmuştur. Yapının geri kalan kısmı ve revakların geleneksel malzemeyle onarıldığı kabul edilmiştir.



Şekil 5.6. Revakların geleneksel malzemeyle, develik kısmındaki tonozların çelikle onarım modeli

5.3. Analiz sonuçlarının Değerlendirilme Yöntemi

Bu bölümde, Deveci Hanı'nın düşey yükler ve olası bir deprem karşısında yapısal davranışının incelenmesi amacıyla sonlu elemanlar yöntemine göre gerçekleştirilen gerilme hesaplarının sonuçları değerlendirilmiştir.

Yürürlükte olan Deprem Yönetmeliğinde, taş yığma duvarlar için basınç emniyet gerilmesi $f_{em}=0,3$ MPa olarak önerilmektedir [ABYYHY,2007]. Hesap sonucunda elde edilen kuvvetlerde herhangi bir azaltma yapılmamıştır ($R=1$). Buna karşılık, emniyet gerilmeleri 3 katsayısı ile büyütülmüştür. Bu durumda, taş duvarlar için taşıma gerilmesi;

$$f_m = 0,3 \times 3 = 0,9 \text{ MPa} \quad (5.1)$$

olarak kabul edilmiştir.

Çekme emniyet gerilmeleri, basınç emniyet gerilmesi olarak belirlenen değerin %15'i olarak kabul edilebilir. Bu durumda, taş duvar için çekme emniyet gerilmesi;

$$f_{m(\text{çek})} = 0,9 \times 0,15 = 0,135 \text{ MPa} \quad (5.2)$$

olarak kabul edilmiştir.

Deprem hesabı sonucunda ortaya çıkan kayma gerilmeleri (Kabuk elemanlarındaki S12 gerilmeleri) aşağıdaki denkleme göre hesaplanan kayma sınır gerilmesi (τ_m) ile karşılaştırılmıştır.

$$\tau_m = \tau_o + \mu \sigma \quad (5.3)$$

Bu denklemde τ_m = kayma sınır gerilmesi , τ_o = çatlama emniyet gerilmesi, μ = sürtünme katsayısı, σ ise duvar düşey gerilmesidir. Taş duvarlar için çatlama gerilmesi;

$$\tau_o = 0,10 \times 3 = 0,30 \text{ MPa} \quad (5.4)$$

olarak kabul edilmiştir.

Deprem yönetmeliğinde önerildiği gibi duvar düşey gerilmelerinin ilgili yapı elemanları için belirlenen basınç emniyet gerilmelerinden büyük olmadığı varsayımı ile; taş duvarlar için kayma emniyet gerilmesi;

$$\tau_m = 0,30 + 0,5 (0,9/2) = 0,53 \text{ MPa} \quad (5.5)$$

olarak kabul edilmiştir.

Tuğla ile ilgili hesaplamalar dördüncü bölümde yapılmıştır. Bu bölümde aynı değerler kullanılacaktır. Tuğla ve taş duvarla ilgili emniyet gerilmeleri Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Malzeme grupları için kabul edilen emniyet gerilmeleri

Malzeme tipi	Basınç emniyet gerilmesi (MPa)	Çekme emniyet gerilmesi (MPa)	Kayma emniyet gerilmesi (MPa)
Tuğla (Harçla birlikte)	2,4	0,36	0,67
Taş Duvar (Harçla birlikte)	0,9	0,135	0,53

5.4. Elde edilen Analiz Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Deveci Hanının yapısal analizi yukarıda belirtilen yük kombinasyonlarına göre SAP2000 sonlu eleman programı ile gerçekleştirilmiştir. Bütün düğüm noktaları ve taşıyıcı elemanlarda elde edilen ötelenme, kuvvetler ve gerilmelerin tek tek incelenerek yorumlanması neredeyse olanaksızdır. Bu nedenle, analiz sonuçlarının yorumu, SAP2000 programının ürettiği renk kodlu şekil ve gerilme haritaları kullanılarak en elverişsiz değerler dikkate alınarak yapılmıştır.

Yapılan ayrıntılı hesaplar sonucunda Deveci Hanı'nın olası bir deprem sırasındaki davranışı ve taşıyıcı elemanlarının karşılaştıkları etkilere karşı dayanımı ile ilgili şu gözlemler yapılmıştır.

Yapılan tepki spektrumu analiz sonuçlarının değerlendirilmesine ilk olarak yapının ilk üç modundaki deformasyonların incelenmesiyle başlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda yapının birinci, ikinci ve üçüncü doğal periyodu birbirine yakın çıkmıştır. Analiz sonucunda sırasıyla yapının periyotları 1. Modan 3. Moda kadar sırasıyla $T=0,516$ sn, $T=0,514$ sn ve $T=0,509$ sn olarak gerçekleşmiştir.

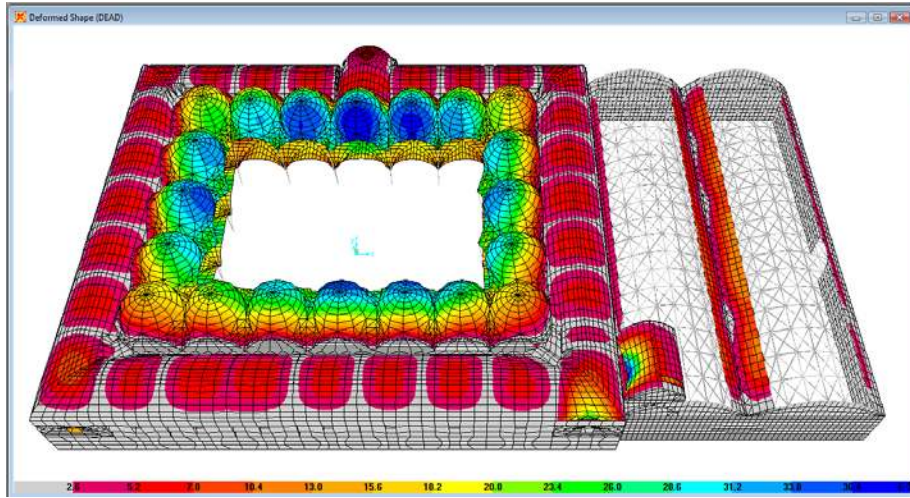
Yapının ilk üç periyoduna bakıldığında salınım değerinin yüksek çıkmasında (kapladığı alan ve yüksekliğine bağlı rijit durumuna göre) yeniden yapılarak onarılan revakların binanın salınım periyodunun artmasına neden olduğu görülmektedir.

Hesap spektrumu deprem yönetmeliğinin Tokat için önerdiği deprem etkisine göre yapılan analizler sonucunda elde edilen en büyük yer değiştirmelerin revaklarda ortaya çıktığı görülmüştür.

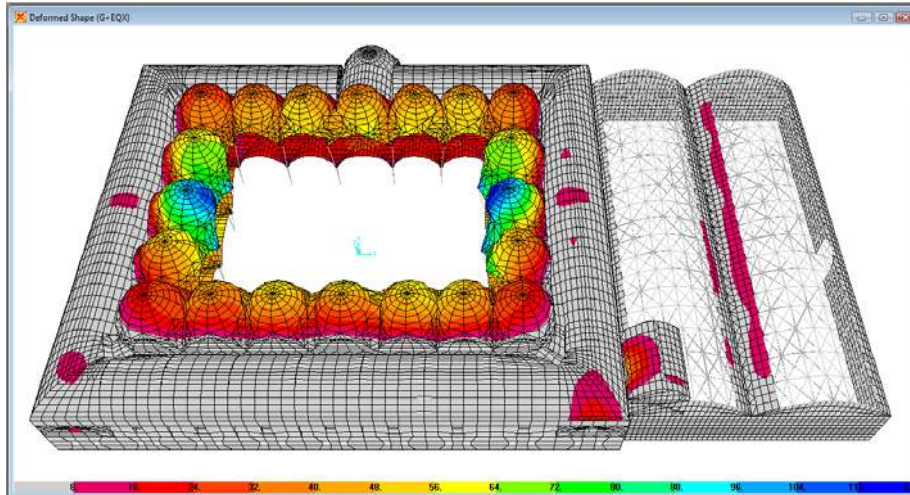
Yapılan analiz sonucunda yapının ana kısmının kareye yakın ve oluşturulan mekan açısında simetrik olmasından dolayı oluşan yer değiştirmeler X ve Y yönündeki deprem yüklemelerinde birbirine yakın çıkmıştır. Revak kubbelerinde oluşan yer değiştirmeler her iki yönde de 2,5- 2,8 cm aralığında ortaya çıkmıştır (Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9).

Tek başına salınım değerleri dikkate alındığında (gerilme ve deformasyonlar dikkate alınmadığında) revaklarda oluşan hareket, yapının halihazırdaki hasarlı durumunu da açıklamaktadır. Revaklarda yapılacak onarım sonunda, ileriki tarihlerde oluşacak depremlerde yıkılma olasılığı beklenmelidir.

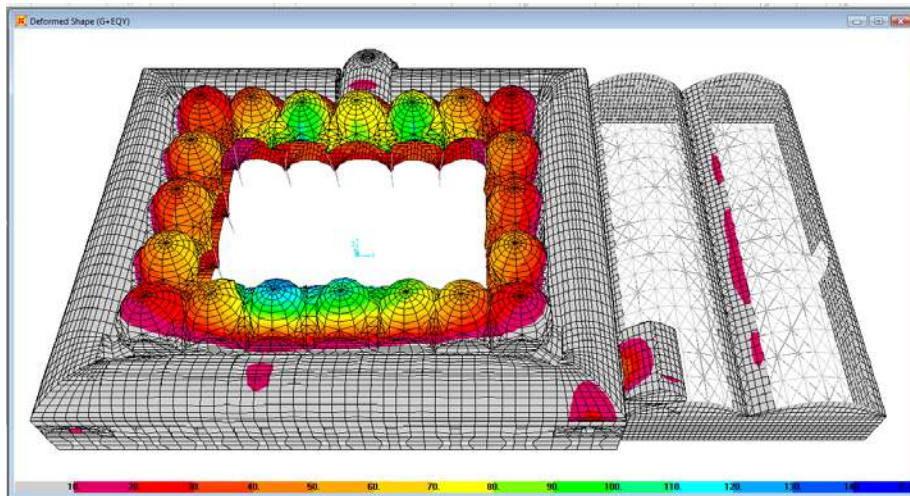
Çelikle onarımı yapılan develik kısmındaki maksimum yer değiştirmeler X ve Y yönündeki deprem yüklemelerinde 0,6 cm'nin altında kalmıştır.



Şekil 5.7. Kendi ağırlığı (GRAVITY) altında elde edilen yer değiştirmeler



Şekil 5.8. X yönündeki deprem yüklemesi altında elde edilen yer değiştirmeler



Şekil 5.9. Y yönündeki deprem yüklemesi altında elde edilen yer değiştirmeler

Yapının strüktürel performansını belirlemek için yapılan sonlu elemanlar analizinin, kabuk elemanlarında hesaplanan gerilmelerden, her elemanın kendi yerel eksenine göre düşey doğrultuda (SAP2000 programının formatına göre S22 olarak tanımlanan) meydana gelen çekme veya basınç gerilmeleri ile (SAP2000 programının formatına göre S12 olarak tanımlanan) kayma gerilmeleri yapının dayanımı hakkında en açıklayıcı sonucu vermektedir.

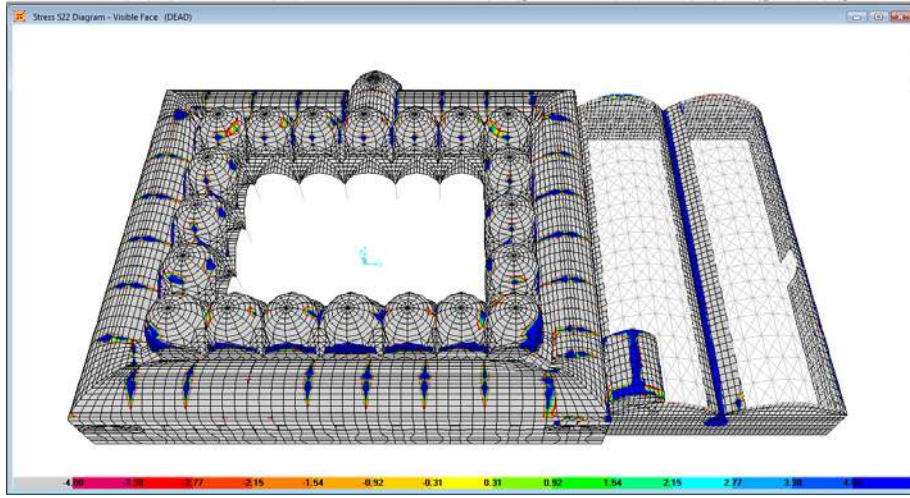
Yükler etkisi altında taşıyıcı elemanlarda oluşan maksimum basınç gerilmelerinin malzemenin basınç emniyet gerilmesini geçmemesi gerekir. Aynı zamanda taşıyıcı elemanlarda oluşan çekme gerilmelerinin çatlama oluşturacak mertebelere ulaşmamış olması gerekir. Yapı modeli incelendiğinde şu değerlendirmeler yapılmıştır:

Kendi ağırlığı (GRAVITY) altında oluşan basınç gerilmeleri incelendiğinde, revaklarda oluşan maksimum basınç gerilmeleri 1,977 MPa ya kadar ulaşmıştır. Yapının tonoz kısmına bakıldığında basınç gerilme değeri 1,165 MPa olarak gerçekleşmiştir(Şekil 5.10).

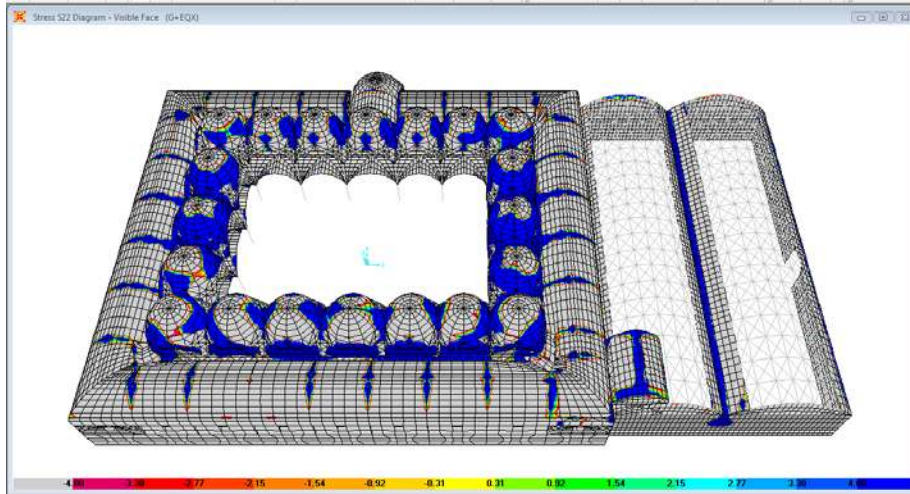
X yönünde (G+EQx) uygulanan deprem kuvveti sonucu oluşan basınç gerilmeleri incelendiğinde revakların bazı kısımlarında oluşan gerilmeler 2,235 MPa'ya kadar ulaşmıştır. Develik kısmındaki tonoz ve duvarlarda oluşan gerilmeler 1,779 MPa düzeyinde gerçekleşmiştir (Şekil 5.11).

Y yönünde (G+EQy) uygulanan deprem kuvveti sonucu oluşan basınç gerilmeleri incelendiğinde revakların bazı kısımlarında oluşan gerilmeler 2,450 MPa'ya kadar ulaşmıştır. Develik kısmındaki tonoz ve duvarlarda oluşan gerilmeler 1,887 MPa düzeyinde gerçekleşmiştir (Şekil 5.12).

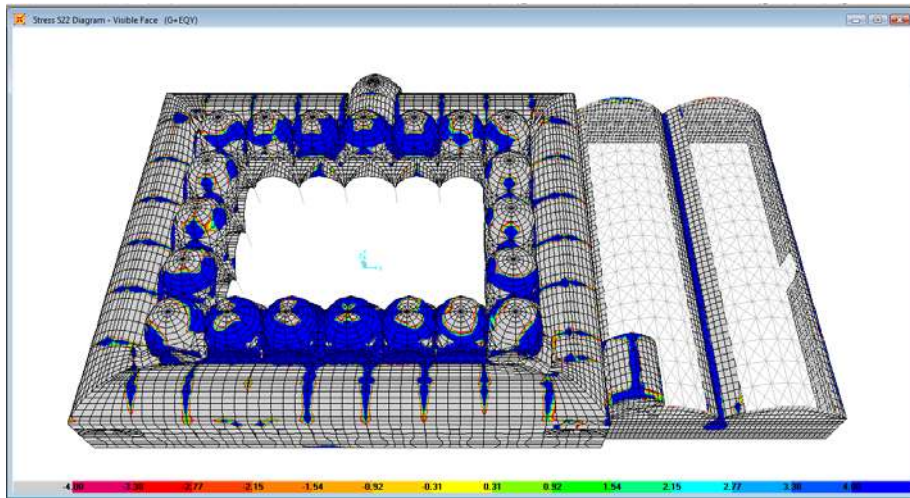
Kayma gerilmelerine bakıldığında gerilme değerleri 0,35-0,48 MPa arasında değişmektedir. Maksimum kayma gerilmesi 0,48 MPa ile yine revaklarda meydana gelmiştir.



Şekil 5.10. Kendi ağırlığı (GRAVITY) sonucunda elde edilen eksensel gerilmeler



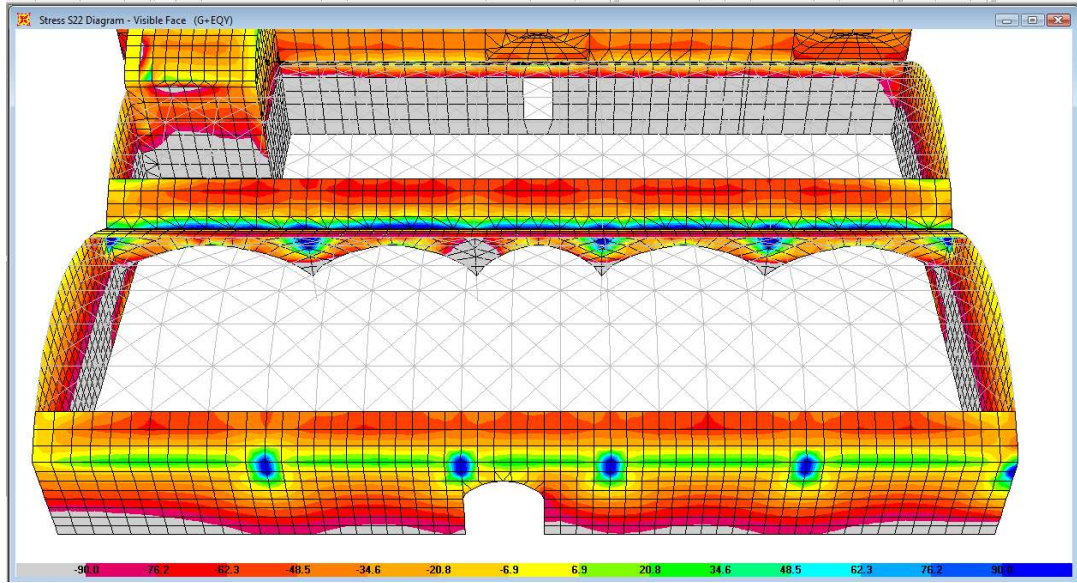
Şekil 5.11. G+EQx yüklemesi sonucunda elde edilen eksensel gerilmeler



Şekil 5.12. G+EQy yüklemesi sonucunda elde edilen eksensel gerilmeler

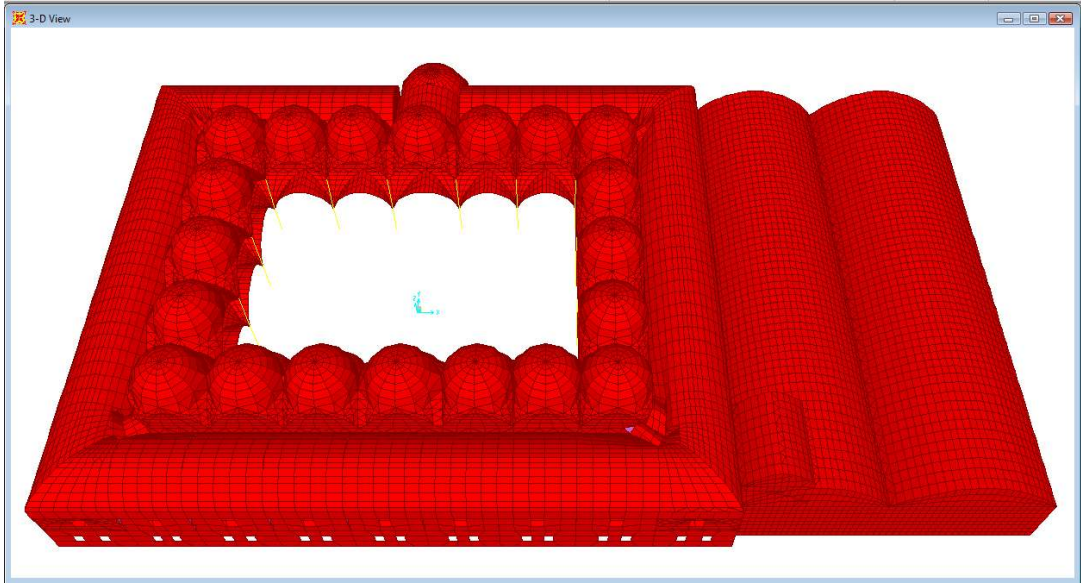
Onarımı yapılan tonoz bölgesi daha kritik olması beklenen X ve Y yönündeki deprem yüklemesine göre incelendiğinde basınç gerilme değerlerinin maksimum 1,105 MPa ile tonoz-duvar birleşim yerlerinde oluşmuştur. Buna karşılık çekme gerilmeleri 0,095 MPa ile tonoz duvarlarında meydana gelmiştir.

Bu durum taşıyıcı elemanın geometrisi ve doğru malzeme kullanılması ile ilgili bir özellik olup analiz sonuçlarından bulunan maksimum gerilmeler, emniyet gerilmeleri ile karşılaştırılmış; yapının tonoz kısmı ve duvarlarının belli bir güvenliğe sahip olduğu görülmüştür. Genel olarak bakıldığında revaklar dışında yapıda oluşan maksimum basınç gerilmesi 1,500 MPa'ın altında gerçekleşmiştir. Özellikle tonoz kısmındaki gerilmelerin düşük çıkmasında çelikle yapılan onarımın yapıyı hafifleterek gerilme değerlerin düşük çıkmasında etkili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.13. Yapının tamamının G+EQy yükleme analizi yapıldıktan sonra develik kısmında oluşan gerilmeler

Başka bir uygulama olarak yapının tüm kısımlarının geleneksel malzemeye onarımı yapıldığındaki durumu yine SAP2000 programında modellenerek analizi yapılmıştır (Şekil 5.15). Yapılan bu analiz sonucunda çelikle yapılan onarımdan farklı bir durum ortaya çıkmıştır. Yıkılan tonozlar tekrar geleneksel malzemeye yapıldığında binanın salınım periyodu artmaktadır. Bu artışa tonozların neden olduğu gözlenmiştir.



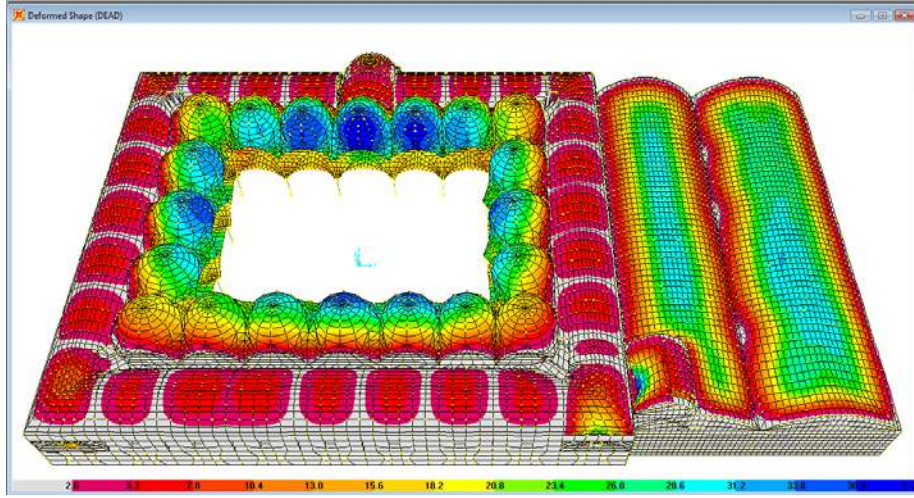
Şekil 5.14. Yapının tamamının geleneksel malzemeye onarımı modeli

Yapılan ayrıntılı hesaplar sonucunda Deveci Hanı'nın olası bir deprem sırasındaki davranışı ve taşıyıcı elemanlarının karşılaştıkları etkilere karşı dayanımı ile ilgili şu gözlemler yapılmıştır.

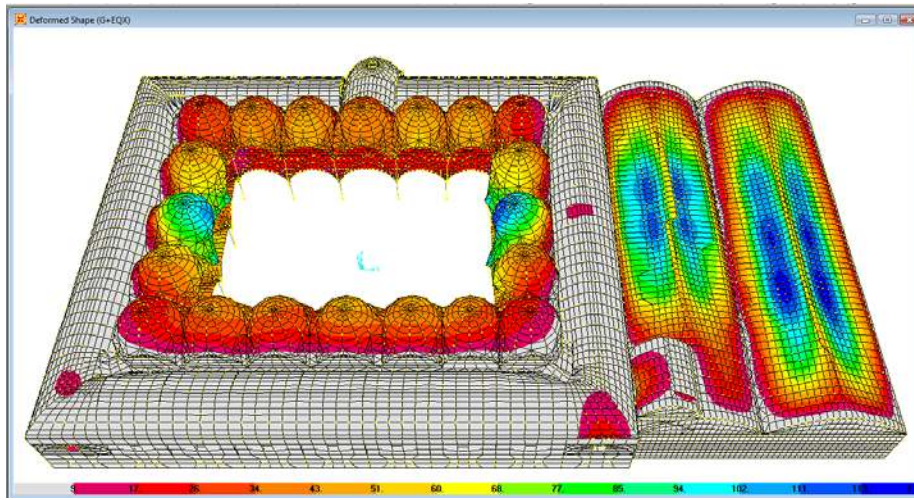
Yapılan tepki spektrumu analiz sonuçlarının değerlendirilmesine ilk olarak yapının ilk üç modundaki deformasyonların incelenmesiyle başlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda yapının birinci, ikinci ve üçüncü doğal periyodu birbirine yakın çıkmıştır. Analiz sonucunda sırasıyla yapının periyotları 1. Modan 3. Moda kadar sırasıyla $T=0,780$ sn, $T=0,702$ sn ve $T=0,683$ sn olarak gerçekleşmiştir.

Yapının ilk üç periyoduna bakıldığında salınım değerlerinin çelikle onarımı yapılan modele göre yüksek çıkmasında, yeniden yapılarak onarılan revakların ve özellikle geleneksel malzemeye onarılan develik kısmındaki tonozların yapının salınım periyodunun artmasına neden olduğu görülmektedir.

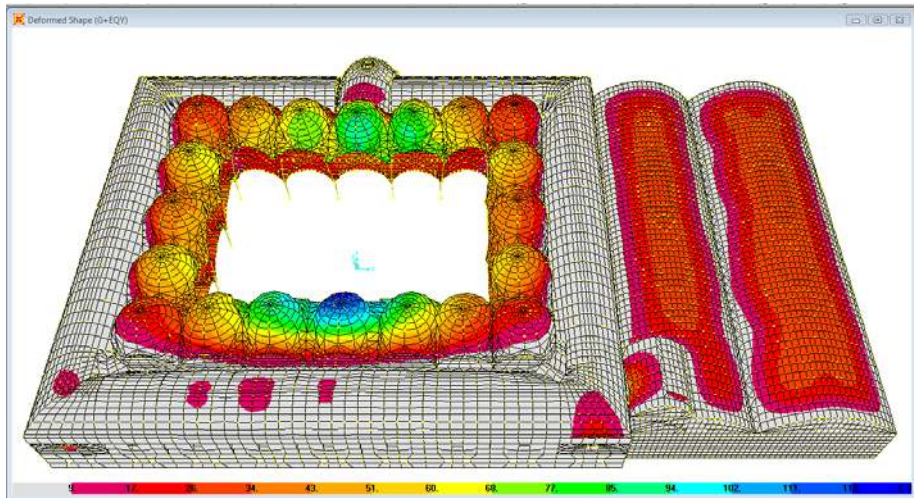
Elde edilen en büyük yer değiştirmelerin tonozlarda ve revaklarda ortaya çıktığı görülmüştür. Revak kubbelerinde oluşan yer değiştirmeler her iki yönde de 2,4- 2,6 cm ve tonozlarda oluşan yer değiştirmeler 2,9 -3,1 cm aralığında ortaya çıkmıştır (Şekil 5.15, Şekil 5.16, Şekil 5.17).



Şekil 5.15. Kendi ağırlığı (GRAVITY) altında elde edilen yer değiştirmeler



Şekil 5.16. X yönündeki deprem yüklemesi altında elde edilen yer değiştirmeler



Şekil 5.17. Y yönündeki deprem yüklemesi altında elde edilen yer değiştirmeler

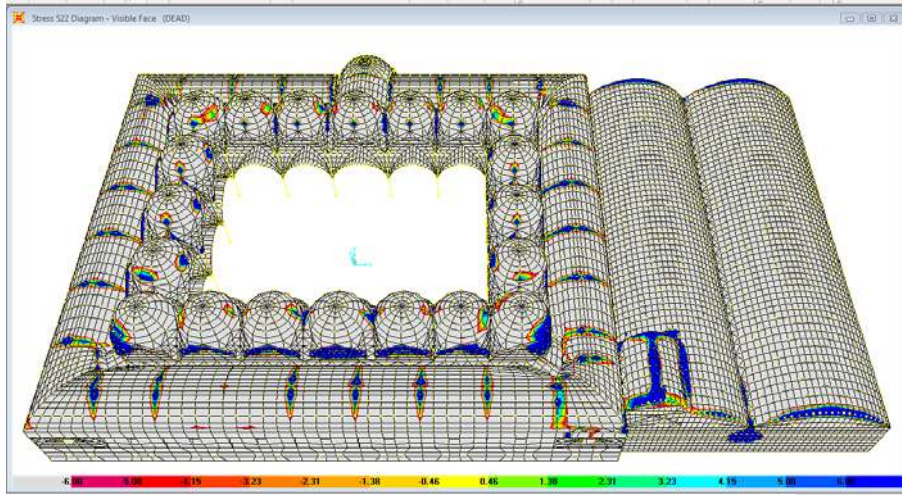
Yine analiz sonuçlarından deformasyonlar incelendiğinde, büyük oranda tonozların deforme olduğu ve en büyük deformasyon değeri birinci akstaki tonozda ve X yönündeki deprem yüklemesi altında ortaya çıktığı ve bununla 3 cm ye ulaştığı gözlenmiştir. Böyle bir deformasyon sürdürülebilir değildir. Analizler sonucunda Bu yapının en zayıf noktalarının revaklar ve develik kısmındaki tonozlar olduğu ortaya çıkmaktadır. Ancak tonozlar çelikle onarımı yapıldığında binanın salınım periyodu azalmaktadır. Bir diğer konu revakları ayakta tutan kolonlarda çok büyük oranda kesme gerilmeleri meydana gelmektedir.

Yükler etkisi altında taşıyıcı elemanlarda oluşan maksimum basınç gerilmelerinin malzemenin basınç emniyet gerilmesini geçmemesi gerekir. Aynı zamanda taşıyıcı elemanlarda oluşan çekme gerilmelerinin çatlama oluşturacak mertebelere ulaşmamış olması gerekir. Yapı modeli incelendiğinde şu değerlendirmeler yapılmıştır.

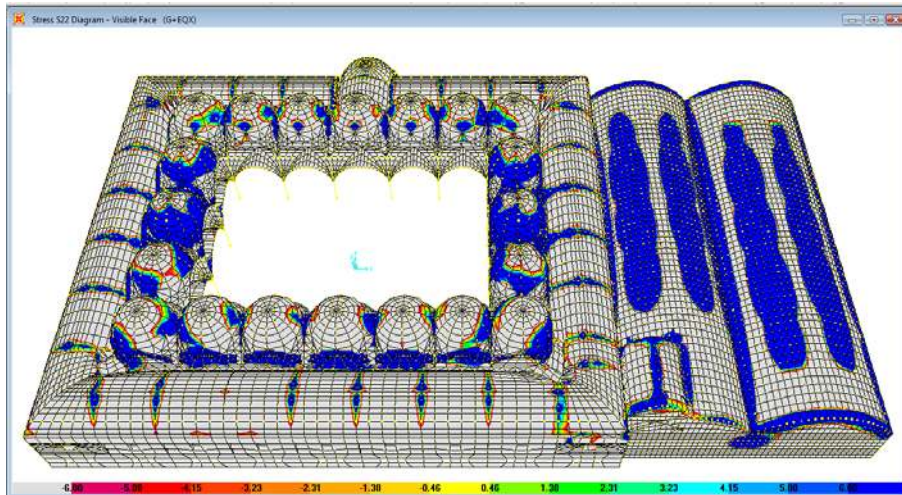
Kendi ağırlığı (GRAVITY) altında oluşan basınç gerilmeleri incelendiğinde, revaklarda oluşan maksimum basınç gerilmeleri 1,277 MPa ya kadar ulaşmıştır. Yapının tonoz kısmına bakıldığında basınç gerilme değeri 1,465 MPa olarak gerçekleşmiştir (Şekil 5.18).

X yönünde (G+EQx) uygulanan deprem kuvveti sonucu oluşan basınç gerilmeleri incelendiğinde revakların bazı kısımlarında oluşan gerilmeler 2,235 MPa'ya kadar ulaşmıştır. Ancak develik kısmındaki tonozlarda oluşan gerilmeler 2,779 MPa düzeyinde gerçekleşmiştir. Bu değerler Çizelge 5.2'de verilmiş olan tuğla malzemenin emniyetle taşıyabileceği gerilme değerlerini aşmaktadır (Şekil 5.19).

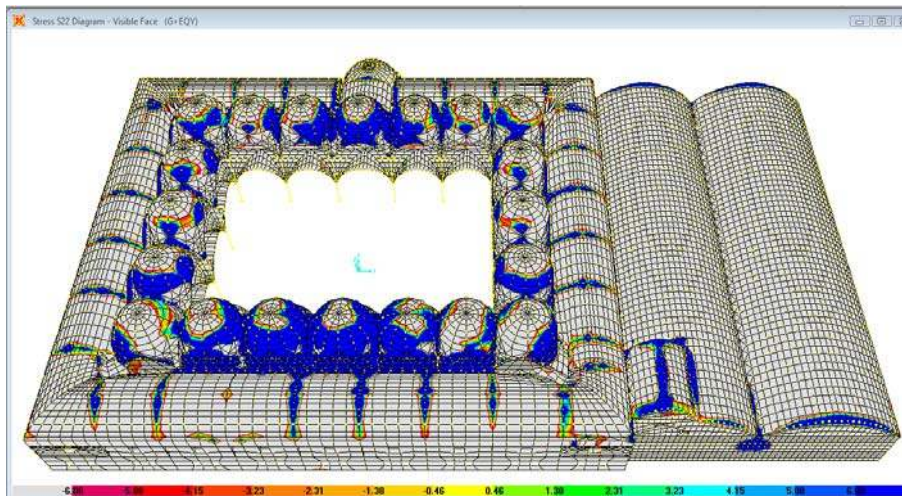
Y yönünde (G+EQy) uygulanan deprem kuvveti sonucu oluşan basınç gerilmeleri incelendiğinde revakların bazı kısımlarında oluşan gerilmeler çelikle onarımı yapılmış modelde olduğu gibi oldukça yüksek çıkmıştır.ancak elde edilen değer 2,350 MPa'ya kadar ulaşmış olmasına rağmen emniyetli değerlerin altında kalmıştır. Develik kısmındaki tonozlarda ise gerilmeler 1,987 MPa düzeyinde gerçekleşmiştir (Şekil 5.20).



Şekil 5.18. Kendi ağırlığı (GRAVITY) sonucunda elde edilen eksensel gerilmeler



Şekil 5.19. G+EQx yüklemesi sonucunda elde edilen eksensel gerilmeler



Şekil 5.20. G+EQy yüklemesi sonucunda elde edilen eksensel gerilmeler

Yapısal analizler sonucunda elde edilen etkilerin incelenmesinde, Tokat Deveci Hanının taşıyıcı elemanlarında Türk Deprem Yönetmeliğinde yığma yapılar için önerilen basınç ve kayma gerilmesi değerlerinin büyük ölçüde aşılmadığı gözlenmiştir.

Yapılan gerilme hesapları sırasında, yapının taşıyıcı sistemini oluşturan elemanların malzeme özelliklerinin literatür araştırması ve mevcut yönetmeliklerde önerilen değerler doğrultusunda belirlenmiş olduğu dikkate alınmalıdır. Bu durumda, yapının belirli yerlerindeki olası malzeme bozulmalarının ya da taşıyıcı elemanlarda meydana gelebilecek malzeme kayıplarının yapının davranışını etkileyebileceği söylenebilir. Ancak, elde edilen deplasmanlar ve gerilmeler kabul edilebilir sınırlar dahilinde olduğundan, bu tür bir varsayım sonucunda bile Tokat Deveci Hanının depreme karşı dayanımı ile ilgili bir olumsuzluğun meydana gelmesi ihtimali çok zayıftır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Taş veya tuğla malzeme ile yığma yapı tekniğine göre inşa edilmiş tarihi yapıların korunması veya restorasyonu için yapısal davranışının belirlenmesi çok önemlidir. Tarihi yapılarda çeşitli yük etkileri altında oluşan gerilme ve kuvvetlerin hesaplanması amacıyla yapısal analizlerinin doğru bir şekilde yapılması gerekmektedir. Çok karmaşık geometrik özelliklere ve malzeme çeşidine sahip bu tür yapıların matematiksel modelleri için özel yöntemler kullanılmalıdır.

Tarihi binaların yapısal analizi günümüzün modern yapım tekniklerine göre üretilen yapıların yapısal analizinden farklıdır. Modelleme aşamasında eleman boyutlarının tam olarak belirlenememesi, birleşim detaylarının tanımlanamaması, malzemelerin gerçek mekanik özellikleri ve sınır gerilme değerlerinin elde edilememesi gibi belirsizlikler nedeniyle hesap sonuçlarının yorumlanmasında benzer binaların yapısal davranışlarında gözlenen deneyimler ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışma iki kısımdan oluşmuştur. Birinci kısımda, dördüncü bölümde çizelgelerle detaylı olarak verilen tonoz modelleri SAP2000 programında modellenerek analizleri yapılmıştır. İkinci kısımda ise tonoz modellerinde elde edilen sonuçlara göre bu uygulama gerçek yapı üzerinde denenmiştir.

Analizlerde kullanılan tonozlar iki farklı hasar türüne göre (eşit kalıntı yüksekliği ve farklı kalıntı yüksekliği) gruplandırılmıştır. Hasarlı tonozlarda geleneksel malzeme yerine çelik malzeme kullanılarak onarım senaryoları hazırlanmıştır. Ayrıca hasarlı kısımların onarımında da 3 farklı çelik konstrüksiyon denenmiştir. Toplamda 16 tonoz modeli oluşturulmuştur. Analiz parametreleri 5. Bölümde analizi yapılan yapının develik kısmındaki tonozların geometrik özellikleri, deprem bölgesi ve zemin sınıfı dikkate alınarak oluşturulmuştur. Çıkan sonuçların değerlendirilmesinde Türkiye Deprem Yönetmeliğinde taş, tuğla ve harç için verilen emniyet gerilme değerleri ve literatürde bununla ilgili oluşturulmuş formüllerden faydalanılmıştır. Bu modellerin analizleri sonucunda şu sonuçlara ulaşılmıştır.

Eşit kalıntı yüksekliğine sahip tonoz modellerinin analizinde salınım değerleri 0,176 sn ile 1,328 sn arasında çıkmıştır. Bu sonuca göre kalıntı yüksekliği arttıkça salınım periyodu değerinin arttığı gözlenmiştir. Çelikle yapılan onarımın yapıyı rijitleştirdiği görülmüştür. Tonozlar salınım periyoduna göre incelendiğinde, çelik konstrüksiyonun şeklinin periyotların değişmesinde pek etkili olmadığı görülmüştür.

Basınç gerilmeleri açısından bakıldığında tüm modeller içinde en büyük gerilme değeri 0,870 MPa ile TK-FKY-4.10 modelinin X yönündeki deprem yüklemesinde çıkmıştır. Bu değer bile Türk Deprem Yönetmeliğine göre hesaplanan emniyet gerilmesinin oldukça altında kalmıştır.

Çekme gerilmelerine bakıldığında en büyük değer 0,433 MPa ile TD-FKY-4.10 modelinin Y yönündeki deprem yüklemesinde çıkmıştır. Kayma gerilmelerine bakıldığında en büyük gerilme yine 0,167 MPa ile TK-FKY-4.10 modelinin X yönündeki deprem yüklemesinde çıkmıştır.

Bu sonuçlara göre tonozlarda meydana gelen basınç ve kayma gerilmeleri açısından bakıldığında herhangi bir olumsuzlukla karşılaşmadığını göstermektedir. Ancak yukarıda adı geçen modelde çekme gerilmeleri açısından bir sıkıntı olduğu ve bunun çatlamlara neden olacağı görülmüştür.

Çelikle yapılan bu onarım, tonozlarda elde edilen veriler dikkate alınarak mevcut yapı üzerinde uygulaması yapılmıştır. Bu uygulama için Tokat Deveciler Hanı seçilmiştir. Bu çalışmada yapının detaylı rölöveleri ve yerinde yapılan incelemeler neticesinde sayısal modeli titizlikle oluşturulmuştur. Analizlerde literatürdeki benzer çalışmalarda kullanılan malzeme değerleri kullanılmıştır.

Deveci hanı 2 kısımdan oluşmuştur. Birinci kısım kareye yakın planda ve han odalarının bulunduğu iki katlı kısımdır. İkinci kısım tek katlı ve iki boyuna akstan oluşan develik kısmıdır. Bu kısımda açıklık tonozlarla geçilmiştir. Mevcut durumda birinci aks tonozları ağır hasarı olup büyük ölçüde yıkılmıştır. İkinci kısımdaki tonozlarda kagir direklerle ayakta tutulmaktadır.

Birinci uygulamada bu iki tonozun hasar durumları göz önüne alınarak çelik konstrüksiyonla onarımı yapılacak şekilde SAP2000 programında 21 235 kabuk (SHELL) 1 060 çubuk (FRAME) elemandan oluşacak şekilde modellenmiş ve analiz edilmiştir. İkinci uygulamada hasarlı tonozlar geleneksel malzeme kullanılarak 23 126 kabuk (SHELL), 227 çubuk (FRAME) eleman kullanılarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Birinci uygulama için şu sonuçlara ulaşılmıştır.

Analiz sonucunda Deveci Hanı'nın rijit bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Yapının periyotları 1. Modan 3. Moda kadar sırasıyla $T=0,516$ sn, $T=0,514$ sn ve $T=0,509$ sn olarak gerçekleşmiştir. Bu değerler yığma yapılar için beklenen düzeyde gerçekleşmiştir.

Deveci Hanının yapısal performansının değerlendirilmesinde sadece en büyük yer değiştirme değil bütün noktalarının hangi oranlarda yer değiştirdiğinin bilinmesi ön plana çıkmaktadır. Yukarıda da belirtildiği gibi çok sayıda düğüm noktasının birleştirilmesi ile elde edilen yapı modelinin öngörülen deprem etkisi altında nasıl bir performans gösterdiği yer değiştirmelerin lokal gerilmelere dönüştürülmesi ile görülebilir.

Hesap spektrumu deprem yönetmeliğinin Tokat için önerdiği deprem etkisine göre yapılan analizler sonucunda elde edilen en büyük ötelenme değerleri yapının sonradan onarılan revaklarının en üst noktasında, X yönünde 2,5 cm ve Y yönünde ise 2,8 cm'dir. Bu yer değiştirmenin revaklarda çatlamalara sebep olması beklenebilir. Bu durum yapının şu anki hasarlı durumunda ışıktır. Ancak çalışmanın esasını oluşturan develik kısmındaki tonozlarda en fazla yer değiştirme X yönündeki deprem yüklemesinde 1,2 cm düzeyinde kalmıştır.

Yapıda oluşan gerilmeler açısından bakıldığında, en büyük değer Y yönünde ($G+E_Q$) uygulanan deprem kuvveti sonucu revakların bazı kısımlarında 2,450 MPa düzeyinde ortaya çıkmıştır. Maksimum kayma gerilmesi 0,48 MPa ile yine revaklarda meydana gelmiştir. Onarımı yapılan tonoz bölgesi daha kritik olması beklenen X ve Y yönündeki deprem yüklemesine göre incelendiğinde basınç gerilme

değerlerinin maksimum 1,105 MPa ile tonoz-duvar birleşim yerlerinde oluşmuştur. Buna karşılık çekme gerilmeleri 0,095 MPa ile tonoz duvarlarında meydana gelmiştir. Özellikle revaklarda oluşan bu değerler Türk Deprem Yönetmeliğine göre sınır değerleri aşmaktadır. Ancak çelikle onarımı yapılan develik kısmındaki değerler sürdürülebilir olarak görülmektedir.

Yapı ikinci olarak geleneksel malzemeyle onarıldığında şu sonuçlar elde edilmiştir.

Yapının periyotları 1. Modan 3. Moda kadar sırasıyla $T=0,780$ sn, $T=0,702$ sn ve $T=0,683$ sn olarak gerçekleşmiştir. Bu değerler yığma yapılar için beklenen düzeyde gerçekleşmiştir. Ancak çelikle yapılan onarıma göre bir artış gözlenmiştir. Bu artışa tonozlarda oluşan hareketin sebep olduğu görülmüştür.

Yapının revakları ve diğer kısımlarında oluşan gerilmelerde kayda değer bir artış görülmemiştir. Ancak develik kısmındaki tonozlarda oluşan gerilmeler 2,779 MPa düzeyinde gerçekleşmiştir. Bu değerler Çizelge 5.2’de verilmiş olan tuğla malzemenin emniyetle taşıyabileceği gerilme değerlerini aşmaktadır.

Genel olarak bakıldığında; oldukça ağır bir kütlesi olan yapının deprem dayanımı belirleyen en önemli kısımların ana yapı ortasındaki revakların ve develik kısmındaki tonozların olduğu görülmüştür. Yapının ana kısmında mekanların küçük olması sayesinde, yapı tavanını oluşturan tonozlar develik kısmına oranla daha az zorlanmaktadırlar.

Develik kısmında çelikle yapılan onarımın geleneksel malzemeyle yapılan onarıma oranla salınım periyodunda ve gerilmelerde avantaj sağladığı görülmüştür. Özellikle çelikle onarımı yapılan tonoz kısmındaki gerilmelerin düşük çıkmasında bu tür bir onarımın yapıyı hafifleterek gerilme değerlerinin düşük çıkmasında etkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca yapısal analizler sonucunda elde edilen etkilerin incelenmesinde, Tokat Deveci Hanı’nın taşıyıcı elemanlarında Türk Deprem Yönetmeliğinde yığma yapılar için önerilen basınç ve kayma gerilmesi değerlerinin bazı bölümlerinde aşıldığı gözlenmiştir.

Yapılan gerilme hesapları sırasında, yapının taşıyıcı sistemini oluşturan elemanların malzeme özelliklerinin literatür araştırması ve mevcut yönetmeliklerde önerilen değerler doğrultusunda belirlenmiş olduğu dikkate alınmalıdır. Bu durumda, yapının belirli yerlerindeki olası malzeme bozulmalarının ya da taşıyıcı elemanlarda meydana gelebilecek malzeme kayıplarının yapının davranışını etkileyebileceği söylenebilir.

Bu tür analizler gerçek yapı malzemesi değerlerine dayanmadığı için elde edilen sayısal sonuçlar nihai sonuç olarak görülmemelidir. Yapılan bu ve buna benzer çalışmalarda genel olarak tarihi yapıların deprem etkisi altında nasıl davranacağını gösteren veriler oluşturmaktadır. Doğrusal elastik analize göre yapılan bu çalışmanın diğer analiz yöntemleri denenerek ve çelik konstrüksiyonla kagir malzeme arasındaki bağlantı detaylarına alternatifler üretilerek devam edilmesinde fayda olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Aras, F., Krstevka, L., Altay, G., Tashkov, L., “Experimental and numerical modal analyses of a historical masonry palace”, *Construction and Building Materials*, 25: 81-91, (2011).
2. Betti, M., Vignoli, A., “Modelline and Analysis of a Romanesque Church Under Earthquake loading: Assessment of Seismic Resistance”, *Engineering Structures*, 1-16, (2007).
3. Venedik Tüzüğü, “Tarihi Anıtların ve Yerleşmenin Korunması ve Onarımı için Uluslar arası Tüzük”, *II.Uluslararası Tarihi Anıtlar Mimar ve Teknisyenleri Kongresi*, İtalya, (1964).
4. Ünay, A.İ., “Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı”, *ODTÜ Mimarlık Fak.Basım İşliğı*, Ankara, 76- 77, (2002).
5. Lourenço, P.B., “Recomandations for restoration of ancient buildings and the survival of a masonry chimney”, *Construction and Buildin Metarials*, 20: 239-251, (2006).
6. Akan, A., E., “Tarihi Ahşap Sütunlu Camilerin Sonlu Elemanlar Analizi ile Taşıyıcı Sistem Performansının Belirlenmesi”, *SDU International Technologic Science, Construction Technology*, Isparta, 2 (1): 41-54, (2010).
7. Lourenço, P.B., “Computational Strategies for Masonary Structures”, Doktora Tezi, *Delft University Pres*, Netherland, 6-15, (1996).
8. Mutlu, B., “Mimarlık Tarihi Ders Notları”, *Mimarlık Vakfı Enstitü Yayınları*, İstanbul, 71-79, (2001).
9. Gökçe, G., “Başlangıçtan Günümüze Mimaride Strüktür”, *Yapı Dergisi*, YEM Yayınları, İstanbul, 23. Sayı:12-26, (1977).
10. Kuban, D., “Sinan’ın Sanatı ve Selimiye”, *Tarih Vakfı Yurt Yayınları*, İstanbul, 41, (1998).
11. Özer, S., “Geleneksel Yığma Yapılarda Strüktürel Elemanların Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri , 10-28, (2006).
12. Şimşek, O., “Yapı Malzemesi II”, *Beta*, Ankara, 137-145, (2001).
13. Çamlıbel, N., “Geleneksel Yapılarda Stabilitenin İyileştirilmesi ve Temellerin Takviyesi”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 22-45, (2000).

14. Dayı, M., “Doğal ve Yapay Puzolanların Kompozit Çimento Üretiminde Kullanılabilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 37-51, (2006).
15. Akman, S., Güner, A., Aksoy, İ.H., “Horasan Harcı ve Betonun Tarihi ve Teknik Özellikleri” **II.Uluslararası Türk-İslam Bilim ve Teknoloji Tarihi Kongresi İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi**, İstanbul, 1: 101-111, (1986).
16. Franzini, M., Leoni, L., Lezzerini, M., “A Procedure for Determining the Chemical Composition of Binder and Aggregate in Ancient Mortars: Its Application to Mortars from Some Medieval Buildings in Pisa”, **Journal of Cultural Heritage**, 1: 365-373. (2000).
17. Tunçoku, S.,S., “Characterization of Masonary Mortars Used in Some Anatolian Seljuk Monuments in Konya, Beyşehir and Akşehir”, Doktora Tezi, **ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, 22-43, (2001)
18. Böke, H., Akkurt, S., İpekoğlu, B., “Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harcı ve Sıvalarının Özellikleri”, **Yapı Dergisi**, İstanbul, 269: 90-95, (2004).
19. Tunçoku, S., “Günümüzde Koruma /Restorasyon Çıkmazı”, **Mimarlık Dergisi Mimarlar Odası**, İstanbul, 315: 56-59, (2004).
20. Croci, G., “The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage”, **Dissertation, Delft University of Technology**, Delft, Netherlands,102-123, (1998).
21. Ural, A., “Yığma Yapıların Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Davranışlarının İncelenmesi”, Doktora Tezi, **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, 37-41, (2009).
22. Bayraktar, A., “Tarihi Yığma Yapıların Depreme Karşı Güçlendirilmesi”, **Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı**, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 1-15, (2005).
23. Romera, L.E., Hernandez, S., Reinose, J.M., “Numerical Characterization of the Structural Behavior of the Basilica of Pilar in Zaragoza (Spain). Part 1:Global and Local Models”, **Advences in Engineering Software**, 39: 301-314, (2008).
24. Akan, A.E., Özen, Ö., “Bursa Yeşil Türbe’nin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Deprem Analizi”, **Deprem Sempozyumu**, Kocaeli, 758-762, (2005).
25. Küçükdoğan, B., Kubin, J., Unay, A.İ., “Seismic assessment of Monastery of Stoudios (Imrahor Mosque) in Istanbul”, **Advanced Materials Research**, Switzerland, 133-134: 721-726, (2010).

26. Özkul, T.A., Karagüler, M., Ergüneş, O.İ., Kaya, Y., Pavlatos, C.F., “Static and Dynamic Analysis of Panagia Ton İsodion Church”, *Internationsl Symposium Studies on Historical Heritage*, İstanbul, 535-543, (2005).
27. Türkçü, Ç., “Yapım”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 100, (2000).
28. Toker, S., “Development of Arch Form; Exploring The Behavior of Masonry Arches and Arch Bridges by Finite Element Analysis”, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, *ODTÜ Mimarlık Bölümü*, Ankara, 13-32, (2000).
29. Yılmaz, P., “Tarihi Yapıların Modellenmesi ve Deprem Güvenliklerinin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 5-15, (2006).
30. Erol, A.İ., “Mimarlıkta Taşıyıcı Sistemler”, *Karaelmas Üniversitesi Zonguldak MYO*, Zonguldak, 85, (1997).
31. Kretzschmer, F., “Antik Roma’da Mimarlık ve Mühendislik”, Çeviri Editörü, İlkelen, Z., *Z.Arkeoloji ve Sanat Yayınları*, İstanbul, 31, (2000),
32. Mavi, Ö., “Kireç Harç ve Sıvaların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 9-21, (2000).
33. Büyükyıldırım, G., “Öldüren deprem mi, yapılar mı?”, *Cumhuriyet Bilim Teknik*, 23-29, (1999).
34. Ching, F.D.K., “Mimarlık Biçim, Mekan, Düzen”, Çeviri Editörü, Lökçe, S., *YEM Yayınları*, İstanbul, 280- 281, (2002).
35. Toker, S., Ünay, A.I., “Mathematical Modeling and Finite Element Analysis of Masonry Arch Bridges”, *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 17(2): 129-139, (2004).
36. Günsoy, O., “Yapı (cilt 1) kagir inşaat”, *Arpaz Matbaacılık*, İstanbul, 44-48, (1975).
37. Arslan, M., “Yapı Teknolojileri 2. Cilt ”, *Seçkin Yayınevi*, Ankara, 62-63, (2008).
38. Kuban, D., “Mimarlık Kavramları”, *YEM Yayınları*, İstanbul, 44- 45, (1998).
39. Tuluk, Ö.İ., “Mekana Bağlı Strüktür Analizi: Osmanlı Dini Mimarisinde Örnekleme(15- 17. yy)”, Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 10- 11, (1999).
40. Hasol, D., “Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü”, *YEM Yayınları*, İstanbul, 145, (1997).

41. Ahunbay, Z., “Tarihi Çevre Koruma ve Restorasyon”, *YEM yayınları*, İstanbul, 23-45, (1996).
42. Köseoğlu, S., “Temeller Statiği ve Konstrüksiyonu”, *Matbaa Teknisyenleri Basımevi*, 4-23; (1987).
43. Ömercioğlu, H.T., Ünay, A.İ., “Seismic Strengthening of Historical Structures by Enfolding Steel Skeleton”, *5th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic areas (Stessa2006)*, Yokohama, Japan, 1: 835-841, (2006).
44. Koçak, A., “Tarihi Yapıların Statik ve Dinamik Yükler Altında Lineer ve Nonlineer Analizi: Küçük Ayasofya Camii Örneği”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 21-27, (1999).
45. Güçhan Ş.N., Kayasü, S., “Türkiye’ de Doğal ve Yapılı Çevreyle İlgili Yeni Yasal Düzenlemeler Hakkında”, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Görüşleri*, Ankara, 22-33, (2005).
46. Vintzileou, E., Zagkotsis, A., Repapis, C., Zeris, Ch., “Seismic behaviour of the historical structural system of the island of Lefkada, Greece”, *Construction and Building Materials*, 21: 225-236, (2007)
47. Ural A., “Tarihî Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Metoduyla Analizi” *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, 1-11, (2005).
48. Lourenço, P.B., Zucchini A., Milani G. and Tralli A., “Homogenization Approaches for Structural Analysis of Masonry Buildings”, *Structural analysis of Historical Constructions*, New Delhi, 59-63, (2006).
49. Çavuş, M., “Tarihi Yapıların Çelik Malzemeyle Restorasyonunun Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Strüktürel Açıdan İncelenmesi”, *Uluslararası Katılımlı Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu -2*, 303-310, (2009).
50. Moropoulou, A., Çakmak, A.S., Lohvyn, N., “Earthquake resistant construction techniques and materials on Byzantine monuments in Kiev”, *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 19: 603-615, (2000).
51. Petyt, M., “Introduction to Finite Element Vibration Analysis”, *Cambridge University Press*, 297-316, (1990).
52. Erdik, M., Durukal, E., “Ayasofya’nın Deprem Davranışı”, *2. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, 203-221, (1993).

53. Çakmak, A.S., Moropoulou, A., Mullen, C.L., “Interdisciplinary Study of Dynamic Behavior and Earthquake Response of Hagia Sophia”, **USA National Technical Universty of Athens**, Greece, 41-57, (1994).
54. Selahiye, A., Aydınoğlu, N.M., Erdik M., “Süleymaniye Camiinin Dinamik Özelliklerinin Deneysel ve Analitik Yöntemlerle Belirlenmesi”, **Teknik Dergi**, 284-293, (1994).
55. Yüzügüllü, Ö., Durukal, E., “The Effects of the Train Traffic on the Küçük Ayasofya Mosque in Istanbul”, **International Conference on Studies in Ancient Structures**, YTÜ, Faculty of Architecture, İstanbul, 323-335, (1997).
56. Timur, T., “Edirnekapı Mihrimah Sultan Camii Taşıyıcı Sistem Davranışının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 21-47, (2001).
57. Özcan, Z., “Tarihi Sangarius (Sakarya) Köprüsü Üzerine Bir Çalışma”, **Sixth International Congress on Advances in Civil Engineering**, Bogazici University, 467-479, (2004).
58. Teomete, E., Aktas, E., “Structural Assessment of a Historical Masonry Structure: Urla Kamanlı Mosque”, **Sixth International Congress on Advances in Civil Engineering**, Bogazici University, 456-465, (2004).
59. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY), **Bayındırlık ve İskan Bakanlığı**, Ankara, 86-90, (2007).
60. Aksulu, B.I., “Tokat Deveci Hanı”, **9. Milletlerarası Türk Sanatları Kongresi**, T.C. Kültür Bakanlığı Yayınlar Dairesi Başkanlığı, İstanbul, 1: 65-77, (1991).
61. Giordano, A., Mele, E., Luca De, A., “Modelline of Historical Masonry Structures: Comparison of Different Approaches Through a Case Study”, **Engineering Structures**, 24 (8):1057-1069, (2002).
62. Dimitri, R., De Lorenzis, L., “Coolapse of Masonry Arches of Different Shapes Under Constant Lateral Acceleration”, **Internationsl Symposium Studies on Historical Heritage**, İstanbul, 1:503-510, (2005).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : ÇAVUŞ, Murat
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 13.07.1976 Malatya
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 202 88 77
 Faks : 0 (312) 212 00 59
 Eposta : muratcavus@gazi.edu.tr

Eğitimi

Derece	Eğitimi Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/ Yapı eğitimi	2002
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Yapı eğitimi	1999
Lise	Ankara İnşaat Teknik Lisesi	1994

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2004-2011	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2001-2004	Gaziosmanpaşa Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Yıldız, K., Çavuş, M., “Silis Dumanlı Kerpiç Üretimi Üzerine Bir Araştırma”, *E-Journal of New World Sciences Academy*, (2008).

Yıldız, K., Çavuş, M., “Kapı Köşe Birleşimlerinde Çekme Dayanımı ile Kereste Türü Arasındaki İlişkinin Analizi”, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (2008)

Çavuş, M., “Tarihi Yapıların Çelik Malzemeyle Restorasyonunun Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Strüktürel Açıdan İncelenmesi”, *Uluslararası Katılımlı Tarihi Yapıların Geleceğe Güvenle Aktarılması Sempozyumu*, Diyarbakır, (2009).

Kılıç, R., Çavuş, M., Gültekin, A.B., “Sürdürülebilirlik Kapsamında Yüksek Yapıların İncelenmesi”, *Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu*, Ankara, (2010).

Bekem, İ., Çavuş, M., Demirel, F., “Türkiye Ölçeğinde Yangın İstatistikleri Üzerine Bir Araştırma”, TÜYAK2011, Yangın ve Güvenlik Sempozyumu ve Sergisi, İstanbul, (2011).