T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARİHİ KÂGİR YAPILARDA ÇAĞDAŞ RESTORASYON UYGULAMALARINA YÖNELİK BİR YÖNTEM ÖNERİSİ

Mustafa Kemal BOZACI

DOKTORA TEZİ

MİMARLIK

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hatice KIRAN ÇAKIR

EDİRNE-2023

MUSTAFA KEMAL BOZACI'nın hazırladığı **"TARİHİ KAGİR YAPILARDA ÇAĞDAŞ RESTORASYON UYGULAMALARINA YÖNELİK BİR YÖNTEM ÖNERİSİ"** başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Mimarlık Anabilim Dalında bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri:	İmza
Prof. Dr. Metin AYDOĞDU	……
Doç. Dr. Hatice KIRAN ÇAKIR	……
Dr. Öğr. Üyesi Tülay CANITEZ	……
Dr. Öğr. Üyesi Gamze Fahriye PEHLİVAN	……
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan UMAROĞULLARI	……

Tez Savunma Tarihi: 11/01/2023

Bu tezin Yüksek Lisans/Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Doç. Dr. Hatice KIRAN ÇAKIR

Tez Danışmanı

……

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Hüseyin Ferhat KARABULUT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARLIK DOKTORA PROGRAMI

DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

11/01/2023

Mustafa Kemal BOZACI

Doktor Tezi
Tarihi Kâgir Yapılarda Çağdaş Restorasyon Uygulamalarına Yönelik Bir Yöntem Önerisi
T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
Mimarlık Anabilim Dalı

ÖZET

Coğrafi konumu itibari ile tarihinde birçok medeniyete ev sahipliği yapmış olan ülkemizde çok farklı çeşitlilikte ve sayıda tarihi eser bulunmaktadır. Kültürel miras olarak kabul edilen bu eserler yapıldıkları dönemin sosyolojik, ekonomik, politik ve dinsel yaşam özelliklerini yansıtmalarının yanı sıra geçmiş ile günümüz arasında bağ kurarak toplumsal bilinci ve kültürel kimliğimizi de oluşturmaktadırlar. Geçmişten günümüze ulaşan bu mirasın korunarak, gelecek kuşaklara sağlıklı bir şekilde aktarılması toplumların en önemli görevi ve sorumluluğudur. Çoğunlukla kâgir yapı olarak inşa edilmiş olan bu yapıların mevcut durumlarının tespit edilerek çevresel ve zamana bağlı oluşan yapısal hasarlarının onarım ve güçlendirilmelerinin yapılması, güvenliklerinin sağlanması gerekmektedir.

Tarihi yapıların, uzun yıllar boyunca kendi yükleri altında ayakta kaldıkları dikkate alındığında, genellikle düşey yükler altında belli bir dengeye ulaştıkları kabul edilmekte ve dışarıdan ilave yükleme veya temel özelliklerinde bir değişiklik olmadığı sürece de hasar oluşması beklenmemektedir. Ancak yapı elemanlarını oluşturan malzemelerde zamanla ve çevresel etkiler sonucunda oluşan bozulma ve hasarlar nedeniyle dayanım düşüşleri ortaya çıkmaktadır. Özellikle deprem ve rüzgâr gibi ilave yüklemeler sonucunda, bu yapılarda hasarlar meydan gelebilmektedir. Bu nedenle aktif fay hatlarının olduğu ülkemizde meydana gelen depremlerin geçmişte pek çok tarihi yapıya zarar verdikleri göz önüne alındığında, her bir tarihi yapının kendi özelinde ayrı ayrı incelenerek deprem performanslarının belirlenmesi ve gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.

Bu çalışmada, tarihi kâgir yapıların yapı özelinde güvenlik seviyelerinin belirlenerek uygulanacak onarım ve güçlendirilme süreçlerine ilişkin izlenmesi gereken yöntem ve yaklaşımların belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla Edirne Eski Camii ve Medrese Ali Bey Camii örnek olarak belirlenmiştir. Seçilen yapıların sonlu elemanlar modelleri hazırlanarak statik ve dinamik analizleri yapılmış, deprem performans güvenlikleri belirlenerek onarım ve güçlendirme türü ve yöntemleri önerilmiştir. Önerilen yöntemin uygulanabilirliği, belirlenen örneklerde denenmiştir.

Altı bölümden oluşan bu çalışmanın; giriş bölümünde, kültürel miras kavramı, tarihi kâgir yapılarda oluşan hasarların nedenleri, yapı deprem güvenliğinin belirlenmesi ve uygulanabilecek müdahale yöntemleri ile ilgili temel bilgiler bulunmaktadır. İkinci bölümde, kâgir malzemelerin genel özellikleri ve oluşturulan strüktürel formları hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, kâgir yapı elemanlarında oluşan hasarlar ve bu hasarların giderilmesine yönelik çözüm önerilerine yer verilmiştir. Dördüncü bölümde, kâgir yapıların analizleri için yapılması gereken çalışmalar ve uygulanacak modelleme yöntemleri ve kabulleri hakkında bilgiler verilmiştir. Beşinci bölümde, örnek olarak seçilen yapıların arşiv ve saha incelemeleri yapılarak oluşturulan analiz modellerinin statik ve dinamik hesapları yapılarak yapısal güvenlikleri ve hedef performans seviyeleri değerlendirilmiş, uygulanacak onarım ve güçlendirme yöntemleri belirlenmiştir. Önerilen yöntemler doğrultusunda uygulamaları yapılmıştır. Altıncı bölüm ise yapılan çalışmanın değerlendirildiği sonuç bölümüdür. Yapılan uygulamalar sonucunda, önerilen yöntemin Tarihi Kâgir Yapılarda Çağdaş Restorasyon Uygulamalarında uygulanabilirliği görülmüştür.

Yıl : 2023

Sayfa Sayısı : 185

Anahtar Kelimeler : Kâgir yapı, Kültürel miras, Performans seviyesi, Onarım ve Güçlendirme.

Doctorate Thesis

A Method Proposal for Contemporary Restoration Practices in Historic Masonry Buildings

Trakya University Institute of Natural Sciences

Faculty of Architecture

ABSTRACT

In our country, which has hosted many civilizations in its history due to its geographical location, there are many different types and numbers of historical artifacts. These works, which are accepted as cultural heritage, reflect the sociological, economic, political, and religious characteristics of the period in which they were made, as well as form our social consciousness and cultural identity by establishing a link between the past and the present.

Considering that historical buildings have survived under their own loads for many years, it is generally accepted that they reach a certain balance under vertical loads, and no damage is expected unless there is an additional external loading or a change in their basic properties. However, due to deterioration and damage in the materials that make up the building elements over time and because of environmental effects, there is a decrease in strength. Especially because of additional loads such as earthquake and wind, these structures may be damaged. For this reason, considering that the earthquakes that occurred in our country where active fault lines have damaged many historical buildings in the past, it is necessary to determine the earthquake performances of each historical structure separately and to take the necessary precautions.

In this study, it is aimed to determine the methods and approaches that should be followed regarding the repair and strengthening processes to be applied by determining the safety levels of the historical masonry structures. For this purpose, Edirne Old Mosque and Madrasa Ali Bey Mosque were determined as examples. Finite element models of

the selected structures were prepared, static and dynamic analyzes were made, earthquake performance safety was determined and repair and strengthening types and methods were proposed. The applicability of the proposed method has been tested in the determined samples.

This study, which consists of six chapters; In the introductory part, there are basic information about the concept of cultural heritage, the causes of damage in historical masonry structures, the determination of earthquake safety and the intervention methods that can be applied. In the second part, information is given about the general properties of masonry materials and their structural forms. In the third chapter, the damages in the masonry building elements and the solution suggestions for the elimination of these damages are given. In the fourth chapter, information about the studies to be done for the analysis of masonry structures and the modeling methods to be applied and their assumptions are given. In the fifth chapter, the structural safety and target performance levels of the selected buildings were evaluated by making static and dynamic calculations of the analysis models created by making archive and field investigations, and the repair and strengthening methods to be applied were determined. Applications were made in line with the suggested methods. The sixth part is the conclusion part in which the study is evaluated. As a result of the applications, the applicability of the proposed method in Contemporary Restoration Applications in Historic Masonry Buildings has been seen.

Year :2023

Number of Pages : 185

Keywords :Masonry, Cultural heritage, Performance Level, Repair and Retrofit.

ÖNSÖZ

Öncelikle, beni restorasyon alanında çalışmaya teşvik ederek tez danışmanlığımı yürüten değerli hocam, Sayın Prof. Dr. Nevzat İLHAN'ı saygı ve rahmetle anıyorum.

Tez danışmanlığımı yürüten ve çalışmamın her aşamasında önerileri ile beni yönlendiren, değerli hocam, Sayın Doç. Dr. Hatice Kıran ÇAKIR'a

Tez izleme sürecinde önerileri ile beni yönlendiren değerli hocalarım, Prof. Dr. Metin Aydoğdu ve Dr. Öğr. Üyesi. Tülay CANITEZ'e

Bu çalışmada incelenen yapılara ait rölöve ve restorasyon bilgilerini temin etmeme katkı sağlayan T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü Edirne Bölge Müdürlüğü'ne,

Bu süreçte yanımda olan, tüm arkadaşlarıma ve manevi destekleri ile her zaman yanımda olan aileme teşekkürlerimi arz ederim.

Mustafa Kemal BOZACI

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv
ABSTRACT vi
ÖNSÖZ viii
İÇİNDEKİLER ix
SİMGELER DİZİNİ xii
KISALTMALAR DİZİNİ xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ xv
ŞEKİLLER DİZİNİ xvii
BÖLÜM 1. GİRİŞ 1
1.1. Problemin Tanımı 3
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 3
1.3. Çalışmanın Yöntemi 5
1.4. Yapılan Çalışmalar 5
BÖLÜM 2. TARİHİ KÂGİR YAPI MALZEMELERİ VE YAPIM TEKNİKLERİ 8
2.1. Kâgir Yapı Malzemeleri 9
2.1.1. Doğal Taş 9
2.1.2. Tuğla 12
2.1.3. Harçlar 13
2.1.4. Ahşap 13
2.1.5. Demir 14
2.2. Kâgir Yapı Malzeme Özellikleri 14
2.2.1. Basınç Dayanımı: 15
2.2.2. Çekme Dayanımı 15
2.2.3. Kayma Dayanımı 16
2.2.4. Elastiste Modolü 17
2.2.5. Kâgir Yapı Elemanlarının Kırılma Teorileri 19
2.2.6. Malzeme Modelleme Yöntemleri 22

2.3. Kâgir Yapıların Strüktürel Öğeleri 24
2.3.1. Örtü Elemanları 24
2.3.2. Geçiş Elemanları 26
2.3.3. Destek Elemanları 32
2.3.4. Taşıyıcı Elemanlar 33
2.3.5. Minareler 37
2.4. Kâgir Yapıların Davranışı 38
BÖLÜM 3. KÂGİR YAPILARDA BOZULMA VE ONARIM BOYUTLARI 40
3.1. Kâgir Yapılarda Bozulma ve Hasar Etkenleri 40
3.1.1. Çevresel Kaynaklı Etkenler 42
3.1.2. İnsan Kaynaklı Etkenler 44
3.2. Kâgir Yapılarda Oluşan Hasar Biçimleri 46
3.2.1. Temellerde Meydana Gelen Hasarlar 48
3.2.2. Duvar ve Ayaklarda Meydana Gelen Hasarlar 49
3.2.3. Sütunlarda Meydana Gelen Hasarlar 55
3.2.4. Kemerlerde Meydana Gelen Hasarlar 55
3.2.5. Kubbelerde Meydana Gelen Hasarlar 56
3.2.6. Tonozlarda Meydana Gelen Hasarlar 57
3.2.7. Gergilerde Meydana Gelen Hasarlar 58
3.2.8. Ahşap Elemanlarda Meydana Gelen Hasarlar 58
3.3. Kâgir Yapılarda Uygulanabilecek Onarım ve Güçlendirme Yöntemleri 59
3.3.1. Acil Müdahale Yöntemleri 60
3.3.2. Kısmi Söküm 60
3.3.3. Onarım ve Güçlendirme Malzemeleri 61
3.3.4. Bölgesel Onarım 61
3.3.5. Bölgesel Güçlendirme 61
3.3.6. Üst Yapının Toptan Güçlendirilmesi 66
3.4. Onarım ve Güçlendirme Sistematikler 68
BÖLÜM 4. TARİHİ KÂGİR YAPILARDA ÇAĞDAŞ RESTORASYON UYGULAMALARINA YÖNELİK ONARIM VE GÜÇLENDİRME YÖNTEMLERİNİN BELİRLENMESİ 70
4.1. Hazırlık Çalışmaları 71
4.2. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi 73
4.3. Modelleme İlkeleri ve Analiz Yöntemleri 76

4.3.1. Modelleme İlkeleri 77
4.3.2. Analiz Yöntemleri 80
4.3.3. Yapı Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi 81
4.3.4. Kesit Tahkikleri 83
4.3.5. Notasyon ve İşaret Kabüller 86
4.4. Performans Kavramı, Onarım ve Güçlendirme İlkeleri 87
4.5. Tarihi Kâgir Yapılarda Çağdaş Restorasyon Uygulamalarına Yönelik Yöntemler 91
BÖLÜM 5. YÖNTEMİN UYGULANABİLİRLİĞİNE YÖNELİK ALAN ÇALIŞMASI 96
5.1. Edirne Eski Camii Örneği 98
5.1.1. Hazırlık Çalışmaları: 98
5.1.2. Malzeme ve Zemin Özellikleri 101
5.1.3. Deprem Parametrelerinin Belirlenmesi: 102
5.1.4. Yapının Sonlu Elemanlar Analizi 106
5.1.5. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi 113
5.1.6. Onarım ve Güçlendirme Önerileri 113
5.1.7. Onarım ve Güçlendirme Uygulamaları 116
5.2. Medrese Ali Bey Camii Örneği 117
5.2.1. Hazırlık Çalışmaları: 118
5.2.2. Malzeme ve Zemin Özellikleri 119
5.2.3. Deprem Parametrelerinin Belirlenmesi 121
5.2.4. Yapının Sonlu Elemanlar Analizi 125
5.2.5. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi 131
5.2.6. Onarım ve Güçlendirme Önerileri 131
5.2.7. Onarım ve Güçlendirme Uygulamaları 139
BÖLÜM 6. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ 140
KAYNAKLAR 144
EKLER 147
ÖZGEÇMİŞ 162

SİMGELER DİZİNİ

γ : Birim hacim ağırlığı

ρ : Özkütle

p : Porozite

w : Su emme

t : Zaman

f_b : Basınç mukavemeti

$f_ç$: Çekme mukavemeti

f_{eb} : Basınç emniyet gerilmesi

f_{bk} : Kompozit malzeme basınç mukavemeti

τ_0 : Çatlama Emniyet gerilmesi

E : Elastisite modülü

ν : Poisson oranı

σ : Gerilme

ε : Şekil değiştirme

S(T) : Spektrum katsayısı

R : Deprem yükü azaltma katsayısı

S_s : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı

S_1 : 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı

S_{DS} : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı

S_{D1} : 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı

I : Bina Önem katsayısı

P_k : Kırma (göçme) Yükü

ρ_k : Tuğla ile harç arasındaki sürtünme katsayısı

σ_m : Flat-jack testinde gerçek gerilme

K_m : Flat-jack testi kalibrasyon faktörü

K_a : Flat-jack testine ait alan katsayısı

d : Flat-jack ölçüm mesafesi

Eh **:** Harç elastisite modülü

Et **:** Tuğla elastisite modülü

Eth **:** Ortak elastisite modülü

i **:** Başlangıç noktası

j **:** Bitiş noktası

[k] **:** Rijitlik matrisi

[m] **:** Kütle matrisi

KISALTMALAR DİZİNİ

TS : Türk Standartları

ASTM : American Society for Testing and Materials

Eurocode 6 : European Committee for Standardization, 2005

TBDY 2018 : Türkiye Bina ;Deprem Yönetmeliği, 2018

SPT : Standard Penetration Test

FRP : Fibre reinforced polymer

CFRP : Carbon Fibre reinforced polymers

CAD : Computer Aided Design

MTA: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Doğal yapı taşlarının ortalama mekanik özellikleri. 10

Çizelge 2.2. Küfeki Taşının Mekanik Özellikleri..... 11

Çizelge 2.3. Tuğlaların Ortalama Fiziksel Özellikleri. 13

Çizelge 2.4. Kâgir malzemenin mekanik özellikleri..... 13

Çizelge 2.5. Ahşap malzemelerin mekanik özellikleri 14

Çizelge 2.6. Demir malzemelerin mekanik özellikleri 14

Çizelge 2.7. Yığma yapı karakteristik basınç dayanım denklemi 15

Çizelge 2.8. Tuğla malzemenin normalize edilmiş basınç dayanım denklemi 15

Çizelge 2.9. Kâgir malzemen kayma dayanım denklemi..... 16

Çizelge 2.10. Elastisite Modülü denklemi 18

Çizelge 2.11. Yığma Duvar Malzemesinin Mekanik Özellikleri 18

Çizelge 2.12. Yığma duvar malzemesinin Çizelge 2.11'de verilen mekanik parametrelerine harç, duvar işçiliğine ve duvarın enine bağlantılarının özellerine bağlı kullanılabilecek düzeltme katsayıları..... 19

Çizelge 2.13. Kompozit malzeme Elastisite Modülü denklemi 23

Çizelge 2.14. Kompozit malzeme karakteristik basınç dayanımı denklemi 23

Çizelge 3.1. Hasar ve bozulma nedenleri..... 42

Çizelge 3.2. Kâgir yapı elemanlarında dış etkilerin oluşturduğu hasarlar 59

Çizelge 4.1. Bina kullanım amacınca göre kullanılacak haraketli yük katsayısı 83

Çizelge 4.2. Kâgir yapı malzeme özellikleri 84

Çizelge 4.3. Hd/t Oranına Bağlı Basınç Dayanımı Azaltma Katsayıları 84

Çizelge 4.4. Duvar Hd/t Oranına Göre Risk Sınırları 85

Çizelge 4.5. Yığma Duvarlar için Dayanım Değerleri 85

Çizelge 4.6. Performans düzeyleri 88

Çizelge 4.7. Önerilen hedef performans düzeyleri. 88

Çizelge 4.8. Hasar sınırları 89

Çizelge 4.9. Performans hesapları ve gerilme, şekil değiştirme sınırları 89

Çizelge 5.1. Modeldeki malzemeler ve kabul edilen emniyet gerilmeleri 101

Çizelge 5.2. Anıtsal eserlere ait deprem performans düzeyleri 103

Çizelge 5.3. DD1 deprem düzeyi için spektral ivme değerleri 104

Çizelge 5.4. DD2 deprem düzeyi için spektral ivme değerleri 105

Çizelge 5.5. Modeldeki malzemeler ve kabul edilen emniyet gerilmeleri 119

Çizelge 5.6. DD1 deprem düzeyi ve R=3 azaltma katsayısı için elde edilen azaltılmış tasarım spektral ivme değerleri 122

Çizelge 5.7. DD2 deprem düzeyi ve R=3 azaltma katsayısı için elde edilen azaltılmış tasarım spektral ivme değerleri 123

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Yığma Taş Yapılar a) Moloz taş, b) Kesme taş, c) İri Kesme Taş 9

Şekil 2.2. Roma'da duvar a)Bağlı, b) Yastıklı-Ortası Dolgulu, c) Tuğla Yüzlü-Dolgulu 9

Şekil 2.3. Taş Malzemede Aranan Özellikleri..... 11

Şekil 2.4. Küfeki taşının statik ve dinamik yükler altında davranışı 12

Şekil 2.5. Küfeki ve betonun karbonatlaşma süreçleri 12

Şekil 2.6. Tuğla duvarda çekme deneyleri ve göçme biçimleri 16

Şekil 2.7. Kayma mukavemetinin belirlenmesi için muhtemel deneyler 17

Şekil 2.8. Basınç yükleri altında kırılma mekanizması..... 20

Şekil 2.9. Basınç kırılma mekanizmaları 20

Şekil 2.10. Basınç, çekme ve kayma kuvvetleri..... 21

Şekil 2.11. Basamak şeklinde diyagonal kırılma..... 21

Şekil 2.12. Makro modelleme 22

Şekil 2.13. Mikro modelleme 23

Şekil 2.14. Kubbe genel formu..... 25

Şekil 2.15. Kubbe yük dağılımı basınç ve çekme gerilmeleri..... 25

Şekil 2.16. Tonoz genel formu 26

Şekil 2.17. Kâgir tonoz biçimleri ve düşey yük aktarımları..... 26

Şekil 2.18. Tromp 27

Şekil 2.19. Pandantif..... 28

Şekil 2.20. Türk üçgeni..... 29

Şekil 2.21. Kemer öğeleri 29
Şekil 2.22. Kemer yük aktarım formu 30
Şekil 2.23. Kemer üzengi seviyesindeki itki durumu 30
Şekil 2.24. Kemer formları 31
Şekil 2.25. Payanda ve ağırlık kule sistemi tesir çizgileri 32
Şekil 2.26. Payanda ve ağırlık kule sistemi 32
Şekil 2.27. Duvar bağlantıları 33
Şekil 2.28. Sütun başında mesnetlenme sistemi 34
Şekil 2.29. Ahşap döşeme 35
Şekil 2.30. Adi Volta döşeme 35
Şekil 2.31. Düz tavanlı volta döşeme 35
Şekil 2.32. Volta döşeme 36
Şekil 2.33. Kemer, sütün gergi sistemi 36
Şekil 2.34. Klasik minare bölümleri 37
Şekil 2.35. Yığma yapı yatay yük taşıma modeli 38
Şekil 2.36. Yığma yapı hasar biçimleri 39
Şekil 3.1. Bozulma ve Hasar Oluşumları 46
Şekil 3.2. Duvar parçasının düzleminden çıkması 48
Şekil 3.3. Temel oturma çatlakları 48
Şekil 3.4. Düşey kuvvet etkisiyle ortaya çıkan çatlaklar 50
Şekil 3.5. Uygun olmayan örgü derzlerinden kaynaklı hasarlar 50
Şekil 3.6. Çok cidarlı duvarda şişme hasarı 50
Şekil 3.7. Boşluk üzerinde hafifletme kemeri 51
Şekil 3.8. Yığma duvarım yatay ve düşey eksen etrafında dönmesi 51
Şekil 3.9. Yatay kuvvet etkisi altında meydana gelen kesme çatlakları 52

Şekil 3.10. Kâgir ayaklarda yatay kuvvet etkisiyle meydana gelen çatlaklar 52

Şekil 3.11. Kesişen çatlakların oluşturduğu davar hasarı 53

Şekil 3.12. Yatay kuvvet etkisiyle ince duvarlarda düzlem dışı hareket 53

Şekil 3.13. Yatay kuvvet etkisiyle birbirine dik duvar çatlakları 54

Şekil 3.14. Çatlağın sürekliliği nedeniyle oluşan serbest duvar 54

Şekil 3.15. Kalkan duvar hasarları 55

Şekil 3.16. Kâgir kemerlerde yük aktarımı diyagramı 56

Şekil 3.17. Kemerde min. ve max. yatay kuvvete göre itki çizgisi 56

Şekil 3.18. Mesnet hareketi etkisiyle oluşan hasarlar 56

Şekil 3.19. Kubbelerde yük taşıma mekanizması 57

Şekil 3.20. Kubbede tipik hasar biçimleri 57

Şekil 3.21. Mesnet hareketi nedeniyle meydana gelen çatlak oluşumu 57

Şekil 3.22. Demir Gergilerde Hasar Biçimleri (a) Burkulma (Vasat Atik Ali Paşa Camisi (b) Kopma (Edirne Sarayı Mutfakları) 58

Şekil 3.23. Ahşap Bozulması 58

Şekil 3.24. Acil müdahale 60

Şekil 3.25. Çatlakların Enjeksiyon Yöntemi ile Onarımı 61

Şekil 3.26. Geniş Duvar Çatlaklarında Dikiş ile Onarım 62

Şekil 3.27. Püskürtme Beton Duvar Detayları (Sultan Abdülaziz Av Köşkü, İzmit) 62

Şekil 3.28. (a) Çelik Hatıl Düzenlemesi (b) Hatılların Köşe Birleşimleri (c), (d) Duvarların Köşelerinde Güçlendirme, Gergi Düzenlemesi (Su Kemeri, Roma) 63

Şekil 3.29. Sütunlarda Çatlak Onarımı 64

Şekil 3.30. .(a) Çelik çaprazlar ile döşemenin rijitleştirilmesi (Sultan Abdülaziz Av Köşkü, İzmit) (b) (c) Çapraz eleman detayları (Sultan Abdülaziz Av Köşkü, İzmit) 65

Şekil 3.31. Kemerlerde Gergi Düzenlemesi ve Mesnetlerin Sabitlenmesi (Roma Forumu'nda Yapı) 65

Şekil 3.32. (a) Kubbe Eteğinde Çekme Çemberi Düzenlemesi (b) Çekme Çemberi Detayları (Ahi Çelebi Camisi) 66

Şekil 3.33. (a) Ağır Çatı (Arastalı Bedesten, Tokat) (b) Çatıda Toprak Dolgu (Arastalı Bedesten, Tokat) 66

Şekil 3.34. Önleyici Tedbirler 68

Şekil 3.35. Onarım ve güçlendirme yöntemleri 69

Şekil 4.1. Çalışma süreçleri 71

Şekil 4.2 (a) Çatlak Genişliği Değişimi (b) Çatlak Genişliği Ölçüm Cetveli 72

Şekil 4.3. (a) Doğrudan Ölçüm, (b) Dolaylı Ölçüm 74

Şekil 4.4. (a) Çatlak derinliği araştırması (b) Çatlak yönünün araştırılması 74

Şekil 4.5. .(a) Tek plak ile ölçüm, (b) Çift plak ile ölçüm 75

Şekil 4.6 Yerinde Kayma Deneyi 75

Şekil 4.7 .Yığma duvarlı yapılarda duvarlarda meydana gelen normal kuvvetler ve kesme kuvvetleri 78

Şekil 4.8. Duvar düzlem içi ve dış etkileri 78

Şekil 4.9. Yığma yapıda çubuk elemanlar 79

Şekil 4.10. Çeşitli malzeme türlerine göre sonlu eleman modelleri 79

Şekil 4.11. Sonlu eleman türleri 80

Şekil 4.12. Yapı dinamik özelliklerinin belirlenmesi 82

Şekil 4.13. Analiz sonuçları 82

Şekil 4.14. Kâgir duvarlarda oluşan hasar tahkikleri 86

Şekil 4.15. Katı eleman ve gerilmeleri 86

Şekil 4.16. Düzlem kabuk elemanda oluşan iç kuvvetler 87

Şekil 4.17. Statik itme eğrisi ve sınır durumları 88

Şekil 4.18. Göreceli sünek ve gevrek taşıyıcı sistemlerde performans düzeyleri 89

Şekil 4.19. Yapısal güvenlik değerlendirme süreçleri 92

Şekil 4.20. Yapının ilk değerlendirme yöntemi 93
Şekil 4.21. Değerlendirme yöntemi 94
Şekil 4.22. Performans yöntemi 95
Şekil 5.1 Sonlu elemanlarda katı modelleme elemanları 98
Şekil 5.2. Eski Cami Planı 99
Şekil 5.3. Eski Cami Çatı Planı 99
Şekil 5.4. Eski Cami genel görünüş 100
Şekil 5.5. Edirne jeolojik formasyonu 102
Şekil 5.6. Eski Camii'nin Coğrafi konumu 103
Şekil 5.7. DD1 deprem düzeyi ve R=3 azaltma katsayısı için elde edilen azaltılmış tasarım spektral ivme grafiği 104
Şekil 5.8. DD2 deprem düzeyi ve R=3 azaltma katsayısı için elde edilen azaltılmış tasarım spektral ivme grafiği 105
Şekil 5.9. Eski Camii sonlu elemanlar modeli 106
Şekil 5.10. Düşey yüklerde oluşan maksimum deformasyon 108
Şekil 5.11. Düşey yüklerden oluşan maksimum asal gerilme 108
Şekil 5.12. Düşey yüklerden oluşan eşdeğer gerilme (Von-Mises)-σ 108
Şekil 5.13. Düşey yüklerden oluşan eşdeğer şekil değiştirme-ε 109
Şekil 5.14. Yapının 1.mod durumu (0.32227Hz) 110
Şekil 5.15. Yapının 2.mod durumu(0.32403Hz) 110
Şekil 5.16. Yapının 3.mod durumu (0.82527Hz) 111
Şekil 5.17. Yapının 4.mod durumu (0.84066Hz) 111
Şekil 5.18. Yatay yüklerden oluşan eşdeğer gerilme 112
Şekil 5.19. Maksimum kayma gerilme durumu 112
Şekil 5.20. Kubbede çatlak oluşum yerleri 114
Şekil 5.21. Kubbe çatlaklarının genel görünüşü 114

Şekil 5.22. FRP çubukların yerleşim planları 115
Şekil 5.23. Kasnak üstü çelik kuşak ve bulon birleşim detayları 116
Şekil 5.24. FRP Bantlar ile onarım ve güçlendirme uygulamaları 117
Şekil 5.25. Medrese Ali Bey Camii Görseli 118
Şekil 5.26. Edirne jeolojik formasyonu 120
Şekil 5.27. Medrese Ali Bey Camii'nin Coğrafi konumu 121
Şekil 5.28. DD1 deprem düzeyi ve R=3 azaltma katsayısı için elde edilen azaltılmış tasarım spektral ivme grafiği 122
Şekil 5.29. DD2 deprem düzeyi ve R=3 azaltma katsayısı için elde edilen azaltılmış tasarım spektral ivme grafiği 123
Şekil 5.30. Medrese Ali Bey Camii sonlu elemanlar modeli 124
Şekil 5.31. Düşey yüklerde oluşan maksimum deformasyon 126
Şekil 5.32. Düşey yüklerden oluşan maksimum asal gerilme 126
Şekil 5.33. Düşey yüklerden oluşan eşdeğer gerilme (Von-Mises)-σ 127
Şekil 5.34. Düşey yüklerden oluşan eşdeğer şekil değiştirme-ε 127
Şekil 5.35. Yapının 1. mod durumu (6.2005 Hz) 128
Şekil 5.36. Yapının 2. mod durumu (7.1343 Hz) 128
Şekil 5.37. Yapının 3. mod durumu (7.7633 Hz) 129
Şekil 5.38. Yapının 4. mod durumu (7.9034 Hz) 129
Şekil 5.39. X yönü maksimum deformasyon durumu 130
Şekil 5.40. Maksimumum kayma gerilme durumu 130
Şekil 5.41 Mevcut temel planı 131
Şekil 5.42. Temel detayı 132
Şekil 5.43. Yeniden yapılacak duvarlarda moloz taş ve ahşap hatıl detayı 133
Şekil 5.44. Yeniden yapılacak duvarlarda yonu taşı detayı 133
Şekil 5.45. Duvar üstü hatıl uygulaması 134

Şekil 5.46. Sütün başlıklarının onarımı..... 135
Şekil 5.47. Son Cemaat yeri +6.30 kotunda oluşturulacak 80x20 cm çelik hatıl detayı 136
Şekil 5.48. Kubbelerin Çelik Konstrüksiyon Detayı 137
Şekil 5.49. Kubbelerin Çelik Konstrüksiyon ve Bağdadi Sıva Detayı 137
Şekil 5.50. Çelik Konstrüksiyon ve Ahşap Profil Detayı 138
Şekil 5.51. Medrese Ali Bey Camiine ait imalat aşamaları 139

BÖLÜM 1.

GİRİŞ

İnsanoğlu medeniyetin başlangıcından beri, başta barınma olmak üzere evler, tapınaklar, sosyal ve kültürel ihtiyaçlarını karşılamak amacı ile birçok yapı inşa etmiştir. Yapıların inşasında öncelikle doğadaki gözlemler ve önceki deneyimler belirleyici olmuştur (Baratta ve Corbi, 2012).

İnsanoğlu tarafından binlerce yıllık uygarlık tarihi boyunca doğrudan veya doğa ile yaratılan tüm değerler, günümüzde tarihi ve kültürel miras olarak adlandırılmaktadır. Bu değerlerin korunarak gelecek kuşaklara aktarılması, toplumların üzerinde önemle durması gereken ortak sorunudur (Aköz ve Yüzer, 2009).

Coğrafi konumu itibari ile tarihte birçok medeniyetin kurulduğu ülkemizde oldukça çeşitlilikte ve zenginlikte tarihi ve kültürel miras bulunmaktadır. Eski medeniyetlerden günümüze ulaşmış birçok, köprü, sur, kale, saray, kilise, camii, su kemeri, medrese vb. çok çeşitli ve sayıda tarihi yapı bulunmaktadır. Tarihi yapılar, yapıldıkları dönemin sosyolojik, ekonomik, politik ve dinsel yaşam özelliklerini yansıtmakta ve geçmiş ile bugün, bugün ile de gelecek arasında, önemli işlevleri de yerine getirerek toplumsal bilinci ve kültürel kimliği oluşturmaktadır. Geçmişten günümüze ulaşan bu mirasın korunarak gelecek kuşaklara aktarılması, toplumların en önemli sorumluluğudur. Bu nedenle kültürel mirasımızı oluşturan yapıların her birinin kendi özelinde ele alınarak, zaman ve çevresel etkilerin oluşturduğu hasarlara karşı güvenliklerinin sağlanması gerekmektedir (Aköz, 2008; Arıcan, 2010; Mahrebel, 2006).

Tarihi yapıların büyük çoğunluğu yığma kâgir yapım sistemi ile yapılmıştır. Yığma kâgir malzemeler, süneklilikleri az ve gevrektir. Düşey ve yatay kuvvetlere karşı

dayanımları; yapı elemanının geometrisine, elemanda kullanılan malzemelerin dayanımına, elemanların birleşim şeklilerine bağlıdır. Düşey yapı yükleri taşıyıcı duvarlarda sadece basınç kuvvetleri oluştururken, deprem gibi yatay kuvvetler; taşıyıcı duvarlarda düzlemleri doğrultusunda ve düzlemlerine dik doğrultularda kesme ve eğilme kuvvetleri meydana getirmektedir (Arun, 2005).

Yığma kâgir yapılarla ilgili olarak, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018), Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar (RYTEİE 2019) ve Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetim Kılavuzunda, hesaplama ve modelleme ilkeleri hakkında tanımlamalar yapılmıştır. Ancak, ülkemizde sadece yığma kâgir yapı taşıyıcı sistemlerin tasarımları ve güvenliklerinin belirlenmesi için hazırlanmış bir yönetmelik bulunmamaktadır.

Ülkemiz, coğrafi konumu itibari ile aktif birçok fay hattının üzerinde bulunmakta olduğundan, tarihi boyunca orta veya daha şiddetli birçok deprem meydana gelmiştir. Tarihi yapıların da, uzun yıllar boyunca kendi yükleri altında ayakta kaldıkları dikkate alındığında, genellikle düşey yükler altında belli bir dengeye ulaştıkları düşünülmekte ve dışarıdan ilave yükleme veya temel özelliklerinde bir değişiklik olmadığı sürece de genel stabilite sorunu beklenmemektedir. Ancak, yapı elemanlarını oluşturan malzemelerde zamanla ve çevresel etkiler sonucunda oluşan bozulma ve hasarlar nedeniyle dayanım düşüşleri ortaya çıkmakta ve özellikle deprem ve rüzgâr gibi ilave yüklemeler sonucunda yapı stabilite sorunları meydan gelebilmektedir. Bu nedenle, depremlerin geçmişte pek çok tarihi yapıya zarar verdikleri göz önüne alındığında, her bir tarihi yapının kendi özelinde ayrı ayrı incelenerek deprem risklerinin belirlenmesi oldukça önem arz etmektedir (Aköz, 2008; Arıcan, 2010; Dabanlı, 2008; Mahrebel, 2006).

Yığma kâgir yapıların düşey ve yatay yükler altındaki davranışı gerek malzeme gerekse yapım teknikleri bakımından birçok belirsizliği içermektedir. Bu nedenle ancak deneysel ve laboratuvar sonuçlarından elde edilen bilgiler yardımı ile yapılan modellemelerin analizleri sonucunda yaklaşık sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu bağlamda tarihi kâgir yapıların öncelikle belli sistematikler çerçevesinde mevcut durumlarının tespit edilerek düşey yükler ve deprem kuvvetleri alındaki güvenirliklerinin değerlendirilmesi, sonrasında anlamlı ve çağdaş yöntemler ile güvenli duruma getirilmeleri gerekmektedir (Sallıo, 2005).

1.1. Problemin Tanımı

Ülke coğrafyamız birçok medeniyete ev sahipliği yapmış olduğundan, her döneme ait çok sayıda tarihi eseri barındırmaktadır. Bu yapılar; malzeme özellikleri, geometrileri, yapım teknikleri ve düzenleri bakımından oldukça karmaşıktır. Bu nedenle tarihi yapılara yapılacak her türlü onarım ve güçlendirme işlemi için kapsamlı araştırmalar ve analizlerin yapılması gerektirmektedir. Yapıların onarım ve güçlendirilmesi için yapılacak müdahalenin kararlarını almak için alanlarında uzmanlaşmış mimar, mühendis, restoratör, sanat tarihçi, arkeolog gibi farklı meslek gruplarının birlikte çalışması gerekmektedir.

Değişik malzeme ve strüktür özelliklere sahip olan kâgir yapıların statik ve dinamik analizleri sonucunda, yapıların mevcut durumları belirlenerek, deprem kuvvetleri etkisinde hedef performans seviyelerinin kontrol edilmesi, yapının tarihi ve estetik değerleri korunacak şekilde çağdaş yöntemler ve restorayon uygulamaları ile taşıyıcı sistem hasarlarının onarılarak, güçlendirilmesi gerekmektedir.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Tarihi yapılar, çeşitli medeniyet dönemlerinde farklı yapım teknikleri ile değişen amaçlar için inşa edilen, yapıldıkları dönemin sosyal, ekonomik, politik, dinsel ve kültürel özelliklerini yansıtan yapılardır. Bugün sahip olduğumuz tarihi yapılar geçmişin mirası olarak, korunarak gelecek kuşaklara sağlıklı bir şekilde aktarmak durumunda olduğumuz yapılar olup, aynı zamanda kültürel kimliğimizin ve sürekliliğin sembolü olmuştur. Günümüzde oluşan koruma bilinci sayesinde bu tür yapıların onarım ve güçlendirilmesi için gerekli olan çalışmalara hız verilmiş olup, ekonomik imkânlar dâhilinde geleneksel onarım ve güçlendirme yöntemlerinin akılcı kullanılmasıyla tarihi yapıların onarım ve güçlendirme çalışmaları yapılarak güvenlik düzeyleri iyileştirilmektedir.

Tarihi kâgir yapıların onarım ve güçlendirilmesinde temel yaklaşım, yapının aslını bozmadan mümkün oldukça en az müdahalenin yapılmasıdır. Bunun için de her bir yapının kendi özelinde ayrıntılı olarak incelenmesi, yapı strüktür davranışının en iyi şekilde temsil edilerek modellemesi, bu model üzerinde beklenen tüm yüklemelerin uygulanması, oluşan yük dağılımları ve şekillerine göre yapının güvenliğinin irdelenmesi,

yapılabilecek onarım ve güçlendirme müdahalelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Yapılacak her türlü müdahalede yapının hedeflenen güvenliğinin sağlanması yanında tarihi ve mimari özelliklerinin de korunması gerekmektedir. Bilimsel ve doğru biçimde uygulanmayan güçlendirme işlemlerinin fayda yerine zarar verebileceği bilinci ile çağdaş tekniklerin uygulanması yanında yapı özelinde yeni tekniklerin geliştirilmesi de gerekebilmektedir (Aköz, 2008; Dabanlı, 2008; Erköseoğlu, 2012; Mahrebel, 2006).

Koruma ilkeleri kapsamında uygulanacak olan onarım ve güçlendirilme yaklaşımlarında geleneksel yöntemlerin yanında doğruluğu bilimsel çalışmalar ve deneysel yöntemler ile kanıtlanmış çağdaş yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Tarihi yapılara uygulanacak olan onarım ve güçlendirme müdahalelerinde disiplinler arası kapsamlı bir çalışma gerekmektedir.

Bu çalışmada, tarihi kâgir yapıların; arazi ve laboratuvar çalışmaları yapılarak mevcut durumlarının tespitinin yapılması, analitik modellerinin hazırlanması, hazırlanan modeller üzerinde statik ve dinamik analizlerinin yapılması ve uygulanabilecek onarım ve güçlendirilme yöntemlerinin belirlenebilmesi, amaçlanmaktadır. Uygulanabilecek onarım ve güçlendirme yönteminin belirlenmesinde yapının hedeflenen performans düzeyinin yanında mimari ve estetik özellikleri de belirleyici olmaktadır. Tarihi kâgir yapılar için ülkemizde yürürlükte bulunan; Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018), Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin esaslar (RYTEİE 2019) ve Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetim Kılavuzunda, tanımlanan hesaplama ve modelleme ilkeleri çerçevesinde mevcut durum tespiti ve sonlu elemanlar yöntemi ile modellemeleri yapılmıştır.

Yapılan modellemelerin, mevcut yapı ağırlıkları ve deprem kuvvetleri altında statik ve dinamik analizleri yapılarak yük-gerilme ve yük-şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen grafikler ile yapıda oluşan mevcut hasarlar ve dağılımı karşılaştırılarak modelin kalibrasyonu yapılarak, kabullerden dolayı oluşan yaklaşık çözümlerde mümkün olduğunca en gerçekçi sonuçlara ulaşılması hedeflenmiştir. Elde edilen analiz sonuçları doğrultusunda, yapıların mimari ve estetik özellikler dikkate alınarak mümkün oldukça en az müdahale ile hedeflenen yapı güvenliklerini sağlayacak şekilde onarım ve güçlendirme yöntemleri belirlenmiştir.

1.3. Çalışmanın Yöntemi

Tarihi kâgir yapılarda uygulanabilecek çağdaş restorasyon yönteminin belirlenebilmesi için çalışmada öncelikle; yapılarının tarihsel sürecine ilişkin arşiv araştırmaları yapılmış, gözlemsel olarak mevut durumları belirlenerek hasar oluşumları tespit edilmiştir. Daha sonra bu yapıların arazi ve laboratuvar çalışmaları yapılarak mevcut malzeme ve zemin özellikleri belirlenmiştir. Belirlenen özellikler doğrultusunda yapıların analitik modelleri ANSYS programı ile hazırlanmıştır. Hazırlanan modeller üzerinde statik ve dinamik analizler yapılarak bu yapılarda uygulanabilecek onarım ve güçlendirilme veya yeniden yapma yöntemleri belirlenmiştir.

Çalışmada çağdaş restorasyon uygulamalarında çoğunlukla karşılaşılan onarım ve güçlendirme yöntemlerine örnek teşkil etmesi amacı ile Edirne Eski Camii, yeniden yapma yöntemine örnek teşkil etmesi amacı ile de Medrese Ali Bey Camii örnek olarak seçilmiştir. Seçilen örneklerin tarihsel süreçlerinin belirlenebilmesi için Edirne Vakıflar Bölge Müdürlüğü ve Edirne Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurul Müdürlüğü arşivlerinde rölöve, restitüsyon, restorasyon projeleri ve raporları ile eski fotoğraflar ayrıntılı olarak incelenmiştir. Daha sonra, yapıların mevcut durumlarını tespit etmek amacı ile yerinde incelemelerde bulunularak, yapıların mevcut durumları fotoğraflarla belgelenmiştir. İncelenen örneklerde arşiv araştırmaları ve yerinde yapılan inceleme çalışmalarıyla elde edilen bilgi birikimi çerçevesinde; belirlenen Edirne Eski Camii ve Medrese Ali Bey Camii ANSYS programında modellenmiştir. Yapılan modellemelerin statik ve dinamik analizleri yapılmıştır. Yapılan modellemeler üzerinde elde edilen gerilme değerleri ve dağılımları incelenmiş, meydana gelebilecek hasarlar irdelenmiş ve muhtemel olması beklenen hasarlar da dikkate alınarak gerekli olan güçlendirme ve onarımlara ait uygulama detayları hazırlanarak, yerinde uygulanmaları yapılmıştır.

1.4. Yapılan Çalışmalar

Çalışma konusu ile ilgili olarak ülkemizde ve dünyada yapılmış çalışmaların incelenmesi sonucunda;

- Tarihi yapılarda kullanılan malzemelerin karakteristik özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar,

- Tarihi yapılarda meydana gelen hasarlar, oluşma nedenleri, yapılacak onarım ve güçlendirme yöntemlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar,
- Tarihi yapıların geometrik özellikleri ve taşıyıcı elemanların mekanik özelliklerinin belirlenerek, deprem performansının belirlenmesine yönelik çalışmalar olduğu belirlenmiştir.

Belirlenen bu ana başlıklar altında yapılan çalışmalardan;

- Ülkemizde yapılarda kullanılan malzemelerinin özellikleri ve yük hesaplamalarında kullanılacak sabit değerleri ile ilgili kurallar ve standartlar bulunmaktadır. Tarihi yapılarda birden fazla ve farklı özelliklerde malzeme kullanılması söz konusu olduğundan her bir yapı özelinde kullanılan malzemelerin karakteristik özelliklerinin tahribatlı ve tahribatsız yöntemler ile belirlenmesi gerekmektedir. Ülkemizde yürürlükte bulunan yönetmeliklerden en önemlisi Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018), Riskli Yapı Tespit Yönetmeliği (2019), Kâgir Duvarlar Hesap ve Yapım Kuralları (TS 2510), Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan "Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu", Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri (TS498-2020) ve Yığma Yapı Tasarımı (Eurocode Ce-6)'dir.
- Tarihi yapılar doğal malzemeler ile yığma yapı şeklinde inşa edildiklerinden dolayı genel olarak çekme gerilmeleri karşısında hasar görmekte ya da kullanılamaz hale gelmektedirler. Özellikle deprem etkisinde oluşan bu kuvvetlerin etkisi altındaki tarihi yapıların deprem performansının belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalardan; "Tarihi Yapıların Güvenlik Faktörlerinin Değerlendirilmesi İçin Bir Metot (Ünay, 1997)", "Tarihi Yapıların Statik ve Dinamik Yükler Altında Lineer ve Non-lineer Analizi: Küçük Ayasofya Camii Örneği (Koçak, 1999)", "Tarihi Yığma Kâgir Yapıların güçlendirilmesi (Saraç, 2003)", "Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Özellikleri, Hasarlar, Onarım ve Güçlendirme Teknikleri (Mahrabel, 2006)", "Deprem Etkisi Altındaki Tarihi Yığma Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi (Aksöz, 2008)", "Tarihi Yığma Yapıların Taşıyıcı Sistemleri, Güvenliğinin İncelenmesi, Onarımı ve

Güçlendirilmesi (Kara, 2009), başlıklarını taşıyan yüksek lisans ve doktora tezleri bulunmaktadır.

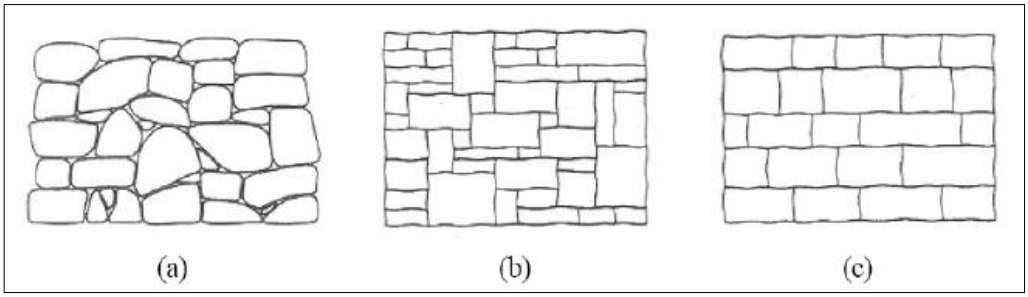
- Yapılan literatür araştırması sonucunda konu ile ilgili olarak; İstanbul Büyükşehir Belediyesi Koruma Uygulama ve Denetim Müdürlüğünü Yayınların'dan ve Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan "Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzundan" faydalanılmıştır. Ayrıca tarihi yapılarla ilgili olarak en kapsamlı yayınlar; Giorgio Croci (1998) "The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage", Bernard M Feilden (2003) "Conservation of Historic Buildings", Poul Beckmann ve Robert Bowles (2004) "Structural Aspects of Building Conservation", Jacques Heymen (1995) "The Stone Skelton- Structural Engineering of Masonry Architectural" başlıklarını taşıyan kitaplardır. Ülkemizde hali hazırda; Nafiz Çamlıbel (1998) "Sinan Mimarlığında Yapı Strüktürünün Analitik İncelenmesi", Ali İhsan Ünay (2002) "Tarihi Yapıların Deprem Dayanımı", Ali Bayraktar (2006) "Tarihi Yapıların Analitik İncelenmesi ve Sismik Güçlendirme Metodları", Zeynep Ahunbay (2017) "Tarihi Çevre Koruma ve Restorasyon" , Lory Zakara ve Kemal Kutgün Eyüpgiller (2018) "Mimari Restorasyon Koruma Teknik ve Yöntemleri" başlıklı kitaplar bulunmaktadır.

BÖLÜM 2.

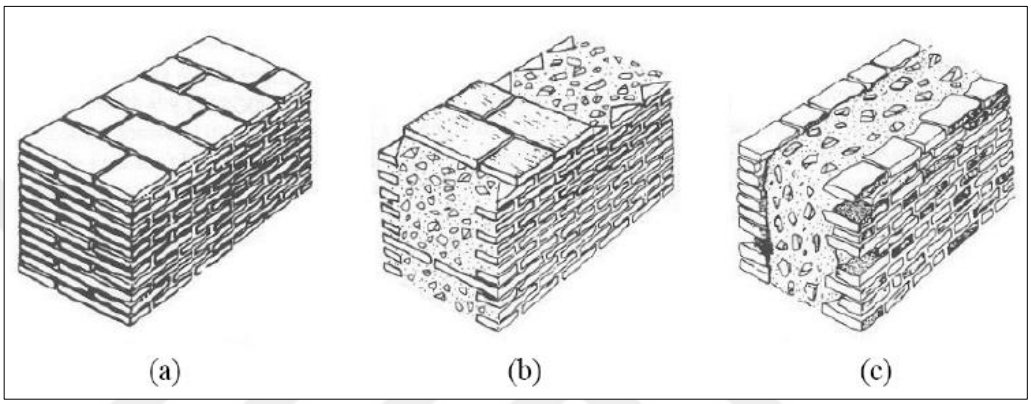
TARİHİ KAGİR YAPI MALZEMELERİ VE YAPIM TEKNİKLERİ

Ülkemizdeki tarihi yapıların büyük bir kısmını yığma yapım tekniği ile yapılmışlardır. Yığma kâgir olarak isimlendirilen bu tür yapılar; tuğla, doğal taş, kerpiç, ahşap gibi geleneksel malzemelerin, harçlı veya harçsız olarak birbirleri üzerine konulması sonucu oluşturulan düşey taşıyıcılı sistemlerdir. Tarihi kâgir yapıların aynı zamanda sınırlarını oluşturan ve düşey taşıyıcılığı sağlayan duvarlar genel olarak doğal taş, kesme taş, moloz taş, tuğla ya da almaşık malzemeden yapılmışlardır. Taşıyıcı strüktürü oluşturan birim elemanlar arasındaki birleşimi sağlamak için bağlayıcı özelliği olan harçlar ve horasan harcı kullanılmıştır. Kâgir yapılarda yatay kuvvetlerin oluşturduğu çekme kuvvetlerinin karşılanması için ahşap ya da demir kenet veya demir gergi elemanları kullanılmıştır. Kâgir yapılarda taşıyıcı strüktürü; kubbeler, tonozlar, kemerler, duvarlar, ayaklar, sütunlar ve payandalar oluşturmaktadır (Arıcan, 2010; Şişik, 2017).

Kâgir yapılarda dönemsel ve bölgesel farklılıklar içermekle birlikte birçok farklı yapım tekniği kullanılmıştır. Duvarların yapımı sırasında farklı birim malzemelerin bir arada kullanımları ve farklı şekillerde yerleştirilmeleri sonucunda farklı yapım tekniklerini oluşmuştur (Lourenço, 2004). Kâgir yapıların yapım tekniği açısından sınıflandırması Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Yığma Taş Yapılar a) Moloz taş, b) Kesme taş, c) İri Kesme Taş (Lourenço, 2004)



Şekil 2.2. Roma'da duvar a) Bağlı, b) Yastıklı-Ortası Dolgulu, c) Tuğla Yüzlü-Dolgulu (Özen, 2007)

2.1. Kâgir Yapı Malzemeleri

Kâgir elemanlarını oluşturan geleneksel malzemeler ve harç, çoğunlukla birbirinden farklı özelliklere sahiptirler. Ayrıca bu elemanların birbirine bağlanma şekli, elemanların taşıma gücü açısından önem taşımaktadır. Bu özelliklerinden dolayı yapılacak modellemede idealleştirme yapılabilmesi için birim eleman boyutlarına ve birbiri ile bağlanma şekilleri dikkate alınarak homojen malzeme kabulünün yapılması gerekmektedir. Kullanılan malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kâgir yapıların yük taşıma kapasitelerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bunlar, basınç dayanımı, kayma dayanımı, çekme dayanımı, durabilite, su emme katsayısı ve ısı genleşme oranı olarak sıralanmaktadır (Mahrebel, 2006). Yığma yapılarda çoğunlukla kullanılan malzemeler doğal taş, tuğla ve kerpiçtir.

2.1.1. Doğal Taş

Doğal taş, gerek dayanımı açısından gerekse de hemen hemen her yerde kolaylıkla bulunabildiğinden tarihi yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Ünay, 2002). Taşın

mekanik özellikleri, jeolojik ve kimyasal özellikleri ile değişkenlik göstermektedir. Doğal taşların basınç dayanımı yüksek olmasına rağmen çekme dayanımı oldukça düşüktür. Bu özelliğinden dolayı yapılarda sadece basınç kuvveti alan elemanlarında taş malzeme kullanılmıştır (Çamlıbel, 1998). Tarihi yığma yapılarda kullanılan taşların ortalama mekanik özellikleri Çizelge 2.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Doğal yapı taşlarının ortalama mekanik özellikleri (Ünay, 2002)

Taşın Cinsi	Basınç Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Granit	30 - 70	14 - 33	4 - 7	30.000-55.000
Mermer	25 - 65	9 - 45	1- 15	25.000-70.000
Kireç Taşı	18 - 35	6 - 20	2-6	10.000-55.000
Kumtaşı	5 - 30	2 - 10	2-4	13.000-50.000
Kuvars	10 - 30	3 - 10	3-4	15.000-55.000
Serpantin	7- 30	2 - 10	6-11	23.000-45.000

Taşın ana birim olarak kullanıldığı elemanlarının dayanımı kullanılan harca bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Harcın dayanımı, en az taşın dayanımına eşit olmalıdır aksi durumda harcın dayanımı belirleyici olur. Bu nedenle taş yığma yapılarda dayanım genel olarak taş ve harç birleşiminin dayanımına göre belirlenmektedir. Taşın çekme dayanımı genel olarak basınç dayanımının %15, kayma dayanımı ise basınç dayanımın %25'i kadardır (Ünay, 2002).

Taş mümkün olduğunca çekme gerilmesi oluşan bölgelerde kullanılmamalıdır. Çekme dayanımın aşılması durumunda taşlarda çatlaklar oluşmaktadır. Taşlar doğal etkilere karşı dayanıksız olup zamanla yüzey kayıpları ve bünyesel bozulmalara oluşabilmektedir.

Yığma yapılarda kullanılacak taşlarda bulunması gereken özellikler Şekil 2.3'de gösterilmektedir.

Taşıyıcılık	
Büyüklük	**Özellik**
$\frac{\text{Basınç dayanımı}}{\text{Birim hacim ağırlık}}$	Yüksek olmalı
$\frac{\text{Elastik modülü}}{\text{Basınç dayanımı}}$	Yüksek olmalı
Boyut etkisi	Minimum olmalı
Yönsel dayanım farklılığı	Minimum olmalı
Taş harç ara yüzey bağlantı	Yüksek olmalı
Dayanıklılık	
Büyüklük	**Özellik**
Donma çözülme dayanıklılığı	Yüksek olmalı
Su ve gaz geçirgenliği	Az olmalı
Dayanım	Sabit kalmalı

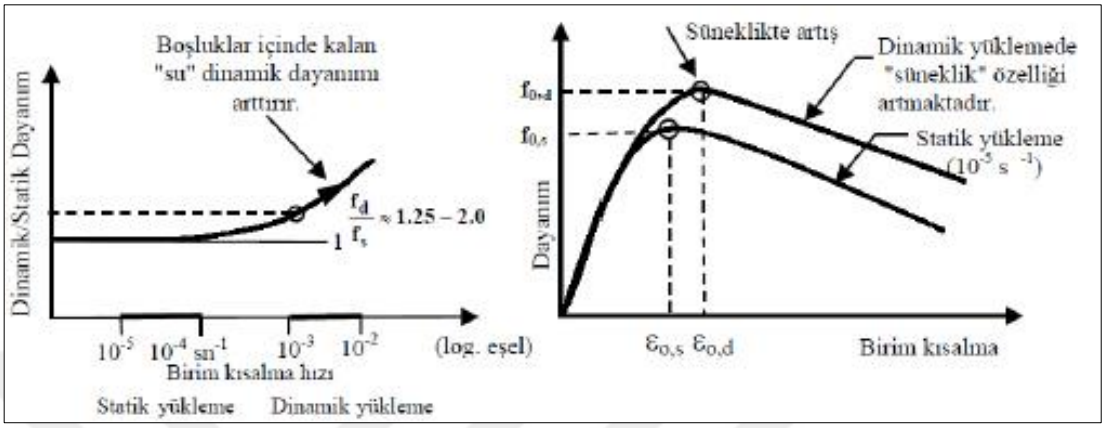
Şekil 2.3. Taş Malzemede Aranan Özellikleri (Arıoğlu vd., 1999)

Tarihi kâgir yapılarda yaygın olarak kullanılan küfeki taşı asıl itibariyle bir tür kireç taşıdır. Küfeki taşı doğadan çıktığı anda oldukça yumuşak ve her türlü işleme uygun olmasına rağmen havayla temas ettikten sonra havadaki karbon dioksid bünyesine alarak zamanla sertleşmekte ve mukavemeti artmaktadır (Arıoğlu vd., 1999), (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2. Küfeki Taşının Mekanik Özellikleri (Arıoğlu ve Arıoğlu, 1997)

Küfeki Taşının Genel Özellikleri		
Tanım	Bol fosilli, boşluklu, kripto-kristallı kireçtaşı	
Fiziksel Özellikleri	Birim hacim ağırlık (gr/cm^3)	2,19
	Porozıte	%12.60
	Su emme (ağırlıkça)	%5.70
	Su emme (hacmice)	% 11.08
	Kılcallık kat sayısı (cm2/sn)	4.93x10^6
	Donma çözülmede ortalama ağırlık kaybı	% 0.28
Mekanik Özellikler	Basınç dayanımı (Mpa)	33,20-45,50
	Çekme dayanımı (Mpa)	3,60
	Elastisite Modülü (Mpa)	24000
	Yüzeysel sertlik okuması	47,70-50,10
	Ultra ses hızı (km/sn)	3,88-5,01
	E/fb	720
	Fb/Fc	11-12

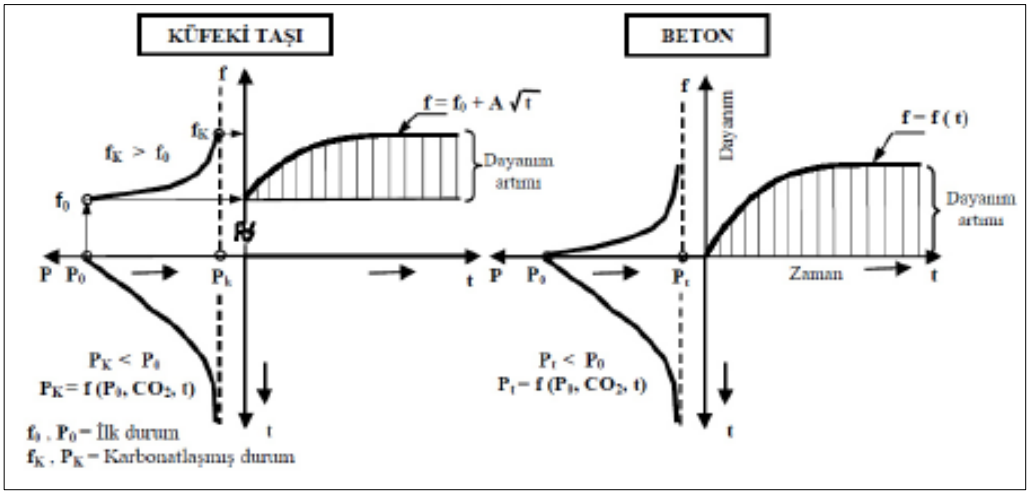
Küfeki taşının bünyesinde su mevcuttur. Bu suyun bir miktarı buharlaşırken bir miktarı da taşın karbonatlaşma sonucunda katmanlar arasında kalarak yapının dayanım ve sünekliliğini artırarak dinamik yükler altındaki davranışına önemli derece katkı sağlamaktadır (Arıoğlu vd., 1999), (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Küfeki taşının statik ve dinamik yükler altında davranışı (Arıoğlu vd., 1999)

Küfeki taşı ocaktan çıktığı andan itibaren denklem 2.1'de gösterildiği üzere hızla karbonatlaşarak betonunun aksine, boşluk oranı azalmakta, dayanımı ve birim hacim ağırlığı artmaktadır. (Şekil 2.5)

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca(HCO_3)_2 \qquad 2.1$$



Şekil 2.5. Küfeki ve betonun karbonatlaşma süreçleri (Dabanlı, 2008)

2.1.2. Tuğla

Tuğla, kâgir yapı elemanı olarak kullanılan en eski malzemedir. Tuğlanın kalitesi, harcın özellikleri ve örgü şekli, dayanımı etkilemektedir. Tuğla malzemenin basınç dayanımı, tuğlanın kalitesine göre 10 MPa - 30 MPa aralığında iken, çekme ve basınç

dayanımları sırası ile basınç dayanımının %10'u ve %30'u kadardır. Tuğlanın ortalama fiziksel özellikleri Çizelge 2.3'de gösterilmiştir (Ünay, 2002).

Çizelge 2.3. Tuğlaların Ortalama Fiziksel Özellikleri (Ünay, 2002)

Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (Mpa)
10-30	2.7 - 5.0	10 - 20	150-300

2.1.3. Harçlar

Harç, kum, su ve bağlayıcı özelliği olan malzemenin karıştırılması ile oluşan ve zamanla sertleşerek dayanım kazanan bir yapı malzemesidir. Kireç kaymağı, sönmüş kireç veya portland çimentosu bağlayıcı malzeme olarak kullanılmaktadır. Kullanılan harcın esas görevi yapı malzemelerini bir arada tutarak bütün olarak çalışmasını sağlamaktır. Tarihi kâgir yapılarda bağlayıcı olarak horasan harcı kullanılmıştır (Kuban, 1998). Tarihi horasan harçlı kâgir malzeme üzerinde yapılan deneyler sonucunda hesaplamalarda kabul edilebilecek mekanik değerler Çizelge 2.4'de verilmektedir.

Çizelge 2.4. Kâgir malzemenin mekanik özellikleri (Çamlıbel, 1998)

Birim Hacim Ağırlık	: 1.76 t/m3
Basınç Mukavemeti	: 38-49 kgf/cm2
Basınç Emniyet Gerilmesi (Gs=3 olmak üzere)	: 12-18 kgf/cm2
Eğilme-Çekme Mukavemeti	: 17.10 kgf/cm2
Çekme Emniyet Gerilmesi(Gs=3 olmak üzere)	: 5 kgf/cm2
Horasan harçlı taş duvarın basınç emniyet gerilmesi	: 10-25 kgf/cm2
Kayma emniyet gerilmesinin basınç emniyet gerilmesinin %10 alınarak:1-2.5kgf/cm2	

2.1.4. Ahşap

Ahşap malzeme mekanik özellikleri bakımından lifler doğrultusunda basınca ve çekmeye dayanıklı olup liflere dik doğrultuda çekme basınçlarına karşı zayıftır. Bu nedenle tarihi yapılarda genellikle çatı ve döşeme sistemlerinde ahşap kullanılmıştır. Ayrıca çekmeye dayanımından dolayı çekme kuvvetlerini karşılaması bakımından mesnetlerde ve duvarlarda hatıl olarak kullanılmıştır. Ancak, ahşap yapı malzemesi bünyesi itibari ile rutubete, böceklenmeye ve yangına karşı dayanıksız olduğundan ilave

önlemler alınarak kullanılması gerekmektedir. Ahşap malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 2.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.5. Ahşap malzemelerin mekanik özellikleri (TS 647)

TS 647'e göre ahşap yapı elemanları için emniyet gerilmeleri (Esas Yükler için)					
Gerilme türü	Notasyon	Emniyet gerilmeleri (kg/cm^2)			
		İğne yapraklılar			Meşe Kayın
		I. sınıf	**II. sınıf**	III. sınıf	
Eğilme	σ_{eem}	130	**100**	70	110
Liflere paralel çekme	$\sigma_{çem//}$	105	**85**	0	110
Liflere paralel basınç	$\sigma_{bem//}$	110	**85**	60	100
Liflere dik basınç	$\sigma_{bem\perp}$	20	**20**	20	30
Makaslama	τ_{em}	9	**9**	9	10

2.1.5. Demir

Kâgir yapılarda kemerlerde oluşan çekme gerilmelerini karşılamak için gergi çubukları, duvarlarda birleşimini sağlamak içinde kenet elemanı olarak kullanılmışlardır. Demire ait mekanik özellikler Çizelge 2.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 2.6. Demir malzemelerin mekanik özellikleri (TS 648)

Elastisite Modülü	E=2,10x10^6 kg/cm^2
Kayma Modlü	G=E/2(1+υ) = 810.000 kg/cm^2
Poisson Oranı	υ = 0,30
Isı Genleşme Katsayısı	α= 0.000012

2.2. Kâgir Yapı Malzeme Özellikleri

Kâgir, doğal veya yapay yollar ile elde edilen geleneksel yapı malzemelerin uygun bir harçla birlikte kullanılması ile elde edilen kompozit malzemeye verilen genel tanımdır. Tarihi yapılarda kütlesel elemanlar kâgir malzeme ile inşa edilmişlerdir. Kâgir malzemeler özellikleri itibari ile heterojen malzeme olup birim hacim ağırlıkları ortalama 21~22 kN/m^3 arasında değişmektedir. Kâgir malzemenin mekanik özellikleri kullanılan malzeme, harç ve yapım tekniği ile çevresel koşullara bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Çamlıbel, 1998). Kireç harcı ile yapılan kâgir malzemede basınç gerilmesi, σ = 0,2 – 0,6 MPa, horosan harçlı ile yapılan kâgir malzemede ise bu değer yaklaşık σ = 1,5 ~ 3,0 MPa değerindedir (Arıoğlu vd., 1999; Saraç, 2003)

2.2.1. Basınç Dayanımı:

Kâgir yapıyı oluşturan malzemelerin mekanik özelliklerinin başında basınç dayanımın belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için TS4563 ve TS705'de belirtilen deneysel yaklaşımlar kullanılmaktadır. Yığma Yapı Tasarımı "Eurocode EC6" da yığma yapı elemanlarının hesaplarında kullanılacak karakteristik basınç dayanımı Çizelge 2.7 denkleminde belirtilmektedir.

Çizelge 2.7. Yığma yapı karakteristik basınç dayanım denklemi

Denklem	Açıklamalar
$f_k = K f_b^{\alpha} f_m^{\beta}$	fk: yığma yapı elemanın karakteristik basınç dayanımı (MPa) fm: harcın ortalama basınç dayanımı (MPa) f'b: birim elemanın (taş veya tuğla) basınç dayanımı (MPa) K, α, β: sabit değerleri göstermektedir.

Tuğla veya taşın normalize edilmiş basınç dayanımı (fb) Çizelge 2.8'de verilmektedir.

Çizelge 2.8. Tuğla malzemenin normalize edilmiş basınç dayanım denklemi

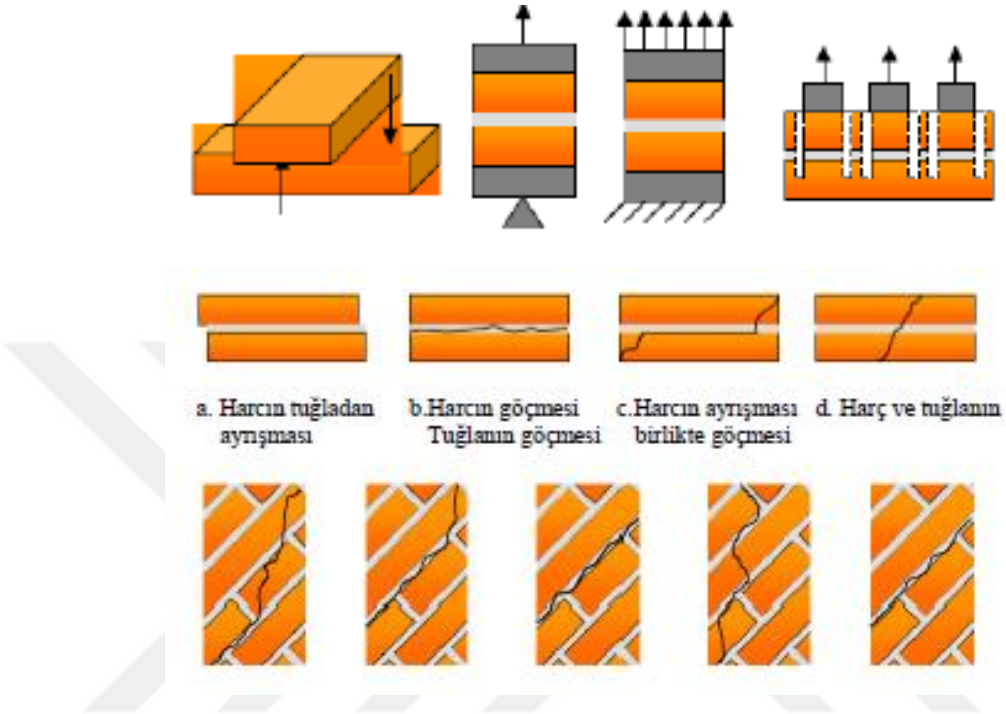
Denklem	Açıklamalar
$f_b = f_b \delta_m \delta_s$	fb: birim elemanın basınç dayanımını (MPa) δm: birim elemanın nem oranını gösteren faktörü δs: birim elemanın biçim ve boyuta bağlı olan şekil faktörünü göstermektedir.

K, α ve β sabit değerleri için sırasıyla çeşitli deneyler sonucunda elde edilen değerler kullanılmaktadır. Kağir yapı elemanlarının karakteristik basınç dayanımını etkileyen en önemli faktörler elemanın nem içerme oranı, birim elemanın şekil ve boyutudur.

2.2.2. Çekme Dayanımı

Kâgir malzemelerin çekme mukavemeti çok düşük olduğundan, hesaplamalarda dikkate alınmaktadır. Kâgir yapı elemanlarının yük taşıma prensibi dikkate alındığında, eksenel çekme gerilmelerinden ziyade elemanlarda eğilmeden dolayı oluşan çekme gerilmelerinin daha önemli olduğu görülmektedir. Kâgir birim malzeme özelliği, nem oranı, harcın yoğunluğu ve birim elemanların yüzey dokuları çekme gerilmesi dayanımını

doğrudan etkilemektedir. Bağlayıcı olarak kullanılan harcın özelliğine ve kalınlığına bağlı olarak çekme dayanımı artırmaktadır. Çekme kapasitesinin belirlenmesi için geliştirilen bazı deney düzenekleri ve yığma yapılarda çekme gerilmelerinden kaynaklanan hasar ve göçme mekanizmaları Şekil 2.6'de gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Tuğla duvarda çekme deneyleri ve göçme biçimleri (Schueremans, 2001)

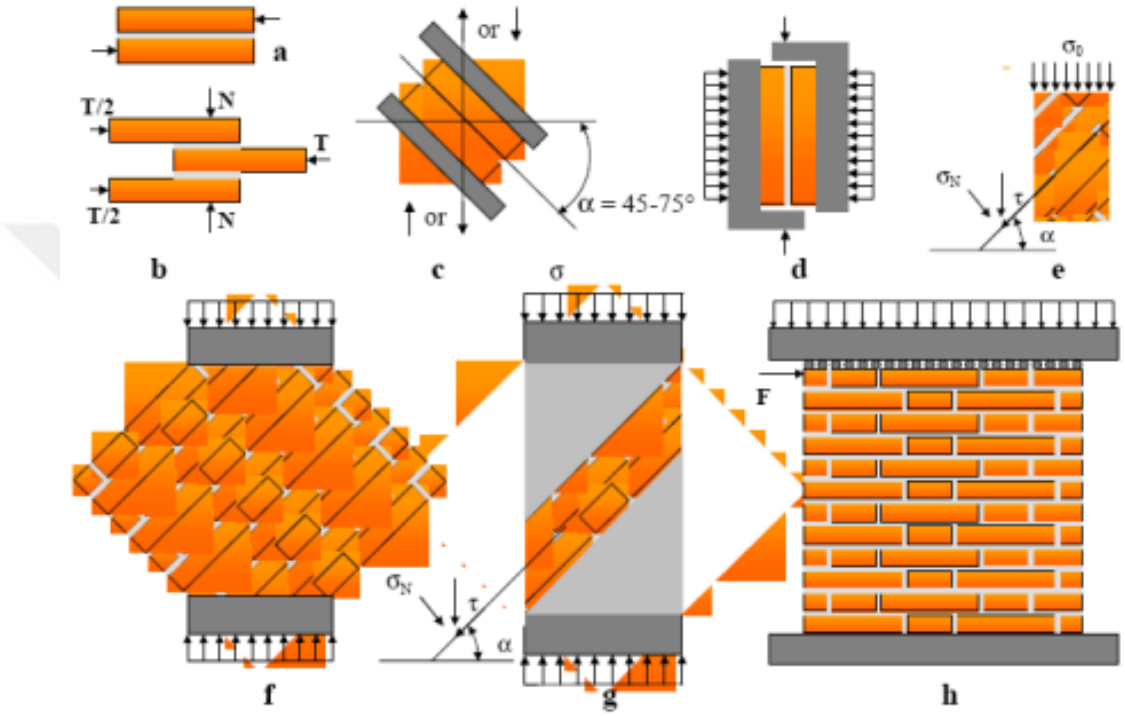
2.2.3. Kayma Dayanımı

Kâgir yapı elemanların kayma dayanımı, birim elamanlar ve bunların arasındaki bağlantıyı sağlayan harcın özelliklerine bağlıdır. Birim elemanlar ile harç arasında oluşan mekanizmanın kâgir birim elemanlar ve harcın fiziksel ve kimyasal özelliklerinden etkilendiği görülmüştür. Kâgir yapı elemanları, etkiyen yük mekanizmasına bağlı olarak basınç ve çekme kırılmaları yanı sıra kayma kırılmalarına da maruz kalabilmektedirler. Kayma dayanımı Çizelge 2.9' daki denklem yardımı ile belirlenmektedir (Ünay, 2002).

Çizelge 2.9. Kâgir malzemen kayma dayanım denklemi (Ünay, 2002)

Denklem	Açıklamalar
$\tau = \tau_0 + \mu f_n$	τ : Kayma dayanımını (MPa) τ_0 : Kohezyon değerini (0.20-0.50) μ :iç sürtünme açısını (0.20-0.10)

Kâgir yapılarda kayma dayanımı normal gerilmelere göre değişiklik gösterir bu nedenle tek bir kayma dayanımında bahsedilemez. Bu nedenle yapıda kritik olan kapı ve pencere boşlukları ile zayıflatılmış olan bölgelerde normal gerilme altındaki kayma gerilmesini belirlenmesi gerçekçi sonuçlar verecektir. Kayma dayanımının belirlenebilmesi için kullanılan deney düzenekleri Şekil 2.7'de gösterilmiştir (Schueremans, 2001).



Şekil 2.7. Kayma mukavemetinin belirlenmesindeki deneyler (Schueremans, 2001)

2.2.4. Elastiste Modolü

Kâgir yapıyı oluşturan birim malzemelerin genel özelliklerinden dolayı elastisite modülü doğrusal elastik olamayan davranış göstermektedir. Bu nedenle yapının matematiksel modellemesi ve strüktürel analiz sırasında kullanılacak Em değerinin doğru belirlenmesi gerekmektedir. Laboratuvar deneyleri sonucunda kâgir yapılarda kullanılacak elastisite modülü için kâgir yapıyı oluşturan elemanın karakteristik basınç gerilmesi ile bağıntılı Çizelge 2.10'daki denkleme yardımı ile belirlenmektedir (Ünay, 2002).

Çizelge 2.10. Elastisite Modülü denklemi (Ünay, 2002)

Denklem	Açıklamalar
$E_m = 1000 f_k$	fk değeri kâgir yapı elemanının karakteristik basınç gerilmesini (MPa) göstermektedir.

Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda yığma yapılar için kullanılan malzemeye göre alınabilecek mekanik özellikler Çizelge 2.11 ve Çizelge 2.12'de verilmektedir. Söz konusu değerler yol gösterici ortalama değerler olup ihtiyaç duyulması halinde yapı özelinde kapsamlı deneyler yapılarak gerekli parametrelerin elde edilmesi gerekmektedir.

Çizelge 2.11. Yığma Duvar Malzemesinin Mekanik Özellikleri (Magenes, Penna, 2009)

Duvar türü	Basınç dayanımı fm (MPa)	Kayma dayanımı τo (kPa)	Elastisite modülü E (MPa)	Kayma modülü G (MPa)	Birim hacim ağırlığı w (kN/m3)
Moloz taşlı yığma duvar	0.6~0.90	20~32	690~1050	115~175	19
Kaba yonu taşlı yığma duvar	1.1~1.6	35~51	1020~1440	170~240	20
Kesme taşlı iyi bağlantılı yığma duvar	1. 5~2. 0	56~74	1500~1980	250~330	21
Yumuşak taşlı (kalker, tüf) yığma duvar	0.8~1.2	28~42	900~1260	150~210	16
Düzgün kesme taşlı, sıvalı yığma duvar	3.0~4.0	78~98	2340~2820	390~470	22
Kireç harçlı tuğla yığma duvar	1.8~2.8	60~92	1800~2400	300~400	18
Çimento harçlı yarı boşluklu tuğla yığma duvar	3.8~5.0	240~320	2800~3600	560~720	15
Boşluk oranı %45'den küçük olan tuğla yığma duvar	4.6~6.0	300~400	3400~4400	680~880	12
Boşluk oranı %45'den küçük düşey derzleri harçsız tuğla yığma duvar	3.0~4.0	100~130	2580~3300	430~550	11
Boşluk oranı %45~65 arasında bulunan beton bloklu yığma duvar	1.5~2.0	95~125	2200~2800	440~560	12
Boşluğu doldurulmuş beton bloklu yığma duvar	3.0~4.4	180~240	2700~3500	540~700	14

Çizelge 2.12. Yığma duvar malzemesinin Çizelge 2.11'de verilen mekanik parametrelerine harç, duvar işçiliğine ve duvarın enine bağlantılarının özellerine bağlı kullanılabilecek düzeltme katsayıları (Magenes, Penna, 2009)

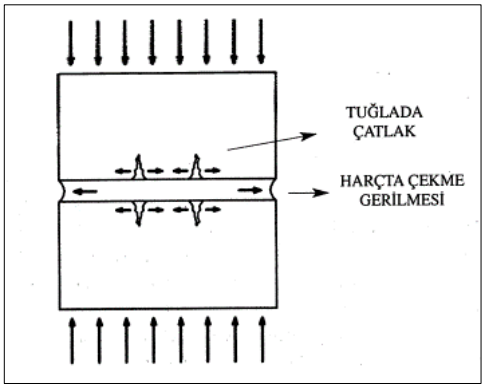
Duvar düzeni	İyi bağlayıcı harç	İyi düzenlenen derzli duvar	Enine bağlantılı duvar	Harç enjeksiyonlu duvar	Donatılı sıva ile güçlendirilmiş duvar
Moloz taşlı yığma duvar	1.5	1.3	1.5	2.0	2.0
Kaba yonu taşlı yığma duvar	1.4	1.2	1.5	1.7	2.0
Kesme taşlı iyi bağlantılı yığma duvar	1.3	1.1	1.3	1.5	1.5
Yumuşak taşlı (kalker, tüf) yığma	1.5	-	1.5	1.7	2.0
Düzgün kesme taşlı, sıvalı yığma duvar	1.2	-	1.2	1.2	1.2
Kireç harçlı tuğla yığma duvar	1.3	-	1.3	1.5	1.5
Çimento harçlı yarı boşluklu tuğla yığma duvar	1.3	-	-	-	1.3
Boşluk oranı %45'den küçük olan tuğla yığma duvar	1.3	-	-	-	1.3
Boşluk oranı %45'den küçük düşey derzleri harçsız tuğla yığma duvar	1.3	-	-	-	1.3
Boşluk oranı %45~65 arasında bulunan beton bloklu yığma duvar	1.3	-	-	-	1.3
Boşluğu doldurulmuş beton bloklu yığma duvar	1.3	-	-	-	1.3

2.2.5. Kâgir Yapı Elemanlarının Kırılma Teorileri

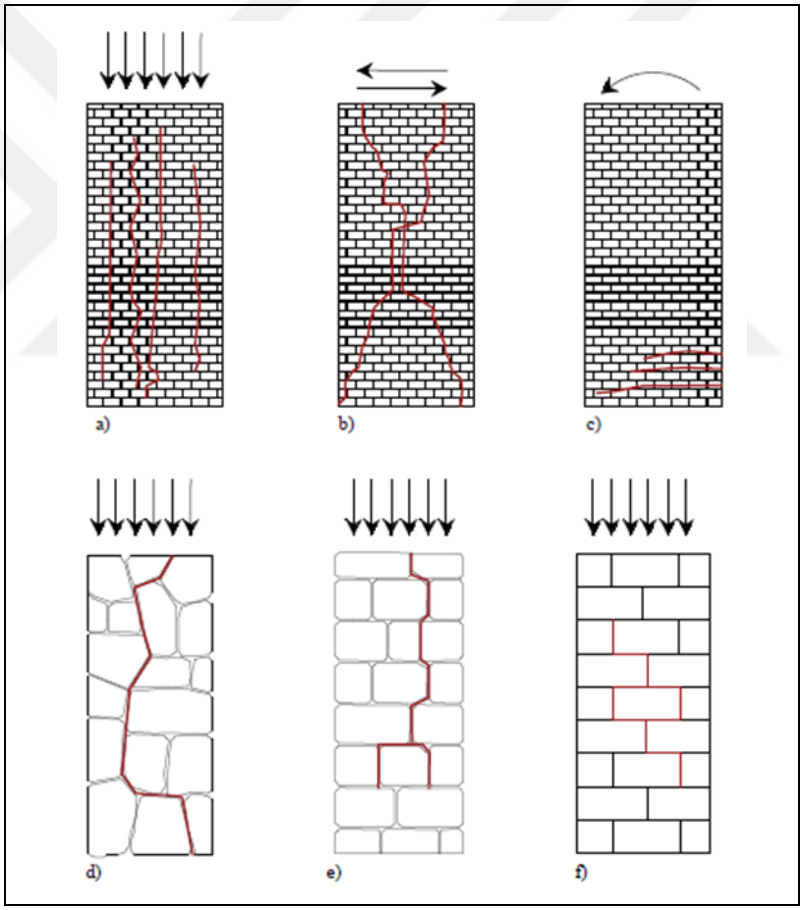
Kırılma teorilerini türetmek için, yığma yapı elemanlarının temel özellikleri üzerinde araştırmacılar tarafından çok sayıda araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalarda, yığma yapı malzemesini oluşturan birim elemanlar ve harç birleşim noktalarının genellikle doğrusal elastik özellik gösterdikleri kabul edilmektedir (Dabanlı, 2008). Bununla birlikte, yığma yapı elemanlarının kırılma mekanizmasını etkileyen en önemli faktör yapının geometrik formudur. Kırılma teorisi için en gerçekçi yöntem, yapının geometrik formuna bağlı olarak taşıyıcı elemanlarının yük aktarma prensiplerinin doğru bir şekilde incelenmesi ile mümkün olabilmektedir. Yığma yapı elemanlarının kesitleri içinde oluşan basınç gerilmesinin, yığma yapı elemanının kesitinin ya da kesit içindeki birim elemanlarının basınç dayanımını aşması, basınç kırılması olarak tanımlanmaktadır (Ünay, 2002). Yığma yapı elemanlarının çekme gerilmesi ve kayma gerilmelerine karşı direnci, taş veya tuğla gibi birim elemanlarıyla harç arasındaki birleşim türünü ve kalitesine bağlıdır.

Basınç Kırılmasının Mekanizması: Eksenel basınç yükleri altındaki yığma yapı elemanlarının kırılma mekanizması, yatay yönde oluşan çekme kuvvetlerinin taş veya tuğla birim elemanlarda düşey yönde neden olduğu yarılmalar sonucunda

gerçekleşmektedir. (Şekil 2.8), (Şekil 2.9) Bu tür kırılmanın nedeni, harç ile tuğla veya taşın farklı birim deformasyon niteliklerine sahip olmasıdır.



Şekil 2.8. Basınç yükleri altında kırılma mekanizması (Ünay, 2002)

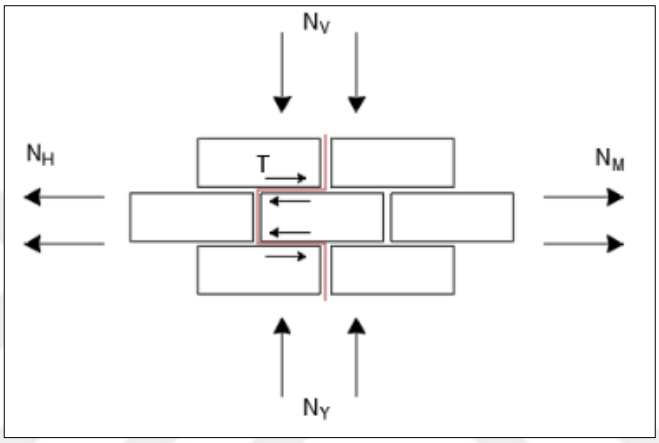


Şekil 2.9. Basınç kırılma mekanizmaları (Croci, 1998)

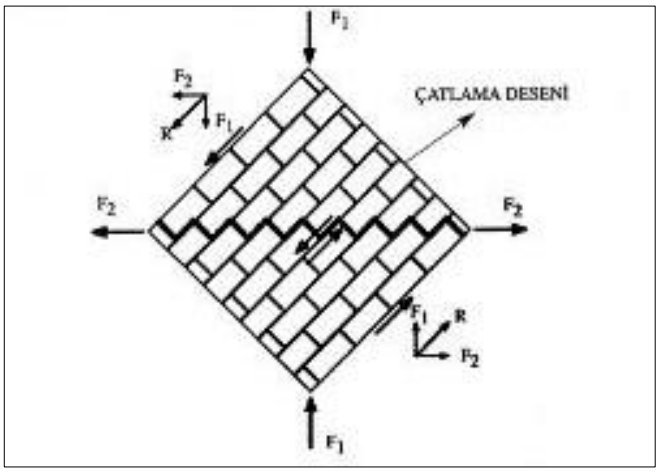
Kayma Kırılmasının Mekanizması: Yığma yapı elemanlarının örgü desenine bağlı olarak kayma gerilmeleri, birleşim noktalarında oluşan kayma ve diyagonal kayma olmak üzere iki şekilde oluşmaktadır. Birleşim noktalarında oluşan kayma kırılması,

komşu tuğla veya taş birim elemanlarının arasındaki harcın yatay yönde oluşan ötelenmeye karşı koyduğu direnç sonucunda gerçekleşmektedir (Şekil 2.8).

Diyagonal kayma kırılması, kâgir yapı elemanında kesme kuvvetinin etki yönünde oluşan kayma gerilmeleri sonucunda ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.10). Kâgir duvarlarda kesme kuvvetleri normal koşullarda elemanların birleşim düzlemlerine paralel doğrultuda oluşmaktadır. Diyagonal çekme kırılmasının oluşmaması için yapı elemanları ile harcın iyi bir bağlantı oluşturması gerekmektedir. Eğer bu sağlanmamış ise Şekil 2.11'de gösterildiği gibi basamaklar halinde kırılmalar meydana gelmektedir.



Şekil 2.10. Basınç, çekme ve kayma kuvvetleri (Ünay, 2002)



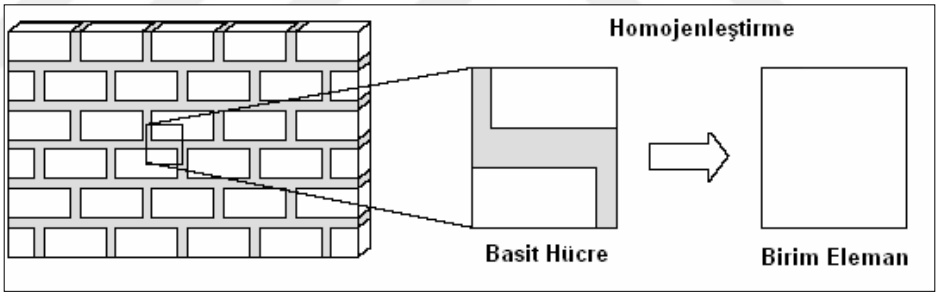
Şekil 2.11. Basamak şeklinde diyagonal kırılma (Ünay, 2002)

Çekme ve Eğilme Kırılmasının Mekanizması: Kâgir yapı elemanları çekme kuvvetlerine karşı dayanıksız gevrek malzemelerdir. Bu nedenle, çoğunlukla eğilmeden dolayı oluşan çekme gerilmeleri öncelikle birleşim yerlerinden başlamak üzere kırılmakta

ve bunun sonuncunda dengesi bozulan eleman içerisinde çekme gerilmeleri artarak yapının tamamen ya da önemli elemanlarının çökmesine neden olabilmektedir.

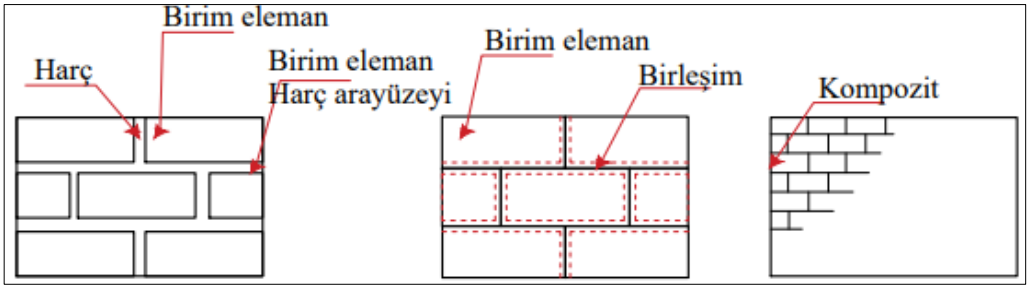
2.2.6. Malzeme Modelleme Yöntemleri

Yığma yapı taşıyıcı strüktürünü oluşturan geleneksel malzemeler ile bağlayıcılığı sağlayan harç çoğunlukla birbirinden farklı malzemelerdir. Bu nedenle yapının davranışının belirlenmesi için yapılacak modellemede ortak parametreler belirlenerek idealleştirme yapılması önemlidir. Yapılacak olan idealleştirmede yapının geometrisi, yapım tekniği ve modelden beklenen hassasiyete bağlı olarak değişkenlik oluşabilmektedir. Genellikle tüm yapı için benzer model yaklaşımlarının kabulü beklenilmektedir. Mümkün olduğunca basit modellerin oluşturulması, sonuçların da daha kolay değerlendirilmesini sağlayacaktır. Ayrıca, yapılan çalışmalar dikkate alındığında birçok yapıda malzeme özelliklerinin yaklaşık olarak belirlenebildiği dikkate alındığında çok özel olmayan durumlarda ayrıntılı model yapılması gerekli olmayabilir. Hesaplardaki hassasiyet düzeyine göre basitleştirme ve idealleştirme durumunda makro modelleme kullanılabilmektedir (Şekil 2.12), (Lourenço, 1998).



Şekil 2.12. Makro modelleme (Lourenço, 1998)

Daha kapsamlı bir çalışma yapılması durumunda öncelikle makro modelleme ile genel çözüm yapılıp ihtiyaç duyulan bölgelerde yığma birimlerinin ve harcın farklı olarak modellendiği Mikro modelleme yapılabilmektedir (Şekil 2.13). Bu tür işlemde ana malzemenin, harcın ve birleşim noktasının yükler altındaki davranışı için ilave kabuller ve parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Söz konusu yöntem çoğunlukla önem arz eden bölgelerdeki davranışın ayrıntılı şekilde incelemesi amacı ile kullanılmaktadır.



Şekil 2.13. Mikro modelleme (Lourenço, 1998)

Kâgir yapıyı oluşturan birim elemanlar ile harcın özellikleri ve katılımını dikkate alınarak tek bir malzeme şeklinde idealleştirme yapılabilmektedir. Lourenço (2001), tuğla ve harçtan oluşan yapı parametrelerini tek bir malzeme olarak hesaplanması için Çizelge 2.13'de verilen bağıntıyı önermektedir (Lourenço, 1998).

Çizelge 2.13. Kompozit malzeme Elastisite Modülü denklemi (Lourenço, 1998)

Denklem	Açıklamalar
$E_{th} = \frac{t_h + t_t}{\frac{t_h}{E_h} + \frac{t_t}{E_t}} \rho$	E_{th}; bulunan ortak elastisite modülü t_h; kullanılan harç kalınlığı t_t; kullanılan tuğla kalınlığı E_h; kullanılan harcın elastisite modülü E_t; kullanılan tuğlanın elastisite modülü ρk=tuğla ile harcın arasındaki bağ kuvvetini temsil eder, ortalama 0,50 kabul edilebilir.

Benzer şekilde Eurocode 8 "Design of structures for earthquake resistance" tuğla ve harçtan oluşan kompozit malzemenin mukavemeti Çizelge 2.14 bağıntısı ile verilmiştir.

Çizelge 2.14. Kompozit malzeme karakteristik basınç dayanımı denklemi (Lourenço, 1998)

Denklem	Açıklamalar
$f_{bk} = K \times f_{\text{tuğla/taş}}^{0.65} \times f_{\text{harc}}^{0.25}$	K, kâgir yapının özelliklerine bağlı olarak, 0.4 ile 0.6 arasında 0.05 adımlarla değişen bir sabit katsayı dır.

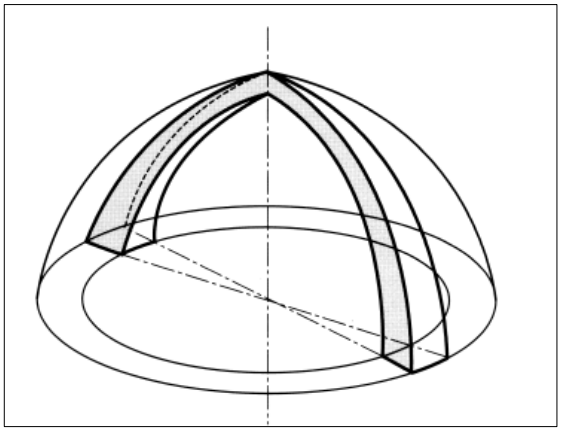
2.3. Kâgir Yapıların Strüktürel Öğeleri

Taşıyıcı sistem (strüktür); mimari mekânı evrensel mekândan ayıran, sınırlayıcıların ayakta kalmasını sağlayan tüm elemanlara verilen isimdir. Yapı strüktür sistemlerinin temel sorunu, yüklerin zemine istenilen yönde, doğrultuda ve istenilen noktalara aktarılmasıdır. Bu nedenle birçok yapıda örtü sistemi ile yapı planı çakıştırılmak suretiyle gelen yükler yerçekimi doğrultusunda zemine iletilmiştir. Tarihi yapılarda strüktür sistem oluşturan malzemeler sınırlı özelliklere sahip olduklarından strüktür biçimleri de belli sınırlar içinde kalınmıştır. Geleneksel yapılarda tasarım, mekân örtüsünden başlar, öncelikle eğrisel örtü elemanları ile yüklerin karşılanması, ardından yatay ve düşey taşıyıcı elemanlar ile güvenli bir şekilde zemine aktarılmasını sağlayacak şekilde düzenlenmiştir (Çamlıbel, 1998).

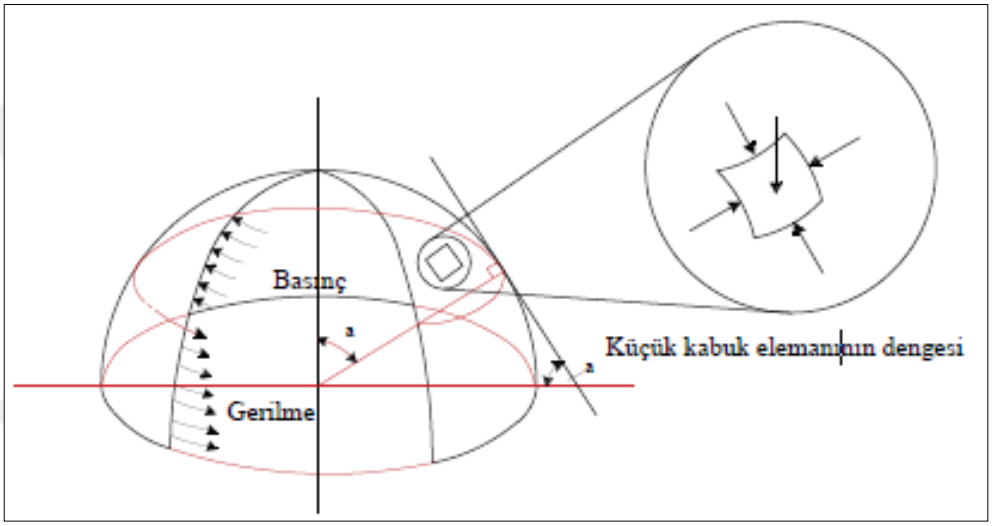
2.3.1. Örtü Elemanları

Sınırlı bir alanın üzerinin bir taşıyıcı sistem tarafından kapanması ile mekân meydana gelir. Örtü sisteminin belirlenmesinde en büyük etken kullanılacak malzeme özelliklerine bağlı olarak geçilebilecek en büyük açıklıktır. Bir açıklığın geçilmesi, tek bir malzemeden bir parça kullanılarak veya aynı malzemelerden çok adet parça yan yana konarak sağlanmıştır (Çamlıbel, 1998).

Kubbeler: Kubbe bir kemerin düşey simetri ekseni etrafında dönmesiyle elde edilen çift eğrilik yüzeyli kabuk elemanlar olup, kemerin statik özelliklerini taşımaktadır (Şekil 2.14). Kubbe kesitinde basınç ve çekme bölgeleri oluşmaktadır (Şekil 2.15). Kubbe, biçim itibari ile mesnetlerinde sürekli bir taşıyıcı yüzey elemanına gereksinim duymaktadır. Buna bağlı olarak kubbeler dairesel bir mesnete oturtulmaktadır. Kubbenin yükü, kubbeyi taşıyan kemerler aracılığı ile zemine iletilirken mesnetlerde oluşan yanal etkiler kemer düzlemlerine dik doğrultuda yerleştirilmiş yarım kemerler ya da payandalar aracılığı ile taşınmaktadır (Çamlıbel, 1998).

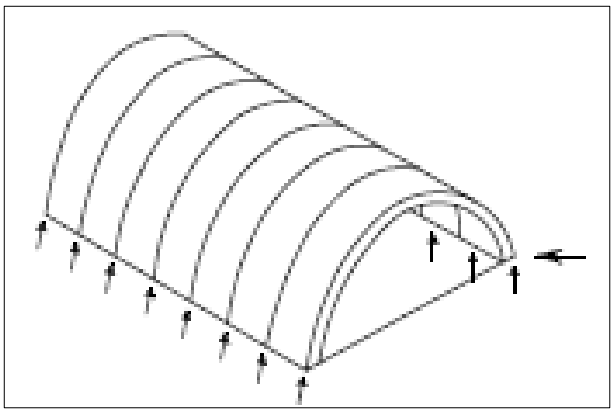


Şekil 2.14. Kubbe genel formu (Çamlıbel, 1998)

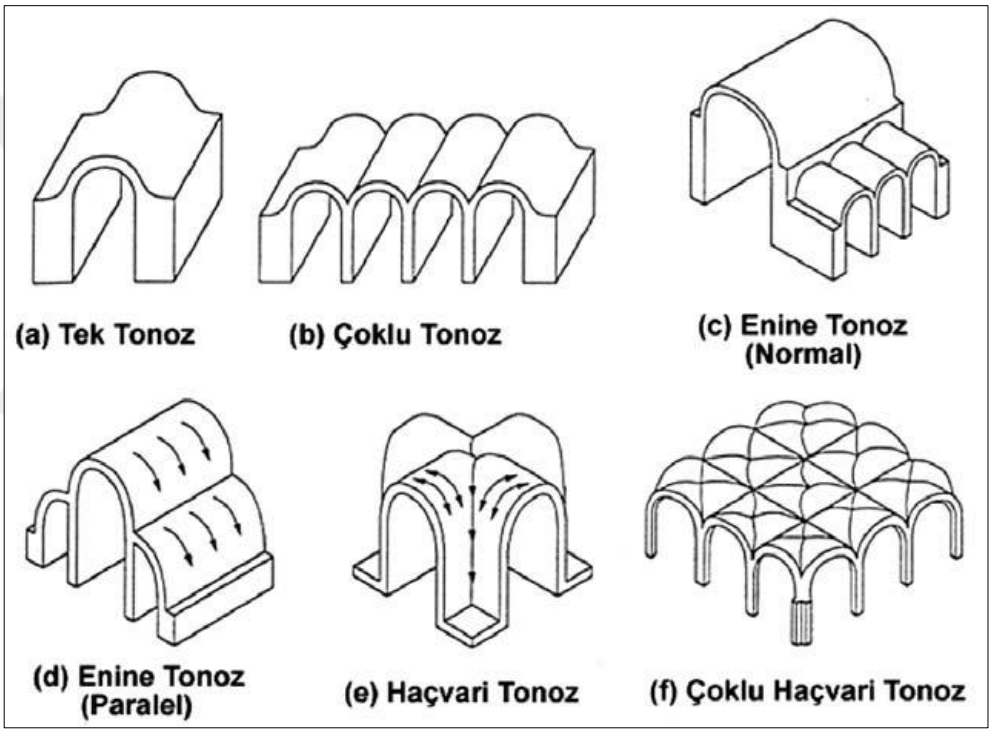


Şekil 2.15. Kubbe yük dağılımı basınç ve çekme gerilmeleri (Sesigür vd., 2007)

Tonozlar: Tonoz, bir kemerin kendi düzlemine dik yönde ötelenmesi sonucu oluşan ve kabuk davranışı gösteren tek eğrilik yüzeyli taşıyıcı elemanıdır (Şekil 2.16). Tarihi yapılarda genellikle dikdörtgen alanların üst örtüsü olarak kullanılmış olup basınç gerilmelerini karşılayan yapı elemanıdır (Ünay, 2002). Tonoz çeşitleri; ilkel tonoz, beşik tonoz, çapraz tonoz ve manastır tonozu olarak dörde ayrılmaktadır. Beşik ve ilkel tonozların mesnetlerinin sürekli olma gerekliliği bulunduğundan tek mekânların üst örtüsü olarak kullanılmışlardır. Ancak çapraz ve haçvari tonoz mesnetlerinin sütün veya ayaklardan oluşmasından dolayı çoklu mekânların üst örtüsünde kullanılmışlardır (Sesigür vd., 2007), (Şekil 2.17).



Şekil 2.16. Tonoz genel formu (Ünay, 2002)



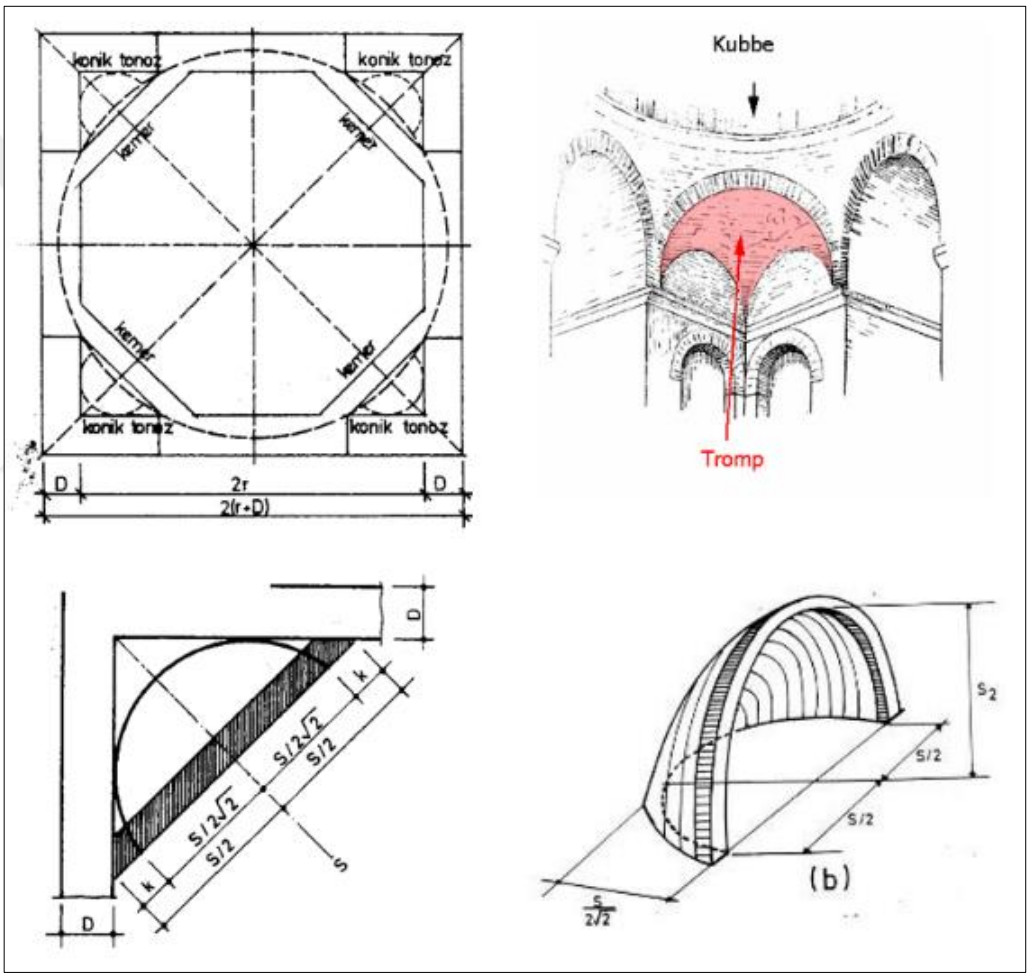
Şekil 2.17. Kâgir tonoz biçimleri ve düşey yük aktarımları (Sesigür vd., 2007)

2.3.2. Geçiş Elemanları

Tarihi yapılarda kullanılan dairesel tabanlı kubbenin kare tabanlı düz duvarlara oturtulması sorunun çözümü için geçiş elemanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için de birbiri üstüne binen ve kenar sayıları giderek artış gösteren çokgenlerin aracılığı ile çözüm üretimi sağlanmıştır (Çamlıbel, 1998). Tarihi kubbeli yapılarda daire ile alt yapı

arasındaki geçişi sağlayan çokgen veya dairesel planlı mesnedi elde etmek için en sık Pandantifler, Tromplar ve Türk üçgeni kullanılmıştır (Kuban, 1998).

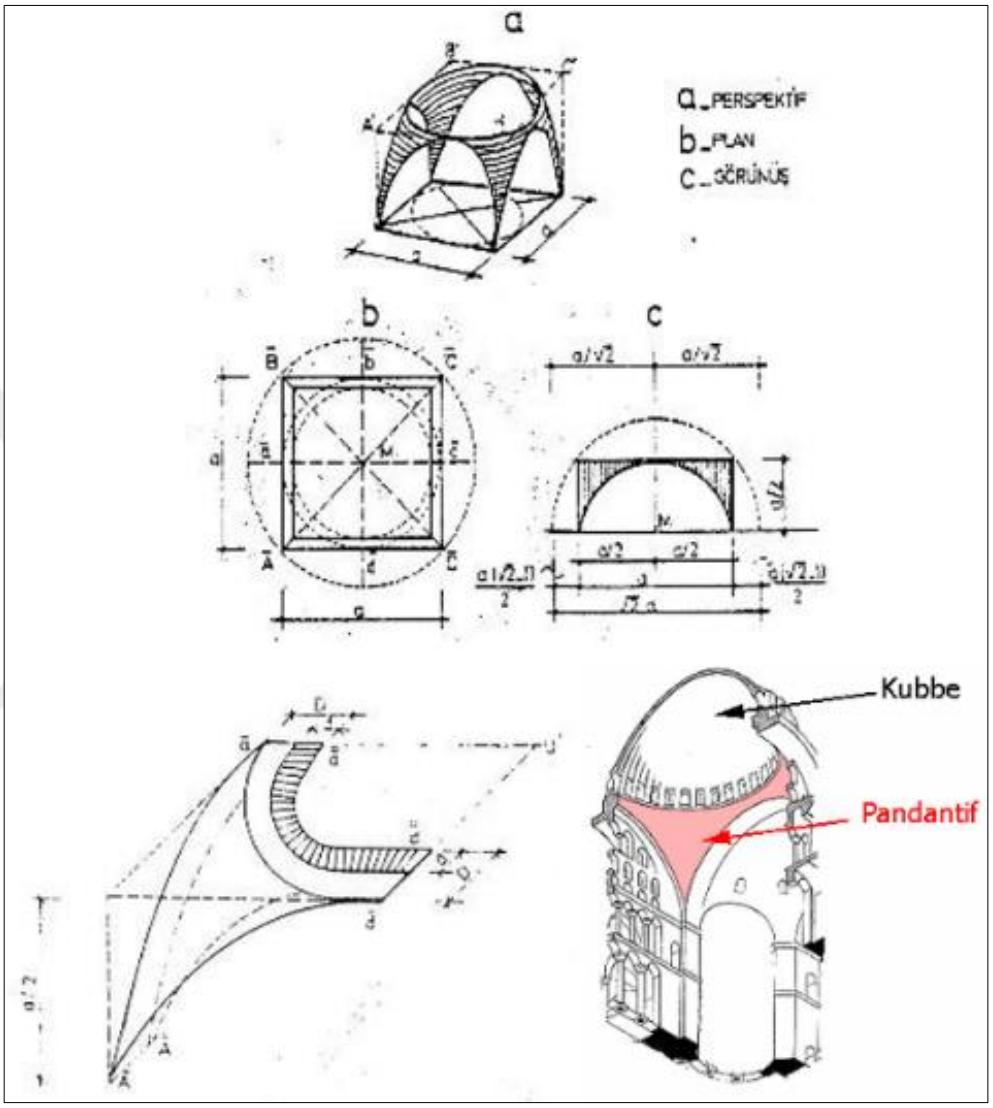
Tromp (Tonoz Mesnet): Tromp kare planlı hacimler ile üst örtüyü oluştura dairesel tabanlı kubbelerin köşelerinde mesnet oluşturmak amacı ile yapının köşelerine çapraz olarak atılmış baş kemer ile köşe arasında kalan hacmi kapatan konik tonoz parçasından oluşan sistemdir (Şekil 2.18). Kubbe çapı çok büyük değilse, bu eleman kubbe mesnet yüklerinden fazla etkilenmemektedir. Kemer taşıyıcılık, konik tonoz ise örtü görevi yapmaktadır (Çamlıbel, 1998).



Şekil 2.18. Tromp (Çamlıbel, 1998)

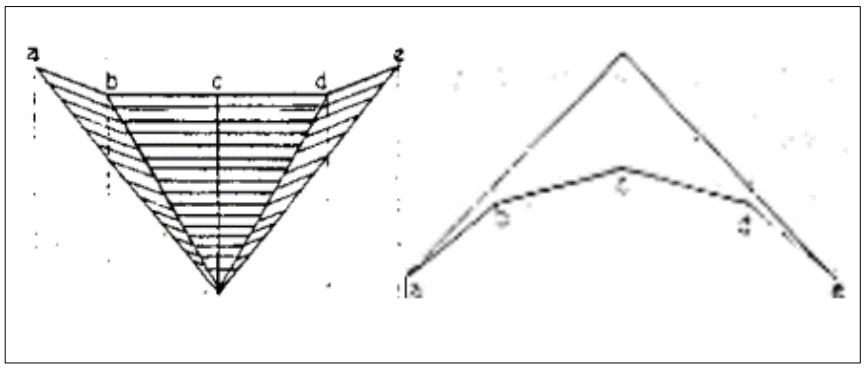
Pandantif (Küresel Üçgen): Kubbenin örtüsünü taşıyan ana kemer ile kubbe kasnağı arasındaki hacmi kapatan küresel üçgenlere pandantif denilmektedir. İki şekilde yapımına rastlamak mümkündür. Birinci durumda kubbenin çapı ile aynı çaplı küresel üçgen, ikinci durumda ise kubbenin örttüğü karenin dışına çizilen daire çapında küresel

üçgen şeklinde olabilmektedir. Birinci durumda pandantif ile kubbe sürekli bir yüzey oluşturarak bir bütün olarak görülmektedir. İkinci durumda ise pandantif üst örtüden ayrılarak alt yapının uzantısı olarak görülmektedir (Şekil 2.19). Kâgir yapılarda genel biçim olarak ikinci tarz kullanılmıştır (Çamlıbel, 1998).



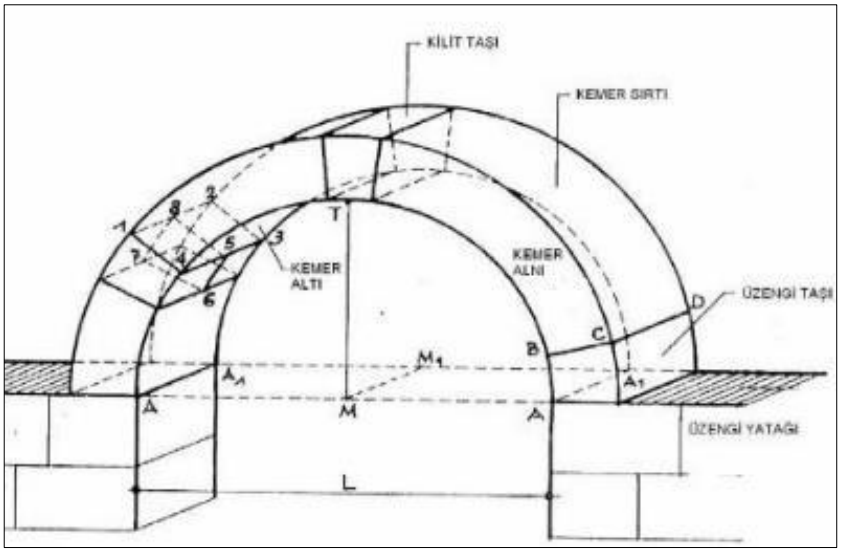
Şekil 2.19. Pandantif (Çamlıbel, 1998)

Türk Üçgeni: Duvar ile kubbe arasındaki geçişi sağlayan ve üçgenlerden meydana gelmiş bir geçit öğesidir (Çamlıbel, 1998), (Şekil 2.20) (Şekil 2.21)



Şekil 2.20. Türk üçgeni (Çamlıbel, 1998)

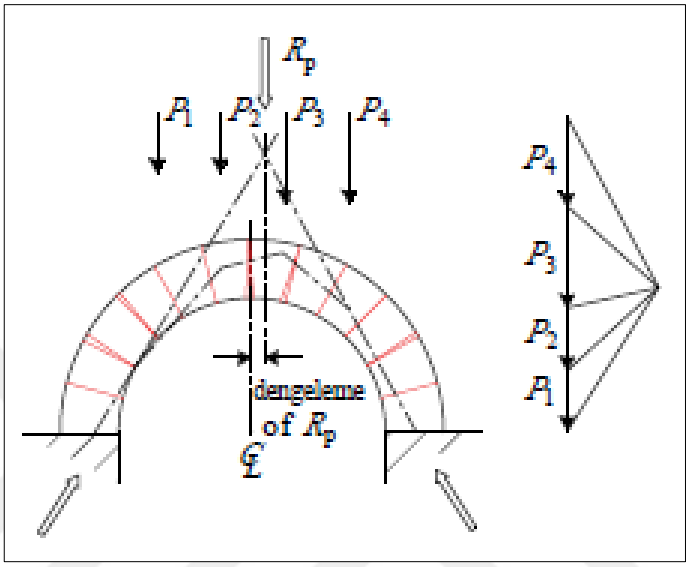
Kemerler: Kemerler, açıklık geçmek için kullanılan düşey eğrilikli kiriş elemanlardır. Geleneksel malzeme olan ve basınç dayanımı yüksek olan taş ya da tuğla ile inşa edilmişlerdir. Taş kemerler, moloz, kaba yonu, ince yonu veya kesme taştan yapılmışlardır (Ulkay, 1978). Kemerler, çekme gerilmeleri oluşturmayacak şekilde düşey ve yatay yükleri eksenleri içinde kendi ağırlığının bileşkesi ile aşağı doğru yönlendirerek basınç gerilmeleri oluşturacak şekilde tasarlanmışlardır. Kemerde, üzengi, kemer ve kilit taşları olmak üzere üç ayrı öğe bulunmaktadır (Şekil 2.21). Kemerin her iki başlangıcında bulunan taşlara üzengi taşı, üzengi taşları arasında bulunan taşlara kemer taşı, kemerin düşey ekseninde bulunan ve üzengi ile kendi arasında kalan kemer taşlarını sıkıştırarak kilitleyen taşa da kilit taşı adı verilmektedir (Bayülke, 1995).



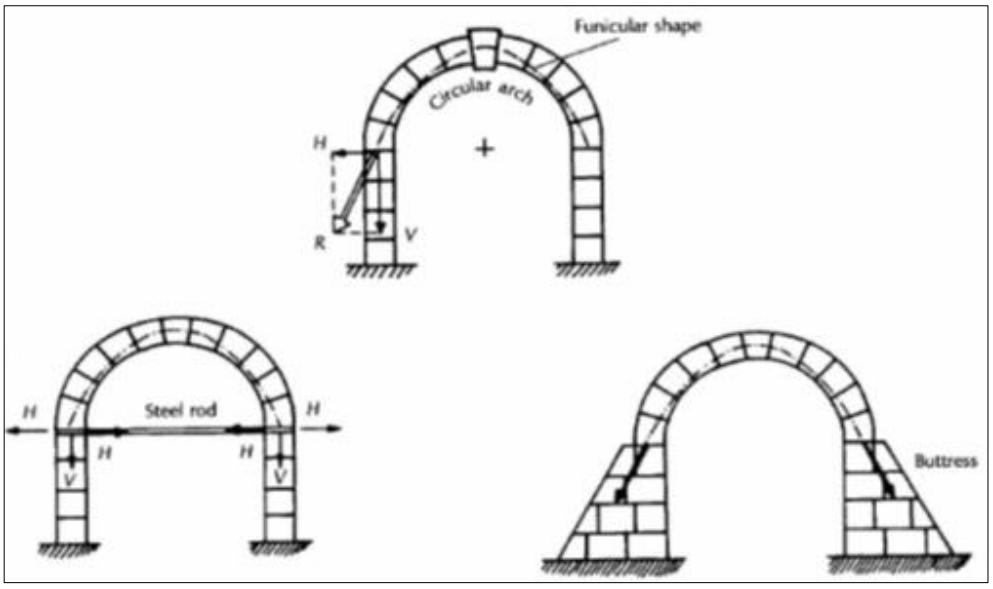
Şekil 2.21. Kemer öğeleri (Bayülke, 1995)

Kâgir yapılarda kemerlerin asıl görevi, üst kubbe örtüsünü taşıyarak, kubbeden gelen yükleri taşıyıcı duvarlara veya ayaklara güvenle aktarmaktır (Şekil 2.22).

Kemerlerin üzengi bölgelerinde yatay kuvvetler oluştuğundan bu bölgelerde stabilite sorunları meydana gelmektedir. Bu nedenle kâgir kemerlerde oluşan yatay kuvvetlerin karşılanması amacı ile ahşap veya metal gergi çubukları kullanılmıştır. Gergi çubuğunun kullanılamadığı durumlarda ise kemer ayakları ayaklar uzatılarak eksenleri doğrultusunda payandalarla desteklenmiştir (Ünay, 2002), (Şekil 2.23).

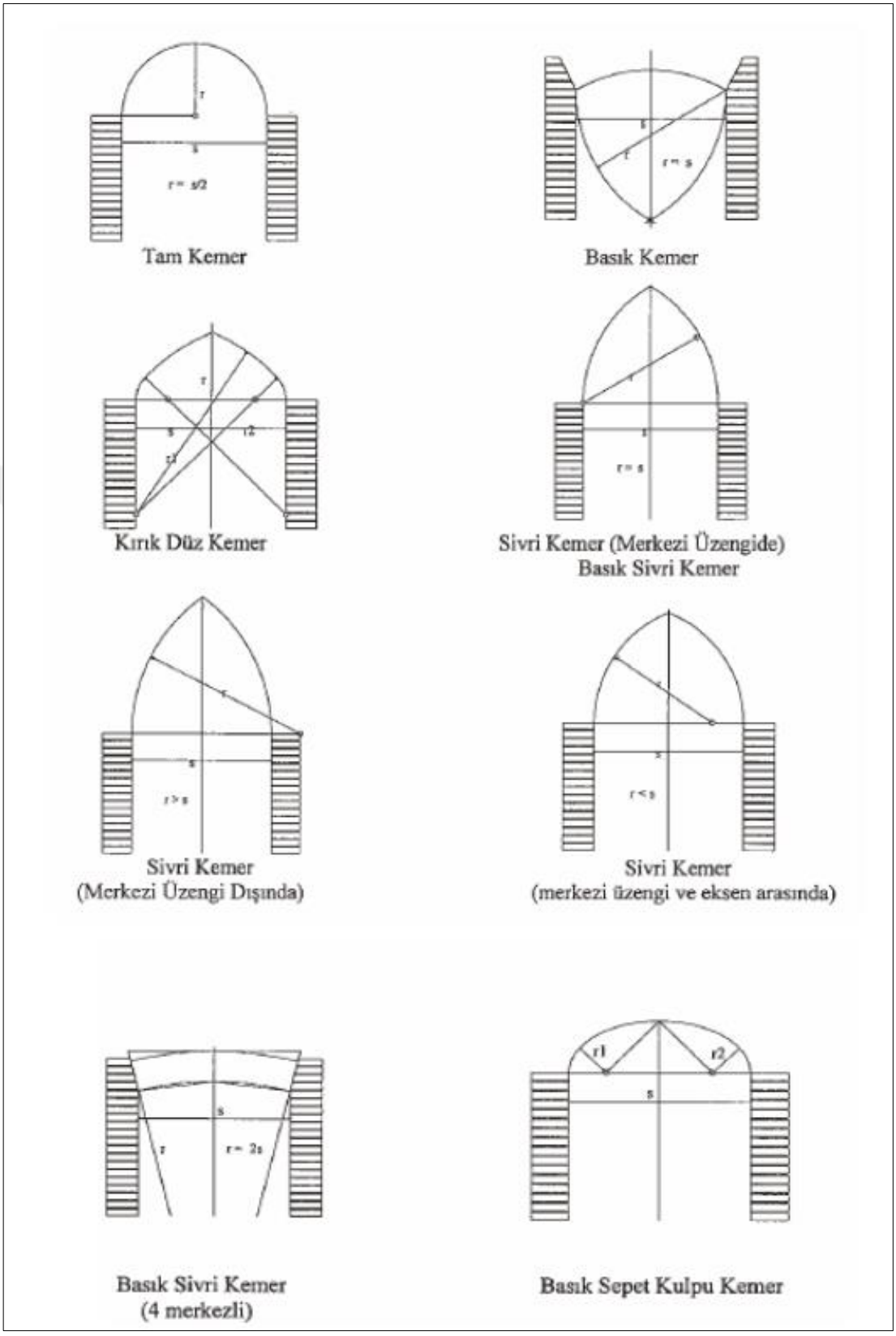


Şekil 2.22. Kemer yük aktarım formu (Ünay, 2002)



Şekil 2.23. Kemer üzengi seviyesindeki itki durumu (Ünay, 2002)

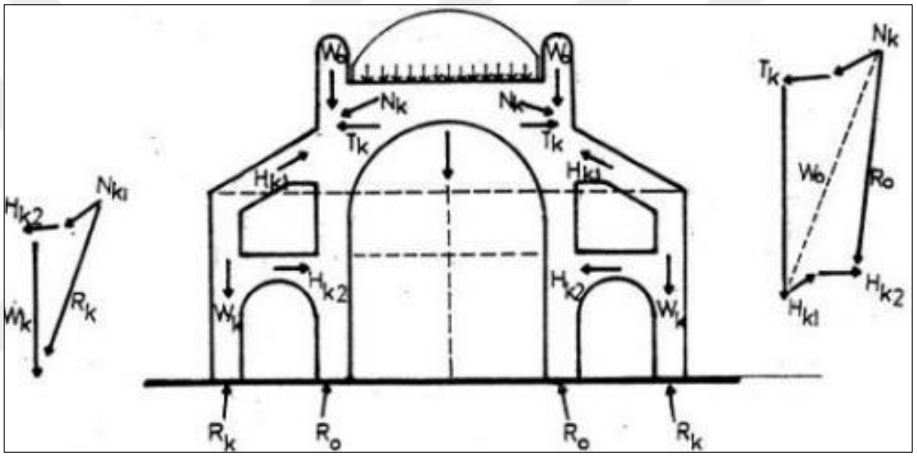
Kâgir yapılarda kullanılan çeşitli kemer formları Şekil 2.24'te gösterilmektedir.



Şekil 2.24. Kemer formları (Mahrebel, 2006)

2.3.3. Destek Elemanları

Yığma taşıyıcı sisteme sahip tarihi yapılar geleneksel malzemeler ile inşaa edildiklerinden düşey yükler altında oluşan basınç gerilmelerini emniyetle taşıyabilirler. Ancak yatay kuvvetler sonucunda oluşan çekme kuvvetlerine karşı oldukça zayıf olduklarından bu tür yapılarda çekme gerilmesinin oluşması istenilmektedir. Bu nedenle kubbe ve tonoz üst örtüsünden dolayı oluşan yatay kuvvetleri kendi ağırlık bileşenleri ile düzlem içinde kalmasını sağlayacak destek elemanları kullanılmıştır. Bunlar payanda ve ağırlık kuleleridir. Kubbe ve Tonoz mesnet itkilerinden ortaya çıkan yatay kuvvetleri ağırlıklarının bileşkesiyle düşey eksene yönlendirerek etkilerini azaltmada kullanılan masif yapı elemanlardır. (Şekil 2.25), (Şekil 2.26)



Şekil 2.25. Payanda ve ağırlık kule sistemi tesir çizgileri (Çamlıbel, 1998)

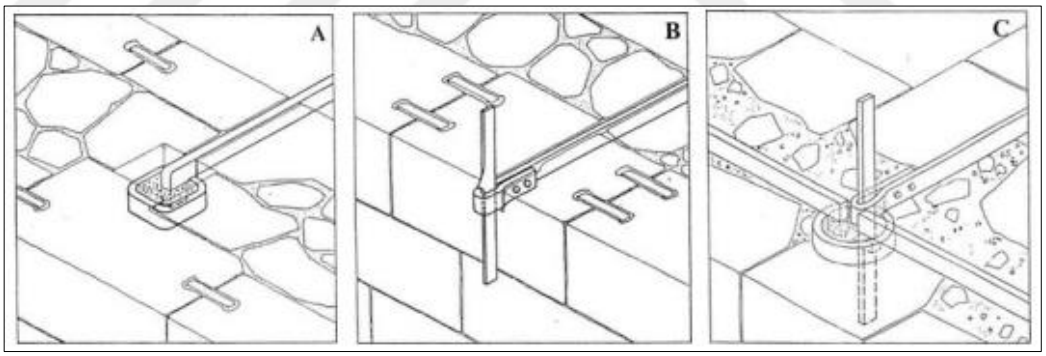


Şekil 2.26. Payanda ve ağırlık kule sistemi (Selimiye Camii)

2.3.4. Taşıyıcı Elemanlar

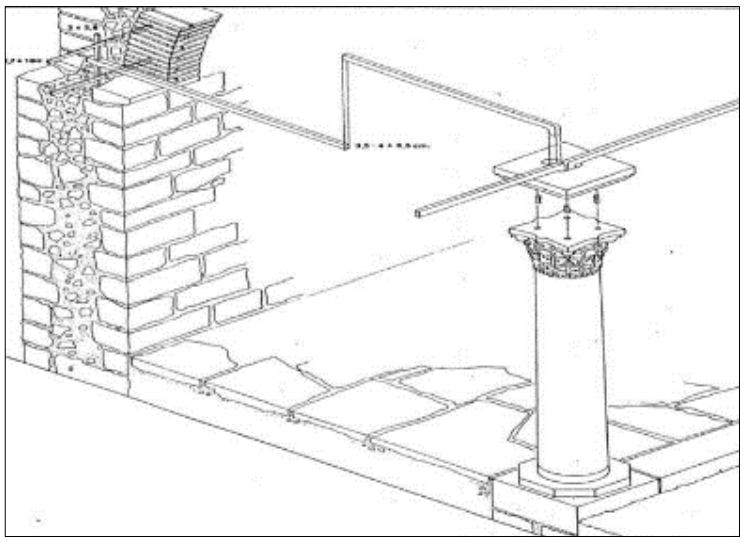
Bu elemanlar üst örtüden gelen yükleri güvenle zemine aktaran yatay ve düşey yapı elemanlarıdır.

Duvarlar: Duvarlar, kâgir yapılarda mekânın sınırlarını oluşturarak kemer, tonoz ve kubbe gibi üst yapı formunu tamamlayan düşey taşıyıcı elemanlardır. Duvarlar üst yapıdan gelen yükleri zemine aktararak yapının stabilitesini sağlarlar. Kâgir yapılarda taşıyıcı duvarlar tuğla, kesme taş, kaba yonu taş, moloz taş veya almaşık malzeme ile yapılmışlardır. Kâgir elemanlar arasında bağlantıyı sağlamak içi genel olarak horasan harcı kullanılmıştır. Kâgir yapılarda duvar kalınlıkları kendi ağırlıkları ve düzlem dışı hareketleri taşıyacak şekilde inşa edildiklerinden uzun süre ayakta kalabilmişlerdir. Duvar kesitleri genel olarak kendi ağırlıkları ve düşey yükler altında oluşacak gerilmeleri güvenle taşıyacak şekilde tasarlanmışlardır. Tarihi kâgir duvarlarda oluşacak çekme kuvvetlerini karşılamak ve yatay ötelenmeyi azaltmak için genellikle duvar elemanları arasına kenetler veya değişik seviyelerde oluşturulan ahşap veya dövme demir hatıllar yerleştirilmiştir (Şekil 2.27). Ayrıca duvarlar, mesnetlik yaptıkları üst örtüden gelen eğik kuvvetleri karşılayabilmeleri için payandalarla desteklenebilirler (Sesigür vd., 2007).



Şekil 2.27. Duvar bağlantıları (Mahrebel, 2006)

Sütunlar ve Ayaklar: Sütunlar, üst örtü yüklerinin tek noktaya iletilmesini sağlayan tek veya çok parçalı elemanlara ile oluşturulmuş düşey yapı elemanlarıdır. Çok parçalı bloklar yardımı ile oluşturulduklarında, parçalar arasında kaymayı önleyerek bağlantı sağlanması amacı ile metal veya ağaç kenetler kullanılmıştır. Sütunlar kare, çokgen ve daire kesitli formlarda olabilirler. Sütunlarda genel olarak üstten gelen yükün toplanması için sütun başlığı, taşınan yükün zemine aktarılması içinde sütun tabanı bulunur (Şekil 2.28).



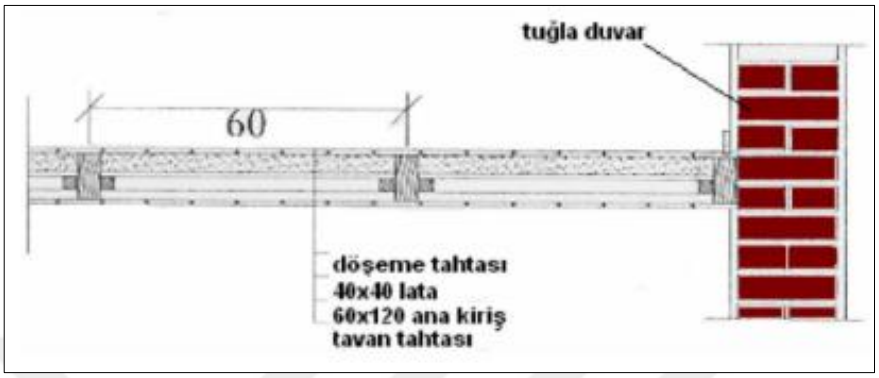
Şekil 2.28. Sütun başında mesnetlenme sistemi (Mahrebel, 2006)

Ayaklar, sütün kesitlerinin yetersiz olduğu ve süreklik sorunu bulunan mekânlarda duvar gibi örülerek oluşturulan düşey taşıyıcılardır. Mekânın üst örtüsünün formuna, kullanım amacına ve yük taşıma biçimine göre çeşitli şekillerde yapılmışlardır (Çamlıbel, 1998). Sütunlarda veya ayaklar ana taşıyıcılar olduğundan bunların herhangi birinde meydana gelecek hasar yapının stabilitesini tamamen bozarak yıkılmasına neden olabilir. Bu nedenle geçmişten edinilen tecrübeler ışığında bu tür elemanlarda kesitlerin büyük seçildiği görülmektedir (Ünay, 2002).

Döşemeler: Döşemeler, yapıda yaşam ve kullanım alanları oluşturan taşıyıcı yapı elemanıdır. Döşemeler sabit ve kullanıma bağlı oluşan yükleri öncelikle kendi düzleminde taşıyarak kendine mesnet görevi yapan diğer taşıyıcı elemanlara aktarırlar Tarihi yapılarının döşemelerinde genellikle ahşap, çelik ve kâgir malzemeler kullanılmıştır. Döşemelerin düşey yükler altında yapının genel davranışına etkisi olmaz, ancak deprem gibi yatay kuvvetlerin oluşması durumunda diyafram davranışı göstererek yatay yükün aktarılmasına katkı sağlarlalar. Bu nedenle yapılarda döşemenin bulunmaması veya döşemede belli oranlarda süreksizliklerin olması durumunda yapıda süreksizlik meydana gelir ve yapının yatay yük aktarımı olumsuz etkilenir (Ünay, 2002).

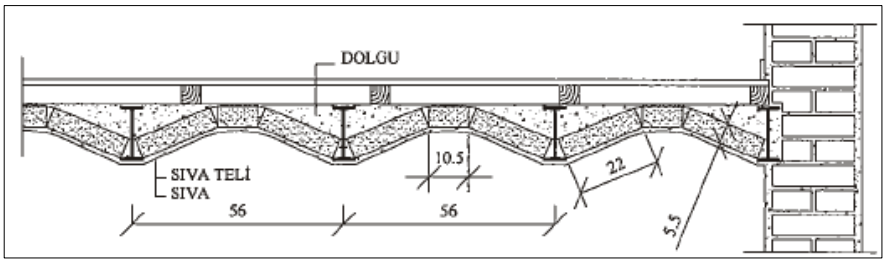
Ahşap Döşemeler: Ahşap döşemeler, ana malzemesi ahşap olup kısa yönde oluşturulan ana kirişlemeler üzerine ahşap döşeme tahtası ile kaplaması yapılan taşıyıcı sistemlerdir (Şekil 2.29). Kiriş kesitleri açıklığa ve servis yüklerine bağlı olarak seçilirler. Kirişleme için döşemenin kısa yönünde, 0.60 m – 0.80 m aralıklarla yerleştirilmeleri gerekmektedir. Açıklık büyük ise kirişleri tali kirişler oluşturularak döşeme sisteminde

sehim ve salınım olunması önlenir. Ahşap döşemeler alt yüzeyden sıva teli yardımı ile sıvanabilirler. Ahşap döşemelere temel seviyesinde nem kaynaklı oluşacak hasarları önlemek için duvarlarda su basman seviyesinde yer yer karşılıklı havalandırma boşlukları bırakılması gerekmektedir (Kanca, 2004; Ulkay, 1978).

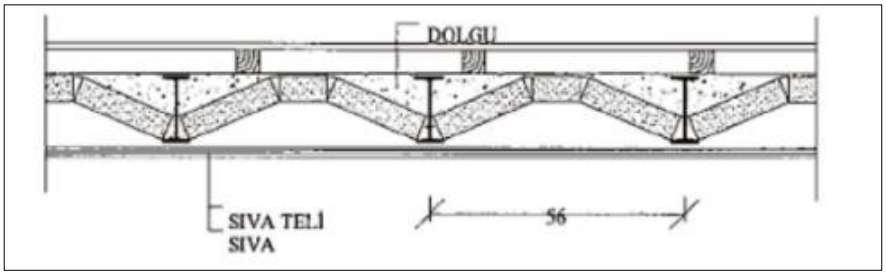


Şekil 2.29. Ahşap döşeme

Adi Volta Döşeme: Döşemenin kısa doğrultusunda, duvar kenarından itibaren 0.50–0.56m. Aralıklarla yerleştiren NPI profillerle oluşturulan putrellerin içinde üç tuğladan tonoz şeklinde yapılan döşeme sistemleridir (Şekil 2.30). Tuğlalar birbirlerine harç ile bağlanır. NPI profiller üstü başlıklarına kadar hafif malzemeler ile tesviye edilerek kaplama malzemesi ile kapatılırlar (Kanca, 2004; Ulkay, 1978). Döşemenin alt yüzeyinde düz bir tavan istenilmesi durumunda sıva teli yardımı ile sıvanabilirler (Şekil 2.31).

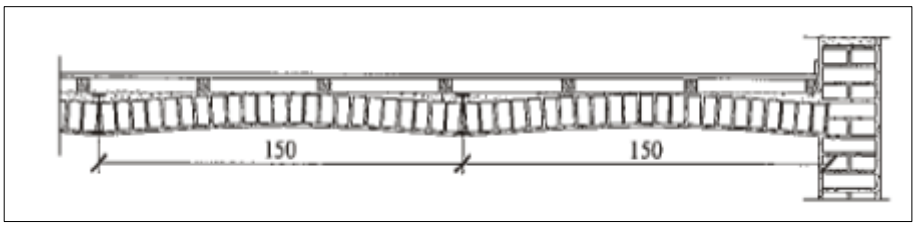


Şekil 2.30. Adi Volta döşeme (Kanca, 2004)



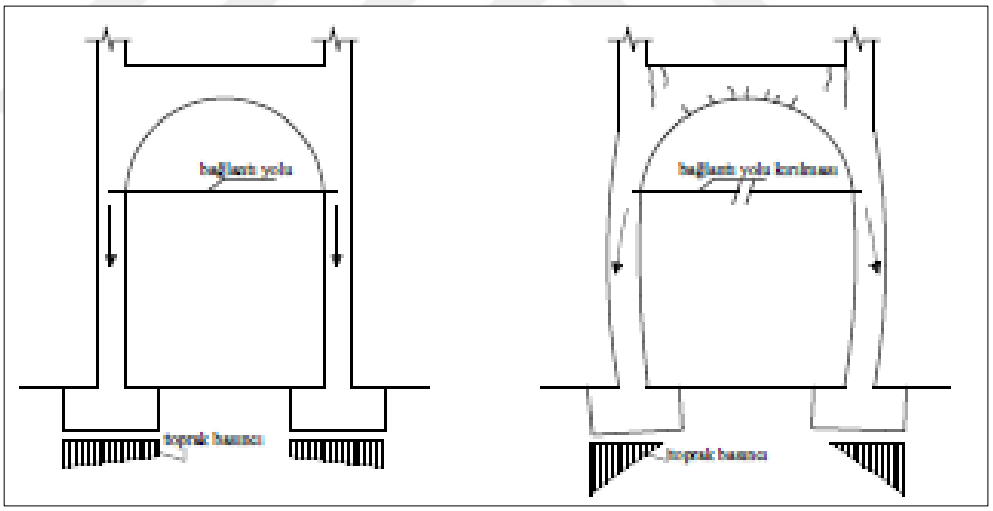
Şekil 2.31. Düz tavanlı volta döşeme (Kanca, 2004)

Volta Döşeme: 1.50 m. aralıklarla oluşturulan NPI profilli taşıyıcı sistemin arasında tuğla malzeme ile oluşturulan tonoz formlu döşeme sistemidir (Şekil 2.32). Tuğlalar birbirlerine kancalar yardımı bağlanır. NPI profiller üstü başlıklarına kadar hafif malzemeler ile tesviye edilerek kaplama malzemesi ile kapatılırlar (Kanca, 2004; Ulkay, 1978).



Şekil 2.32. Volta döşeme (Kanca, 2004)

Gergiler: Gergiler üst yapı yüklerinin kemerlerde oluşturduğu yatay kuvvetlerin oluşturduğu itki kuvvetlerinin karşılanması amacıyla kullanılmaktadır (Şekil 2.33). Kâgir yapılarda ahşap veya dövme demir gergiler sıkça kullanılmışlardır. Genel olarak kemerlerin üzengi seviyesinden tek veya çift olarak bulunurlar (Sesigür vd., 2007).



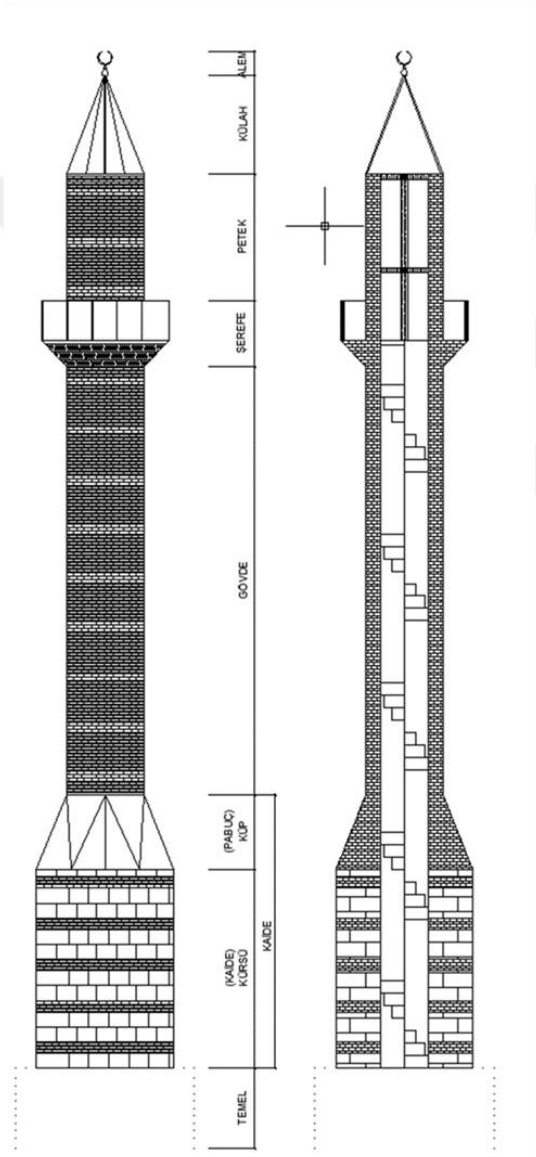
Şekil 2.33. Kemer, sütün gergi sistemi (Sesigür vd., 2007)

Temeller: Temeller, yapının dış ve iç kuvvetlerden dolayı oluşan yüklerini sağlam zemine aktaran taşıyıcı elemanlardır. Tarihi yapıların temel yapım teknikleri günümüz teknolojisine göre çok basit kalmakla beraber sağlam zeminlerde yüzeysel temeller, sağlam olmayan zeminlerde ise derin temeller yapılmıştır. Dolgu veya yeraltı su seviyesi yüksek olan zeminlerde zemine çakılan kazıkların oluşturduğu ızgara sistem üzerine oturan temeler yapılmıştır. Ahşap kazıklarda sürekli su içinde bulunmalarından

ve hava ile temas etmediklerinden dolayı herhangi bir bozulma ve çürüme olayı oluşmamıştır (Çamlıbel, 1983).

2.3.5. Minareler

Minareler genellikle kesme taş veya tuğla ile imal edilmiş olup çok az sayıda ahşap minare de yapılmıştır. Klasik Minare bölümleri Lomlu (1996) ve Uluengin vd., (2001) tarafından incelenmiştir. Minare bölümleri Şekil 2.34'de verilmektedir.



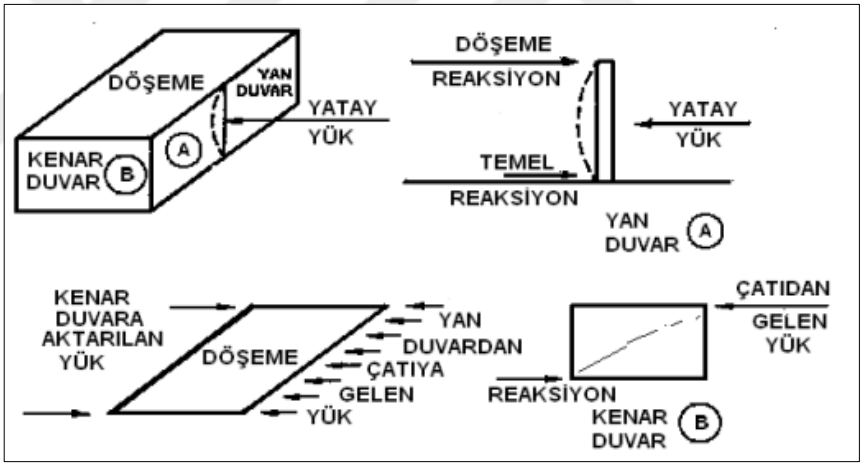
Alem	Hilal biçimindeki elemanı taşıyan simgesel bölüm
Külah	Alem'in üzerinde durduğu, genelde metal olan koni biçimindeki kısım.
Petek	Şerefeye çıkış kapısını içerir. Bu bölümde merdivenler kapıdan sonra 4–5 basamak devam eder.
Şerefe	Müezzinleri ezan okuduğu kısımdır.
Gövde	Dış duvar ve içte helezonik merdivenden oluşur.
Küp	Üsteki yuvarlak kısımın alttaki karesel kısıma geçişini sağlayan bölümdür.
Kürsü	Üsteki yuvarlak kısımın alttaki karesel kısıma geçişini sağlayan bölümdür.
Temel	Minare yüklerini zemine aktaran bölüm

Şekil 2.34. Klasik minare bölümleri (Lomlu, 1996)

2.4. Kâgir Yapıların Davranışı

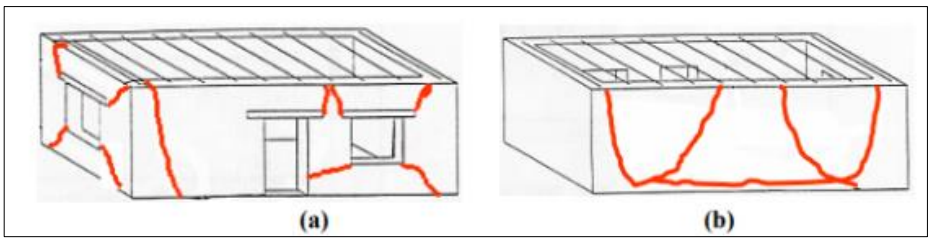
Kâgir yapıların düşey yükler altında davranışı hakkında genel bir öngörü oluşmasına rağmen deprem gibi yatay yükler altındaki davranışları tam olarak belirlenememiştir. Yığma yapılar kullanılan malzeme özelliklerine bağlı olarak gevrek davranış göstermektedir. Yığma yapılarda düşey yükler basınç kuvvetleri oluşturarak döşemelerden taşıyıcı duvar, kemer veya ayaklara, oradan da temele aktarılmaktadır.

Ancak deprem veya rüzgâr gibi yatay kuvvetlerin etkisinde, rijit diyafram etkisi gösteren döşemeler etkiyen yatay yükleri düzlemleri doğrultusunda kendine mesnet oluşturan taşıyıcı elemanlara aktarılmaktadır (Şekil 2.35). Böylece mesnet bölgelerinde yatay kuvvetlerden dolayı oluşan kesme ve eğilme kuvvetlerine bağlı olarak kritik bölgelerden başlayarak kesme çatlakları oluşmaktadır. Kuvvetin büyüklüğüne bağlı olarak yapı satabilesini kaybedebilmektedir. Yığma yapılarda kapı, pencere boşlukları ve duvar kesişim yerleri en kritik bölgelerdir.



Şekil 2.35. Yığma yapı yatay yük taşıma modeli (Bayülke, 2011)

Duvarlarda çatlaklar, gerilmenin yoğun olduğu bölgelerde oluşmaktadır. Duvar çatlakları yükün duvar düzlemine paralel veya duvar düzlemine dik yönde etkimesine göre şekil değişmektedir. Duvar düzlemine paralel yönde yük etkimesi durumunda oluşan kayma kuvvetleri nedeniyle duvarlarda alt ve üst bölgelerde yatay çatlaklar kapı ve pencere kenarlarında ise diyagonal çatlaklar oluşmaktadır (Şekil 2.36.a). Duvar düzlemine dik yönde yük etkimesi durumunda duvar alt bölgesinde yatay çatlaklar ile duvar birleşim bölgelerinde düşey veya diyagonal çatlaklar oluşmaktadır (Şekil 2.36.b).



Şekil 2.36. Yığma yapı hasar biçimleri (Mahrebel, 2006)

Duvar çatlakları genellikle; basınç ve kayma gerilmelerinin yoğun olduğu bölgelerde birbirine paralel çatlaklar şeklinde, çekme gerilmelerinin yoğun olduğu bölgelerde ise tekil çatlaklar şeklinde kendini göstermektedir (Vatan, 2010).

BÖLÜM 3.

KAGİR YAPILARDA BOZULMA VE ONARIM BOYUTLARI

Kâgir yapılarda kullanılan geleneksel yapı malzemelerinin davranışı birbirinden farklılık gösterdiğinden, kâgir yapı davranışı hakkında genel bir sonuca varmak oldukça zordur. Kâgir yapının davranışında, yapıyı oluşturan tüm elemanların boyutları, kullanılan malzemelerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri, yapım tekniği ve elemanların birleşim detayları oldukça önemlidir.

Kâgir malzemelerin basınç dayanımları oldukça yüksek olmasına rağmen, çekme dayanımları oldukça düşüktür. Deprem kuvvetleri veya zemin oturmasından dolayı meydana gelen çekme gerilmeleri sonucunda, kâgir malzemelerde hasarlara meydana gelmektedir. Ayrıca, sıcaklık değişimi, nem, yağış, donma-çözülme, çevresel etkiler, amaç dışı ve bilinçsiz kullanımlar, bilgisiz ve gelişigüzel onarımlar sonucunda kâgir yapılarda hasarlar ve bozulmalar meydana gelmektedir (Mahrebel, 2006).

3.1. Kâgir Yapılarda Bozulma ve Hasar Etkenleri

Bozulma veya çürüme; fiziksel ve kimyasal etkilerden kaynaklı olarak yapı elemanlarında genelde dış yüzeyden başlayarak içe doğru ilerleyen, malzeme dayanımının azalması ve yüzey kayıplarıdır. Hasar ise bozulma ve çürümeye bağlı olarak veya dış etkilerden kaynaklı yapı elemanlarının ve malzemenin kısmen veya tamamen taşıma kapasitesini kaybetmesidir. Kâgir yapılarda oluşan hasarlar kullanılan malzeme ve bağlayıcının özellikleri ile yapı elemanına etkiyen kuvvetin etkime şekline göre farklılık göstermektedir (Croci, 1998).

Kâgir yapılarda bozulmaya ve hasara neden olan etkenler çoğu zaman aynı kaynaklıdır. Ancak bu etkenlerden bazıları sadece bozulmaya bazıları da sadece hasara neden olabilmektedir. Hasarlar genellikle yapım hatası, bakımsızlık ve yanlış müdahale nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Çoğu durumda oluşan tek bir hasarın yapıya zarar veremeyeceği ancak diğer bozulma ve hasarlarla birlikte düşünüldüğünde zararlı olabileceği göz ardı edilmemelidir. Hasar oluşumları birbirine bağlı olarak gelişmektedir. Bu nedenle kâgir yapılarda oluşan hasar ve bozulmalar incelenirken yapı bütünde ele alınarak oluşan hasar ve bozulmaların birbirleri ile olan ilişkilerini ayrıntılı olarak belirlenmesi gerekmektedir (Vatan, 2010).

Kâgir yapı malzemelerde oluşan bozulmalar genellikle yapı birim elemanının atmosferik koşullara açık olan yüzeyinden başlamaktadır. Dış etkiler sonucunda malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri dış yüzeyden itibaren içeriye doğru değişir, bunun sonucunda malzeme yüzeyinde; kırıntılanma, kabuklanma, kavlanma biçiminde yüzey ve malzeme kayıpları meydana gelir. Kâgir malzemelerde bünyedeki suyun artışına bağlı olarak malzemenin fiziko-mekanik özellikleri değişerek ayrışma hızlanır (Ulusoy, 1993).

Kâgir yapılarda oluşan hasarların nedenleri araştırılırken; taşıyıcı elemanları oluşturan malzeme türü ve özellikleri dikkate alınarak, çevresel etkilerin yapıda oluşturduğu olumsuz etkiler birlikte değerlendirilmelidir. Kâgir yapılarda bazı durumlarda farklı nedenlerle oluşmuş ancak benzer görünümlü hasarlarla karşılaşıldığından tespit edilen hasarlar ve nedenleri doğru bir şekilde belirlenmelidir (Akman, 2000).

Kâgir yapılarda hasar tespiti yapılırken öncelikle hasara neden olan bozulma nedenlerinin ve düzeylerinin ayrıntılı olarak araştırılması gerekmektedir. Yapılarda meydana gelen bozulma ve hasar seviyeleri malzemenin fiziksel özelliklerine ve çevresel koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu nedenle oluşan bozulma ve hasarlar bazı durumlarda malzeme yüzeyinde yapılacak basit bir inceleme ile tespit edilebileceği gibi ihtiyaca bağlı olarak daha ayrıntılı test ve araştırmalar da gerektirebilir (Akman, 2000).

Kâgir yapılarda oluşan bozulma ve hasarlar nedenleri "çevresel kaynaklı etkenler" ve "insan kaynaklı etkenler" olarak iki ana başlıkta sınıflandırılmıştır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Hasar ve bozulma nedenleri (Ahunbay, 2018; Vatan, 2010)

Çevresel kaynaklı etkenler	**İnsan kaynaklı etkenler**
Yapının konumu	Çevre kirliliği
Zemin türü ve zemin yapısı	Tasarım hataları
Yeraltı su seviyesi profili	Hatalı malzeme kullanımı
Su ve nem etkileri	Kötü işçilik ve detay kullanımı
Isı etkisi	Bakımsızlık, ihmal
Hava kirliliği	Kötü kullanım ve onarımlar
Biyolojik etkiler	Vandalizm
Doğal afetler	Trafik
	Yangınlar
	Savaşlar
	Turizm
	Yeni yapılaşma etkisi

3.1.1. Çevresel Kaynaklı Etkenler

Yapılar, bulundukları ortama bağlı olarak sürekli değişkenlik gösteren çevresel etkilere maruz kalmaktadırlar. Bunlar için gerekli azaltıcı ve koruyucu önlemler alınmadığında, yapılarda bozulmalar ve hasarlar meydana gelmektedir. Bunların yapılara etki biçimi, hızları ve nedenleri araştırılarak, ancak olumsuz etkileri azaltılabilmektedir.

Yapının konumu: Yapının bulunduğu yere ve iklim koşullarına bağlı olarak nem, sel, rüzgâr, heyelan ve deprem gibi doğa olaylarından yapı elemanları zarar görebilir.

Zemin türü ve zemin yapısı: Yapının oturduğu zeminin özellikleri, temelin biçimi, temel zemin ilişkisi, yeraltı su seviyesi ve değişimi gibi nedenlerle yapıda zemin kaynaklı hasarlar oluşabilmektedir. Yapının temelinde, zeminin taşıma kapasitesindeki değişimlere bağlı olarak oturmalar ve dönmelere meydana gelebilir buna bağlı olarak ta üst yapıda çatlaklar oluşabilir.

Yeraltı su seviyesi profili: Yeraltı su seviyendeki mevsimsel değişikliklere bağlı olarak zemin taşıma kapasitesinde düşüş meydana geldiğinden, temelde oturma ve dönmeler oluşmaktadır. Tarihi kâgir yapıların yüzyıllarca ayakta kalmış oldukları göz önüne alındığında genel olarak bu tür hasarların oluşması beklenmmektedir. Ancak yapının drenaj sisteminin bozulması veya yapının yakınlarında su kuyusu, yeni yapı temel çukuru açılması gibi yeraltı su profilinde değişiklikler olması durumunda söz konusu hasarların oluşması beklenebilmektedir (Arun, 2008).

Su ve Nem Etkisi: Yağmur suyu, yeraltı suları veya havadaki nem biçiminde yapıya etkiyen su; malzemelerin bozulmasını başlatır veya var olan bozulma sürecini hızlandırır. Malzeme içine ve yüzeyine nüfuz eden su donam ve çözülme etkisi ile çatlak oluşumu, yüzeyde çiçeklenme ve tuzlanamaya neden olur (Ahunbay, 2017).

Isı Etkisi: Mevsimsel ısı değişimleri sonucunda kâgir malzemelerde genleşme ve büzülme meydana geldiğinden, malzemelerde çatlamalar veya malzeme ve harç kayıpları oluşmaktadır (Bernad, 2003). Kâgir yapılarda malzeme bünyesinde bulunan suyun, ısı değişimi nedeniyle donma çözülmeye uğrayarak malzemenin çatlamasına, ortam ısısının artması sonucunda da çözülen su ile birlikte tuzların açığa çıkması sonucu ile de derz boşalmalarına neden olmakta ve bloklar arasında kayma hasarları meydana gelmektedir. Bu nedenle kâgir yapıların bozulma ve hasar nedenleri incelenirken yapı genel olarak ele alınmalı, oluşan hasarlar ve nedenleri dikkatlice incelemelidir. Aynı hasara neden olan farklı bozulma ve hasar nedenleri olacağı göz ardı edilmemelidir (Richardson, 2002).

Hava Kirliliği: Kentlerin sanayileşmesi sonucunda artan çevre ve hava kirliliğine bağlı olarak oluşan havadaki zararlı gazlar, yağmur suyu ile çözünerek ve karbonatlarla etkileşerek malzemelerin kimyasal yapılarının bozulmalara sebep olmaktadır. (Richardson, 2002). Kâgir yapılarda kullanılan kenetler, gergiler, sütun çemberleri vb metal elemanların havadaki buhar ve nem ile teması sonucunda oksitlenerek paslanıp malzeme yapıları bozulur. Bünyeye nüfuz eden su ve nem etkisi ile metal elemanlarda zamanla paslanarak kesit büyümesi oluşur bunun sonucunda da kâgir malzemede çatlaklar meydana gelerek yapı elemanlarının zamanla taşıyıcı özelliklerini kaybetmesine neden olurlar (Richardson, 2002).

Biyolojik Etkiler: Kâgir malzemelerde karşılaşılan biyolojik etkenli bozulmaların nedeni ahşap malzemelerin bünyesinde barınan böcek, bitki vb canlı türleridir. Ayrıca ahşap elemanlarda nem etkisi ile çeşitli zararlı mantar ve yosun türleri üreyebilmektedir. Bu canlılar yapıda kullanılan ahşap elemanların içyapısını bozarak taşıyıcılığını yitirmesine ve yapıda hasarlar oluşmasına neden olmaktadır. Rüzgâr veya kuşlar tarafından taşınan tohumlar ve polenler yapıda boşalan derzlere yerleşerek büyümekte ve kökleriyle yapı elemanlarında hasarlara neden olmaktadırlar. Yapı yüzeylerinde uygun nem bulunması durumunda mantar oluşumları meydana gelerek malzeme yapısında hasara neden olurken, yosunlar kökleriyle salgıladıkları asit nedeniyle

malzeme yüzeyinde bozulmalara yol açarlar. Buna karşın asit üretmeyen ve kimyasal tepkimelere yol açmayan algler ise yapı bileşeninin yüzeyini filim gibi kaplayarak doğal koruyucu tabaka oluşturarak dış etkilere karşı aşındırıcı etkileri azaltırlar (Ulusoy, 1993).

Doğal afetler: Deprem, heyelan ve sel gibi ne zaman olacağı önceden bilinmeyen doğal afetler karşısında tüm yapılar gibi tarihi anıtsal yapılarda zarar görmektedir. Özellikle deprem etkisi sonucunda yapıların hasar görmesi en çok karşılaşılan durumdur. Deprem sırasında yer kabuğunda oluşan sismik dalgalar yeryüzünde bulunan yapıya ulaşarak yapıda dinamik kuvvetler meydana getirirler (Ünay, 2002). Bunun yanı sıra akarsu yakınlarında bulunan tarihi yapılarda seller etkili olmaktadır. Özellikle köprüler gibi yapılarda hızlı ve güçlü akıntılar nedeniyle köprü ayaklarında hasarlara oluşmaktadır. Ayrıca seller ve taşkınlar sonucunda yer altı su seviyelerinde mevsimsel değişiklikler meydana gelmekte buna bağlı olarak ta yapı temel sistemleri olumsuz şekilde etkilenmektedir (Ahunbay, 2017).

3.1.2. İnsan Kaynaklı Etkenler

Kâgir yapılarda çevre kirliliği, yangın, bakımsızlık, yanlış restorasyon, hatalı malzeme seçimi ve terk etme gibi insan kaynaklı hasarlar meydana gelmektedir. Ayrıca mülkiyet belirsizlikleri, onarım ve bakım maliyetleri ile yasal kısıtlamalar da hasar oluşumlarına neden olmaktadır.

Çevre Kirliliği: Günümüzde kent nüfuslarının artışı sonucunda insan kaynaklı çevresel kirleticiler oldukça artmıştır. Özellikle ısıtma sistemleri ve ulaşım kaynaklı oluşan zararlı gazlar, anıt eserler üzerinde kirli bir tabakanın oluşmasına, ayrıca kâgir eleman yüzeylerinin özelliklerini yitirerek erimelerine ve tabakalar halinde dökülmelerine neden olmaktadır.

Tasarım hataları: Yapının ilk tasarımında, taşıyıcı sistem seçimi ve boyutlandırma hataları sonucunda; yatay ve düşey yükleri karşılaması gereken kesitlerin yetersizliği sonucunda ortaya çıkan hasarlardır.

Hatalı malzeme kullanımı: Tarihi kâgir yapılar taş, tuğla ve ağaç gibi doğal kökenli malzemelerle oluşturulmuştur. Yapı strüktüründe kullanılan bu malzemelerin iyi nitelikte olmaması sonucunda yapılarda hasarlar meydana gelmektedir. Bu nedenle kullanılacak malzemelerde yabancı madde bulunmaması, taş malzemenin tabakalaşmasına uygun olarak işlenmesi ve yerleştirilmesi, tuğla malzemelerin iyi pişmiş

olması, ana malzemeleri birleştiren harcın niteliği ve kullanılan ahşabın özelliklerine bağlı olarak yapının dayanım özellikleri değişiklik göstermektedir.

Kötü işçilik ve detay kullanımı: Yapı elemanlarını oluşturan malzemelerin uygun bağlayıcı malzemeler ve yapım teknikleri ile yapılmaları yapının mukavemeti açısından önemlidir. İyi işçilik ve detay çözümleri yapının dayanımını ve kullanım ömrünü belirleyici özelliklerdir.

Bakımsızlık ve İhmal: Kâgir yapılar; mülkiyet sorunları, ekonomik nedenler ve yasal kısıtlamalar sonucunda bazen bakımsızlığa terk edilmektedir. Bunun sonucu olarak ta yapılarda ciddi bozulma ve hasarlar meydana gelmektedir.

Kötü kullanım ve onarımlar: Kâgir yapılarda bilinçsizce yapılacak her türlü ilave ve değişiklik ile yapı strüktürü olumsuz olarak etkilenmektedir.

Vandalizm: İnsanlar tarafından bilinçli olarak yapılan her türlü zarar.

Trafik: Tarihi kentler çağının ihtiyaçları ve imkânları doğrultusunda yapılanmıştır. Ancak günümüzdeki taşıt özellikleri ve ulaşım ihtiyaçları göz önüne alındığında, tarihi eserlere yakın bulunan yollarda araç trafiğine bağlı oluşan titreşimler ve yapı temellerine gelen ilave basınç yükleri sonucunda yapısal hasarlar oluşmaktadır (Ahunbay, 2017).

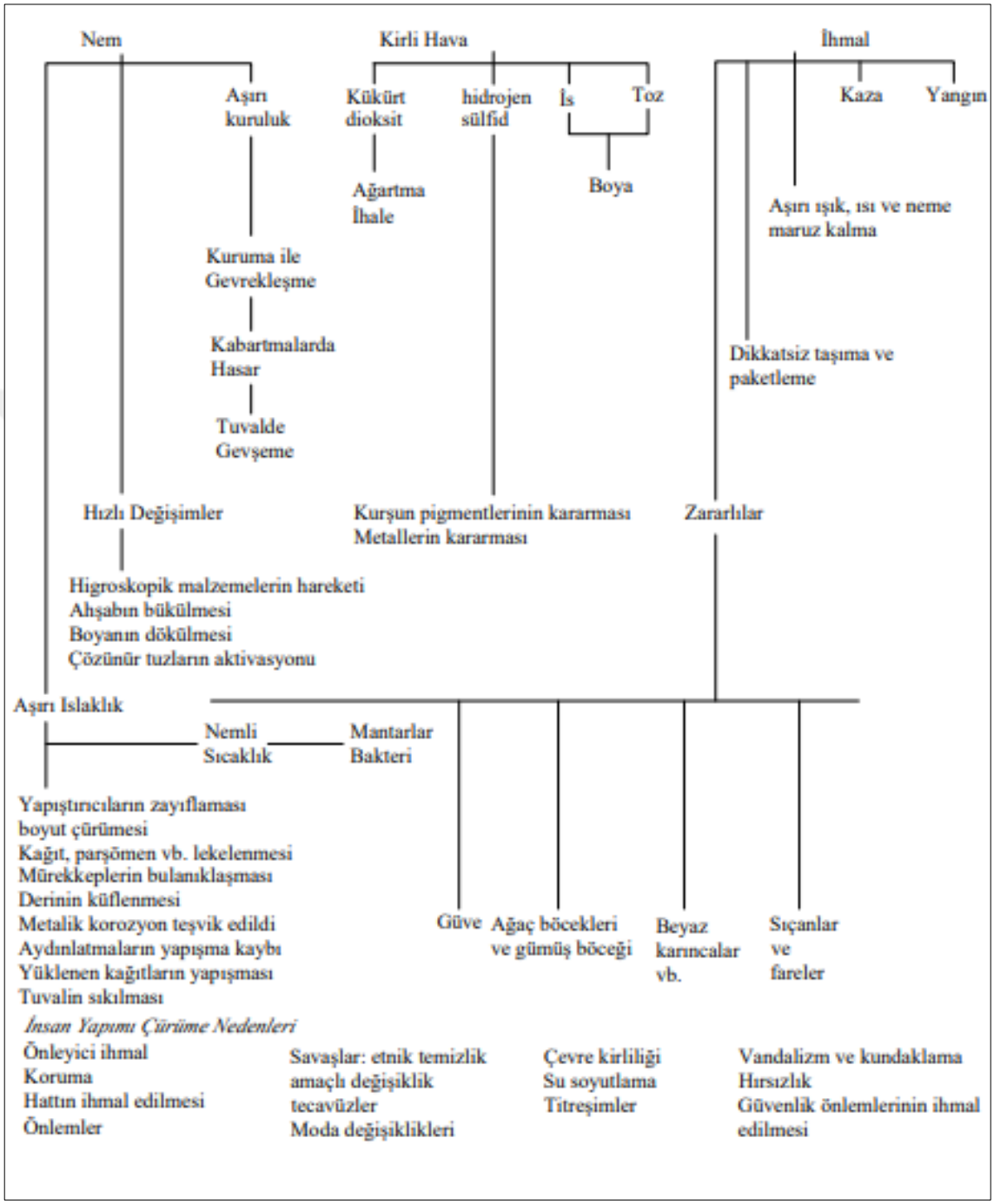
Yangınlar: Özellikle ahşap strüktürlü yapılarda, ihmal, dikkatsizlik ve kundaklama sonucu çıkan yangınlar nedeniyle yapılarını çoğu kez yaşanamaz, bazen de onarılamaz duruma gelmektedir.

Savaşlar: Savaşlar sonucunda tarihi yapıların kısmen veya tamamen yanması, yıkılması veya yok olması durumudur.

Turizm: Tarihi binalarda müşteri taleplerini karşılamak amacı ile yapılan ilaveler ve yoğun ziyaretçi topluluklarının oluşturduğu ilave yüklerin yapı strüktüründe meydana getirdiği ilave yüklere bağlı oluşan hasarlar.

Yeni Yapılaşma Etkisi: Kentlerin büyümesine bağlı olarak oluşan ihtiyaçların karşılanması amacı ile yapılan yapılaşmalar, tarihi eserlerin; siluetteki etkilerinin zayıflamasına ve tarihi çevre görsel bütünlüğünün kaybolmasına neden olmaktadır. Ayrıca tarihi eserlere yakın bölgelerde önlem almadan yapılan her türlü derin kazı, yapı temellerinin mesnetlenme düzeni bozduğundan hasarlara neden olmaktadır.

Tarihi yapılarda çevresel ve insan kaynaklı oluşan bozulma ve hasarlar özetlenerek Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Bozulma ve Hasar Oluşumları

3.2. Kâgir Yapılarda Oluşan Hasar Biçimleri

Kâgir yapılar taş, tuğla gibi gevrek malzemelerden oluşmaktadırlar. Bu nedenle basınç kuvvetlerine karşı dayanımı fazla olmasına karşı çekme kuvvetlerine karşı oldukça

zayıftırlar. Yapılarda oluşan çekme kuvvetleri sonucunda kâgir yapı elemanlarında çatlaklar, kırıklar ve ayrılmalar meydana gelmektedir. Bu durum hasar olarak tanımlanmaktadır. Hasarın oluşum şekli malzeme özelliklerine ve yük dağılımına bağlıdır. Yapısal hasarlar; malzemelerde ve yapı elemanlarında oluşan çatlaklar, ezilmeler ve kalıcı şekil değiştirmeler olarak sıralanabilmektedir (Croci, 2000).

Çatlak; malzeme yüzeyinde gözle görülebilen, dıştan içe doğru ilerleyen veya komşu elemanlar arasında oluşan ayrılma veya yarılmadır. Bu hasar türü yapıda çekme gerilmesinin oluştuğunun en belirgin göstergesidir. Genellikle bu tür hasarlar deprem kuvvetleri veya zemin kaynaklı dış etkilerden ortaya çıkmaktadır. Ancak oluşan bu çatlakların yapı stabilitesi için tehlikeli olduğu anlamı çıkartılmamladır. Çatlakların oluşumunu yapı için gerekli olmayan gerilmelerin boşaltılması ve strüktür sistem içinde yeniden gerilmelerin dağıtıldığı sonucu çıkartılabilir (Arun, 2007). Yapısal güvenliğin değerlendirmesi aşamasında, çatlakların genişliği, derinliği, uzunluğu ve ilerleme durumları oldukça önemlidir. Bu hususlar tespit edildikten sonra izlenmeye alınması son derece önemlidir.

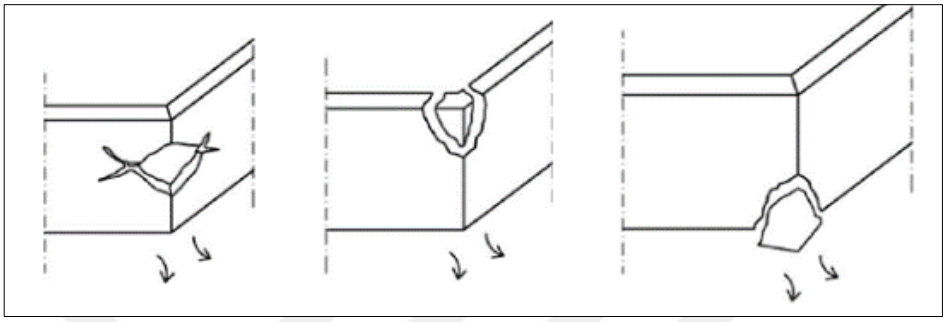
Ezilme; yapıda oluşan basınç kuvvetlerinin oluşturduğu gerilme değerlerinin malzeme dayanımından fazla olduğu durumda oluşan hasar durumdur. Malzemenin türüne bağlı olarak şişme, kabuklanma, ufalanma ve ince kılcal çatlaklar şeklinde oluşabilmektedir. Basınç kuvvetlerinin artışına bağlı olarak, ilk önce gerilmeler doğrultusunda ince çatlaklar oluşmaktadır, ardından gerilmeye dik yönde ani yer değiştirmeler ve göçme meydana gelmektedir. Ezilme, malzeme özelliklerine bağlı olarak gözle görülebileceği gibi bazı durumlarda hiç belirti göstermeden doğrudan elemanının göçmesiyle de sonuçlanabilmektedir. Bu nedenle, narin elemanlarda tehlikeli bir hasar türüdür. Basınç kuvvetleri sonucu oluştuğu için sadece basınca çalışan elemanlarında görülmektedir (Croci, 1998).

Kalıcı deformasyonlar; yapı elemanına etkiyen yatay ve düşey yüklerden oluşan eğilmeler ve zemin oturmalarından kaynaklanan hasarlardır (Croci, 1998).

Çalışmada, kâgir kâgir yapılarda oluşan hasar biçimlerinin yapı elemanlarına göre temellerde, duvar ve ayaklarda, sütunlarda, kemerlerde, kubbelerde, tonozlarda, gergilerde ve ahşap elemanlarda meydana gelenler olarak incelenmektedir.

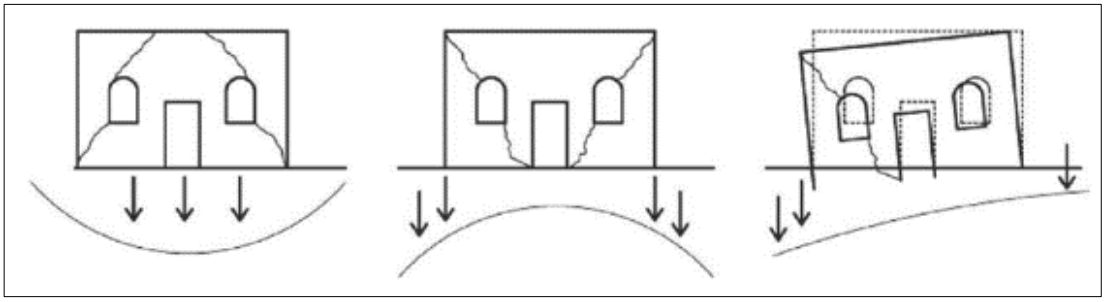
3.2.1. Temellerde Meydana Gelen Hasarlar

Zeminde oluşan her türlü değişiklik sonucunda temelde ve buna bağlı olarak üst yapıda hasarlar oluşmaktadır. Temel oturmasına bağlı olarak üst yapı duvarlarında kesme çatlakları, dönmeler, çökmeler ve duvar parçalarının düzlemlerinden çıkarak devrilmeleri meydana gelebilmektedir (Vatan, 2010), (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Duvar parçasının düzleminden çıkması (Vatan, 2010)

Temelde meydana gelen oturmalar üst yapıda kendini çatlaklar şeklinde gösterir. Çatlakların şekli ve yönü, temel oturmasının nerede olduğu hakkında genel bir bilgi vermektedir. Temel oturması yapının kenarlarında meydana gelmişse çatlaklar duvarın orta bölgesinden başlayarak zeminden itibaren kenarlara doğru açılarak yukarıya doğru ilerlemektedir. Temel oturması yapının orta kısmında meydana gelmişse çatlaklar zeminden itibaren duvarların kenarlarından başlayıp daralarak yukarı doğru ilerlemektedir. Şayet bölgesel bir oturma meydana gelmişse oturmanın olduğu yere göre çatlaklar değişiklik gösterir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Temel oturma çatlakları (Vatan, 2010)

Temel oturmasına bağlı olarak daha rijit olan üst yapıda dönme meydana gelmektedir. Oluşan bu dönme sonucunda duvar elemanlarda kesme çatlakları ve düşey çatlaklar oluşmaktadır. Bunun sonucunda da yapının kesiti yetersiz olan bölgelerinde bölgesel yıkılmalar veya göçmeler oluşabilmektedir.

3.2.2. Duvar ve Ayaklarda Meydana Gelen Hasarlar

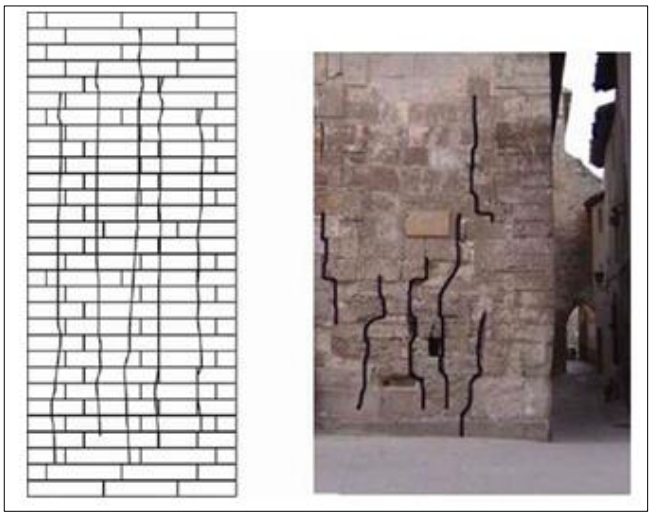
Kâgir yapılarda taş ve tuğla kâgir yapı elemanları ile harçlı veya harçsız örülmek suretiyle inşa edilirler. Temel görevleri yapıya gelen yükleri zemine iletmektir. Kâgir duvarlar ve ayaklar, kemerler yardımı ile üst örtüyü taşıyan birer düşey taşıcı elemandır. Duvar elemanlar iki boyutlu düzlem taşıyıcı, ayak elemanlar ise tek boyutlu çubuk elemanlardır. Kâgir yapılarda, üzerinde örtü sistemi bulunan tüm duvar ve ayak elemanlar birer düşey taşıyıcıdır (Vatan, 2010).

Kâgir yapılarda, duvarların taşıyabileceği yük duvar yüksekliğinin duvar kalınlığına oranına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Buna narinlik etkisi adı verilmektedir. Duvarlar narinliklerine (λ = yükseklik/kalınlık) göre kalın ya da ince duvar olarak sınıflandırılmaktadır. Tolles ve diğerlerine göre taşıyıcı yığma duvarlar; $\lambda < 6$ ise kalın duvar, $6 < \lambda < 8$ ise orta kalın duvar ve $\lambda > 8$ ise ince duvardır (Tolles vd., 2003). Eurocode 8'e göre taşıyıcı yığma duvarlarda; 35 cm ve üzeri kalınlıktaki duvarlar taşıyıcı yığma duvar olup yığma duvar için $\lambda < 9$ narinliği uygun kabul edilmektedir ("Eurocode 8 En 1998-1," 2003).

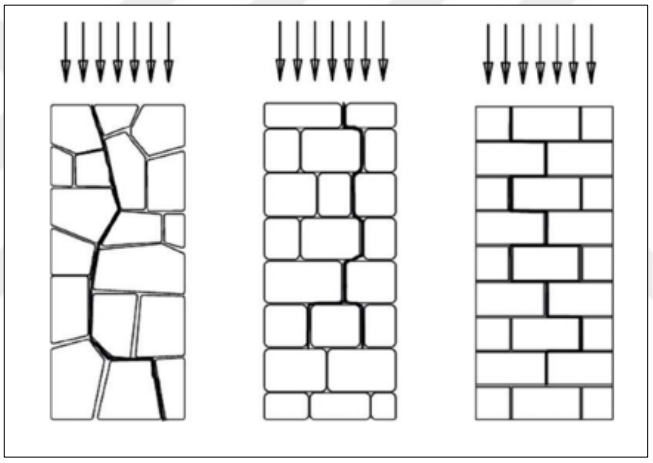
Kâgir ayak ve duvarlara etkiyen kuvvetler sonucunda elemanı oluşturan parçalar hareket ederek hasarlar meydana gelmektedir. Oluşan hasarlar, etkiyen yükün doğrultusu ve yönüne göre farklılıklar göstermektedir.

Düşey Kuvvetlerden Meydana Gelen Hasarlar: Kâgir ayak ve duvarlarda düşey kuvvetlerden meydana gelen hasarlar zaman içerisinde çatlaklar şeklinde kendini göstermektedir. Bu çatlakların görülmesinden sonra oluşabilecek hasarları önceden tahmin ederek kontrol altına alınması mümkündür (Roca, 2007). Düşey kuvvetlere bağlı olarak kâgir duvar ve ayaklarda oluşan basınç gerilmelerindeki artış sonucunda yapı elemanlarında ezilmeler meydana gelmektedir. Ezilme durumu, duvar ve ayakların zemine yakın bölgelerinde oluşan, çok sayıda ve birbirine yakın çatlaklar şeklinde görülmektedir (Şekil 3.4).

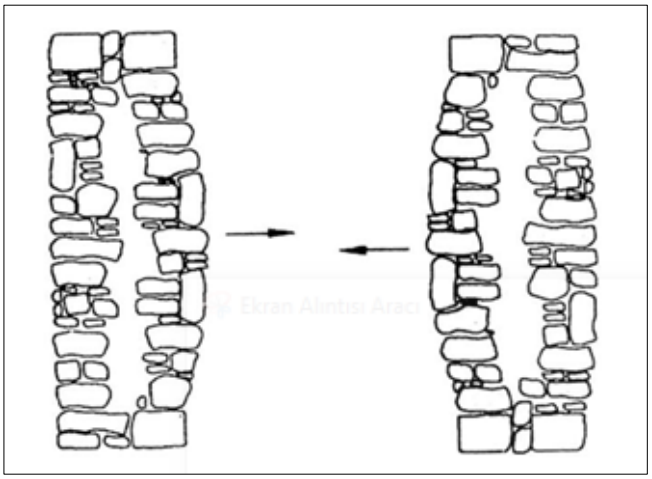
Düşey kuvvetlerden dolayı duvar en kesiti içinde ve örgü derzleri uygun olmayan duvarlarda çatlamalar meydana gelmektedir (Şekil 3.5). Çok cidarlı duvarlarda ara dolgu malzemesi ile cidarlar arasındaki birleşimler iyi yapılmamışsa veya zamanla bozulmuş ise duvarda düzlemi dışı hareket oluşmaktadır (Şekil 3.6). Duvarda şişme denilen bu hareket, duvar yüzeyinin birinde veya her iki yüzünde de oluşabilmektedir.



Şekil 3.4. Düşey kuvvet etkisiyle ortaya çıkan çatlaklar (Vatan, 2010)

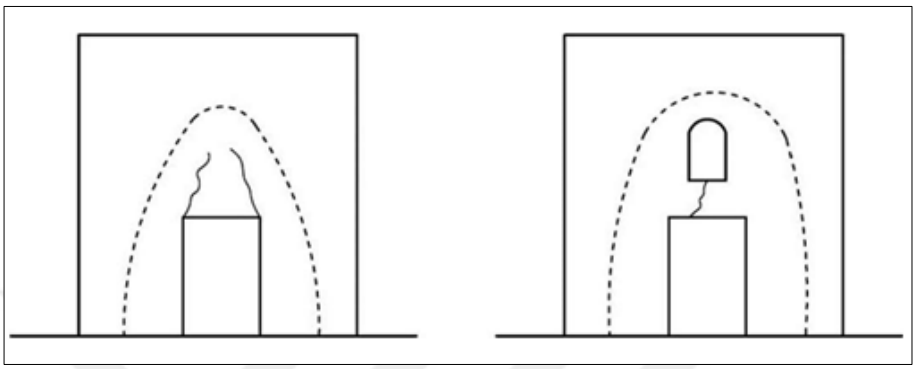


Şekil 3.5. Uygun olmayan örgü derzlerinden kaynaklı hasarlar (Vatan, 2010)



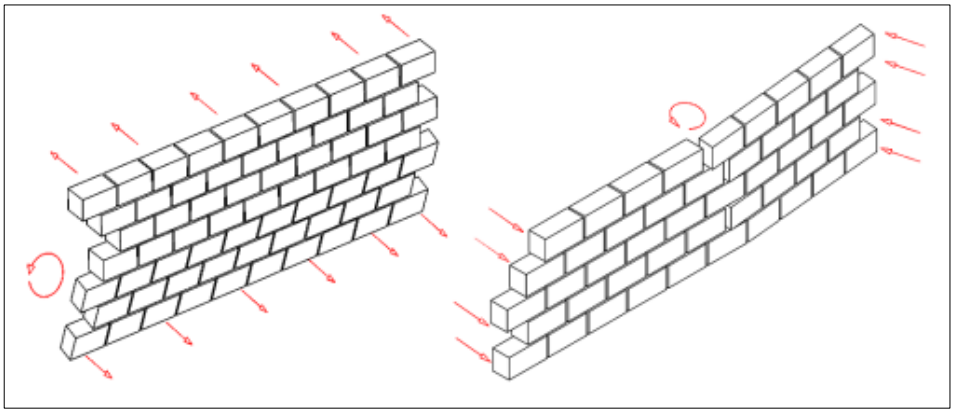
Şekil 3.6. Çok cidarlı duvarda şişme hasarı (Bayülke, 2001)

Kâgir duvarlara düşey kuvvetlerin artması sonucunda duvarlarda bulunan kapı ve pencere boşluklarının üst kısımlarında hafifletme kemeri oluşturacak biçimde çatlaklar görülmektedir (Şekil 3.7). Oluşan bu çatlakların alt tarafında kalan duvar parçası çatlayarak düşebilmektedir. Ancak düşen bu duvar parçası yük taşımadığından yapı hala güvenli bölgededir (Arun, 2009).



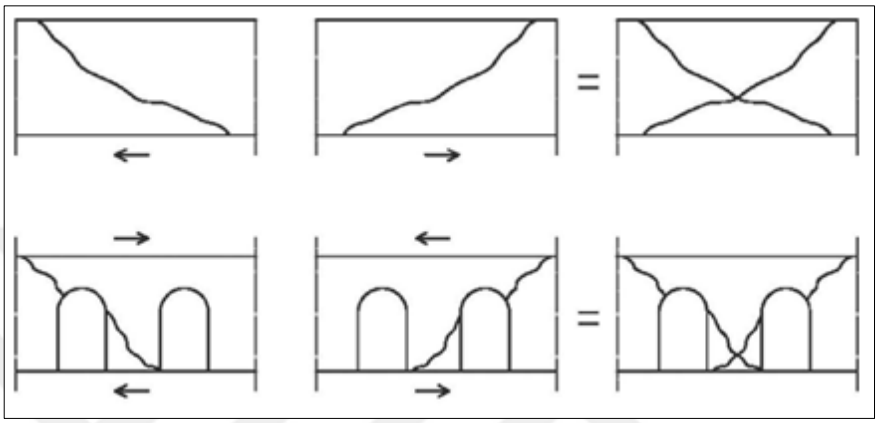
Şekil 3.7. Boşluk üzerinde hafifletme kemeri (Vatan, 2010)

Yatay Kuvvetlerden Meydana Gelen Hasarlar: Kâgir yapılara etkiyen deprem kuvveti en önemli yatay kuvvettir. Deprem kuvvetlerinin büyüklüğü ve etkime yönleri önceden tespit edilememektedir. Bu nedenle yönetmeliklerle yapı türüne ve zemin yapısına göre öngörülen deprem büyüklüğüne göre deprem kuvvet hesaplamaları yapılarak meydana gelecek hasarlar azaltılabilmektedir. Deprem sırasında, öncelikle duvarlarda çatlaklar oluşmaya başlamaktadır ve tekrarlanan yüklemeler sonucunda yatay kuvvetlere karşı dayanıksız hale gelerek hasar oluşmaktadır. (Tolles vd., 2003). Deprem kuvveti; duvar düzlemine paralel veya duvar düzlemine dik yönde etkiyebilir (Şekil 3.8). Deprem kuvvetinin etkime yönüne göre duvarda; kayma, eğilme ya da burulma kuvvetleri oluşmaktadır.



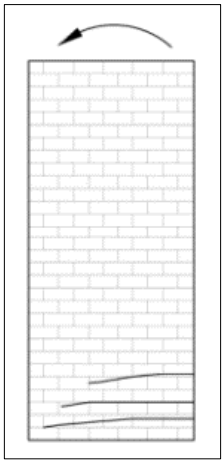
Şekil 3.8. Yığma duvarım yatay ve düşey eksen etrafında dönmesi (Aköz, 2008)

Duvar Düzlemine Paralel Yönde Etkiyen Kuvvetlerin Oluşturduğu Hasarlar: Duvarlarda diyagonal çatlaklar (kayma çatlakları) oluşturmaktadır. Deprem kuvvetinin tekrarlanan yük olmasından dolayı oluşan çatlaklar kesişerek X çatlakları şeklini alır. Yatay kuvvet etkisiyle oluşan çatlaklar ilk olarak duvar boşluğunun üst tarafında saha sonra da alt tarafında oluşmaktadır. Kapı ve pencere boşluklarının olduğu yerlerde süreksizlikten dolayı diyagonal ya da yatay çatlaklar oluşmaktadır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Yatay kuvvet etkisi altında meydana gelen kesme çatlakları (Vatan, 2010)

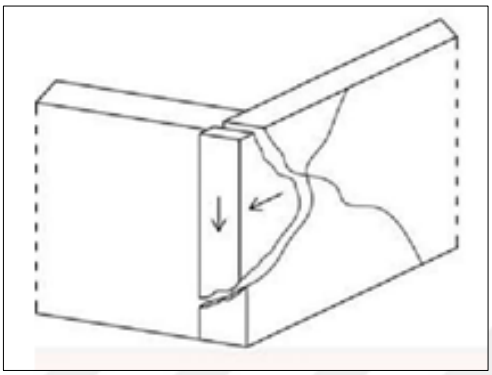
Kâgir ayaklarda yatay kuvvet etkisi ile tabanda oluşan eğilme momenti nedeniyle zemine yakın olan bölgelerde birbirine yakın çok sayıda eğilme çatlağı oluşmaktadır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Kâgir ayaklarda yatay kuvvet etkisiyle meydana gelen çatlaklar (Vatan, 2010)

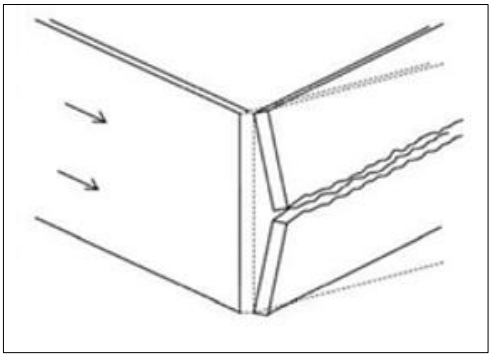
Kâgir duvarlarda görülen diyagonal çatlaklar duvar kesitinin yeterli kalınlıkta olması durumunda tehlike oluşturmamaktadır. Ancak duvar kesitinin yetersiz olduğu ince

duvarlarda diyagonal çatlaklar kesiştikleri bölgelerde bağımsız duvar parçacıkları oluşturarak kendi ağırlığı ile düzlemden ayrılarak düşmesine sebep olabilmektedir. Ayrıca duvar köşelerinde oluşan diyagonal çatlakların bağımsız duvar parçacıkları ile birlikte düşey çatlaklar da oluşturduğundan duvarın stabiletsinin bozulmasına neden olmaktadırlar (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Kesişen çatlakların oluşturduğu davar hasarı (Vatan, 2010)

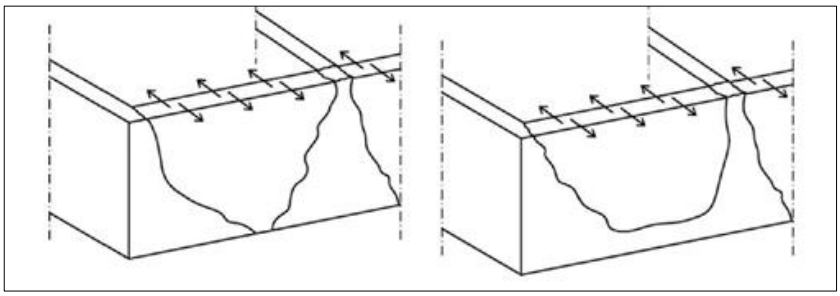
Duvar Düzlemine Dik Yönde Etkiyen Kuvvetlerin Oluşturduğu Hasarlar: Yatay kuvvetler sonucunda duvar düzlem dışı hareket eder. Düzlemi dışı hareket eden duvarda oluşan hasarlar genellikle düzeltilemezler. Deprem kuvvetleri nedeniyle birbirine dik duvarların birleşimine yakın bölgelerde çekme ve eğilme kuvvetleri nedeniyle düşey ve diyagonal çatlakların oluşmaktadır (Tolles vd., 2003). Kâgir yapı duvarlarda düzlem dışı hareketin meydana gelmesi; duvarın narinliğine, duvar birleşimlerine, boşluklarının yeri ve büyüklüğüne, üst örtü ile döşemelerden gelen yüklere bağlıdır. İnce kâgir ($\lambda > 8$) yapı duvarlarında, düzlemine dik yönde yatay kuvvet etkisinde duvar orta bölgesi boyunca çatlak meydana gelmekte ve duvar düzlemi dışında hareket oluşmaktadır (Şekil 3.12).



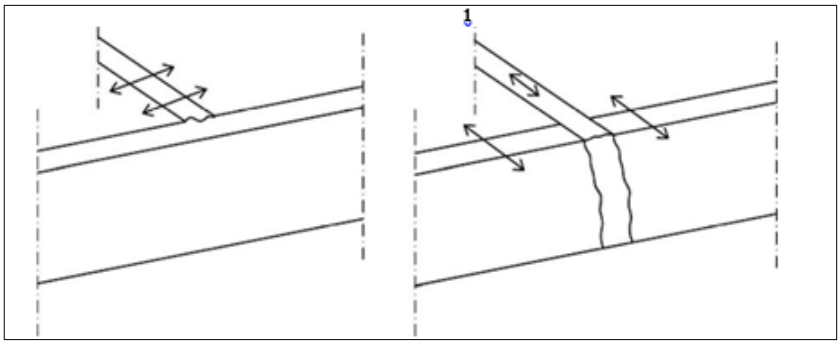
Şekil 3.12. Yatay kuvvet etkisiyle ince duvarlarda düzlem dışı hareket (Vatan, 2010)

İnce duvarlar uzunlukları boyunca kendilerine dik doğrultuda desteklenmedikleri takdirde serbest davranarak devrilebilmektedirler (Vatan, 2010). Kalın kâgir($\lambda < 6$) yapı duvarlarında, düzlem dışına hareket genellikle beklenmektedir. Ancak çok büyük kuvvet etkisi altında düzlem dışı hareket meydana gelebilmektedir (Vatan, 2010).

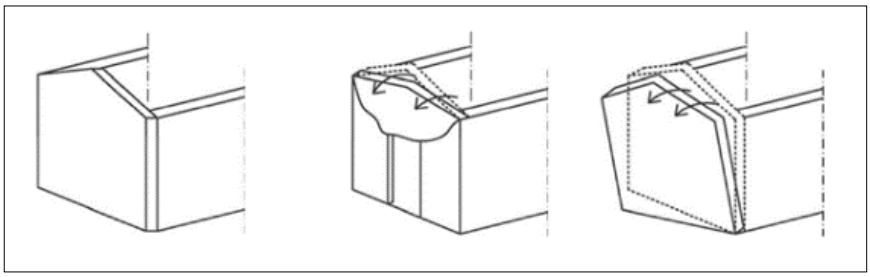
Deprem gibi yatay kuvvetlerin etkisi altında olan birbirine dik duvarlarda hem düzlem içinde hem de düzleme dışında kuvvetler mevcuttur. Bu nedenle duvar birleşim bölgelerinde çatlaklar ortaya çıkmaktadır. Birbirini dik kesen iki duvarda hem eğilme hem de çekme kuvvetleri oluşmaktadır. Kuvvetlerin etkime yönlerine göre duvarlarda ayrılma veya düşey çatlaklar meydana gelmektedir. Duvarların birbirlerine uyguladıkları yatay kuvvetin etkisiyle duvar birleşimleri üst taraftan başlayan çatlaklar ve duvar tabanına doğru düşey veya diyagonal olarak ilerleyerek tüm duvar boyunca yatay olarak büyümektedir. Ayrıca birbirini dik kesen duvarlar arasında bağlantı yok ise duvar düzlemi dışı hareket ederek devrilmektedir (Şekil 3.13). Birbirine dik duvar birleşimlerinde ayrılan duvar parçası serbest duvar gibi davranarak devrilme ya da göçme durumu oluşabilmektedir. Ayrıca oluşan çatlaklar duvarlarda kalıcı deformasyonlara neden olmaktadır (Şekil 3.14). Çatı kalkan duvarları ise yatay ve düşey hatıllar ile çatı ve döşeme elemanlarına iyi bir şekilde bağlanmamışsa düzlemi dışı hareket ederek devrilebilmektedirler (Şekil 3.15) (Vatan, 2010).



Şekil 3.13. Yatay kuvvet etkisiyle birbirine dik duvar çatlakları (Vatan, 2010)



Şekil 3.14. Çatlağın sürekliliği nedeniyle oluşan serbest duvar (Vatan, 2010)



Şekil 3.15. Kalkan duvar hasarları (Vatan, 2010)

3.2.3. Sütunlarda Meydana Gelen Hasarlar

Sütunlar tek parça ya da çok parçalı blokların üst üste konulmasıyla inşa edilen düşey taşıyıcı elemanlardır. Basınç kuvvetlerinin etkisinde olan sütunlarda; düşey kuvvetlerin artması ile düşey çatlaklar ve kapak atma şeklinde hasarlar oluşmaktadır. Deprem kuvveti gibi yatay kuvvetlerin etkisinde tek parça sütunlarda devrilme, çok parçalı sütunlarda ise bloklar arasında kayma veya devrilme oluşabilir. Zemin kaynaklı temelde oluşan oturmalar sonucunda sütunlar da dönmeye bağlı olarak çatlaklar veya devrilmeler meydana gelmektedir (Vatan, 2010).

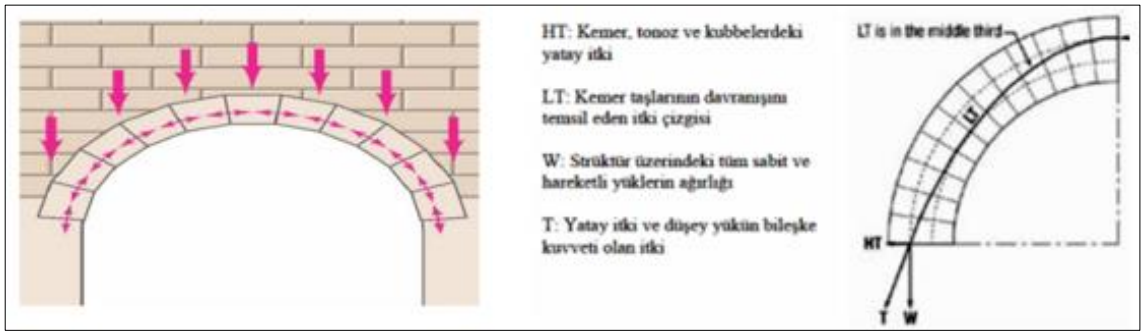
Çok parçalı sütunlarda metaller yaygın olarak kullanılmıştır. Kullanılan metal sütun bloklar arasında kayma kuvvetini karşılayarak sütun bloklarının ayrılmasını önlemektedirler. Ancak metaller hem yapı elemanın deformasyonlarını kısıtladıklarından hem de korozyona uğradıklarından elemanda parça kopmasına neden olabilmektedirler (Vatan, 2010).

Kemerlere mesnetlik yapan sütunlarda, kemerden gelen yatay kuvvet itkisini almak için ahşap ya da metal gergi elemanları kullanılmıştır. Ancak ahşap gergilerde zamanla çürüme, böceklenme gibi etkilerle, metal gergilerde ise zamanla korozyon nedeniyle kesitleri zayıflamaktadır. Geri elemanlarının kesitleri zayıfladığı durumda almaları gereken itki kuvvetlerini taşıyamayarak sütunlarda hasar oluşumlarına neden oluşmaktadırlar.

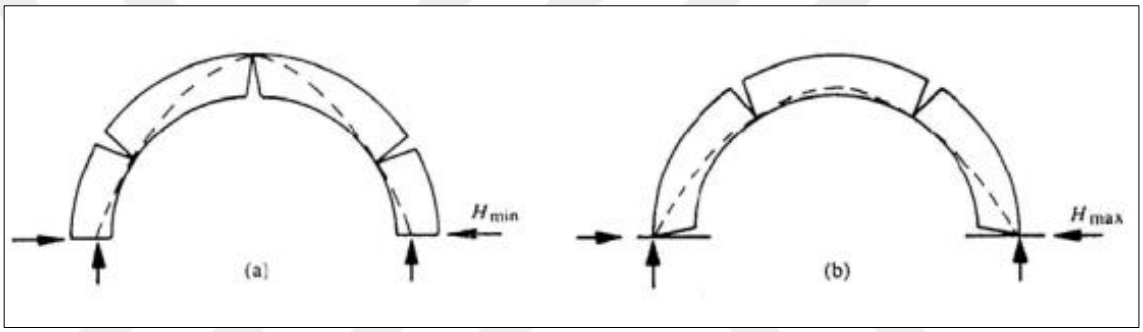
3.2.4. Kemerlerde Meydana Gelen Hasarlar

Kemer ekseninde ya da buna dik doğrultuda derz açılmaları oluşabilmektedir. Bunun nedeni kemer-tonoz üzengilerindeki itki kuvvetinin zaman içinde azalmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 3.16), (Aköz, 2008).

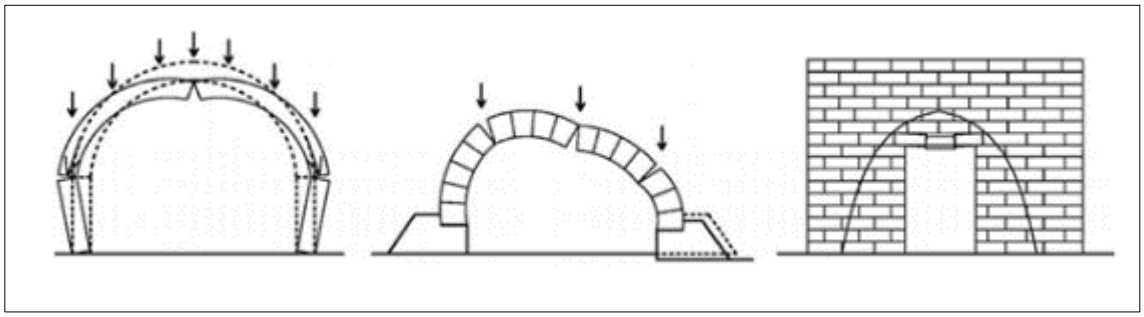
Kemer formuna göre kemer ekseninde ve mesnetlerinde oluşan itki kuvvetleri ve mesnet hareketleri sonucunda kemerlerde oluşan hasar biçimleri Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de gösterilmektedir.



Şekil 3.16. Kâgir kemerlerde yük aktarımı diyagramı (Şişik, 2017)



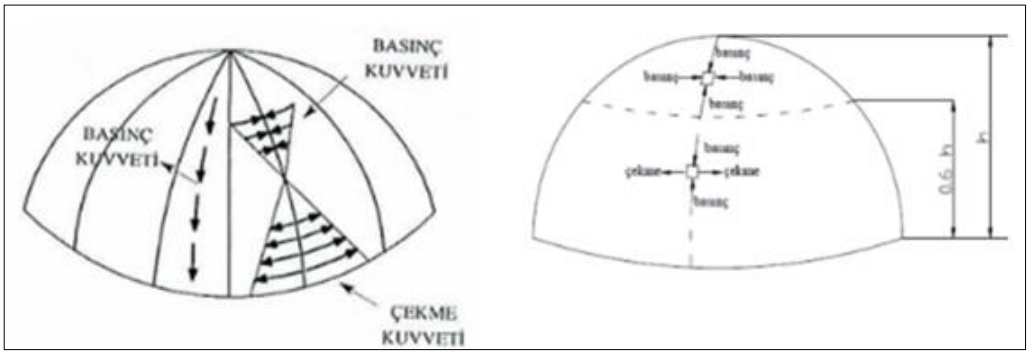
Şekil 3.17. Kemerde min. ve maksimum yatay kuvvete göre itki çizgisi (Huerta, 2001)



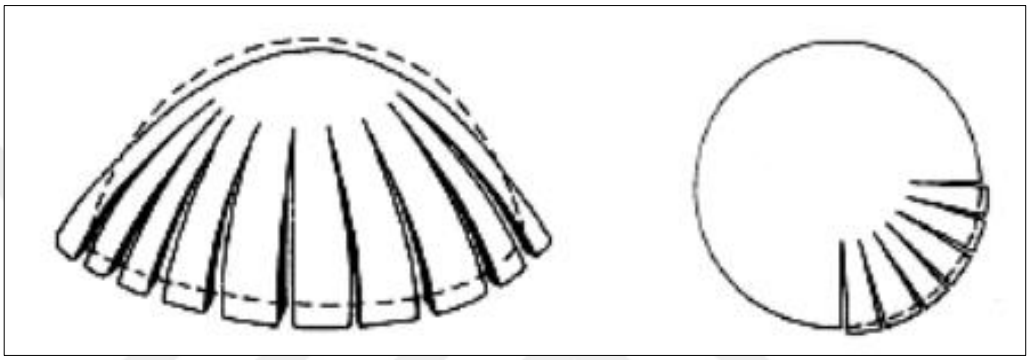
Şekil 3.18. Mesnet hareketi etkisiyle oluşan hasarlar (Vatan, 2010)

3.2.5. Kubbelerde Meydana Gelen Hasarlar

Genellikle kubbenin çekme bölgesinin olduğu kubbe eteğinde oluşmaktadır (Şekil 3.19). Kubbenin açıklığı ve formuna bağlı olarak kubbe eteğinde düşey çatlaklar meydana gelmektedir. Bu çatlaklar kubbe eteğinden başlayarak dik yönde yukarıya doğru gelişirler (Şekil 3.20). Oluşan bu çatlaklar kubbeyi kemer dilimlerine ayırdığı için kubbenin stabilitesini bozmamaktadırlar (Arun, 2009).



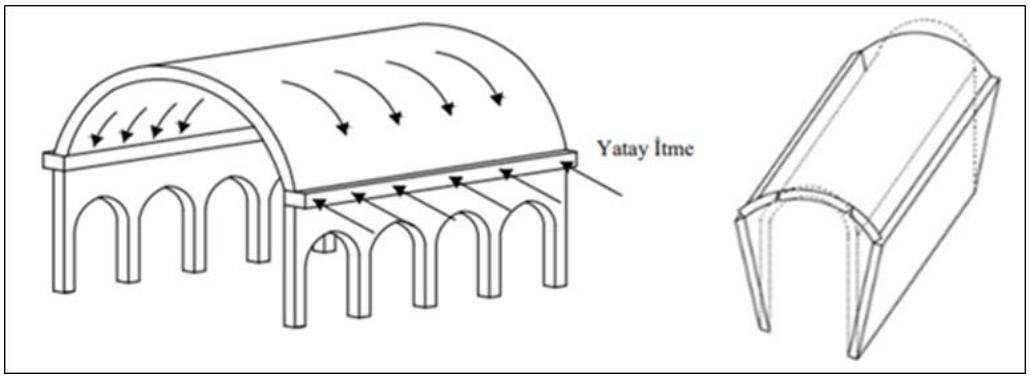
Şekil 3.19. Kubbelerde yük taşıma mekanizması (Sesigür vd., 2007)



Şekil 3.20. Kubbede tipik hasar biçimleri (Huerta Fernández, 2001)

3.2.6. Tonozlarda Meydana Gelen Hasarlar

Kâgir tonozlar geometrilerine göre mesnetlerde itki kuvveti meydana getirirler. Tonoz mesnedinin oluşan itki kuvvetini alacak kalınlıkta olmaması veya bu itkiyi karşılayacak başka destek elemanlarının olmaması durumunda mesnet bölgelerinde düzlem dışı hareketler oluşmaktadır (Şekil 3.21). Tonozların kesit kalınlıkları yeterli büyüklükte seçilerek mesnet bölgelerinde oluşan itki kuvvetleri kendi düşey ağırlıkları ile dengelenebilmektedir (Arun, 2006).



Şekil 3.21. Mesnet hareketi nedeniyle meydana gelen çatlak oluşumu (Vatan, 2010)

3.2.7. Gergilerde Meydana Gelen Hasarlar

Kâgir yapılarda kullanılan demir gergilerde oluşan hasarlardan en önemlisi korozyondur. Oluşan korozyon sonucunda, kemerlerin üzengi seviyesinde elemanlar arasında açılmalar ve kabuk atmalar oluşmaktadır. Ayrıca yapıda oluşan yanal hareketler sonucu gergilerde burkulma (Şekil 3.22.a) ve kopma (Şekil 3.22.b) çoğunlukla karşılaşılan hasar biçimlerini oluşturmaktadır (Sesigür vd., 2007).



(a) (b)

Şekil 3.22. Demir Gergilerde Hasar Biçimleri (a) Burkulma (Vasat Atik Ali Paşa Camisi (b) Kopma (Edirne Sarayı Mutfakları), (Sesigür vd., 2007)

3.2.8. Ahşap Elemanlarda Meydana Gelen Hasarlar

Ahşap yapı elemanlarda atmosferik koşullar ile yüzeysel ve bünyesel bozulmalar meydana gelmektedir. Ahşap iskeletli yapılarda genellikle çürüme ve mantarlaşma sıkça karşılaşılan hasar türleridir. Bunun sonucunda birleşim elemanının taşıyıcı ve bağlayıcı özelliğini yitirerek taşıyıcı özelliğini kaybedebilir (Şekil 3.23), (Sesigür vd., 2007).



Şekil 3.23. Ahşap Bozulması (Kademi Şerif Tekkesi, İstanbul), (Sesigür vd., 2007)

Kâgir yapılarda dış etkilerden kaynaklı eleman bazlı oluşabilecek hasarların tümü Çizelge 3.2'de detaylı olarak gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Kâgir yapı elemanlarında dış etkilerin oluşturduğu hasarlar (Vatan, 2010)

Strüktür Eleman		Düşey Yükler	Deprem Kuvvetleri	Temel Oturması	Deformasyonların Engelenmesi
Sütün	**Tek parça**	Düşey Çatlak	Devrilme	Dönme	Parça Kopması
		Kapak Atma		Devrilme	
	Çok parçalı	Düşey Çatlak	Devrilme	Dönme	Parça Kopması
		Kapak Atma	Parçalar Arasında Kayma	Devrilme	
Duvar/Ayak		Düşey çatlak	Kesme çatlağı	Diyagonal çatlaklar	Parça Kopması
		Ezilme	Parça kopma	Parçalı kopma	
		Şişme	Düzlemine dik devrilme	Farklı seviyeler arasında düşey çatlak	
		Boşluklar üzerinde hafifletme kemeri oluşturma	Komşu duvarların düşeyde ayrılması	Kalkan duvarın düşmesi	Dönme
		Lento kırılması	Dönme	Boşluklar üzerinde hafifletme kemeri oluşması	
		Kemer alt yüzeyinde çatlak	Kısmi göçme	Rijit yapıda dönme	
Döşeme/Çatı	**Silindirk tonoz**	Tonoz doğrutusunda çatlak	Paralel kemer oluşması		
	Konik tonoz	Tonoz doğrutusunda çatlak			
	Eliptik paraboloid tonoz		Tonoz doğrutusunda çatlak		
	Tor yüzeyli tonoz	Tonoz doğrutusunda çatlak	Tonoz doğrutusunda çatlak		
	Konid tonoz	Diyagonal çatlak	Diyagonal çatlak		
	Kubbe	Meridyen doğrultusunda çatlak (düşey çatlak)	Paralel doğrultsunda dairesel çatlak	Paralel doğrultsunda çatlak	
	Ahşap döşeme	Sehim			Mesnet bölgesinde kırılma
	Volta döşeme	Sehim			Mesnet bölgesinde kırılma
	BA. Döşeme	Kesme Çatlağı			
		Sehim			

3.3. Kâgir Yapılarda Uygulanabilecek Onarım ve Güçlendirme Yöntemleri

Kâgir yapılarda oluşan hasarların şekil ve özelliklerine bağlı olarak uygulanabilecek onarım ve güçlendirme yöntemleri bir veya birden fazla olabilmektedir. Bunlardan hangisi veya hangilerinin kullanılacağına yapının mimari ve estetik özelliklerine göre karar verilmelidir. Uygulanabilecek yöntemler, çalışmada acil

müdahale, kısmi söküm, onarım ve güçlendirme malzemeleri, bölgesel onarım, üst yapının toptan güçlendirilmesi başlıkları altında incelenmektedir (Sesigür vd., 2007).

3.3.1. Acil Müdahale Yöntemleri

Hasar oluşan yapıda kısmen veya tamamında stabilite bozukluğu veya göçme riski olduğunun tespit edilmesi durumunda, yapıya geçici olacak şekilde acil müdahaleler yapılması gerekecektir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus, yapılacak geçici müdahalenin kalıcı müdahaleye dönüşme riskinin oldukça yüksek olmasıdır. Bu nedenle yapılacak müdahalelerin en az seviyelerde tutulmasına dikkate edilmesi gerekmektedir. Acil müdahale yöntemlerinin başında, yapının kısmen veya tamamen askıya alınması (Şekil 3.24), mimari detaylarının korunması ve kısmi yıkım şeklinde sıralanabilir. Kısmi yıkım, yapının stabilitesini sağlamak için yapılabilecek başka bir yöntem olmaması durumunda tercih edilmelidir (Sesigür vd., 2007).



Şekil 3.24. Acil müdahale (Mihrimah Sultan Camisi), (Sesigür vd., 2007)

3.3.2. Kısmi Söküm

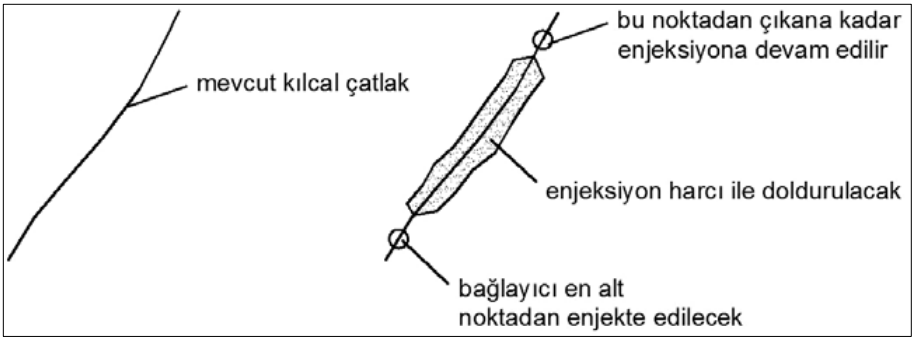
Yapının rölöve ve restorasyon projesine göre strüktürü tamamen veya bir parçasının numaralandırma yapılarak sökülüp yeniden yapılmasıdır. Genellikle malzeme ve hasar biçimlerine göre anıtsal yapıların taşınmasında bu yöntem tercih edilmektedir (Sesigür vd., 2007).

3.3.3. Onarım ve Güçlendirme Malzemeleri

Kâgir yapıların onarımı ve güçlendirilmesi için özgün malzemelere ilave olarak, paslanmaz çelik, yüksek dayanımlı metaller, epoksi reçinesi, değişik özellikte çimentolar, GFRP ve CFRP gibi malzemeler kullanılabilmektedir. Ancak kullanılacak malzeme seçiminde Venedik Tüzüğü'ne göre geleneksel malzemenin yetersiz ve uygun olmadığının belgelenmesi gerekmektedir. Ayrıca onarım ve güçlendirmede seçilen malzemelerin özgün malzemeler ile uyumlu olması ve geri dönüşümü mümkün olması gerekmektedir (Sesigür vd., 2007).

3.3.4. Bölgesel Onarım

Kâgir yapılarda oluşan bölgesel çatlakların onarım ve güçlendirilmesinin yapılması yapının genel davranışını iyileştirmesi bakımından önemlidir. Bu amaçla kâgir duvarlardaki çatlaklar ile tonoz ve kubbelerde oluşan çatlakların onarımı yapılmalıdır. Çatlak genişliği ve çatlağın yerine bağlı olarak onarım yöntemi değişiklik göstermektedir. Çatlakların oluştuğu bölgede çekme gerilmeleri mevcut ise çelik ya da FRP donatı kullanılarak çekme gerilmelerinin alınması gerekmektedir. Kâgir yapılarda çatlak onarımı en çok tercih edilen yöntem enjeksiyon harcı ile çatlağın doldurulmasıdır (Şekil 3.25), (Sesigür vd., 2007).

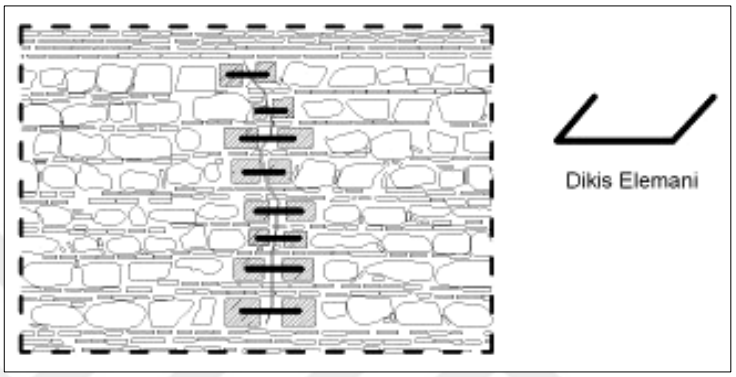


Şekil 3.25. Çatlakların Enjeksiyon Yöntemi ile Onarımı (Sesigür vd., 2007)

3.3.5. Bölgesel Güçlendirme

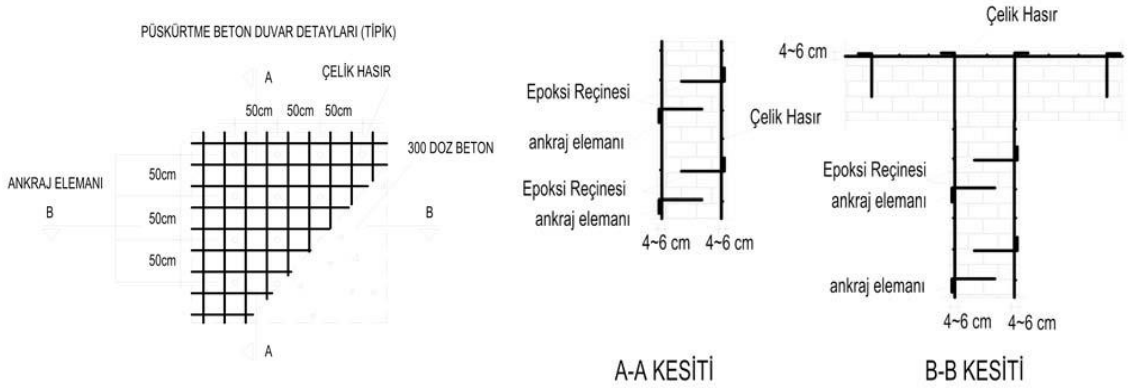
Bölgesel güçlendirme yalnızca bir yapı elemanı üzerinde yapılan işlemdir. Bölgesel güçlendirme yapılan yapı elemanın, yapının bütünündeki davranışa olumlu katkısı olacaktır. Çalışmada, bölgesel güçlendirme; duvarlar-sütunlar, döşemeler, kemerler-tonozlar, kubbeler başlığında incelenmektedir.

Duvarlar-Sütunlar: Kagir duvarlardaki çatlakların genişliği 10 mm'den daha fazla veya duvarı oluşturan elemanlarda kopma meydana gelmesi durumunda, çatlakların enjeksiyon harcı yöntemi ile onarımları yanında çekme gerilmelerini alacak elemanların da kullanılması gerekmektedir. Bunun için çatlağa bitişik elemanlar alınarak dikiş elemanları ya da çelik bağlantı elemanları yerleştirilerek, boşluklar özgün malzemeye uyumlu bir karışımla her iki yüzdende de düşük basınç altında doldurulmaktadır (Şekil 3.26), (Sesigür vd., 2007).



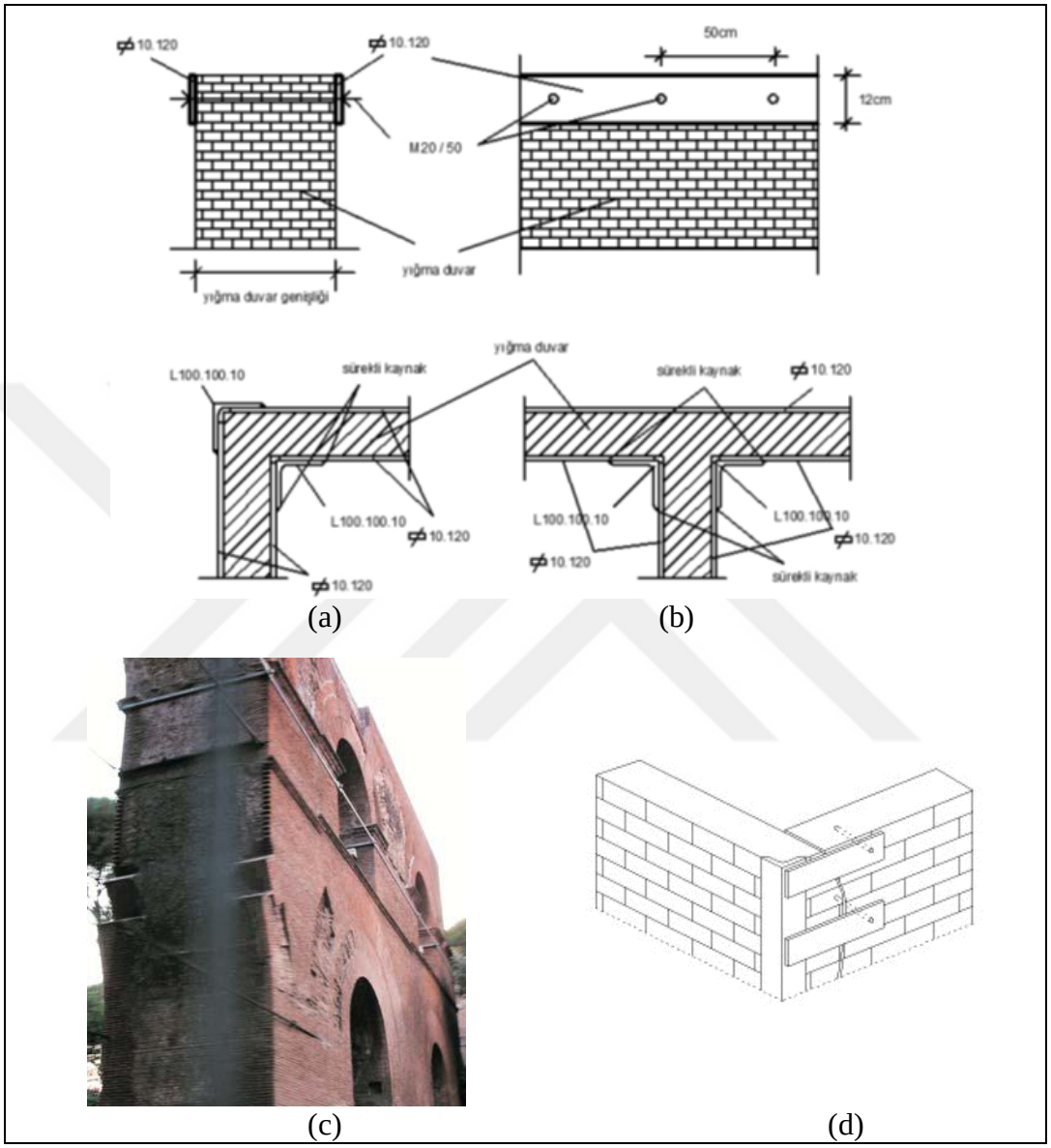
Şekil 3.26. Geniş Duvar Çatlaklarında Dikiş ile Onarım (Sesigür vd., 2007)

Bazı durumlarda duvarlarda çatlaklar için enjeksiyon harcı uygulaması yapılmasına rağmen duvarlar yeterli güvenlik gerilmelerini sağlayamayabilirler. Bu durumda mevcut çatlaklar boyunca düşey hatıllar oluşturulması gerekebilir. Ayrıca duvardaki hasarın büyüklüğüne bağlı olarak duvarların tek veya her iki yüzüne hasır donatı yerleştirilerek mümkün oldukça en az müdahale olacak şekilde kalınlığı 30 mm-80 mm'yi geçmeyecek şekilde püskürtme beton uygulaması yapılabilmektedir (Şekil 3.27), (Sesigür vd., 2007).



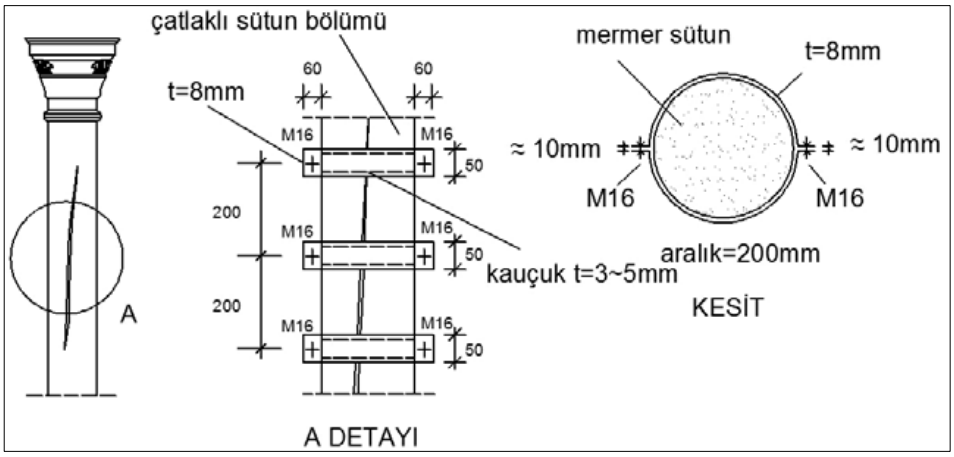
Şekil 3.27. Püskürtme Beton Duvar Detayları (Sultan Abdülaziz Av Köşkü, İzmit), (Sesigür vd., 2007).

Duvar köşelerinde ayrılma olması durumunda, duvar üst kotlarında metal ve/veya FRP şerit elemanlarla hatıllar oluşturulabilmektedir (Şekil 3.28.a, b, c, d), (Sesigür vd., 2007).



Şekil 3.28. (a) Çelik Hatıl Düzenlemesi (b) Hatılların Köşe Birleşimleri (c), (d) Duvarların Köşelerinde Güçlendirme, Gergi Düzenlemesi (Su Kemeri, Roma) (Sesigür vd., 2007)

Sütunların basınç kuvvetleri taşıdıkları dikkate alındığında parçalar arsında kaymayı önlemek ve dıştan ön gerilme oluşturması amacı ile çelik donatılar aracılığı ile sarılmaları gerekmektedir. Böylece sütunlar üzerinde oluşan çatlaklarının ilerlemeleri ve güvenliklerinin artırılmaları sağlanabilecektir (Şekil 3.29), (Sesigür vd., 2007).

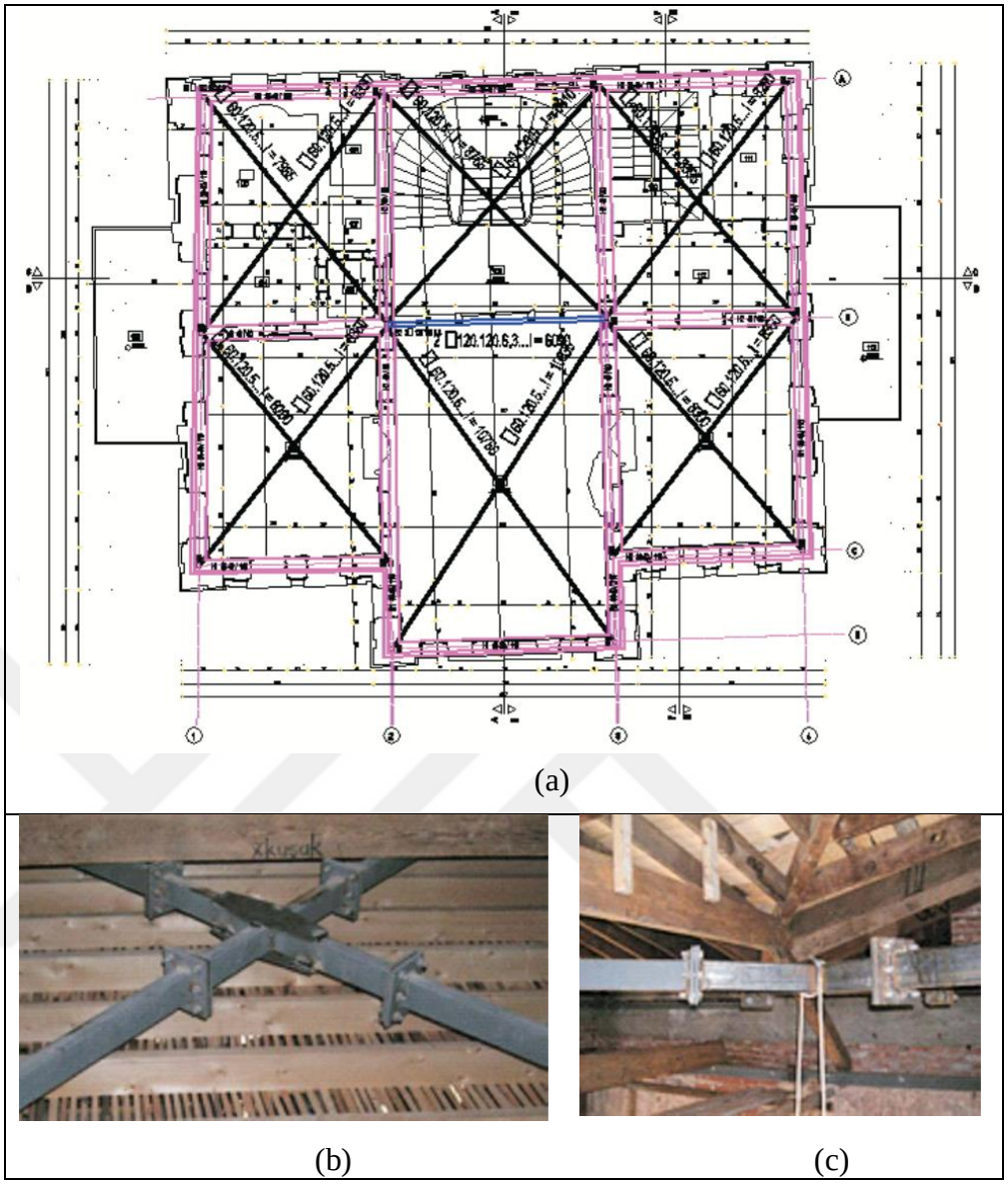


Şekil 3.29. Sütunlarda Çatlak Onarımı (Sesigür vd., 2007)

Döşemeler: Döşemeler deprem kuvvetleri altında diyafram davranışı göstererek oluşan yatay kuvvetleri mesnetlerinde bulunan taşıyıcı elemanlara aktarmaktadırlar. Rijitliği az olan döşemelerin güçlendirilmesi gerekmektedir. Bunun için döşeme düzleminde yapıya ilave yük oluşturmayacak şekilde ahşap veya çelik elemanlar ile çaprazlar yapılarak döşeme rijitliği artırılabilmektedir (Şekil 3.30. a, b, c), (Sesigür vd., 2007).

Kemerler – Tonozlar: Kemer ve tonozlarda görülen en önemli hasar türü mesnet itkilerinden kaynaklanmaktadır. Mesnet itkisine bağlı olarak elemanlarda çekme çatlakları, mesnetlerde mafsal oluşumu ve mesnetlerde ezilme ve kopmalar görülmektedir. Bu nedenle itki kuvvetleri sonucunda mesnet bölgesinde oluşan çekme kuvvetlerinin alınması ve güvenli şekilde zemine yönlendirilmesi gerekmektedir. Ezilen, düşen ve yer değiştiren yapı elemanları yenilerek oluşan çatlakların enjeksiyon harçları ile doldurularak gergilerin bakım ve onarımlarının yapılması gerekmektedir (Şekil 3.31), (Sesigür vd., 2007).

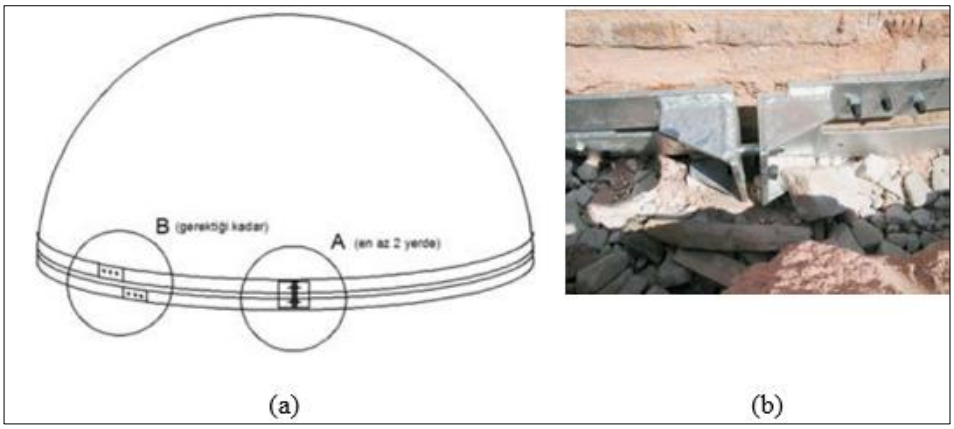
Kubbeler: Kubbelerde meydana gelen en genel hasar biçimi çekme kuvvetlerinden dolayı kubbe eteğinde oluşan çekme çatlaklarıdır. Kubbenin formu nedeniyle oluşan çekme kuvvetlerinin alınması için etek çevresinde paslanmaz çelik malzemeden çekme çemberi oluşturması uygun olacaktır (Şekil 3.32a, b), (Sesigür vd., 2007). Kubbe eteklerinde çatlak bulunmaması durumunda koruyucu amaçlı olarak oluşacak çekme kuvvetlerini almak için FRP kullanılması önerilmektedir (Sesigür vd., 2007).



Şekil 3.30. (a) Çelik çaprazlar ile döşemenin rijitleştirilmesi (Sultan Abdülaziz Av Köşkü, İzmit), (b) ve (c) Çapraz eleman detayları (Sultan Abdülaziz Av Köşkü, İzmit) (Sesigür vd., 2007)



Şekil 3.31. Kemerlerde Gergi Düzenlemesi ve Mesnetlerin Sabitlenmesi (Roma Forumu'nda Yapı), (Sesigür vd., 2007)



Şekil 3.32. (a) Kubbe Eteğinde Çekme Çemberi Düzenlemesi (b) Çekme Çemberi Detayları (Ahi Çelebi Camisi), (Sesigür vd., 2007)

3.3.6. Üst Yapının Toptan Güçlendirilmesi

Tekil elemanlarda yapılan güçlendirmeler, tüm yapının taşıyıcı sistem davranışına olumlu yönde katkı sağlamaktadır. Ancak yapının toptan güçlendirilmesi aşamasında yapının genel davranışı göz ardı edilerek uygulama yapılması durumunda, taşıyıcı sistem davranışı olumsuz etkilenmektedir. Bunun en temel nedeni, kâgir taşıyıcı sistemin içine farklı davranış özelliklerine sahip betonarme veya çelik iskelet sistemlerinin eklenmesiyle, yapının kompozit davranış göstermesinden kaynaklanmaktadır. Bu uygulamaların yapıda estetik kayba neden olduğu ayrıca geriye dönüşü mümkün olmadığı uygulamacılar tarafından bilinmelidir (Sesigür vd., 2007). Üst yapının toptan güçlendirilmesi için uygulanabilecek yöntemler şu şekilde sıralanabilir.

Yapı Üzerinden Fazla Ağırlığın Kaldırılması: Kubbeler ve tonozlarda fazla olan ağırlıkların kaldırılarak daha hafif malzeme ile yenilenmesi gerekmektedir. Bu şekilde yapının ağırlığı düşürülerek deprem yükleri altında taşıyıcı sisteminin davranışını olumlu yönde etkileyecektir (Şekil 3.33.a, b), (Sesigür vd., 2007).



Şekil 3.33. (a) Ağır Çatı (Arastalı Bedesten, Tokat) (b) Çatıda Toprak Dolgu (Arastalı Bedesten, Tokat) (Sesigür vd., 2007)

Yapı ve Eklentileri Arasındaki Etkileşimin İyileştirilmesi: Ana kütle ile etkileşimi zayıf ve sonradan yapılan eklentiler arasında mümkün oldukça arada derz oluşturması gerekmektedir. Ancak mevcut durumda bu yöntem teknik olarak mümkün olmamakla birlikte yeniden yapım aşamalarında dikkate alınmalıdır (Sesigür vd., 2007).

Kütle ve Rijitliğin Yapı İçindeki Dağılımının Dengelenmesi: Tarihi yapılar genellikle simetrik planlı olduklarından rijitlik ve kütle dağılımları ideale yakındır. Ancak zaman içinde yapılan ilave ve düzenlemeler ile bu özelliği bozulmuş olabilir. Bu durumda yapıda gerekli yerlerde derzler oluşturarak yapının burulma düzensizliği azaltılabilmektedir (Sesigür vd., 2007).

Hal Tipi Yığma Yapıların Güçlendirilmesi: Dört cephesinde kâgir duvar bulunan ve üst örtüsü ahşap veya çelik çatı makaslarından oluşan hal tip yapıların güçlendirilmesinde, çatıya mesnetlik yapan cephe duvarlarında stabilitenin arttırılarak çatı elemanlarının alt başlık seviyesinde birbirlerine bağlantılarının sağlanması gerekmektedir (Sesigür vd., 2007).

Kemer-Tonoz ve Kubbe Arasındaki Etkileşimin Artırılması: Kemer, tonoz ve kubbelerin alt yapı ile bağlantılarının; üzengi, mesnet ve etek kotundaki mevcut gergilerinin yeterliliğini yitirmiş olanlarının yenilenmesi ve gerek duyulan yerlerde payandalar düzenlenerek elemanlar arasındaki etkileşimi arttırılması gerekmektedir (Sesigür vd., 2007).

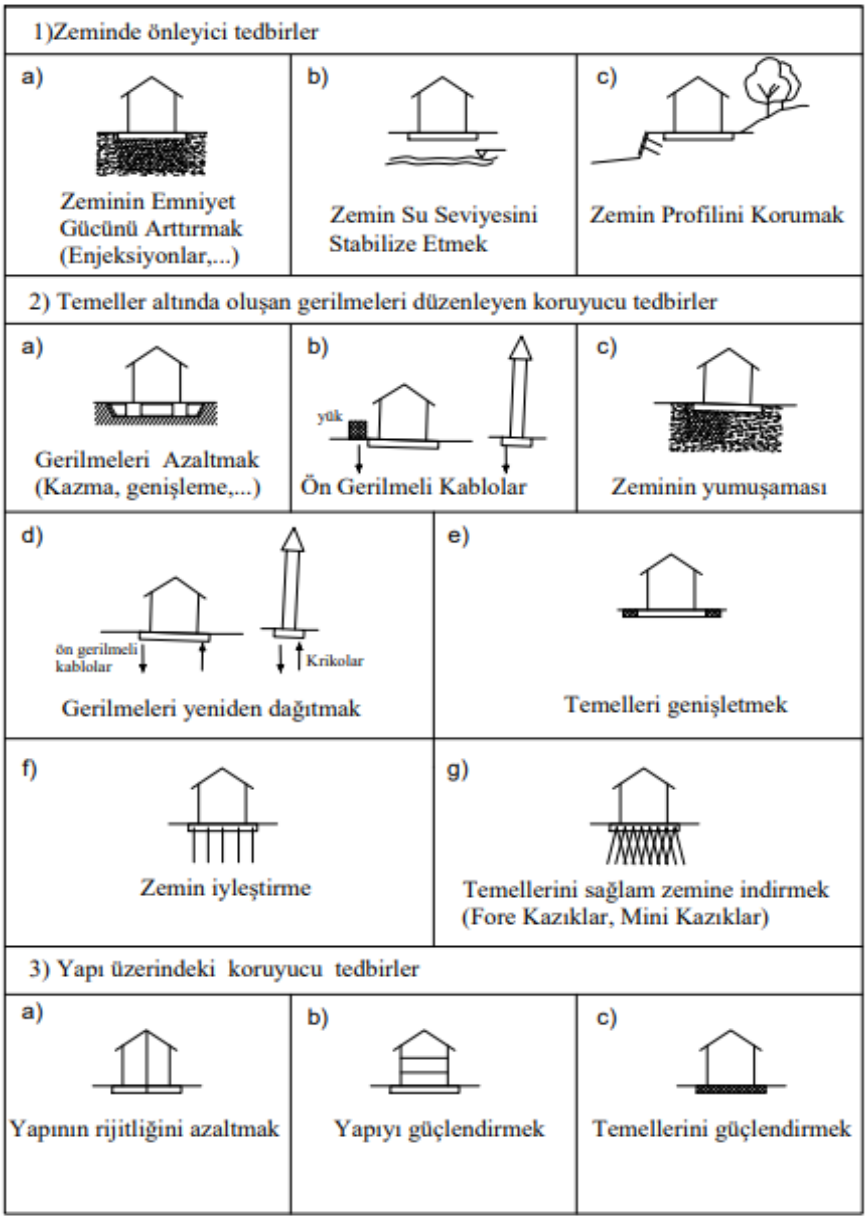
Sismik Yalıtım: Sismik yalıtımın temel ilkesi deprem sonucu oluşan titreşimlerin üst yapıya periyotları uzatarak aktarılması ve böylece daha az deprem yükü etkimesinin sağlanmasıdır. Anıtsal değeri yüksek olan ve depreme karşı yeterli dayanımı olmayan yapılarda sismik yalıtım kullanılabilmektedir (Sesigür vd., 2007).

Temel Sisteminin Güçlendirilmesi: Kâgir yapıların oturdukları zeminler, yapının kendi ağırlığını uzun süreler boyunca taşıdığından, kohezyonlu zeminlerde oturmaların sona erdiği düşünülmektedir. Zemin etütleri sonucunda sıvılaşma riski olan zeminlerin ortaya çıkması durumunda bu tür zeminlerde koruyucu önlemler alınması gerekmektedir. Mevcut yeraltı su seviyesinin mevsimsel değişikliklerle birlikte sürekli gözlemlenmesi ve drenaj sisteminin mutlaka kurulması gerekmektedir. Yapıda oluşan farklı oturmalar ayrıntılı olarak incelenmelidir. Temel sisteminin güçlendirilmesi, temel tipine uygun olarak temel genişliklerinin arttırılması, kuyu veya keson temel yapılarak

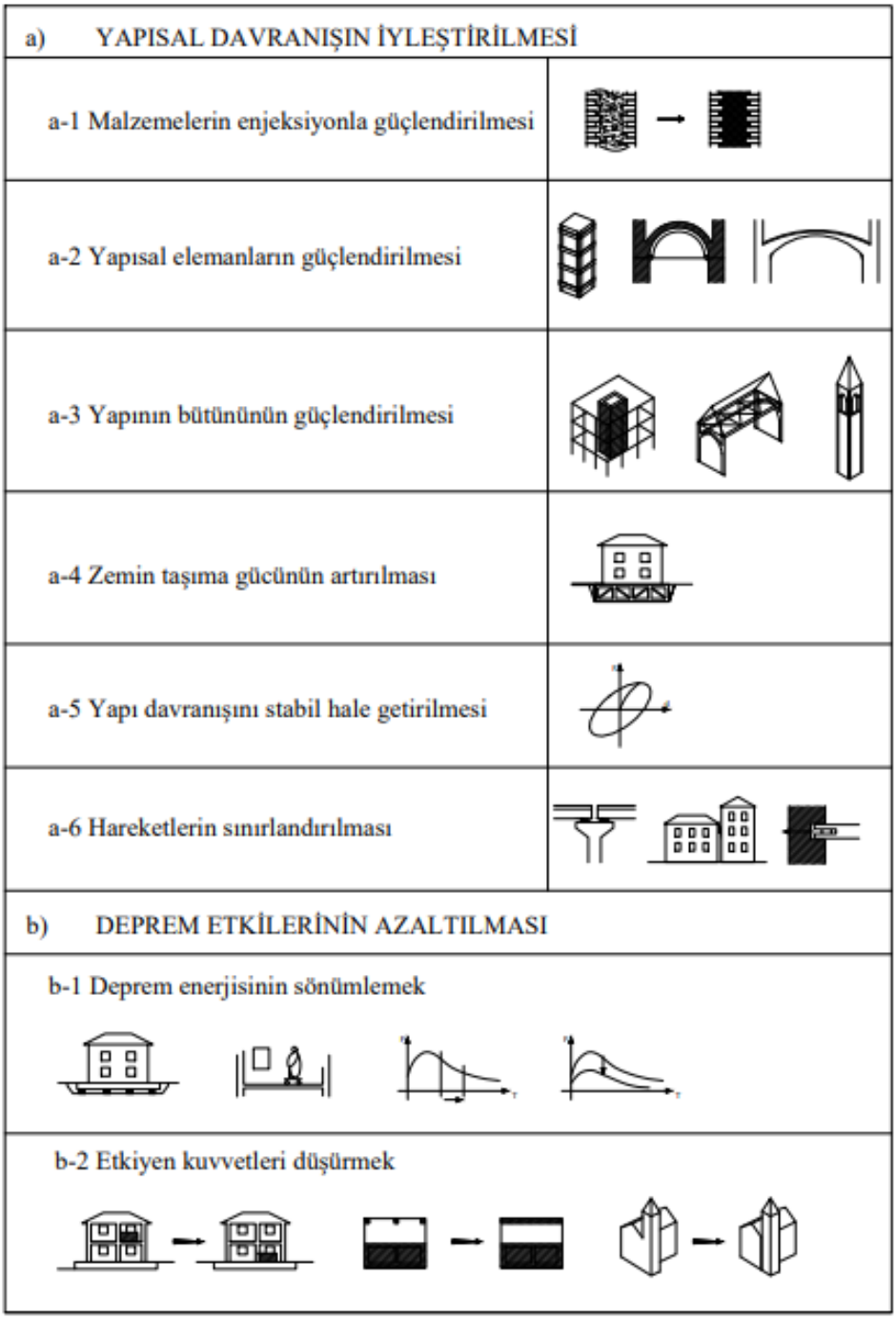
temel yüklerinin daha derinlerde bulunan sağlam zemin tabakalarına aktarılması şekline yapılabilmektedir (Sesigür vd., 2007).

3.4. Onarım ve Güçlendirme Sistematikler

Kâgir yapılarda meydana gelen bozulma ve hasarların, oluşum biçimleri ve nedenleri araştırılarak, önleyici tedbirler alınabilmektedir. Önleyici tedbirler alınarak, oluşan hasarların bakım ve onarım yapıldığı takdirde yapının güvenliğinin sağlanmasının yanında, hasarın tekrardan oluşması da önlenebilecektir. Bunun için geliştirilen sistematikler Şekil 3.34 ve Şekil 3.35'te verilmektedir.



Şekil 3.34. Önleyici Tedbirler (Croci, 1998)



Şekil 3.35. Onarım ve güçlendirme yöntemleri (Croci, 1998)

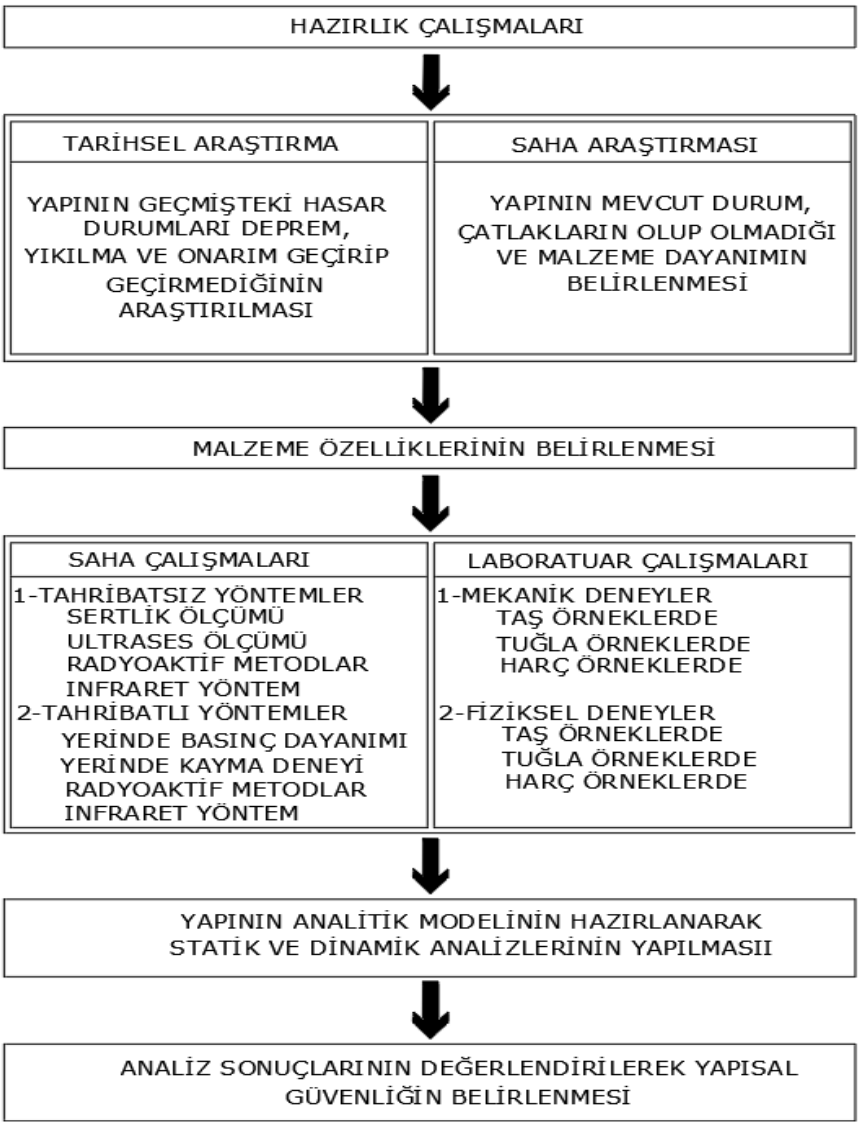
BÖLÜM 4.

TARİHİ KÂGİR YAPILARDA ÇAĞDAŞ RESTORASYON UYGULAMALARINA YÖNELİK ONARIM VE GÜÇLENDİRME YÖNTEMLERİNİN BELİRLENMESİ

Tarihi kâgir yapıların mevcut durumlarının tespit edilmesi ve muhtemel deprem riskleri altındaki davranışının belirlenmesi için Şekil 4.1'de belirtilen süreçlerin sırası ile gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

- Hazırlık çalışmaları; Yapı hakkında genel bilgi toplanılır. Yapının tarihi gelişim süreci arşivlerden detaylı olarak araştırılmalı, yapı strüktürün incelenmesi daha önceki dönemlerde meydana gelen hasarlar, yapılan müdahaleler ve türleri, yapı temeli, zemin yapısı, yapısal hareketler deneysel ve gözlemsel olarak tespit edilmelidir.
- Malzeme özelliklerinin belirlenmesi; Yapı strüktürünü oluşturan malzemelerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin tahribatsız ve tahribatlı yöntemler ile belirlenmesidir.
- Yapının analitik modelinin hazırlanması; Yapının rölöve çizimlerinin hazırlanması, mevcut hasarların tespiti, malzeme ve modelleme kabullerinin yapılması, strüktür sistemde yük taşıma ve dağılımlarının belirlenmesi, yapının analitik modelinin oluşturulması, yapıya etkiyecek yüklerin belirlenerek oluşturulan modelin statik ve dinamik analizlerinin yapılmasıdır.
- Yapılan analiz sonuçlarının değerlendirilerek onarım ve güçlendirme kararlarının alınması; Elde edilen analiz sonuçları incelenerek mevcut hasarlar ile hasar oluşması beklenen bölgelerin karşılaştırılması, ortaya çıkan gerilmeler ile yönetmelikler

çerçevesinde izin verilen gerilmelere göre muhtemel hasar oluşabilecek bölgelerin belirlenmesi, belirlenen bu bölgelerde uygulanabilecek onarım ve güçlendirme yönteminin tespiti, alınan yöntemin güvenirliliğinin tahkik edilmesidir.



Şekil 4.1. Çalışma süreçleri

4.1. Hazırlık Çalışmaları

Yapının saha ve arşiv araştırmaları yapılarak, hasar geçmişi, yapılmış olan onarım ve güçlendirmeler, taşıyıcı sistemi, malzeme özellikleri ve mevcut durumu hakkında bilgi toplanılmasıdır. Taşıyıcı sistemde gerek duyulması halinde yapıya zarar verilmeden basit sondajlar yapılarak kameralar yardımı ile daha detaylı incelemeler yapılabilmektedir.

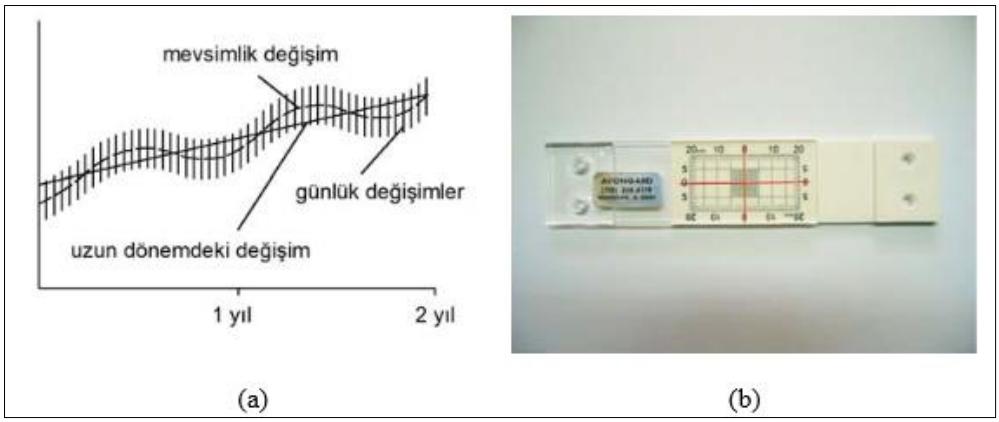
Yapının mevcut durumunu gösterir rölövesi hazırlanarak taşıyıcı sistemi üzerinde tespit edilen tüm bozulma ve hasarların ayrıntılı bir şekilde işaretlenmesi ve tespit edilen

tüm çatlaklar ve yer değiştirmeler izleme altına alınarak hasarların gelişimi ve ilerleyişi hakkında genel bilgilerin elde edilmesi gerekmektedir. Bu bilgiler gözlemsel ve deneysel çalışmalar yapılarak elde edilebilmektedir.

Gözlemsel Çalışmalar: Yapıda zaman içinde oluşacak değişiklilerin izlenerek kayıt altına alınması için yapılan çalışmalardır. Bunlar iki şekilde yapılmaktadır (Aköz, 2005).

Bozulmaların İzlenmesi, Malzeme ve Temel Zemini Özelliklerinin Belirlenmesi: Yapıda tespit edilen bozulmaların izlenerek, taşıyıcı strüktürü oluşturan malzemelerin mekanik özellikleri ve temel zemin özelliklerinin belirlenmesidir.

Yapıdaki Önemli Hareketlerin Sürekli Kaydı: Yapılarda çatlak oluşması doğal bir durumdur. Çatlak oluşan bölgede yük dağılımı yeniden şekillenir. Çatlaklar çoğu zaman yapıya zarar vermezler ancak tespit edilen çatlakların boyutu ve ilerleme yönleri incelemeye alınarak çatlağın zaman içinde yapıya zarar verip vermeyeceği hakkında genel bir görüşe varılabilmektedir. Çatlakların genişliği yüke ve mevsimsel sıcaklık değişimlerine bağlı olarak değişebilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus, çatlak gelişiminin zaman içindeki gelişimidir. Bu nedenle tespit edilen çatlak genişlikleri belirlenen bir zaman aralığında izlemeye alınarak sabit kalıp kalmadığının incelenmesi gerekmektedir (Şekil 4.2. a, b).



Şekil 4.2 (a) Çatlak Genişliği Değişimi (b) Çatlak Genişliği Ölçüm Cetveli (Aköz, 2005)

Deneysel Çalışmalar: Yapı temel zeminin katmaları, yeraltı su seviyesinin izlenmesi ve zemin taşıma kapasitesinin belirlenmesi için yapılan çalışmalardır.

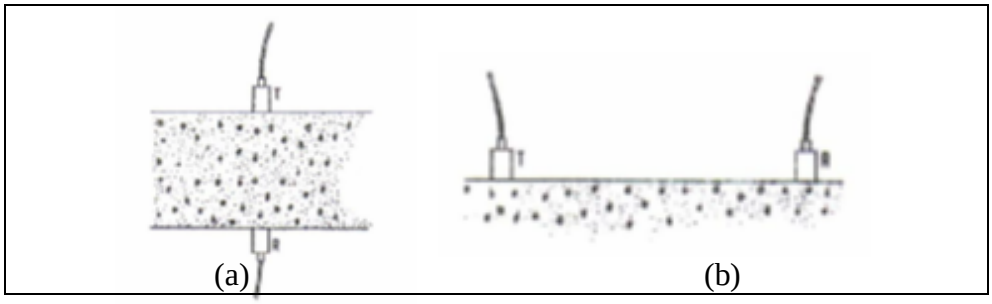
4.2. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Yapının analiz modelinin oluşturulabilmesi için taşıyıcı sistemi oluşturan malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için tahribatlı ve tahribatsız deney yöntemleri kullanılabilmektedir. Yerinde ve laboratuvar ortamında yapılan tahribatlı deney yöntemleri malzemelerin basınç dayanımı, çekme dayanımı, kayma dayanımı ve birim hacim ağırlıkları gibi özellikleri tam olarak belirlenirken, schmidt çekici ve ultrasess ölçüm gibi yapılan tahribatsız deney yöntemleri ile yaklaşık değerler tespit edilebilmektedir.

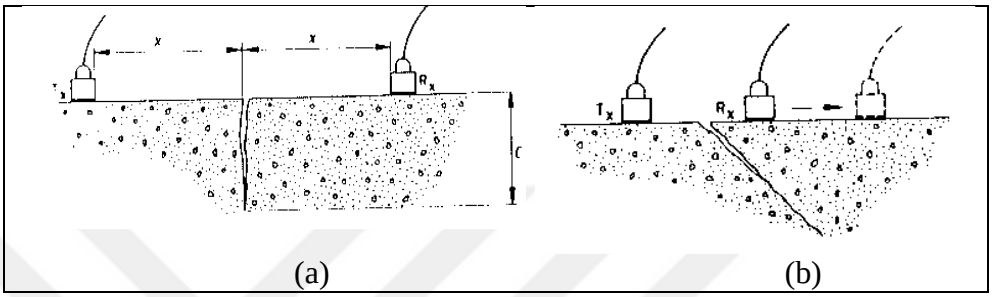
Tahribatsız Deney Yöntemleri: Kâgir yapıların malzeme özelliklerinin belirlenebilmesi için sertlik ölçümü, ultrases ölçüm, radyoaktif metodlar ve infrared tomografi gibi tahribatsız deney yöntemlerinden faydalanılmaktadır (Aköz, 2001).

Sertlik ve Ölçümü: Sertlik, malzemenin yüzeyine uygulanan kuvvete karşı gösterdiği tepkidir. Malzemeye zarar vermediği için tercih edilmektedir. Bu yöntemle malzemenin kökeni ve içyapısı hakkında genel bilgiler elde edilebilir. Kâgir yapıları oluşturan doğal taş, tuğla ve harç gibi malzemelerde kolayca uygulanabilmektedir. Sertlik ölçümünde N tipi veya P tipi Schmidt çekiçleri kullanılmaktadır. Cisme uygulanan kuvvete göre ölçülen geri tepmenin büyüklüğüne göre cismin sertliği ölçülmektedir. Uygulamada yüzey sertliğinin belirlenmesi için kullanılan standarta "ASTM C805" göre eleman yüzeyinde farklı noktalarda en az 10 vuruş yapılarak elde edilen değerlerden en büyük ve en küçük değerlerin dışında kalanların ortalaması ile bulunan R değerine karşılık gelen dayanım bulunmaktadır (Postacıoğlu,1981).

Ultrases Ölçümü: Cisim yüzeyine yerleştirilen piezoelektrik transduser ile gönderilen ses dalgalarının alıcı transduser tarafından alım süresi ve hızının ölçülmesidir (Şekil 4.3. a, b). Elde edilen veriler doğrultusunda cismin yoğunluğu ve dayanımı hakkında bilgiler elde edilebilmektedir (Postacıoğlu,1981). Aynı zamanda ultrases aleti ile ses geçiş süreleri incelerek çatlakların varlığı ve özellikleri de belirlenebilmektedir (Şekil 4.4. a, b).



Şekil 4.3. (a) Doğrudan Ölçüm, (b) Dolaylı Ölçüm (Postacıoğlu,1981)



Şekil 4.4. (a) Çatlak derinliği araştırması (b) Çatlak yönünün araştırılması (Postacıoğlu,1981)

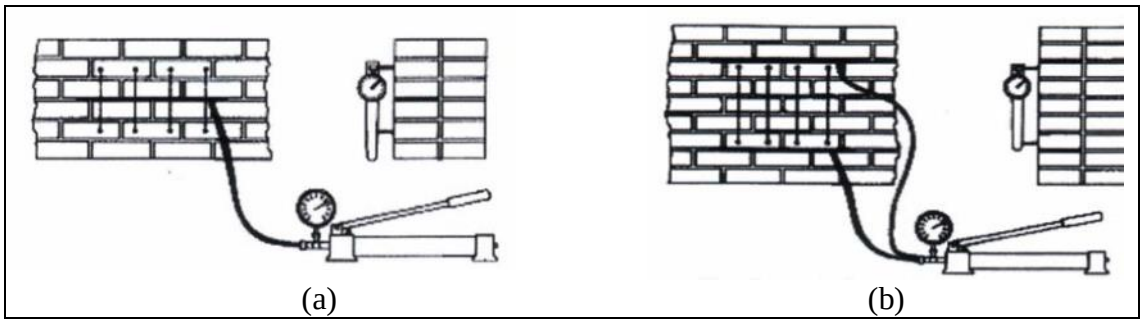
Radyoaktif Metodlar: Malzeme içinden elektromanyetik radyasyonun geçiş hızının ölçülmesi yöntemine radyoaktif metod yöntemi denilmektedir (Carino,1991).

İnfrared Tomografi Yöntemi: Kızılötesi ışınlar yardımı ile oda sıcaklığında bulunan yüzeylerdeki oluşan elektromanyetik radyasyon yayılımı ile kusurlu bölgelerin belirlenmesidir. Elemanda oluşan ısı akışı yönüne göre kusurlu olan bölgeler tespit edilebilir. Uygulamada yüzey sıcaklığını ölçen infrared tarayıcılar kullanılmaktadır (Carino,1991).

Tahribatlı Deney Yöntemleri: Tahribatsız yöntemler ile yapılan deney yöntemleri kesin sonuçlar vermezler. Bu nedenle malzeme özelliklerinin kesin olarak elde edilebilmesi için belirleyici bazı testlerin yapılmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Uygulanacak deney yöntemlerinde mümkün olduğunca küçük ve görünebilir materyallerin kullanılması ve deney yönteminin, yapıya mümkün oldukça az zarar verecek ve basitçe uygulanabilir olması gerekmektedir. Çalışmada bu yöntemler yerinde basınç ve kayma deneyleri ile yapıdan numune almak olarak üç başlıkta ele alınmaktadır.

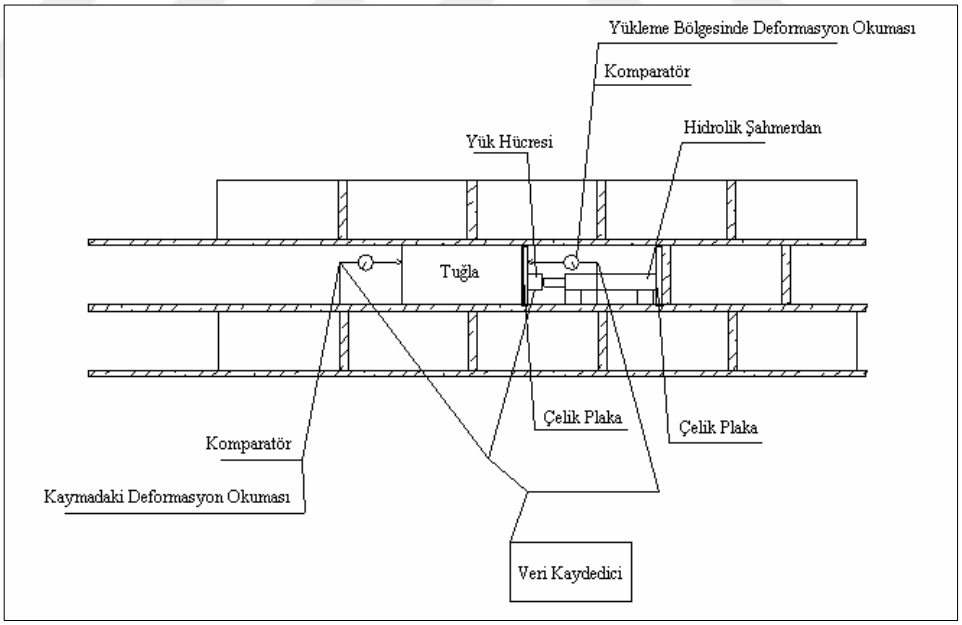
Yerinde Basınç Deneyi: Kâgir yapılarda flatjack deney düzeneği ile yerinde basınç deneyleri yapılabilmektedir. Deney düzeneği, ASTM C 1196-92 (Reapproved 1997)'ye uygun olarak, elemana basınç uygulayan bir kompresör ve basınç ölçer yardımı

ile uygulanan kuvvete karşılık meydana gelen yer değiştirmenin ölçülmesi prensibine dayanmaktadır (Şekil 4.5. a, b). Yapılan deney sonucunda elde edilen gerilme ve şekil değiştirmelere bağlı olarak malzemenin elastisite modülü hesaplanabilmektedir (Aköz, 2001).



Şekil 4.5. .(a) Tek plak ile ölçüm, (b) Çift plak ile ölçüm (Aköz, 2005)

Yerinde Kayma Deneyi: Kâgir yapılarda kayma dayanımının Şekil 4.6'de gösterildiği üzere, ASTM C 1531-03'e uygun olarak, elemana kuvvet uygulayacak bir kompresör, kuvvet ve deplasman ölçerler yardımı ile oluşturulan kayma kuvvetine karşılık oluşan deplasmanın ölçülmesi prensibine dayanmaktadır (Aköz, 2001).



Şekil 4.6 Yerinde Kayma Deneyi (Aköz, 2005)

Yapıdan Numune Alınması: Kâgir yapılarda TS 10465'de uygun olarak karot numuneleri alınmaktadır. Ancak malzeme boyutları karot alınması için uygun değil ise laboratuvar deneyleri yapmak için yeteri sayıda malzeme örneklerinin alınması gerekmektedir. Bunların üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmaktadır.

Laboratuvar Çalışmaları: Kâgir yapılardan alınan malzeme örnekleri üzerinde mekanik ve fiziksel deneyler yapılmaktadır. Ayrıca onarım ve güçlendirme malzemelerinin seçiminde özgün malzeme ile uyumluluğu sağlamak amacı ile içyapı analizleri gerçekleştirilmektedir. Bunlar taş ve tuğla örneklerde yapılan mekanik deneyler ve taş, tuğla ve harç örneklerinde yapılan fiziksel deneylerdir.

Taş Örneklerde Mekanik Deneyler: Taş malzeme örnekleri üzerinde TS EN 1926'ya göre tek eksenli basınç deneyi yapılarak malzemenin basınç dayanımı belirlenmektedir.

Tuğla Örneklerde Mekanik Deneyler: Tuğla malzeme örneklerin üzerinde TS 4563 ve TS 705'e uygun olarak tek eksenli basınç deneyi yapılarak basınç dayanımı belirlenmektedir.

Taş, Tuğla ve Harç Örneklerde Fiziksel Deneyler: Malzemelerin kılcal su emme, ağırlıkça su emme, boşluklu birim hacim ağırlıkları belirlenmektedir (Saraylı,1978).

4.3. Modelleme İlkeleri ve Analiz Yöntemleri

Kâgir yapıların modellenmesinde farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Ancak genel yaklaşım olarak öncelikle yapının genel davranışını anlamak açısından, malzemede idealleştirme yapılarak, taşıyıcı sistem için basitleştirici kabullerin yapıldığı makro modellemedir (Aköz, 2008; Dabanlı, 2008; Koçak, 1999). Yapılan basitleştirici kabuller sebebiyle elde edilen sonuçlar ve grafik sonuçların karşılaştırılarak yapının genel davranışı hakkında bir fikir elde edilebilmektedir. Elde edilen bu değerlerin mutlak doğrulukta olduğunun kabul edilmesi, sadece yol gösterici olduğunun bilinmesi gerekmektedir.

Yapılacak olan model türünün ve hassasiyetinin belirlenmesinde;

- Yapılacak modellemede malzeme ve geometrik idealleştirmeler oldukça basit ve anlaşılır olmalıdır. Modellemeye başlamadan önce, yapının yük taşıma mekanizmasının doğru bir şekilde incelenerek taşıyıcı sistemin davranışı temsil edecek en doğru modelleme yöntemi belirlenmelidir. Modellemede yapı elemanlarının konumları ve geometrik şekillerine uygun olacak şekilde, yapının genel davranışını temsil edecek sadeleştirmeler yapılmalıdır. Karmaşık modeller yerine,

daha kolayca oluşturulabilen ve kısa sürede analiz edilebilecek basit modelleme seçenekleri kullanılmalıdır.

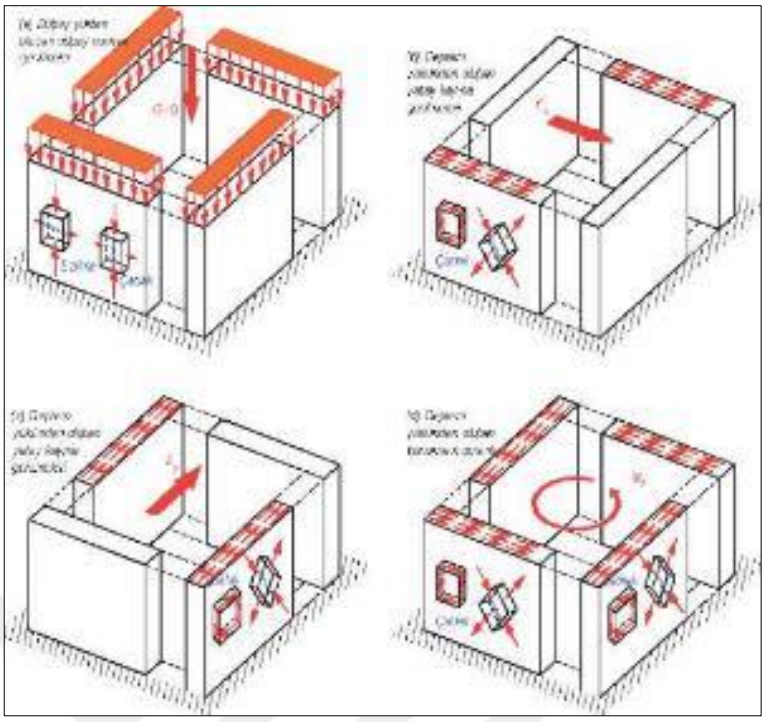
- Modellemede çubuk ve yüzey elemanlar kullanılabilir. Ancak yüzey elemanlar kullanılması durumunda kalınlıklarına bağlı olarak gerilme dağılımları ayrıca incelenmelidir. Bu nedenle model oluştururken birim eleman boyutu ve eleman narinlikleri dikkate alınmalıdır.
- Yapılan modellemede yapı davranışını en iyi temsil eden modelin belirlenebilmesi için farklı analitik modeller uygulanarak farklı seçenekler üzerinde çözümler yapılmalıdır.

4.3.1. Modelleme İlkeleri

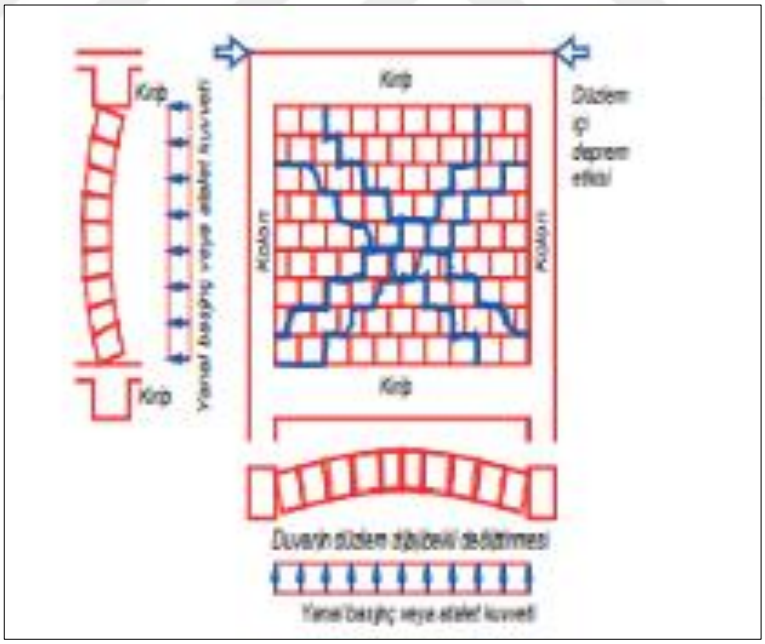
Çalışmada, basit duvar, eşdeğer çerçeve ve sonlu elemanlar modellerinin ilkeleri incelenmektedir.

Basit Duvar Modeli İlkesi: Kâgir yapılardaki taşıyıcı eleman kesitleri etkiyen yükler dikkate alındığında oldukça büyüktür. Yük taşıma mekanizmasına göre duvarlar ve ayaklar ana taşıyıcılardır. Duvarlar düşey yükler ve yatay yüklere maruz kalmaktadır. Bunun sonucunda duvarlarda düzlem içi ve düzlem dışı etkiler meydana gelmektedir. Duvarlarda, düzlem içi kuvvetler sonucunda basınç kuvvetleri oluşurken, düzlem dışı kuvvetler sonucunda kesme kuvveti ve eğilme momentleri oluşmaktadır (Şekil 4.7). Bu modelde, düşey kuvvetlerin tüm duvarlardaki düzlem içi basınç gerilmeleri ile yatay kuvvetlerin ise etkime yönündeki duvarlardaki düzlem içi kesme gerilmeleri ile karşılandığı kabul edilmektedir (Şekil 4.8), ("TYDRYK 2017," 2017)

Hesaplamalarda, düşey yükler ile birlikte her iki doğrultudaki deprem kuvvetleri dikkate alınarak, duvarlarda oluşan normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri bulunmaktadır. Bulunan bu gerilmeler ile duvar malzemesinin normal ve kayma gerilmeleri kontrol edilerek yapının güvenliği belirlenmektedir.

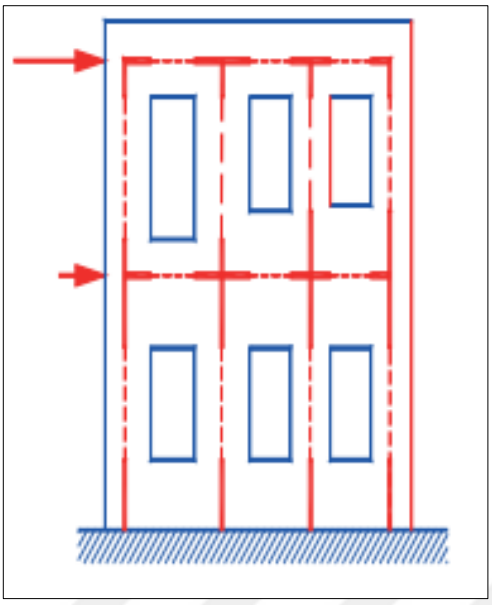


Şekil 4.7 .Yığma duvarlı yapılarda duvarlarda meydana gelen normal kuvvetler ve kesme kuvvetleri ("TYDRYK 2017", 2017)



Şekil 4.8. Duvar düzlem içi ve dış etkileri ("TYDRYK 2017", 2017)

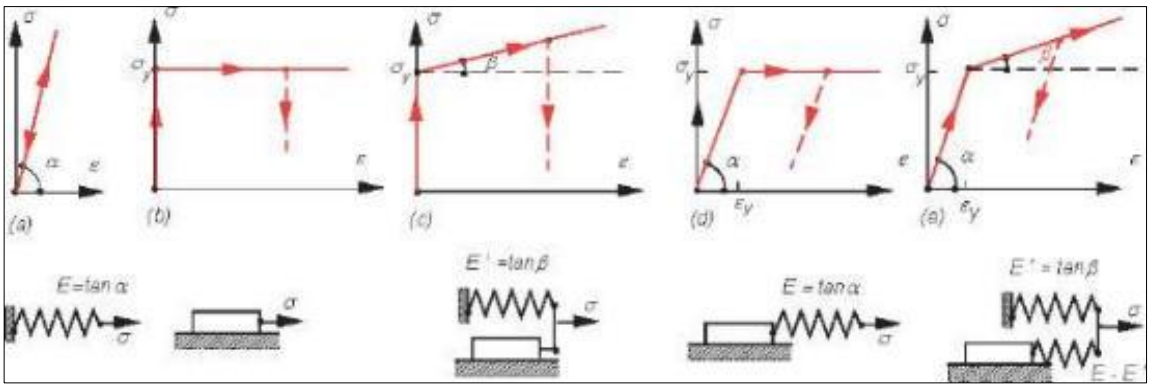
Eşdeğer Çerçeve Modeli İlkesi: Bu yöntem duvar elemanlarının eğilme ve kesme davranışlarını idealize edecek şekilde çubuk elemanlara dönüştürülmesi ile oluşturulan modellemek yöntemidir (Şekil 4.9).



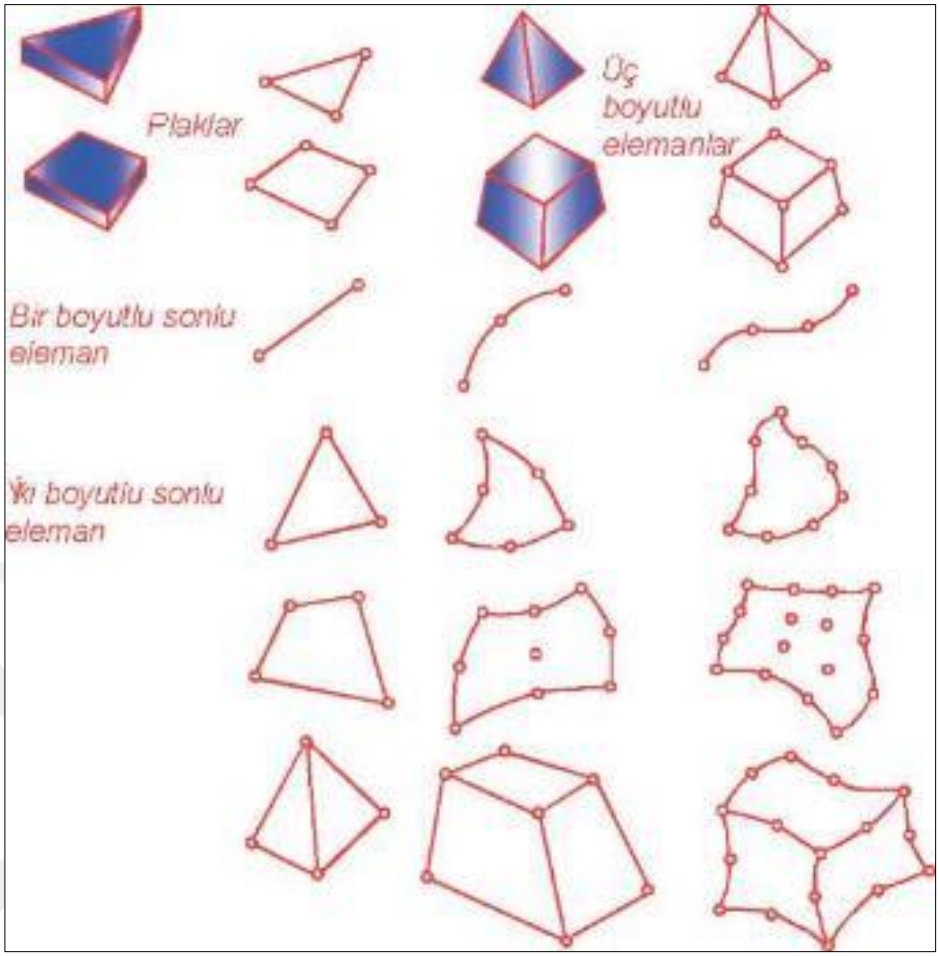
Şekil 4.9. Yığma yapıda çubuk elemanlar ("TYDRYK 2017", 2017)

Sonlu Elemanlar Modeli İlkesi: Yapı elemanlarının sonlu parçalara ayrılarak, düğüm noktalarındaki yer değiştirmeleri çeşitli malzeme türlerine göre gerilme ve şekil değiştirme denklemleri yardımı ile çözümü yapılan modelleme yöntemidir (Şekil 4.10), ("TYDRYK 2017", 2017).

Bu yöntemde bir boyutlu (çubuk.) sonlu elemanlar, iki boyutlu (kabuk) sonlu elemanlar ve üç boyutlu (solid) sonlu elemanlar kullanılarak modelleme yapılabilmektedir (Şekil 4.11), ("TYDRYK 2017," 2017).



Şekil 4.10. Çeşitli malzeme türlerine göre sonlu eleman modelleri ("TYDRYK 2017", 2017)



Şekil 4.11. Sonlu eleman türleri ("TYDRYK 2017", 2017)

Kâgir yapılarda taşıyıcı strüktür elemanları modellemek için,

- Eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve burulma momenti oluşan kirişler, sütunlar ve gergiler bir boyutlu çubuk eleman olarak,
- Düzlem içi ve düzlem dışı etkilere maruz tonoz ve kubbeleri iki boyutlu yüzeysel eleman olarak,
- Taşıyıcı duvar ve ayak gibi kalın taşıyıcı elemanları üç boyutlu hacimsel elemanlar olarak seçilmeleri gerekmektedir.

4.3.2. Analiz Yöntemleri

Kâgir yapılarda, statik ve dinamik yükler etkisi altında oluşacak kesit etkilerinin bulunmasında, doğrusal statik analiz, zaman tanım alanında doğrusal analiz ve doğrusal olmayan analiz yöntemleri kullanılabilmektedir ("TBDY 2018," 2018).

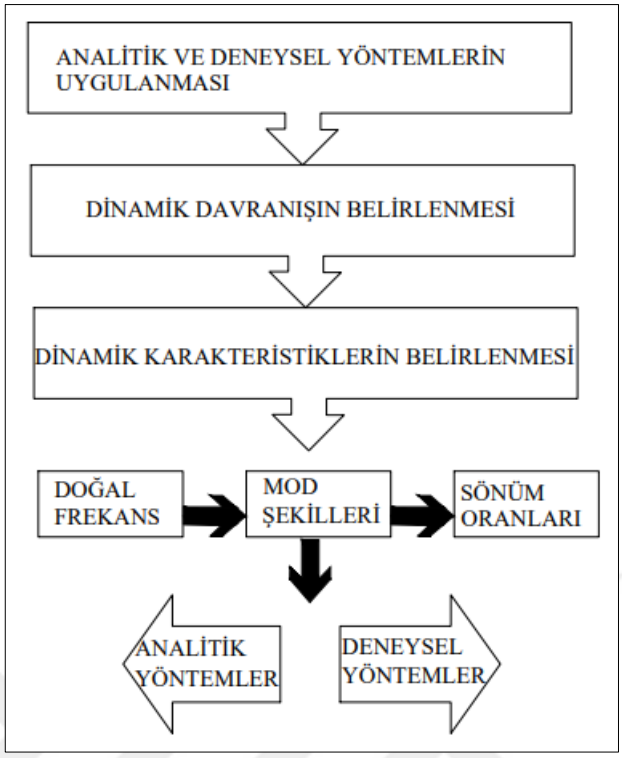
Doğrusal Statik Analiz (Tek ve Çok Modlu): Kâgir yapılarda doğrusal statik analiz en çok kullanılan hesap yöntemidir ("TBDY 2018," 2018). Bu yöntem tek modlu olan Eşdeğer Deprem yükü yöntemi ve çok modlu olan Mod Birleştirme yöntemi olarak ta bilinmektedir. Deprem hesabı için yapının bulunduğu bölge ve zemine uygun spektrum değerleri AFAD'ın deprem yer hareketlerinden elde edilmektedir. Deprem azaltma katsayısı Kâgir yapılarda R=3, minareler gibi sistemlerde R=2 alınarak deprem hesapları yapılmaktadır. Yapının doğal titreşim periyodu yazılımlar tarafından hesaplanabildiği gibi yaklaşık denklemler ile de hesaplanabilmektedir. Bulunan periyoda göre deprem kuvvetleri bulunmaktadır. Hesaplamalar sonucunda ortaya çıkan mod şekillerin, yapının deprem davranışını ve deprem etkisinde ortaya çıkan gerilme ve yer değiştirmelerin yoğunlaştığı bölgeleri göstermektedir (Dabanlı, 2008).

Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analiz: Yapının seçilen bir ivme kaydı altında sayısal çözümlemesidir. Bu yöntemde yönetmeliklerde belirtilen spektrumla uyumlu seçilecek belirli sayıdaki deprem kaydının ölçeklendirilmesi sonucunda elde edilen ivme değerinin belli zaman aralığında yapıya uygulanmasıdır (Dabanlı, 2008).

Doğrusal Olmayan Analiz: Doğrusal olmayan artımsal itme analizi ile taşıyıcı elemanların elastik ötesi davranış altında mafsallaşarak göçme mekanizmasının incelenmesidir. Analizde duvarlar çapraz çubuk veya kabuk eleman olarak modellenebilmektedir (Dabanlı, 2008).

4.3.3. Yapı Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi

Yapının deprem etkisi altındaki davranışını belirlemek için yapının doğal titreşim periyodu, sönüm oranının ve mod şekillerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu büyüklükler analitik veya deneysel yöntemler ile belirlenebilmektedir (Şekil 4.12), (Şekil 4.13), (Bayraktar vd., 2010).



Şekil 4.12. Yapı dinamik özelliklerinin belirlenmesi (Bayraktar vd., 2010)

Analitk Yöntem		**Deneysel Yöntem**		
Sonlu Elemanlar Yöntemi		Deneysel Model Analiz Yöntemi		
Serbest Titreşim Analizi		Çevresel Titreşim Testi	Zorlanmış Titreşim Tesi	
Doğal Frekanslar	Mod Şekilleri	Doğal Frekanslar	Mod Şekilleri	Sönüm Oranları

Şekil 4.13. Analiz sonuçları (Bayraktar vd., 2010)

Analitik Yöntem: Kâgir yapıların doğal frekansları oluşturulacak analitik modeller yardımı ile belirlenebilmektedir. Yapılan analizler sonucunda yapıların doğal frekanslar ve mod şekilleri elde edilerek, yapının dinamik davranışı hakkında genel fikir sahibi olunmaktadır. Genel olarak yapıların modal davranışında, yapının özelliklerine bağlı olarak birinci ve ikinci modda enine ve boyuna yönlerde hareket, üçüncü modda ise burulma olması beklenilmektedir. Bunun için bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme yapılarak analizler yapılabilmektedir.

Deneysel Yöntem: Yapının dinamik özellikleri analitik yöntemler ile belirlendikten sonra hazırlanan modelin doğruluğu ve kalibrasyonun yapılabilmesi için yapı üzerinde titreşim testlerinin yapılması gerekmektedir. Yapılar üzerinde direkt uygulanan kuvvetler veya çevresel etkiler sonucu oluşan titreşimler ölçülerek yapının dinamik özellikleri tespit edilebilmektedir. Yöntem titreşim kuvvetinin bilinmesine bağlı

olarak deneysel ve operasyonal modal analiz olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Uygulanan titreşim kuvvetinin bilinmesi durumunda deneysel modal analiz, bilinmemesi durumunda operasyonal modal analiz adı verilmektedir (Bayraktar vd., 2010).

4.3.4. Kesit Tahkikleri

Kâgir yapıların analizleri sonucunda elde edilen kuvvetler altında yapı elemanlarının kesit tahkiklerinin yapılması gerekmektedir. Bunun için yürürlükte olan (RYTİE 2019) Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar' da belirtilen hükümler doğrultusunda;

- Yapıya etkiyen düşey yükler ve deprem yükleri *(G + nQ ± E)* planda her iki doğrultu dikkate alınarak belirlenmesi.
- Tüm düşey elemanların kat kütleleri bağlandıkları katlara eşit olarak dağıtılması.
- Düşey yüklerin *(G ve Q)* TS 498'den alınarak, hareketli yük azaltma katsayısı *(n)* Çizelge 4.1'den alınacak şekilde yapısal analizler yapıldıktan sonra, Çizelge 4.2' belirtilen malzeme özellikleri dikkate alınarak sırası ile;
  1- Düşey yükler altında tahkik,
  2- Düzlem dışı yükler altında tahkik,
  3- Düşey ve deprem yükleri altında tahkikleri yapılması gerekmektedir.

Çizelge 4.1. Bina kullanım amacınca göre kullanılacak haraketli yük katsayısı

Bina Kullanım Amacı	Hareketli Yük Azaltma Katsayısı, *n*	Deprem Yer Hareketi Düzeyi
1. Deprem sonrası kullanımı gereken binalar, insanların uzun süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar, değerli eşyanın saklandığı binalar ve tehlikeli madde içeren binalar		
a) Deprem sonrasında hemen kullanılması gerekli binalar (Hastaneler, dispanserler, sağlık ocakları, itfaiye bina ve tesisleri, PTT ve diğer haberleşme tesisleri, ulaşım istasyonları ve terminalleri, enerji üretim ve dağıtım tesisleri, vilayet, kaymakamlık ve belediye yönetim binaları, ilk yardım ve afet planlama istasyonları)	0.3	DD-1*
b) Okullar, diğer eğitim bina ve tesisleri, yurt ve yatakhaneler, askeri kışlalar, cezaevleri, vb.	0.6	
c) Müzeler	0.6	
d) Toksik, patlayıcı, parlayıcı, vb. özellikleri olan maddelerin bulunduğu veya depolandığı binalar	0.6	
2. İnsanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar ve diğer binalar		
a) Alışveriş merkezleri, spor tesisleri, sinema, tiyatro, konser salonları, ibadethaneler, vb.	0.6	DD-2
b) Konutlar, işyerleri, oteller, bina türü endüstri yapıları, otopark, vb.	0.3	
c) Depo, antrepo, vb.	0.8	

* DD-2 için bulunan S_{DS} katsayısının 1.5 katının, DD-1 için bulunan S_{DS} katsayısından küçük olması durumunda, DD-1 yerine DD-2 deprem yer hareketi düzeyi 1.5 ile çarpılarak kullanılacaktır.

Çizelge 4.2. Kâgir yapı malzeme özellikleri (RYTİE, 2019)

Duvar Malzeme Türü	Basınç Dayanımı (MPa), f_m	Özgül Ağırlık (kN/m^3)	Kayma Dayanımı (MPa), τ_0		Diyagonal Çekme Dayanımı (MPa), $f_{dç}$	
			Görünür Kalite		Görünür Kalite	
			Kötü	Normal	Kötü	Normal
Düşey Delikli Tuğla	1.2	13	0.10	0.15	0.15	0.25
Dolu Tuğla veya Harman Tuğlası	1.4	18	0.10	0.15	0.12	0.18
Dolu Briket	1.2	15	0.12	0.18	0.15	0.25
Gazbeton	1.0	10	0.12	0.18	0.12	0.20
Taş Duvar	0.5	25	0.06	0.10	0.06	0.10

$$E_m = 600 f_m$$
$$G_m = 0.4 E_m \qquad 4.1$$

Duvarın elastisite modülü ve kayma modülü Denklem 4.1 ile hesaplanacaktır.

1- Düşey Yükler Altında Tahkik: Kâgir duvarda *(G+nQ)* yüklemesi altında bulunan düşey gerilmenin denklem 4.2'yi sağlamadığı durumda, duvar düşey yük ve deprem hesaplarında modele dâhil edilmesine rağmen Risk Sınırını aşan eleman olarak kabul edilmesi gerekmektedir.

$$\sigma \leq 0.65 \eta f_m \qquad 4.2$$

Duvar yüksekliğinin, duvar kalınlığına oranı (Hd/t) bağlı olarak basınç dayanımı azaltma katsayısı η Çizelge 4.3'e göre seçilmeli ve ara değerler için enterpolasyon yapılmalıdır (RYTİE, 2019).

Çizelge 4.3. Hd/t Oranına Bağlı Basınç Dayanımı Azaltma Katsayıları (RYTİE, 2019)

H_d/t	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
η	1.0	0.95	0.89	0.84	0.78	0.73	0.67	0.62	0.56	0.51

H_d Yığma duvar (hatıl hariç) net yüksekliği [mm]
t Çimento harçlı sıva dâhil yığma duvarın kalınlığı [mm]

2- Düzlem Dışı Etkiler İçin Tahkik: Yatay yükler altında düzlem dışı hareket riski bulunan duvarların tespit edilebilmesi için tamamen toprağın altında bulunan bodrum

katlar hariç her bir kattaki duvar parçalarının Hd/t oranı hesaplanacaktır. Çizelge 4.4'de verilen Hd/t risk sınır değerlerinden büyük Hd/t oranına sahip duvarlar düşey yük ve deprem hesaplarında modele dâhil edilecek ancak, Risk Sınırını aşan elemanlar olarak değerlendirilmektedir. Döşemeleri betonarme olmayan ve rijit diyafram davranışı göstermeyen katlardaki duvar parçaları için Çizelge 4.4'de verilen Hd/t sınır değerleri 0.55 ile çarpılarak kullanılmaktadır (RYTİE, 2019).

Çizelge 4.4. Duvar Hd/t Oranına Göre Risk Sınırları (RYTİE, 2019)

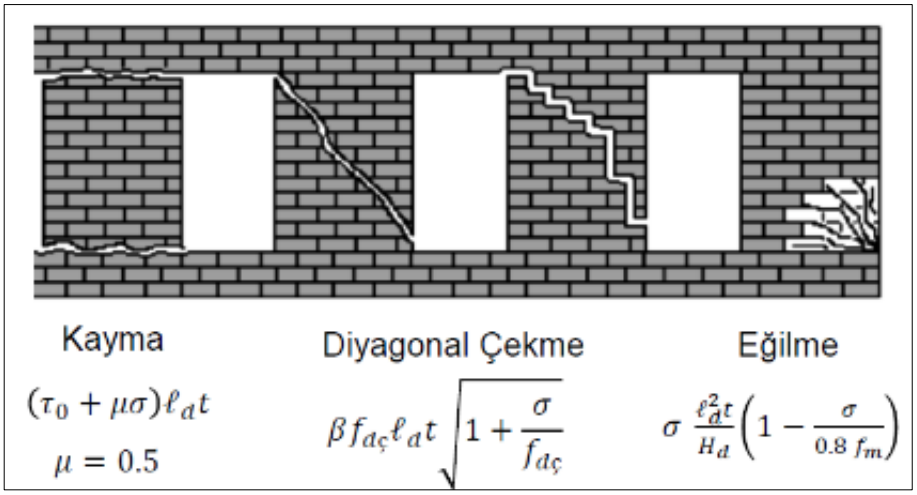
Bina Katı	$S_{D1} \leq 0.25$	$0.25 < S_{D1} < 0.40$	$S_{D1} \geq 0.40$
En az üç katlı* binalarda en üst kat	21	15	11
En az üç katlı* binalarda diğer katlar	25	20	16
Diğer binalarda tüm katlar			

* Tam gömülü bodrum katları kat sayısı hesabında dikkate alınmayacaktır.

3- **Düşey Yük ve Deprem Etkisi İçin Tahkik:** Kâgir duvarlarda, kayma kuvvetlerinde, diyagonal çekme kuvvetlerinde ve eğilme kuvvetlerinden kaynaklanan üç farklı göçme durumu meydana gelmektedir. Çizelge 4.5'e gösterilen üç durum için *(G + nQ)* ve *(G + nQ ± E)* yüklemeleri için hesaplanacak $m_{sınır}$ değerinin en küçük değeri dikkate alınacaktır (Şekil 4.14), (RYTİE, 2019).

Çizelge 4.5. Yığma Duvarlar için Dayanım Değerleri (RYTİE, 2019)

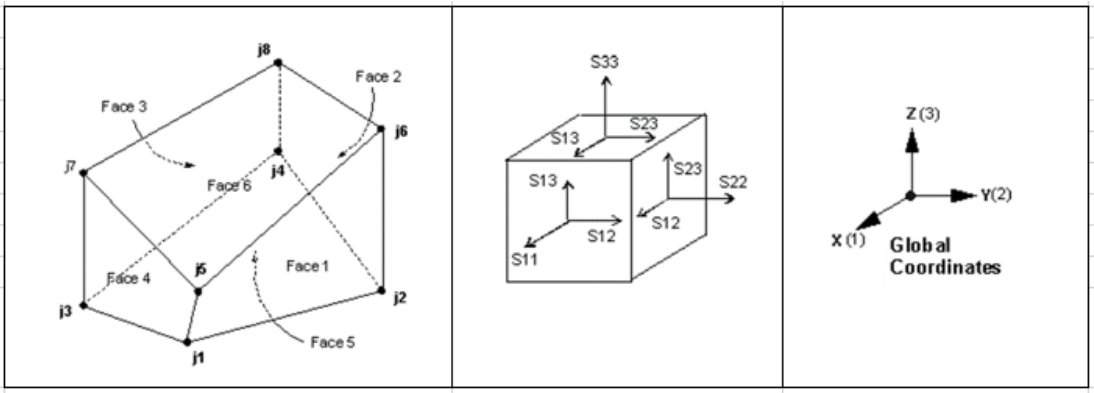
Göçme Şekli	**Kesme Kapasitesi**	$m_{sınır}$
Kayma	$(\tau_0 + \mu\sigma)\ell_d t$ $\mu = 0.5$	2.0
Diyagonal Çekme	$\beta f_{dç} \ell_d t \sqrt{1 + \frac{\sigma}{f_{dç}}}$ $\beta = \begin{cases} 1 & \frac{\ell_d}{H_d} \geq 1 \\ \frac{\ell_d}{H_d} & 1 \geq \frac{\ell_d}{H_d} \geq \frac{2}{3} \\ \frac{2}{3} & \frac{2}{3} \geq \frac{\ell_d}{H_d} \end{cases}$	1.0
Eğilme	$\sigma \frac{\ell_d^2 t}{H_d}\left(1 - \frac{\sigma}{0.8 f_m}\right) \geq 0.1 f_m \frac{\ell_d^2 t}{H_d}$	3.0



Şekil 4.14. Kâgir duvarlarda oluşan hasar tahkikleri (RYTİE, 2019)

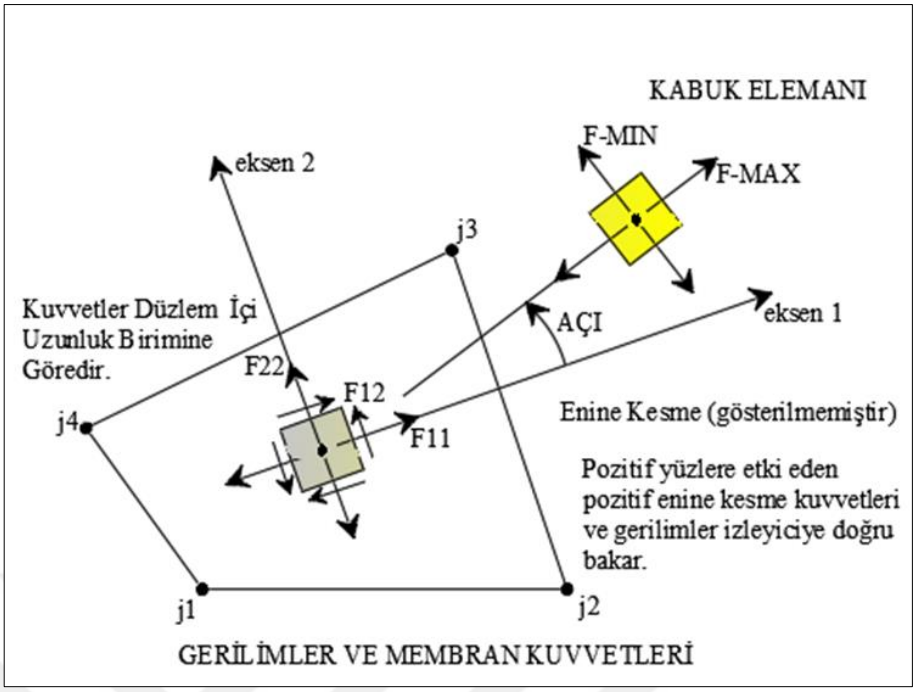
4.3.5. Notasyon ve İşaret Kabüller

Yapının modellemesinde kullanılan katı (solid) elemanlarda oluşan gerilme kuvvetleri ve pozitif yön kabulleri Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Katı (Solid) elemana ait S11, S22 ve S33 gerilmeleri sırasıyla x, y ve z doğrultularındaki normal gerilmeleri, S12 gerilmesi x ekseni doğrultusunda, yz düzleminde oluşan kayma gerilmesini ifade etmektedir. Genel mukavemet bilgileri çerçevesinde S12=S21 dir. Modellemede z ekseninin yönüne bağlı olarak deprem yönüne göre S12, S13 ve S23 yönlerinde kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Söz konusu işaret kabulleri global kabullerden alınmıştır.



Şekil 4.15. Katı eleman ve gerilmeleri

Kabuk (Shell) elemanlarda oluşan iç kuvvet ve işaret kabulleri Şekil 4.16'de gösterilmektedir. Buradaki (F) kuvveti, (M) momenti ifade etmektedir.



Şekil 4.16. Düzlem kabuk elemanda oluşan iç kuvvetler

4.4. Performans Kavramı, Onarım ve Güçlendirme İlkeleri

Kâgir yapıların kendi ağırlıkları ve dinamik yükler etkisi altında oluşan gerilmeleri emniyetle taşıması beklenmektedir. Bunun içinde yönetmelikler çerçevesinde uygun taşıyıcı sistem seçimi, eleman boyutlandırılması ve uygulamanın denetlenmesi gerekmektedir. Yapının öz ağırlığı yanında dinamik kuvvetler oluşturan deprem kuvvetleri tasarımda belirleyicidir. Bunun için her bir yapı özelinde yapının bulunduğu bölgedeki zemin özellikleri ve deprem parametreleri yönetmelikler çerçevesinde tanımlanmıştır ("TBDY 2018," 2018).

Kâgir yapılar özelliklerine bağlı olarak deprem kuvvetlerin karşı yeterli dayanıma sahip olmaları beklenilmektedir. Bunun için taşıyıcı sistemi oluşturan her bir elemanın yeterli dayanım, süneklik ve rijitliğe sahip olması gerekmektedir.

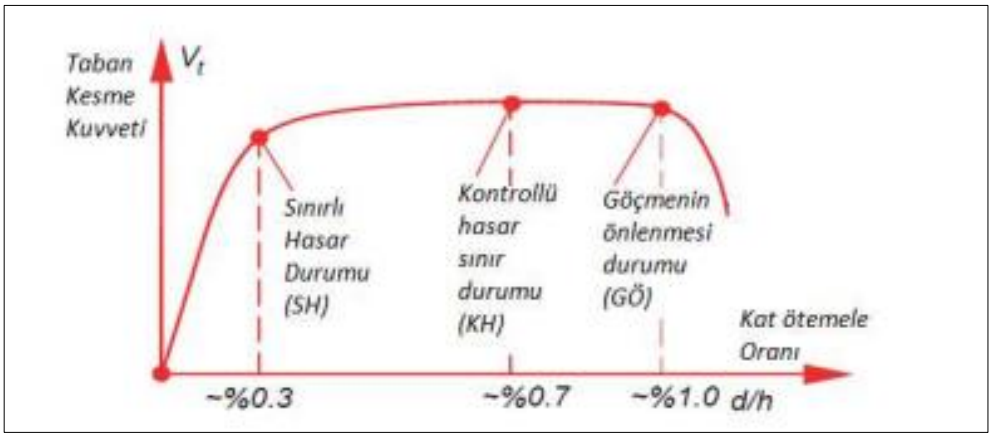
Performans Kavramı: Performans kavramı, deprem kuvvetlerine karşı taşıyıcı sistemin doğrusal ve doğrusal olmayan davranışının belirlenmesidir. Ülkemizde yürürlükte bulunan deprem yönetmeliğinde, tarihi yapılar için deprem düzeylerine bağlı olarak hedeflenen Yapısal Performans Düzeyleri tanımlanmıştır ("TBDY 2018," 2018), (Çizelge 4.6), (Çizelge 4.7), (Şekil 4.17).

Çizelge 4.6. Performans düzeyleri ("TBDY 2018," 2018)

Sınırlı Hasar (SH) Performans Düzeyi:	Bu düzey, yapının taşıyıcı sistem elemanlarında sınırlı düzeyde hasarın meydana geldiği (doğrusal olmayan davranışın sınırlı kaldığı) hasar düzeyine karşı gelir.
Kontrollü Hasar (KH) Performans Düzeyi	Bu düzey, yapının taşıyıcı sistem elemanlarında çoğunlukla onarılması mümkün olan kontrollü hasar düzeyine karşı gelir.
Göçmenin Önlenmesi (GÖ) Performans Düzeyi	Bu düzey, bina taşıyıcı sistem elemanlarında ileri düzeyde ağır hasarın meydana geldiği, yapının kısmen veya tamamen göçmeye yaklaştığı, ancak göçmenin önlendiği duruma karşı gelir.

Çizelge 4.7. Önerilen hedef performans düzeyleri (Dabanlı, 2008)

TARİHİ YAPILARIN ÖNEMİNE GÖRE SEÇİLEBİLECEK PERFORMANS DÜZEYLERİ	*Ulusal öneme sahip tarihi yapı Grup I*	*Evrensel öneme sahip tarihi yapı*	
	DD-3 (50/%50, 72 yıl) Sınırlı hasar düzeyi(SH)	*DD-2 (50/%10, 475 yıl) Sınırlı hasar düzeyi (SH)*	*DD-1 (50/%2, 2475 yıl) Sınırlı hasar düzeyi (SH)*
Yerel öneme sahip tarihi yapı Grup II	*DD-3 (50/%50, 72 yıl) Kontrollü hasar düzeyi (KH)*	*DD-2 (50/%10, 475 yıl) Kontrollü hasar düzeyi (KH)*	*DD-1 (50/%2, 2475 yıl) Kontrollü hasar düzeyi(KHI*
	DD-3 (50/%50, 72yıl) Göçmenin önlenmesi düzeyi (GÖ)	*DD-2 (50/%10, 475yıl) Göçmenin önlenmesi düzeyi (GÖ)*	*DD-1 (50/%2, 2475yıl) Göçmenin önlenmesi düzeyi (GÖ)*



Şekil 4.17. Statik itme eğrisi ve sınır durumları ("TYDRYK 2017," 2017)

Performans düzeyinin belirlenmesinde; oluşan hasarların az olması durumunda dayanıma göre değerlendirme veya oluşan hasarların kontrollü şekilde göçmeye sebep olmayacak büyüklükte olması durumunda şekil değiştirmeye göre değerlendirmenin yapılması gerekmektedir.

Dayanıma Göre Değerlendirme: Dayanıma göre değerlendirmede, deprem yükü azaltma katsayısı (Ra<3) alınarak yapı elemanlarındaki gerilmeler hesaplanmaktadır. Bulunan gerilmeler ile malzeme için kabul edilen emniyet gerilmelerinin karşılanıp karşılanmadığının kontrol edilmesi gerekmektedir (Çizelge 4.8).

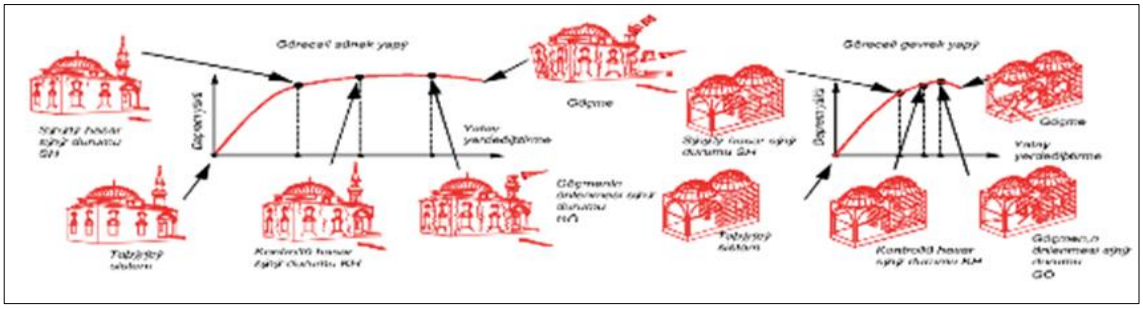
Çizelge 4.8. Hasar sınırları ("TYDRYK 2017," 2017)

Yapının Sınırlı Hasar (SH) bölgesinde kalması isteniliyorsa	(Ra= 1) alınarak azaltılmamış deprem kuvvetleri altında sınır gerilmelerin aşılmaması öngörülür.
Yapının toptan göçmesinin engellenmesi amaçlanıyorsa	Ddüşey yüklerle beraber azaltılmış deprem etkisinin taşıyıcı sistemde oluşturduğu gerilmelerin ilgili sınır gerilmelerinin belirli oranda (%50) aşmasına izin verilir.
İki hasar durumunun arasında olan kontrollü hasar durumund	Azaltılmış deprem etkileri altında sınır gerilmelerin aşılmaması beklenir.

Yapılan karşılaştırma sonucunda; Bütün hasar durumları için taşıyıcı sistemin azaltılmış deprem kuvvetleri altındaki öteleme oranı sınırlandırılmıştır (Çizelge 4.9), (Şekil 4.18). Ötelenme oranı, komşu kat seviyelerinde oluşan ötelenme farklarının yükseklik farklarına oranıdır ("TYDRYK 2017," 2017).

Çizelge 4.9. Performans düzeyleri ile ilgili hesap yöntemleri ("TYDRYK 2017," 2017)

Performans düzeyi	*Hesap yöntemi ve sınırlar*
Sınırlı hasar sınır durum (SH)	*1. Doğrusal hesap yöntemi kullanılıyor; a) Düşey yük ve azaltılmamış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımları aşılmıyor.* *b) Azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı % 0,3 sınırını aşmıyor.*
Kontrollü hasar sınır durumu (KH)	*1. Doğrusal hesap yöntemi kullanılıyor; a) Düşey yük ve $R_a \leq 3$ ile azaltılmış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımları aşılmıyor.* *b) Azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı % 0,7 sınırını aşmıyor.* *2. Doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılıyor; a) Öteleme oranı % 0,7 sınırının aşmıyor. b) Malzemelerin şekildeğiştirme kapasiteleri aşılmıyor.*
Göçme öncesi sınır durumu (GÖ)	*1. Doğrusal hesap yöntemi kullanılıyor; a) Düşey yük ve $R_a \leq 3$ ile azaltılmış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımları belirli bir oranla (~1.5 katı) aşılabilir.* *b) Azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı % 1 sınırını aşmıyor.* *1. Doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılıyor; a) Öteleme oranı % 1 sınırının aşmıyor. b) Malzemelerin şekildeğiştirme kapasiteleri sınırlı oranda (~1.2 katı) aşılabilir.*



Şekil 4.18. Göreceli sünek ve gevrek taşıyıcı sistemlerde performans düzeyleri ("TYDRYK 2017," 2017)

Şekil Değiştirmeye Göre Değerlendirme: Yükün artmasıyla yapı elemanlarında elastik ötesi şekil değiştirmeler ortaya çıkmaktadır. Kâgir yapılarda sünek davranış sınırlı olduğundan, sınırlı hasar ile göçme durumu birbirine yakın olmaktadır. Değerlendirmede, doğrusal olmayan analiz yöntemleri yerel şekil değiştirmeler ve yapının bütünsel davranışını temsil eden, yer değiştirme oranlarının hesaplanarak performans sınır durumlarının Çizelge 4.7' ye göre kontrol edilmesi gerekmektedir.

Yapı İçin Hedef Performans Düzeyi: Dayanım ve şekil değiştirmeye göre değerlendirme yöntemlerindeki yapılan kabuller ve kurallar birbirinden farklık göstermektedir. Bu nedenle aynı yapı için birbirine yakın olmakla birlikte farklı sonuçlar çıkabileceği öngörülmektedir. Seçilecek herhangi bir deprem güvenliği seviyesinin bütün tarihi yapılar için geçerli olmayacağı dikkate alınarak, hedeflenen güvenlik seviyesinin tarihi yapının önem ve müdahale edilebilirlik imkânlarına göre belirlenmesi gerekmektedir.

Çizelge 4.7'de tarihi yapılar için önerilen hedef performans seviyeleri ile Çizelge 4.9'da performans düzeyine bağlı olarak, önerilen hesap yöntemleri ve malzeme sınır gerilmeleri ile şekil değiştirmeleri tanımlanmıştır. Bu çerçevede tarihi yapının özelliği dikkate alınarak deprem güvenliği incelemesi için iki farklı hedef performans seviyesi için değerlendirilme yapılarak müdahalenin kapsamına karar verilmesi uygun olacaktır.

Onarım ve Güçlendirme İlkeleri: Yapılarda, hasar kaynaklı oluşan dayanım kayıplarının giderilmesi, hasar nedenlerinin ortadan kaldırılması, hasarın bir daha oluşmaması için koruyucu ve önleyici tedbirler alınması, mevcut durumunun daha iyi hale getirilmesi v.b amaçlar doğrultusunda yapılan her türlü müdahale; onarım, güçlendirme ve iyileştirme olarak tanımlanmaktadır (Vatan, 2010).

Onarım; yapı elemanlarının yük taşıma kapasitelerinin eski haline getirilmesidir. Güçlendirme; yapının yük taşıma kapasitelerini öncekinden daha iyi seviyelere çıkartılmasıdır. Onarım hasar görmüş bir elemanda yapılırken, güçlendirme yapıda hasar olmasa da yapılabilir. İyileştirme, yapının yük taşıma kapasitesini kısmen daha iyi seviyeler getirilmesidir.

Tarihi kâgir yapılarda yapılacak müdahale yönteminin seçiminde temel yaklaşım en az müdahale ile en fazla koruma sağlanmasıdır. Bu nedenle tarihi kâgir yapılarda yapılacak müdahalelerde disiplinler arası çalışmalar yapılarak, yapının kültürel ve sembolik değerlerini koruyacak şekilde, hedeflenen yapı güvenliğinin sağlanması gerekmektedir.

Tarihi yapılarda yapılacak her türlü işlemin, tarihi yapıların korunması ve restorasyonu hakkında uluslararası bir çerçeve belirleyen, Mayıs 1964'te kabul edilen Venedik Tüzüğü, 2863 Sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu, Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Yüksek Kurulu'nun 660 sayılı İlke Kararı'na uygun olması gerekmektedir.

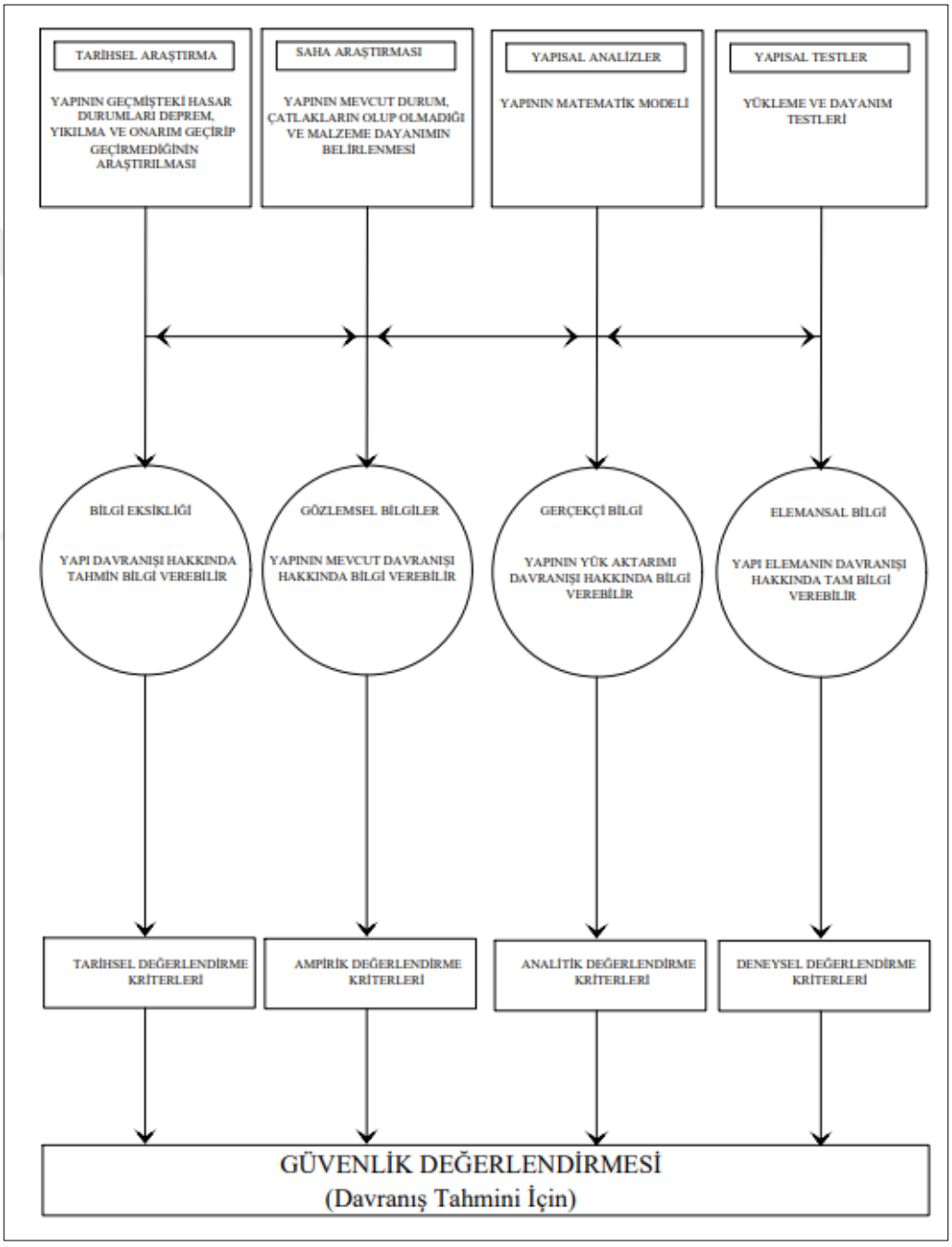
4.5. Tarihi Kâgir Yapılarda Çağdaş Restorasyon Uygulamalarına Yönelik Yöntemler

Tarihi kâgir yapıların mevcut durumlarının tespit edilerek muhtemel deprem riskleri altındaki davranışının belirlenmesi ve uygulanabilecek onarım ve güçlendirme yönteminin belirlenmesi için;

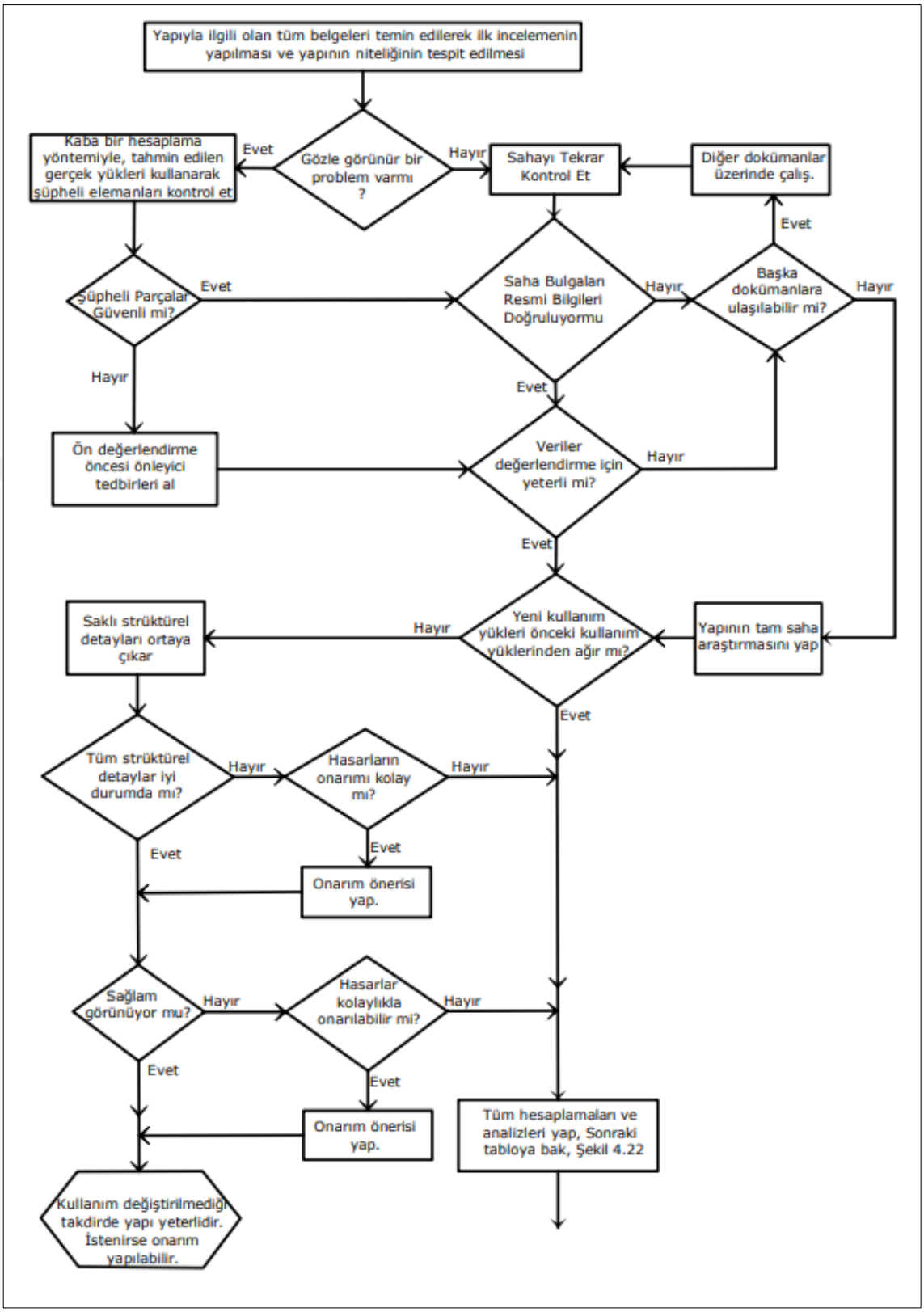
- Arşivlerden detaylı araştırmalar yapılarak daha önceki dönemlerde yapıda meydana gelen hasarlar, yapılan müdahaleler ve türleri, yapı temeli, zemin yapısı, meydana gelen yapısal hareketlerin deneysel ve gözlemsel olarak tespit edilmesi,
- Elde edilen veriler çerçevesinde yapı strüktürünü oluşturan malzemelerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin tahribatsız ve tahribatla yöntemler ile belirlenmesi,
- Strüktür ve malzeme idealleştirilmeleri yapılarak yapının analitik modelinin oluşturulması, oluşturulan modelin yapının statik ve dinamik yükler altında analizi yapılarak hedeflenen performans düzeyleri için mevcut kesitlerin yeterliliğinin tahkik edilmesi,

- Kesit tahkikleri sonucuna hedeflenen performans düzeyini sağlamayan yapı elemanlarında yapının mimari ve estetik özelliklerine zarar vermeyecek şekilde uygulanabilecek onarım ve güçlendirme yönteminin tespiti edilerek, alınan yönteminin güvenirliliğinin tahkik edilmesi gerekmektedir.

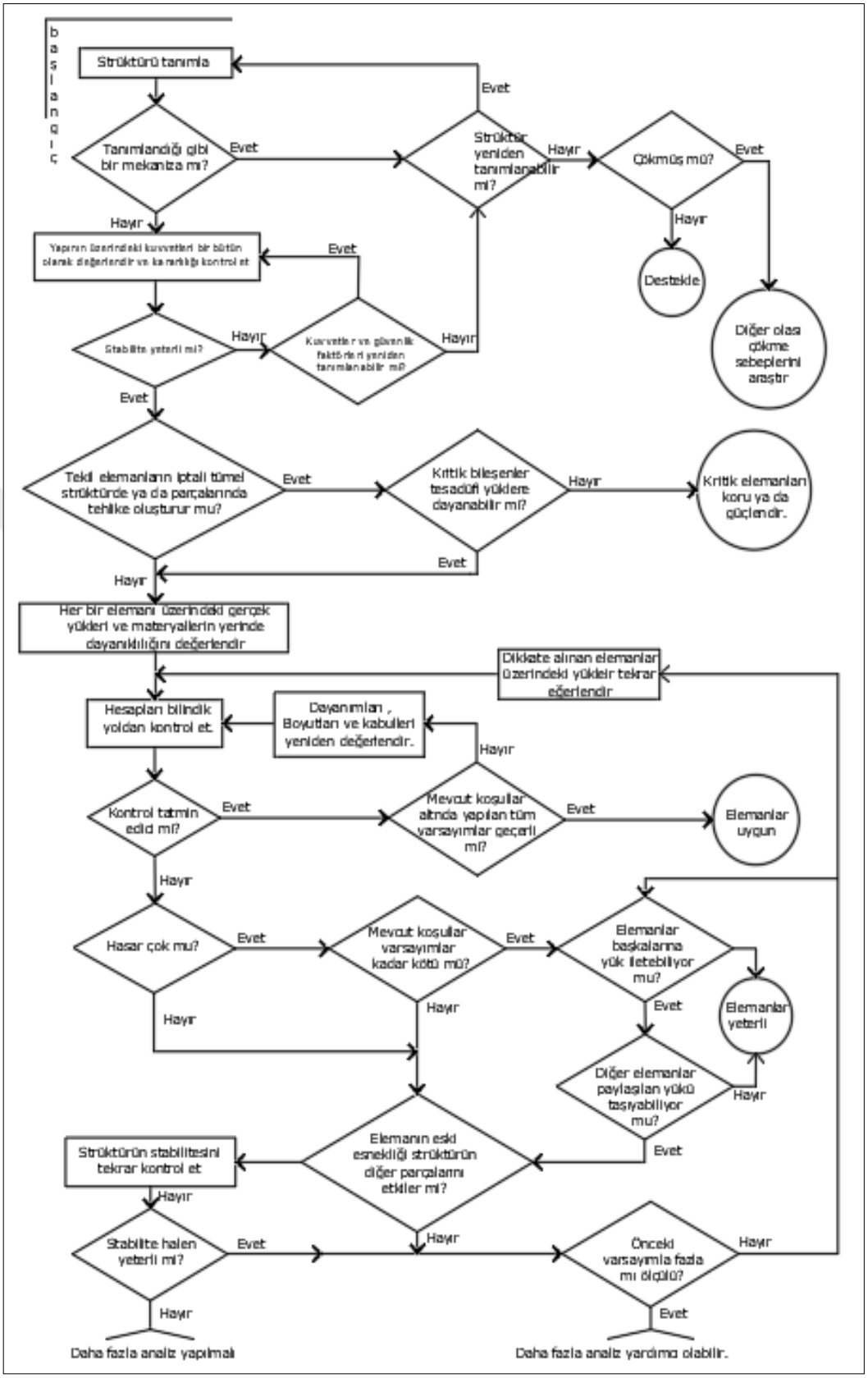
Bunun için geliştirilen sistematikler Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de verilmektedir.



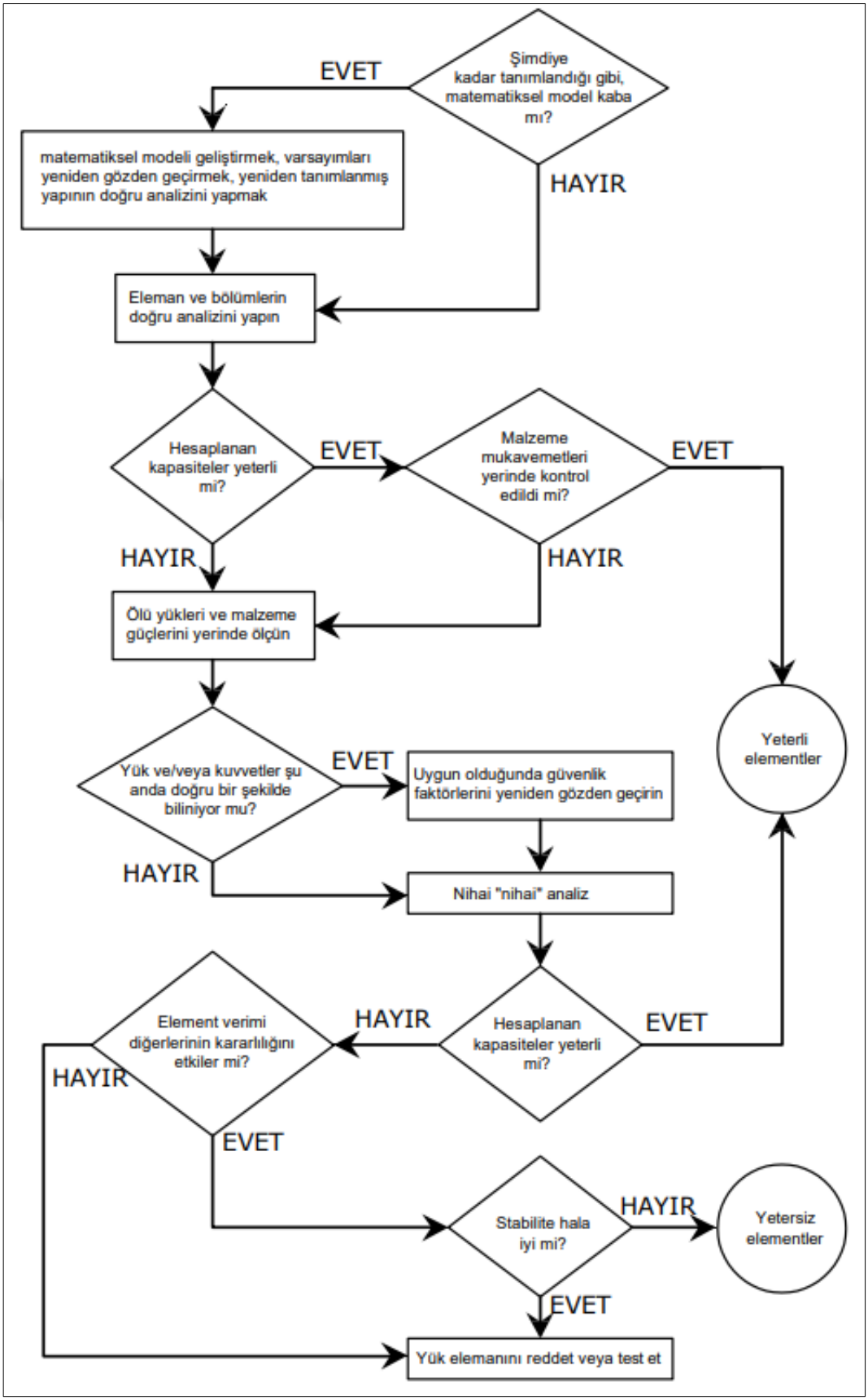
Şekil 4.19. Yapısal güvenlik değerlendirme süreçleri (Croci, 1998)



Şekil 4.20. Yapının ilk değerlendirme yöntemi (Beckmann ve Bowles, 2012)



Şekil 4.21. Değerlendirme yöntemi (Beckmann ve Bowles, 2012)



Şekil 4.22. Performans yöntemi (Beckmann ve Bowles, 2012)

BÖLÜM 5.

YÖNTEMİN UYGULANABİLİRLİĞİNE YÖNELİK ALAN ÇALIŞMASI

Tarihi kâgir yapılarda yapılan çağdaş restorasyon uygulamalarında, yapıların mevcut durumlarının tespit edilerek, muhtemel deprem riskleri altındaki davranışları belirlenmektedir. Yapıların hedeflenen performans düzeylerini sağlamaları için onarım ve güçlendirmeleri yapılması yanı sıra malzeme ve yapısal hasarların genel durumları da dikkate alınarak sökülerek yeniden yapılması en çok karşılaşılan yöntemlerdendir.

Bu nedenle tezin kapsamında söz konusu onarım ve güçlendirme yöntemi ile söküp yeniden yapmak yöntemlerine örnek teşkil etmesi amacı ile Edirne Eski Camii ve Medrese Ali Bey Camii incelenmiş ve uygulamaları yapılmıştır.

Seçilen örneklerden; Edirne Eski Cami'sinde çağdaş restorasyon uygulamalarına göre onarım ve güçlendirme yöntemi yapılmış ve bunun uygulaması yaptırılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda camii kubbelerinde meydana gelen su ve nem sorunlarının ana kaynağının kubbe deformasyonları olduğu tespit edilmiştir. Yapının ANSYS programı yardımı ile hazırlanan sonlu elemanlar modelinin statik ve dinamik analizleri yapılarak tespit edilen yapısal hasarlar ile analiz sonucu elde edilen verilerin yerinde karşılaştırılması mümkün olmuştur. Söz konusu hasarların giderilmesi için önerilen onarım ve güçlendirme yöntemleri Vakıflar Bölge Müdürlüğü tarafından uygulatılarak sonuçları gözlemlenmiştir.

Medrese Ali Bey Cami'sinde ise çağdaş restorasyon uygulamalarına göre yeniden yapım yöntemi uygulanmıştır. Mevcut hali ile sadece temel izi bulunan caminin arşiv ve saha incelemeleri yapılarak oluşturulan modelin statik ve dinamik analizler yapılarak

belirlenen kesitler ve hazırlanan uygulama detayları doğrultusunda camii yeniden yapım tekniği ile Vakıflar Bölge Müdürlüğü tarafından yaptırılarak sonuçları gözlemlenmiştir.

Her iki örnek seçiminde yapılarda tespit edilen hasarlar ile hazırlanan modellerin statik ve dinamik analizleri sonucunda elde edilen verilerin yerinde karşılaştırılması, önerilen onarım ve güçlendirme yöntemlerinin uygulanabilirliği ve izlenebilirliği belirleyici olmuştur.

Seçilen örnekler sırası ile

- Hazırlık çalışmaları; arşiv ve saha çalışmaları,
- Yapı malzeme ve strüktürünün özelliklerinin belirlenmesi,
- Yapının analitik modelinin hazırlanarak statik ve dinamik analizlerinin yapılması,
- Yapılan analiz sonuçlarının değerlendirilerek onarım ve güçlendirme kararlarının alınması,
- Onarım ve güçlendirme yapım süreçlerinde incelenmiştir.

İdealleştirme ve Modelleme Kabulleri

Kâgir yapıların modellenmesinde en temel yaklaşım elemanların yük taşıma davranışlarına uygun elaman modelleri oluşturulmasıdır. Analize esas modelin oluşturulmasında kubbe, tonoz ve duvarlar katı (solid) elemanlar kullanılmıştır. Uygulamalarda ayaklar ve sütunların çubuk (frame) eleman olarak modellenebilmekle birlikte diğer elemanlarla birleşim noktalarında gerilme yığılmalarına neden olduklarında hatalı sonuçlar verebilmektedirler. Bu nedenle katı (solid) eleman olarak modellenmeleri daha uygun olmaktadır.

Seçilen örnek çalışmalarda;

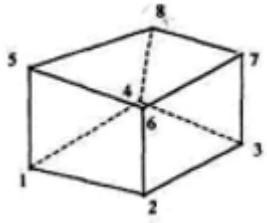
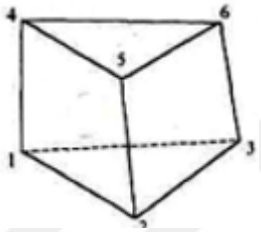
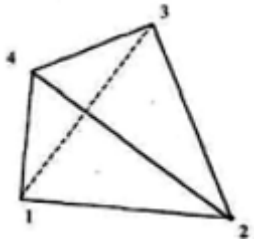
Tonoz ve Kubbeler: Tonoz ve kubbelerde tuğla ve harç malzemesi kullanılmıştır. Kubbelerde kar yükü ve ilave yükler malzeme yük analizinde dikkate alınmıştır. Kubbe ve tonozlar uygun sonlu eleman büyüklüklerine göre katı (solid) eleman olarak modellenmiştir.

Duvarlar: Duvarlarda taş ve harç malzemesi kullanılmıştır. Duvar kalınlığına bağlı olarak yatay kesitinde ikiye veya üçe bölünmek suretiyle katı (solid) eleman olarak modellenmiştir.

Sütunlar: Sütunlar taş ve mermer olması durumuna göre katı (solid) eleman olarak modellenmiştir.

Temeller: Yapıların temelleri 2.00 m olarak alınarak katı (solid) eleman olarak modellenmiştir.

Oluşturulan modellerde, sekiz düğüm noktalı hekzahedral katı elemanlar ile ihtiyaç olan yerlerde altı düğüm noktalı pentahedral ve dört düğüm noktalı tetrahedral katı elemanlar kullanılmıştır (Şekil 5.1).

		
Hekzahedral	Pentahedaral	Tetrahedra

Şekil 5.1 Sonlu elemanlarda katı modelleme elemanları

5.1. Edirne Eski Camii Örneği

Eski Cami, Edirne'de Osmanlılardan günümüze ulaşmış en eski anıtsal yapıdır (Usal, 2006). Caminin inşası "H.804-M.1401" yılında Sultan I. Süleyman tarafından başlanmış, "H.816-1413" yılında Çelebi Sultan Mehmet döneminde tamamlanmıştır (Kazancıgil, 1996; Osman, 2013). Cami önce Süleymaniye Cami olarak, sonra Ulu Cami olarak, Üç Şerefeli Cami'nin yapımından sonra Eski Cami (Cami-i Atik) olarak adlandırılmıştır. Yapının mimarı Konyalı Hacı Alaeddin ve kalfası İbrahim oğlu Ömer'dir (Osman, 2013). Erken Dönem Osmanlı yapısı olan Eski Cami çok kubbeli yapı grubundandır (Kuban ve Emden, 2007).

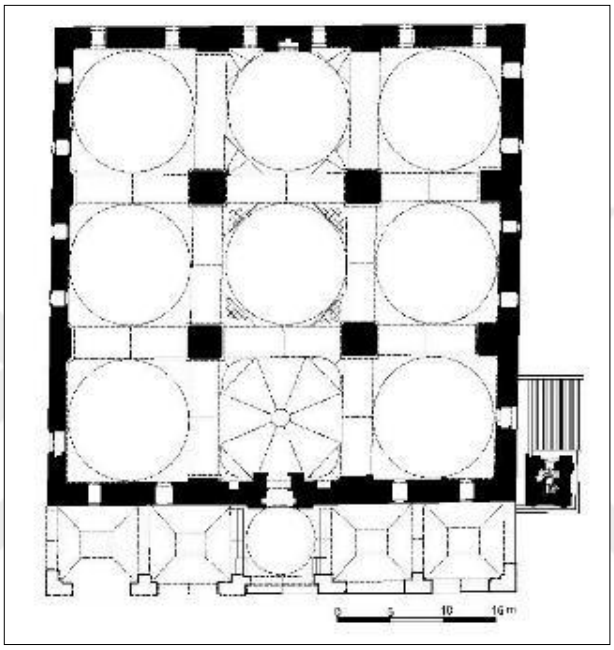
5.1.1. Hazırlık Çalışmaları:

Edirne Vakıflar Bölge Müdürlüğü ve Edirne Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu Müdürlüğü arşivlerinden elde edilen veriler çerçevesinde;

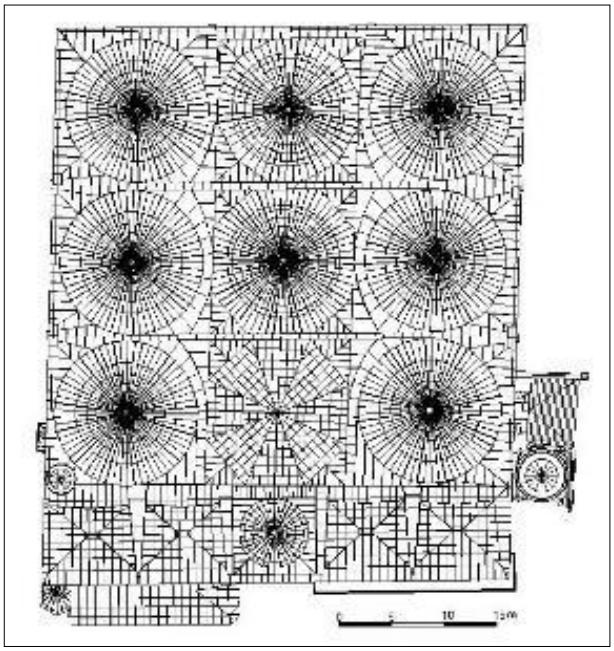
Plan Özellikleri: Eski Cami'nin plan özellikleri incelendiğinde, harim (orta mekân) kare planlıdır. İçten 2.116 m^2 olan mekân 4 sütun ile 9 eşit parçaya bölünmüş,

aynı büyüklükteki kubbeler ile üst örtü oluşturulmuştur (Osman, 2013). Bu özelliklerine bakıldığında çok kubbeli ve çok ayaklı sınıfında yer almaktadır (Aslanapa, 1986).

Avlusu olmayan caminin kuzeybatı (giriş) cephesinde paye ve üst örtüleri ile 5 bölüme ayrılmış son cemaat yeri bulunmaktadır. 5 birimlik son cemaat kısmının giriş bölümünün üst örtüsü kubbe iken kenarlardaki 4 bölümün örtüsü tekne tonozdur. Son cemaat yerinin sol tarafında giriş cephesinde yer alan şadırvan sonradan yapılmıştır (E.H. Ayverdi).



Şekil 5.2. Eski Cami Planı (E.H. Ayverdi).



Şekil 5.3. Eski Cami Çatı Planı (Asmira Mimarlık Rest. Dek., 2006)

Harim bölümünün üst örtüsünü oluşturulan 9 kubbesinin, kenarlardaki 6 kubbesinde pandantif kullanılmıştır. Orta aksta ise mihrap önündeki kubbede prizmatik üçgen, girişteki aydınlık fenerli, düz tromplu, ortadaki kubbe ise mukarnas tromplu yapılmıştır (Aslanapa, 1986).



Şekil 5.4. Eski Cami genel görünüş (https://edirne.web.tr/edirne-eski-cami-fotograf-albumu/)

Girişin solunda caminin beden duvarı üstünden yükselen tek şerefeli, sağında ise kare bir kaide ile zemine oturan iki şerefeli bir minaresi vardır. İki şerefeli minarenin II. Murat tarafından sonradan yaptırıldığı belirtilmektedir (Gökbilgin vd., 2015).

Büyük minarenin gerek taş konstrüksiyonu, gerekse bezemeleri camiyle beraber düşünüldüğünü göstermektedir (Kuban ve Emden, 2007). Ayrıca beden duvarı üzerindeki minareyi cami duvarı ile yapmak, dönemin bağlayıcı yapı malzemeleri düşünüldüğünde statik olarak sakıncalı olduğu belirtilmiştir (Kuban ve Emden, 2007).

Hasarlar ve Onarımlar: Büyük minare kaidesi dışında, 1748 yangınında ve 1752 depreminde harap olmuş, Osmanlı İmparatoru I. Mahmut tarafından tamir ettirilmiştir (Kuban ve Emden, 2007; Peremeci, 1939). Doğu payandalarının da depremde hasar görmüş duvarı güçlendirmek için yapılmış olduğu düşünülmektedir (Ayverdi, 1972). 1850 yılında çıkan bir başka yangında minarelerin taşları yanmış ve dökülmüştür (Osman, 1999). 1929 ve 1934 yıllarında esaslı onarımlar yapılmıştır. Ayrıca 1965 yılında da bir

tadilat geçirdiği söylenmektedir (Ayverdi, 1972; Peremeci, 1939). Eski Camii'nin 2006-2008 yılları arasında Vakıflar Bölge Müdürlüğü tarafından kapsamlı bakım ve onarımları yapılmıştır.

Yapının Rölöve Çizimleri: Edirne Eski Camiine ait Asmira Mimarlık Restorasyon tarafından hazırlanmış rölöve ve restorasyon projeleri temin edilmiştir. Yapısal analiz için CAD ortamında bulunan çizimlerden faydalanılarak yapıya ait üç boyutlu katı modellemesi yapılmıştır. Camii ait planlar, görünüşler ve kesitler Ek A'da verilmektedir.

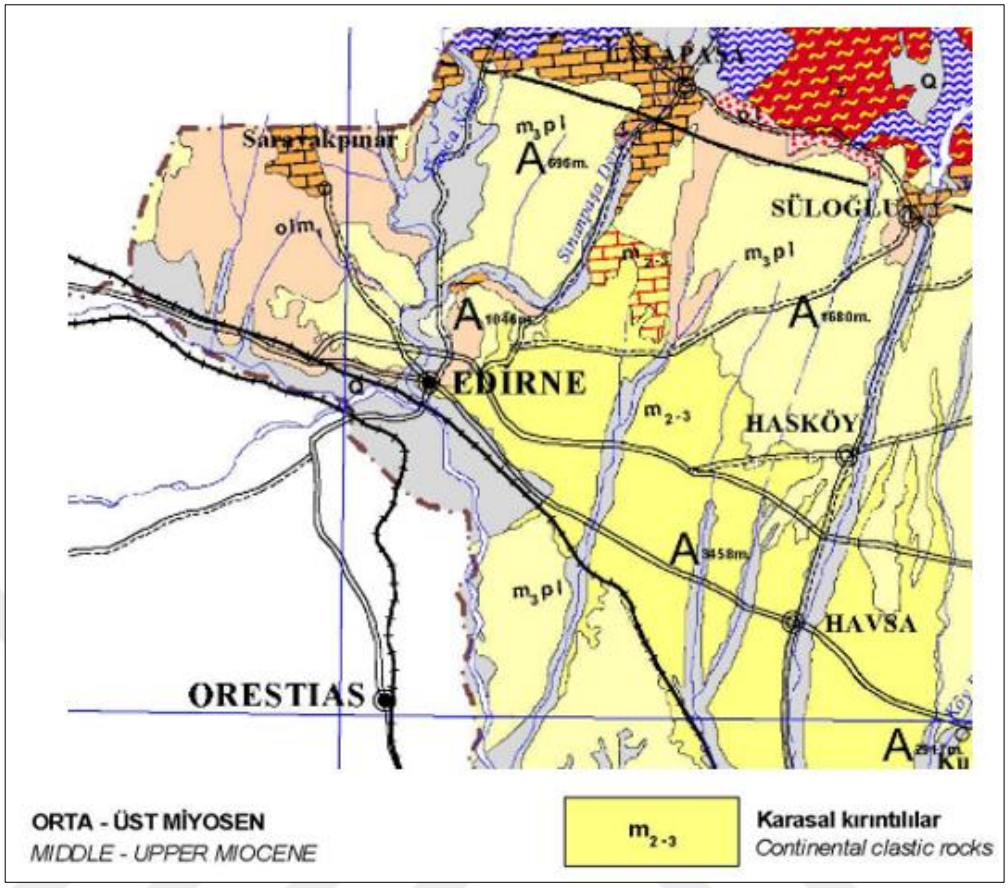
5.1.2. Malzeme ve Zemin Özellikleri

Eski Camii, beden duvarları küfeki taşından, kubbe ve tonozları tuğladan inşa edilmiştir. Malzemenin fiziksel özelliklerini belirlemek için testler ve deneylerin yapılması gerekmektedir. Ancak yapının tarihsel özellikleri dikkate alınarak Çizelge 5.1'de verilen malzeme özellikleri dikkate alınmıştır (Aköz, 2008; Dabanlı, 2008; Ünay, 2002).

Çizelge 5.1. Modelde kullanılan malzemeler ve kabul edilen emniyet gerilmeleri (Akan, 2010; Yazgan ve Ünay, 2019)

Yapı Elemanı	Yapı Birimi	Eleman Tipi	Malzeme Özellikleri			Emniyet Gerilmeleri		
			Elastiste Modulü	Öz Kütle	Possion Oranı	Basınç	Çekme	Kayma
			E	γ	ν	σ	σ	τ
			(Mpa)	(kg/m3)		(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)
Kubbeler	Tuğla+Harç	Kabuk	3.000	1.800	0,20	0,80	0,120	0,350
Tonozlar	Tuğla+Harç	Kabuk	3.000	1.800	0,20	0,80	0,120	0,350
Kemerler	Tuğla+Harç	Katı	3.000	1.800	0,20	0,80	0,120	0,350
Beden Duvarları	Taş+Harç	Katı	10.000	2.200	0,20	0,30	0,045	0,175
Minare	Taş+Harç	Katı	10.000	2.200	0,20	0,30	0,045	0,175
Sütunlar	Mermer	Katı	30.000	2.400	0,20	20,00	2,500	5,000
Gergiler	Demir	Çubuk	210.000	7.800	0,30	240,00	14,000	30,000
	Ahşap	Çubuk	9.000	500	0,30	2,83	2,830	0,450

Zemin Özellikleri: Edirne ilinin, MTA Yerbilimleri haritasından faydalanarak "http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx" aktif faylar ve jeolojik formasyonlara göre Eski Camii'e zemin parametreleri orta-miyosen üst formasyonu m_{2-3} karasal kırıntılar olmak üzere güvenli bölgede kalacak şekilde ZC sınıfı olarak seçilmiştir. Zemin parametrelerine ait veriler Şekil 5.5' de verilmiştir.

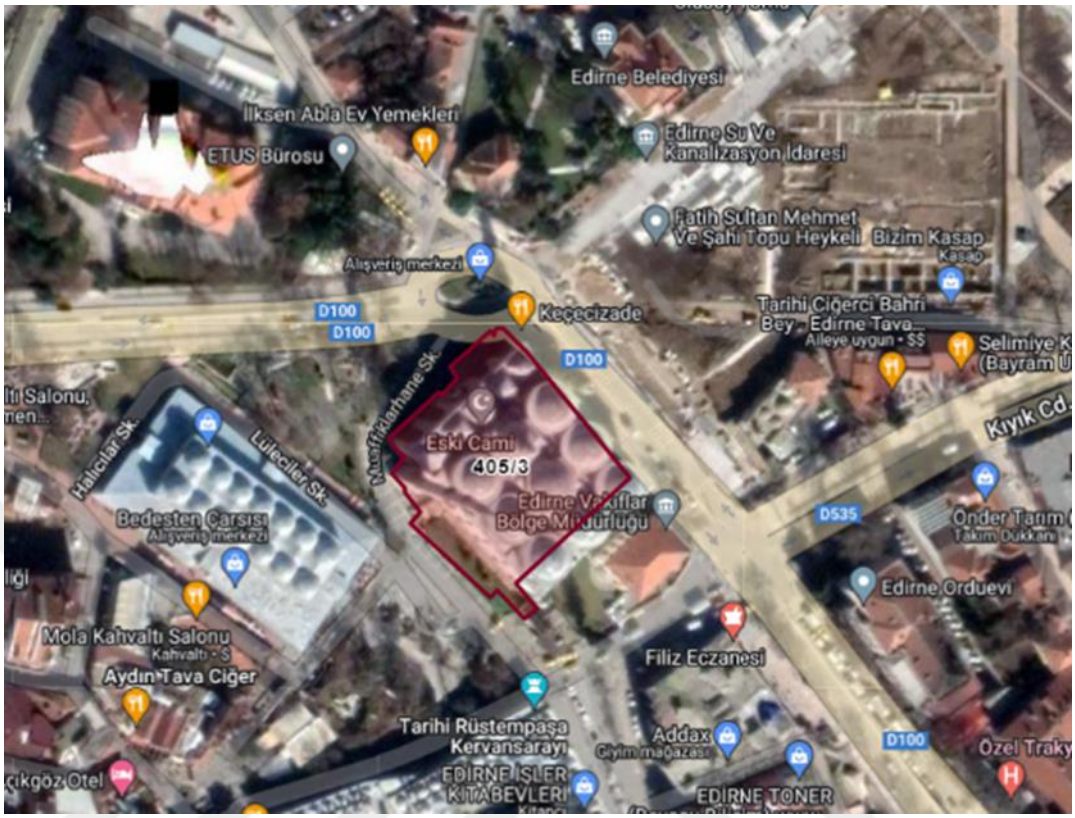


Şekil 5.5. Edirne jeolojik formasyonu "http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx"

5.1.3. Deprem Parametrelerinin Belirlenmesi:

Yapıya etkiyen deprem kuvvetlerinin bulunması için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY 2018) belirtilen hesap yöntemi sırası ile uygulanmıştır. Yapının Şekil 5.6'da verilen coğrafi konumuna göre, TDTH Web Arayüzü (https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml afad.gov.tr) adresinden; Çizelge 5.2'de belirtilen DD-1 ve DD-2 deprem düzeyleri için spektral ivme katsayıları ZC zemin sınıfı için S1 ve Ss elde edilmiştir. Yapı davranış katsayısı R=3 alınarak azaltılmış tasarım spektral ivme değerleri hesaplanmıştır. DD-1 deprem düzeyleri için hesaplanan azaltılmış spektral ivme değerleri ve grafiği Çizelge 5.3 ve Şekil 5.7'de. DD-2 deprem düzeyleri için hesaplanan azaltılmış spektral ivme değerleri ve grafiği Çizelge 5.4 ve Şekil 5.8'de verilmektedir.

Enlem: 41.676627	Boylam: 26.555928



Şekil 5.6. Eski Camii'nin Coğrafi konumu

Çizelge 5.2. Anıtsal eserlere ait deprem performans düzeyleri

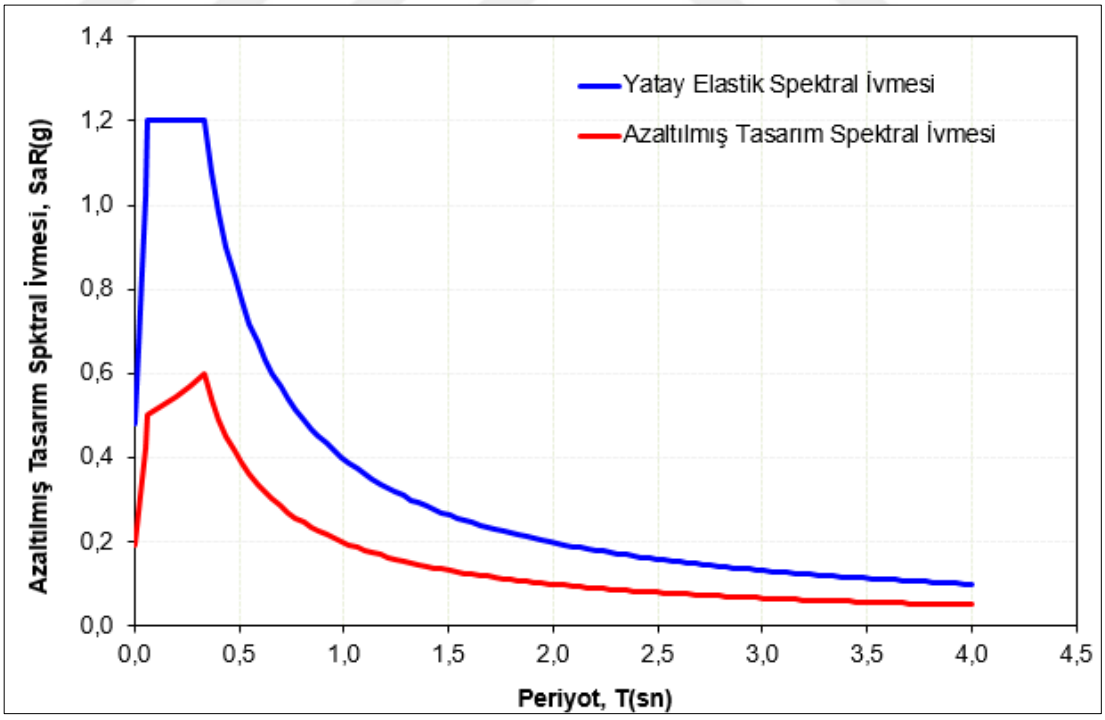
TARİHİ YAPILARIN ÖNEMİNE GÖRE SEÇİLEBİLECEK PERFORMANS DÜZEYLERİ	*Ulusal öneme sahip tarihi yapı Grup I*	*Evrensel öneme sahip tarihi yapı*	
	DD-3 (50/%50, 72 yıl) Sınırlı hasar düzeyi(SH)	*DD-2 (50/%10, 475 yıl) Sınırlı hasar düzeyi (SH)*	*DD-1 (50/%2, 2475 yıl) Sınırlı hasar düzeyi (SH)*
Yerel öneme sahip tarihi yapı Grup II	*DD-3 (50/%50, 72 yıl) Kontrollü hasar düzeyi (KH)*	*DD-2 (50/%10, 475 yıl) Kontrollü hasar düzeyi (KH)*	*DD-1 (50/%2, 2475 yıl) Kontrollü hasar düzeyi(KH)*
	DD-3 (50/%50, 72yıl) Göçmenin önlenmesi düzeyi (GÖ)	*DD-2 (50/%10, 475yıl) Göçmenin önlenmesi düzeyi (GÖ)*	*DD-1 (50/%2, 2475yıl) Göçmenin önlenmesi düzeyi (GÖ)*

TBDY2018'e göre DD-1 deprem düzeyi için azaltılmış tasarım spektral ivmesi,

DD1 deprem düzeyi ve R=3 azaltma katsayısı için elde edilen azaltılmış tasarım spektral ivme değerleri,

Çizelge 5.3. DD1 deprem düzeyi için spektral ivme değerleri

S_s =	1,000	
S_1 =	0,264	
Zemin Vs30=	ZC	
TL=	6,0	
Şekil için En Son Periyot =	4,0	s
γ_F	1,000	
R, Davranış Katsayısı	3,000	
I, Bina Önem Katsayısı	1,500	
D, Dayanım Fazlalığı	2,500	
Fs =	1,200	
F1 =	1,500	
SDS =	1,200	g
SD1=	0,396	
TB =	0,330	s
TA =	0,066	s



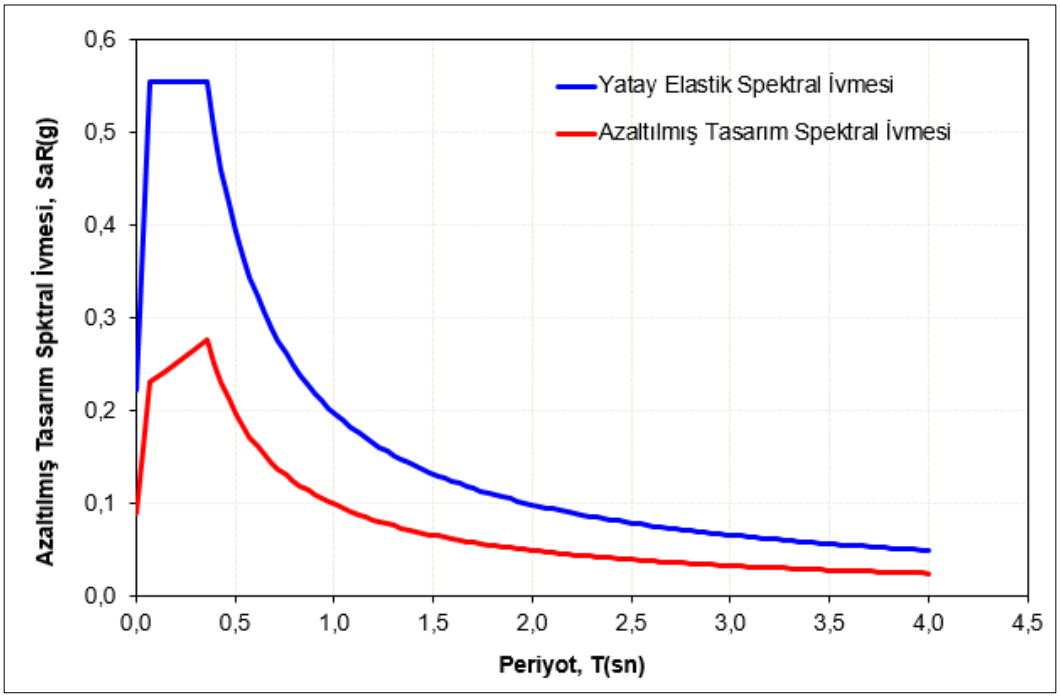
Şekil 5.7. DD1 deprem düzeyi ve R=3 azaltma katsayısı için elde edilen azaltılmış tasarım spektral ivme grafiği

TBDY2018'e göre DD-2 deprem düzeyine göre azaltılmış tasarım spektral ivmesi,

DD2 deprem düzeyi ve R=3 azaltma katsayısı için elde edilen azaltılmış tasarım spektral ivme değerleri,

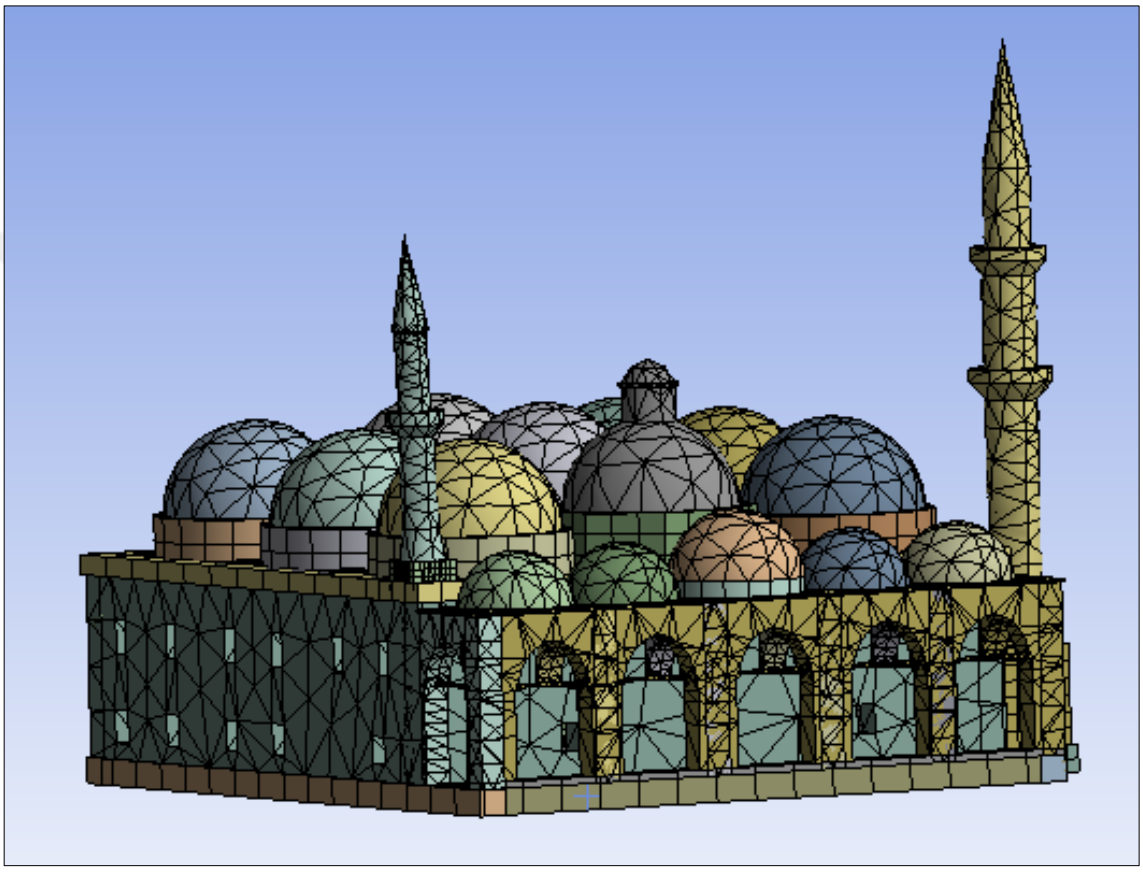
Çizelge 5.4. DD2 deprem düzeyi için spektral ivme değerleri

S_s =	0,427	
S_1 =	0,132	
Zemin Vs30=	ZC	
TL=	6,0	
Şekil için En Son Periyot =	4,0	s
γ_F	1,000	
R, Davranış Katsayısı	3,000	
I, Bina Önem Katsayısı	1,500	
D, Dayanım Fazlalığı	2,500	
Fs =	1,300	
F1 =	1,500	
SDS =	0,555	g
SD1=	0,198	
TB =	0,357	s
TA =	0,071	s



Şekil 5.8. DD2 deprem düzeyi ve R=3 azaltma katsayısı için elde edilen azaltılmış tasarım spektral ivme grafiği

Eski Camii'nin sonlu eleman modeli Ansys R2021-R.2 yazılımında oluşturulmuştur. Caminin oturma alanı 2.116 m^2 dir. Kubbe ve tonoz kalınlığı 60 cm'dir. Kubbelerin ortalama dış çapı 13 m, yükseklikleri ise 4.00 m dir. Cami temeli 2,00 metre kabul edilerek, sonlu eleman büyüklüğü 100 cm'den daha büyük elemanlar kullanılmayarak modelleme yapılmıştır. Yapılan modellemede camii duvar ve minaresi, taş ve harç, kubbe ve tonozlar ise tuğla ve harç malzeme özellikleri ile modellenmiştir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9. Eski Camii sonlu elemanlar modeli

Modellemede kullanılan elaman sayıları;

Katı (solid) Eleman Sayısı : 20.539

Düğüm Noktası (node) Sayısı : 86.753

5.1.4. Yapının Sonlu Elemanlar Analizi

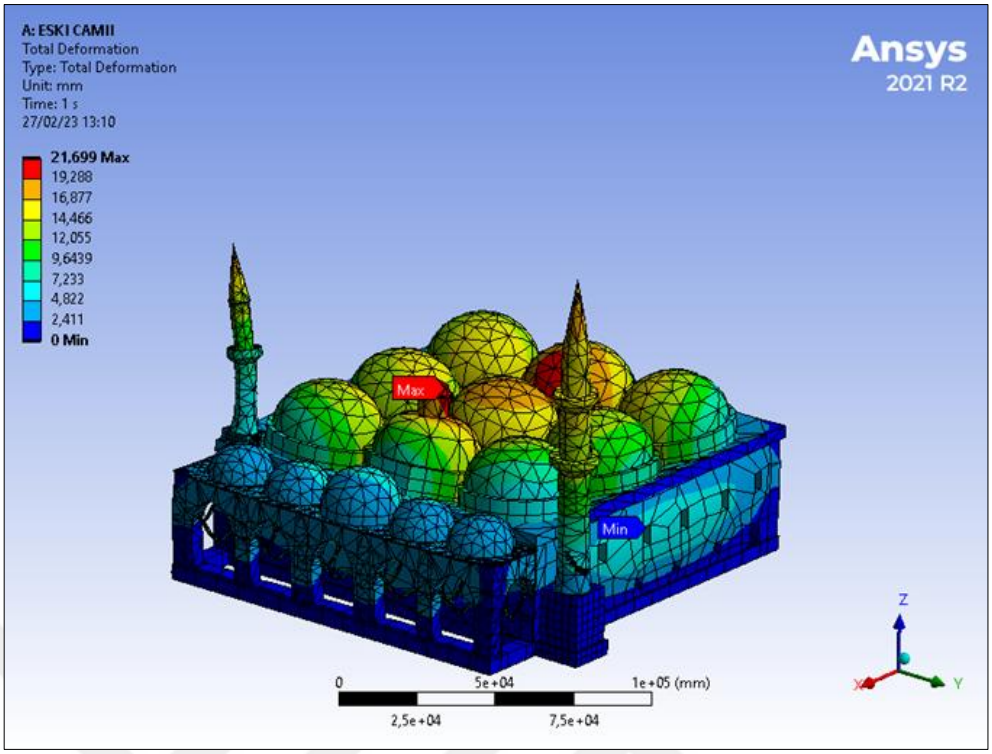
Eski Camii'nin ANSYS programı ile hazırlanan katı modeli, öncelikle düşey yükler altındaki davranışının belirlenebilmesi için sonlu elemanlar yöntemi ile (G+nQ) statik analizi yapılmıştır. Yapının düşey yükler altında stabilitenin sağlandığı dikkate alındığında, öncelikle yapıda meydana gelen en büyük yer değiştirme ve gerilme

dağılışlarının belirlenmesi önem arz etmektedir. Böylece yapıda meydana gelen hasarlar ve çataklar hakkında genel bir bilgiye ulaşılması ve önlem alınması mümkün olmaktadır. Düşey yüklemdeki, G ile ifade edilen sabit yükler için modellemede kullanılan malzemelerin birim ağırlıkları yerçekimi yönünde tanımlanmış olup, kaplama ve ilave yüklerde zati ağırlığın %10 gibi bir oranla sabit yüklere ilave edilmiştir. Q ile ifade edilen haraketli yüke ise kar yükü 0.75 kN/m^2 olarak ilave edilmiştir.

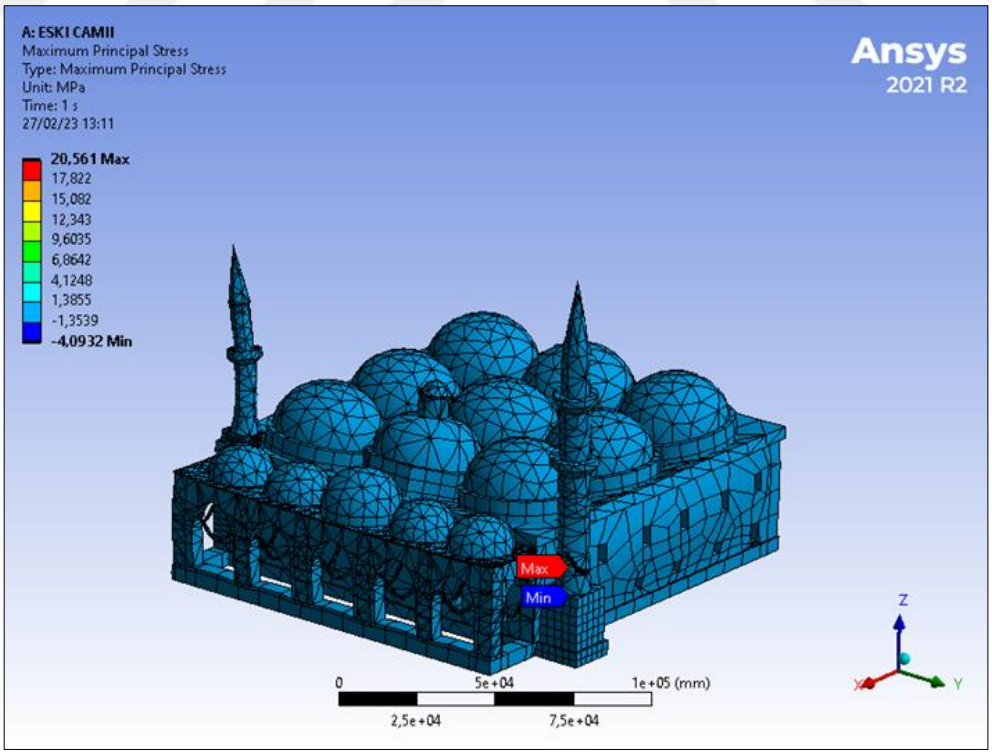
Eski Camii'de *(G+nQ)* düşey yüklerden kaynaklanan bazı hasarların oluştuğu görülmüştür. En büyük yer değiştirme, harimi örten büyük kubbenin tepe noktasının düşey 3 ekseni (z ekseni) üzerindeki 21,699 mm değeriyle, maksimum asal gerilme 20,56 Mpa değeri ile gerçekleşmiştir. Yapının düşey yükler altında oluşan deformasyon ve gerilme dağılımları Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de gösterilmektedir.

Yapının modal analizi yapıldığında, en büyük periyodunun dördüncü modda küçük minarenin y yönünde (0.84066 Hz) olduğu görülmüştür. Yapıya ait mod şekilleri Şekil 5.14, Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de gösterilmektedir.

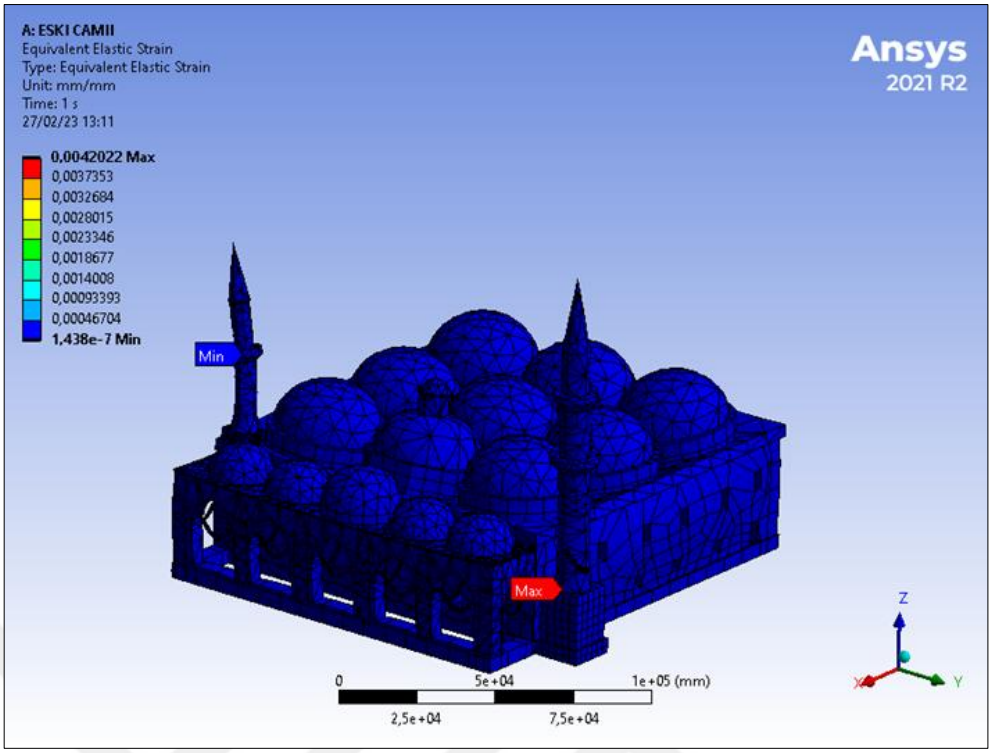
Yapının deprem yükleri altındaki analizi sonucunda, maksimum asal gerilme 0,1645 Mpa değeri ile gerçekleşmiş, maksimum kayma gerilmesi ise 0,035Mpa değeri ile gerçekleşmiştir. Yapının düşey yükler altında oluşan deformasyon ve gerilme dağılımları Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'de gösterilmektedir.



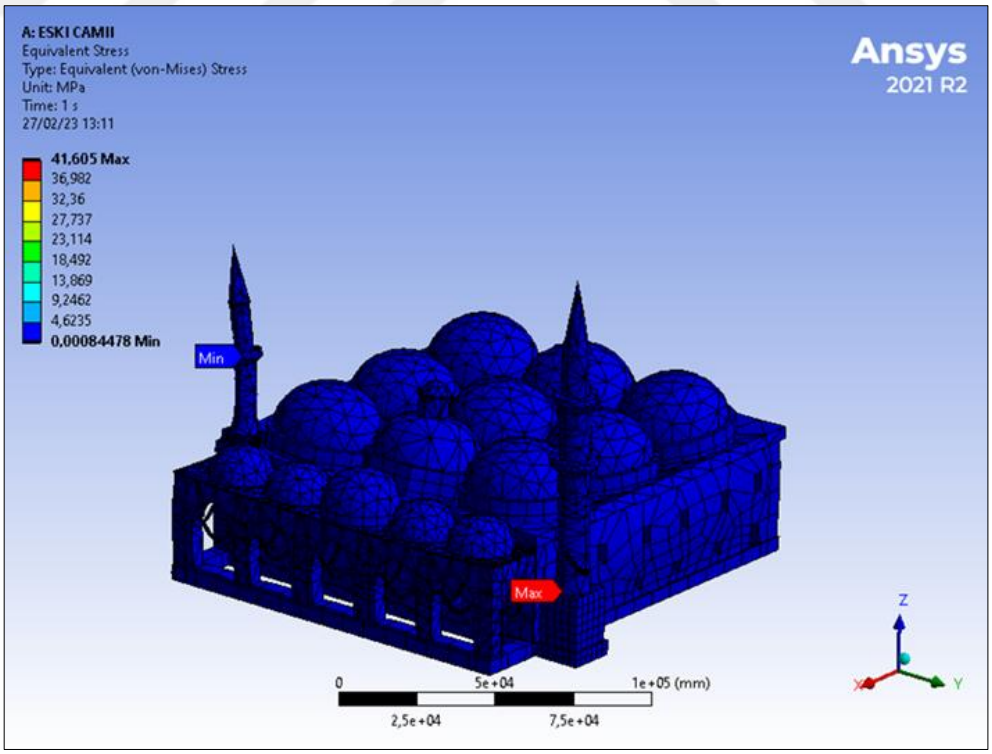
Şekil 5.10. Düşey yüklerde oluşan maksimum deformasyon



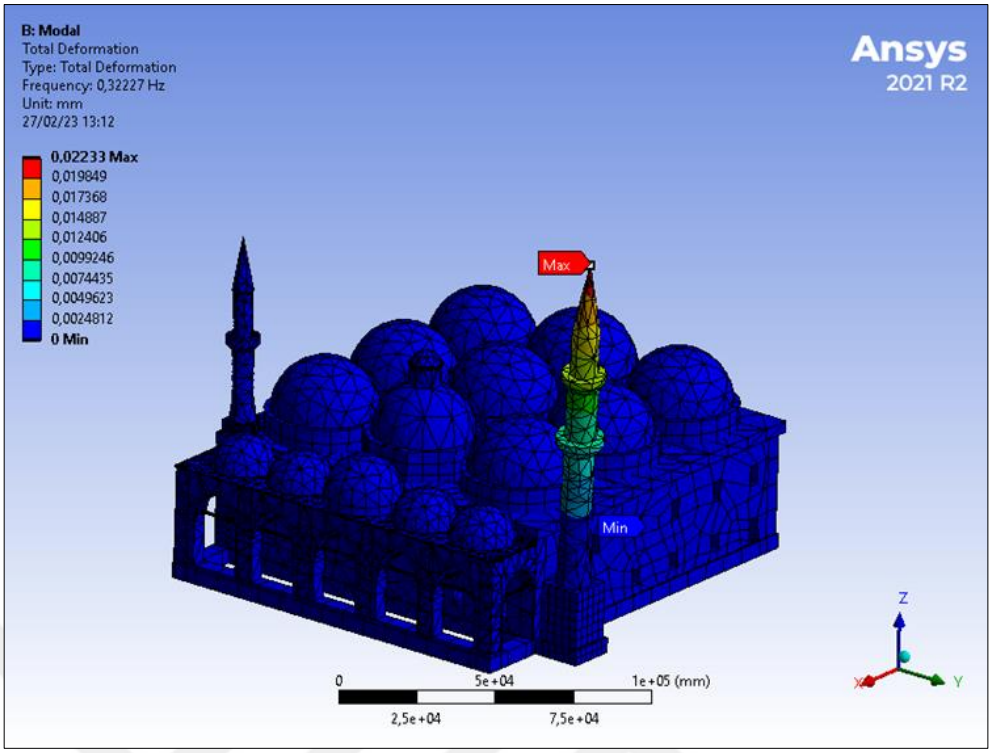
Şekil 5.11. Düşey yüklerden oluşan maksimum asal gerilme



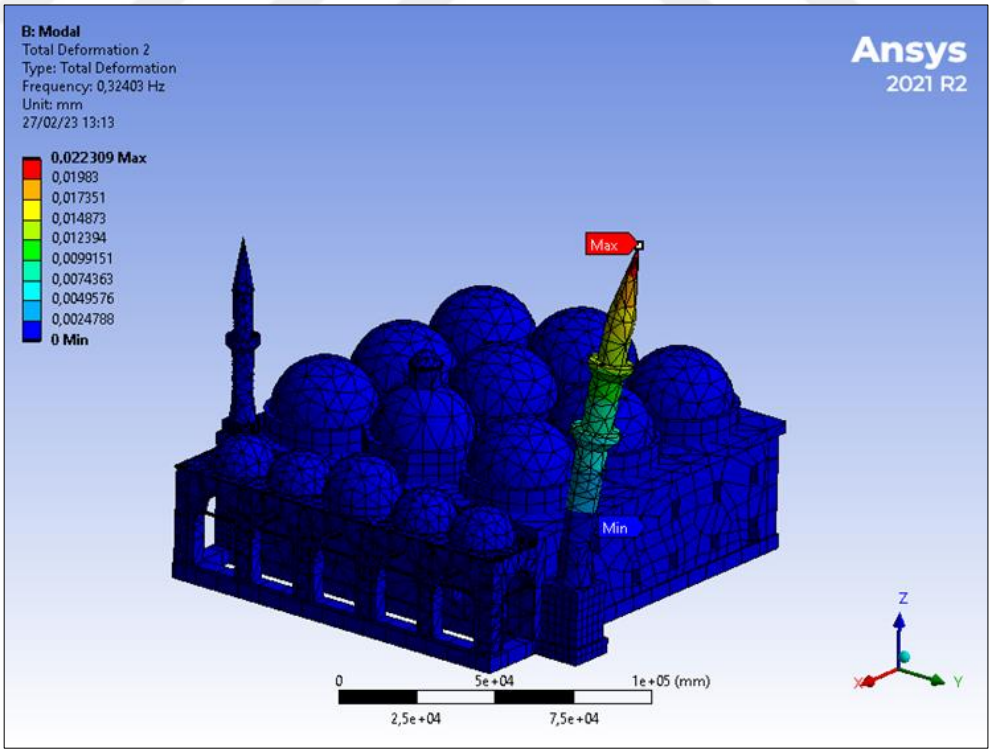
Şekil 5.12. Düşey yüklerden oluşan eşdeğer gerilme (Von-Mises)-σ



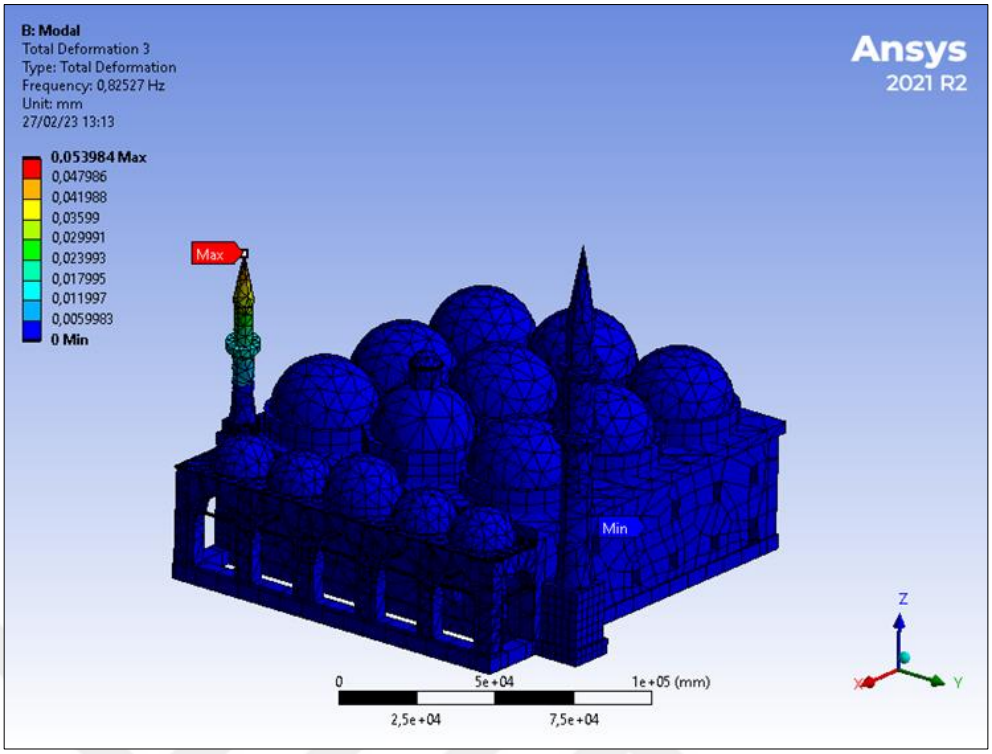
Şekil 5.13. Düşey yüklerden oluşan eşdeğer şekil değiştirme-ε



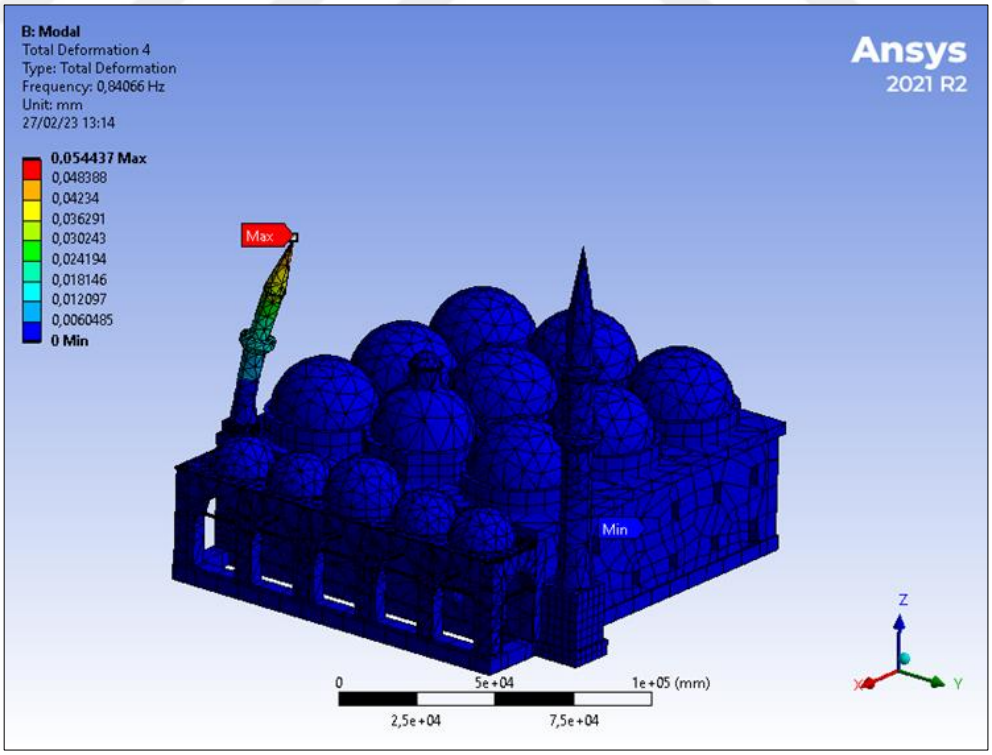
Şekil 5.14. Yapının 1.mod durumu (0.32227Hz)



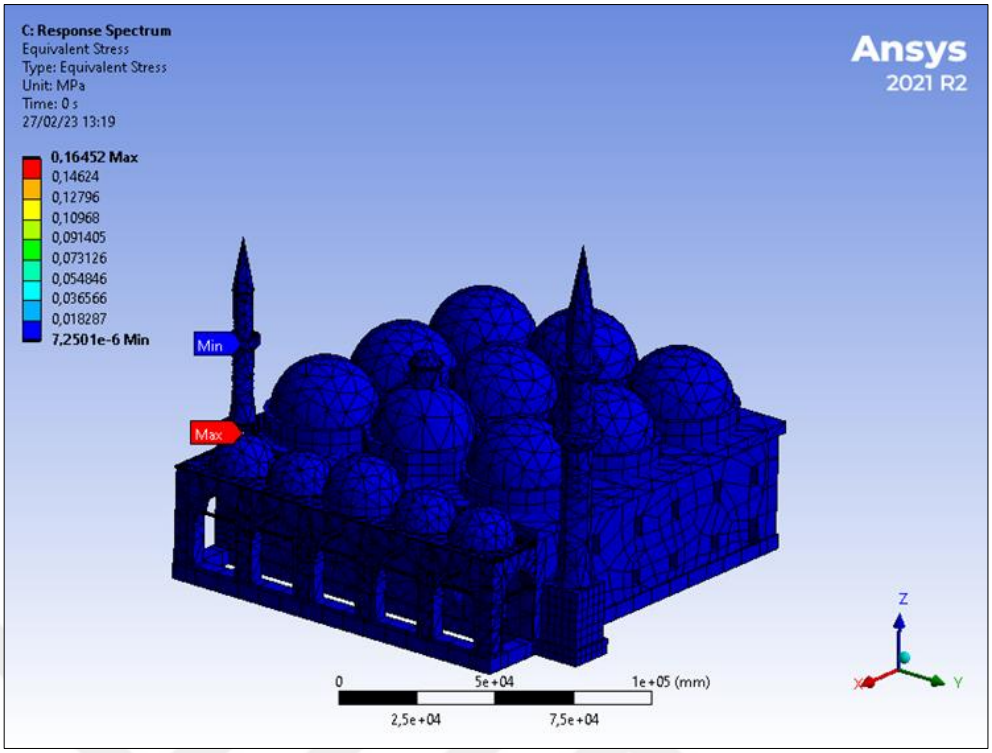
Şekil 5.15. Yapının 2.mod durumu(0.32403Hz)



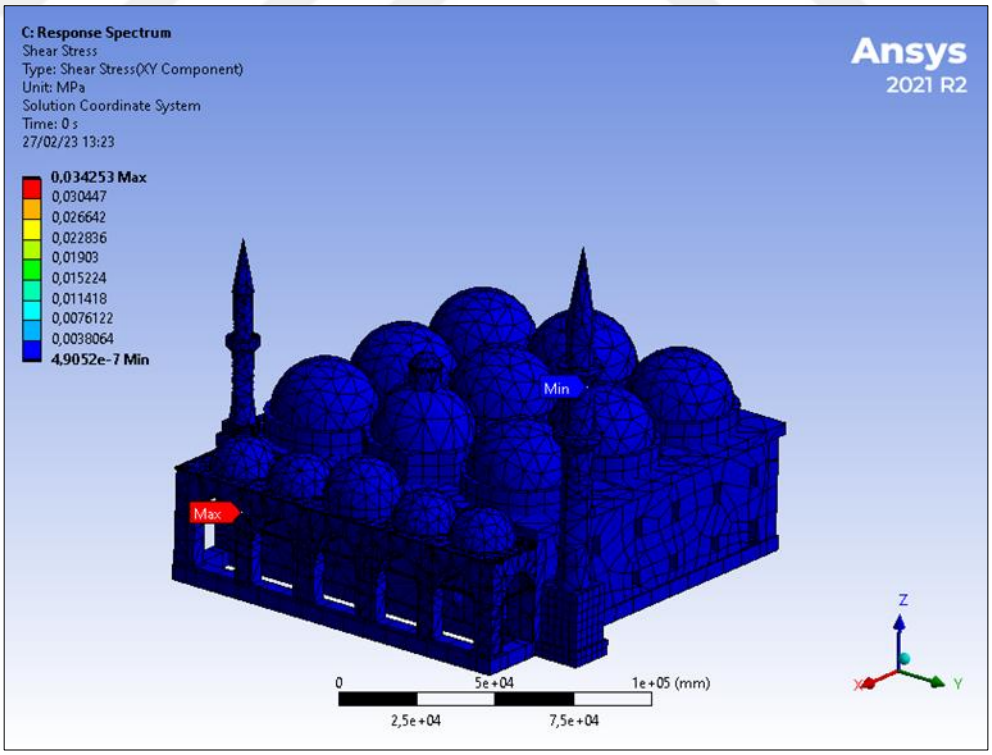
Şekil 5.16. Yapının 3.mod durumu (0.82527Hz)



Şekil 5.17. Yapının 4.mod durumu (0.84066Hz)



Şekil 5.18. Yatay yüklerden oluşan eşdeğer gerilme



Şekil 5.19. Maksimum kayma gerilme durumu

5.1.5. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

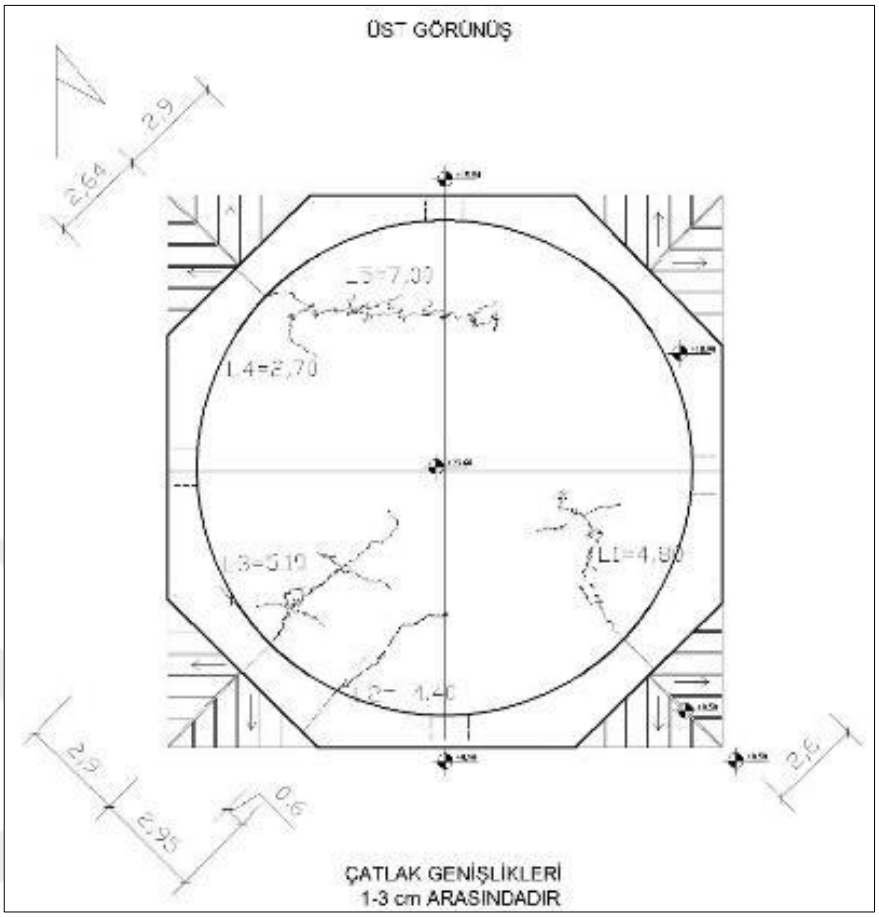
Analiz sonuçlarında yükleme tipine bağlı olarak normal gerilmeler, kayma gerilmeleri, asal gerilmeler ve şekil değiştirmeler Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da grafikler şeklinde gösterilmiştir. Gösterimlerde değerler en küçükten en büyüğe olacak şekilde renk skalası ile ifade edilmiştir. Yapıda yüklemelere bağlı oluşan basınç, çekme ve kayma gerilme değerleri ile malzemelerin karakteristik değerleri karşılaştırılarak analiz sonuçlarının değerlendirilmesi yapılmıştır. Özellikle çekme ve kayma gerilme değerleri ve oluşum yerlerinin dikkatlice izlenmesi gerekmektedir.

5.1.6. Onarım ve Güçlendirme Önerileri

Edirne Eski Camii'de kubbede çatlaklar olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.20), (Şekil 5.21). Oluşan çatlaklar temizlenip incelendiğinde, çatlakların sadece kubbenin üst katmanında oluştuğu ve kubbe merkezine yakın bir yerden başlayarak kubbe kasnağına kadar ilerlediği gözlemlenmiştir.

Bu hasarların onarılmasına ilişkin;

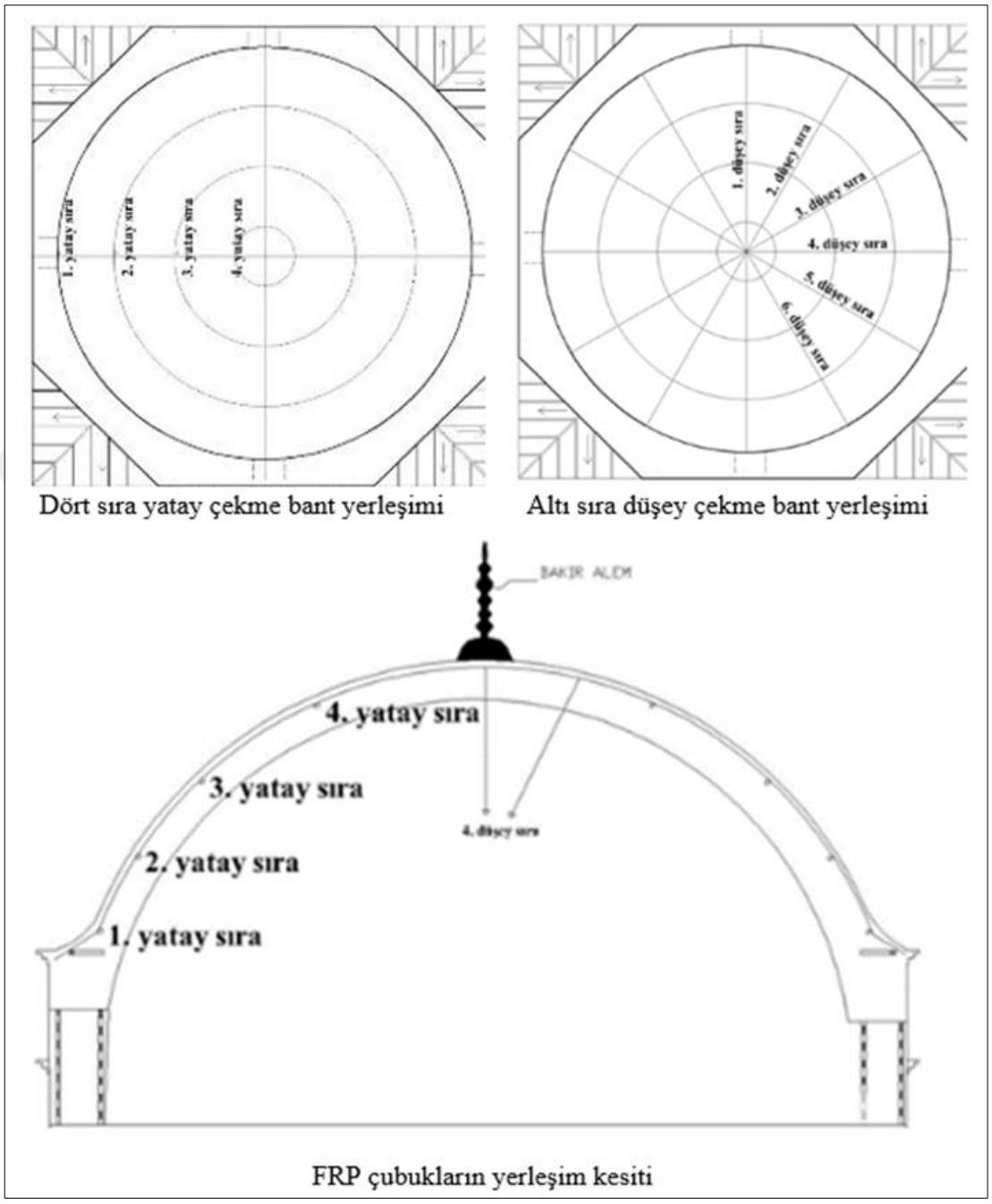
- Kasnak bölgesinde çatlak oluşan bölgelerin itina ile açılarak temizlenmesinin, kasnak bölgesinde çürüyen ve bozulan ahşap çekme elemanlarının değiştirilmesinden sonra orijinaline uygun malzeme ile yeniden örülmesi ve hidrolik kireç enjeksiyonun yapılmasının uygun olacaktır.
- Kubbedeki çatlakların orijinaline uygun malzeme ve hidrolik kireç enjeksiyonu ile onarılması uygun olacaktır.
- Kubbenin oluşturduğu yatay çekme kuvvetlerini karşılayıcı ve çatlak oluşumlarını önleyici olmak üzere, yatay yönde kasnak seviyesinde başlayan yaklaşık 1,0-1,5 m. aralıkla 4 sıra FRP (lifli Polimer) çekme bantlarının yerleştirilmesinin, düşey yönde ise 6 sıra öngerilme verilmiş FRP çekme bantları ile bir ızgara sistem oluşturulması uygun olacaktır (Şekil 5.22).
- Kasnak seviyesinin üst ve alt bölgesinde bulunan çatlakların ilerlemesini önlemek için, paslanmaz çelik kuşaklarla ile 1'er sıra kuşaklama yapılarak, çelik kuşakların birbirlerine 2 adet 20mm (2M20) bulonla birleştirilmesi uygun olacaktır (Şekil 5.23).



Şekil 5.20. Kubbede çatlak oluşum yerleri

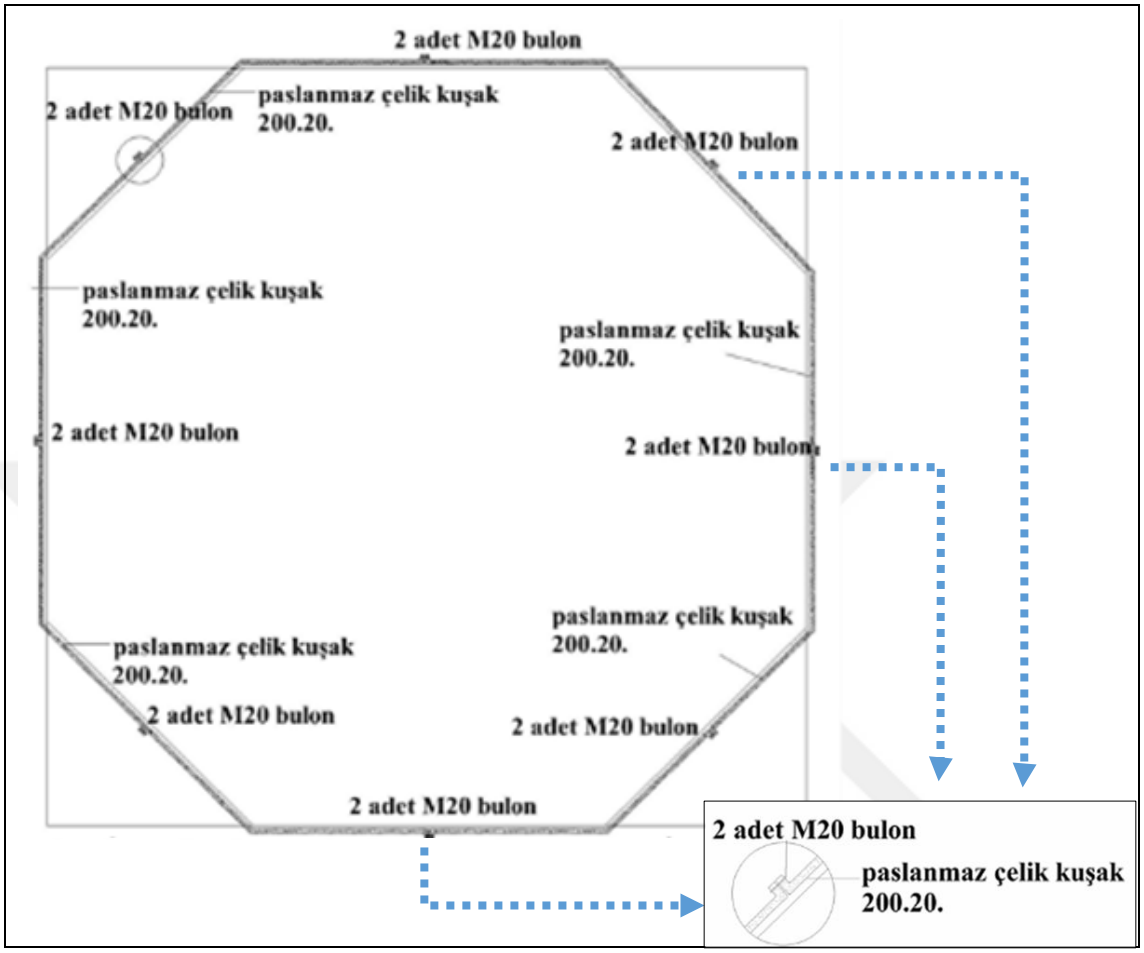


Şekil 5.21. Kubbe çatlaklarının genel görünüşü



Şekil 5.22. FRP çubukların yerleşim planları

Şekil 5.23. Kasnak üstü çelik kuşak ve bulon birleşim detayları



5.1.7. Onarım ve Güçlendirme Uygulamaları

Edirne Eski Camii'de yapılan hesaplamaları sonucunda kubbede oluşan çatlakların onarım ve güçlendirme önerileri doğrultusunda 2008 yılında, Edirne Vakıflar Bölge Müdürlüğü kontrolünde uygulamaları yaptırılmıştır. Kubbelerin güçlendirilmesi için yatayda ve düşeyde uygulanılması önerilen FRP çekme bantlarının yerleşimine ait imalat aşamaları aşağıda verilmiştir (Şekil 5.24).



Şekil 5.24. FRP Bantlar ile onarım ve güçlendirme uygulamaları (Edirne Vakıflar Bölge Müdürlüğü, 2008)

5.2. Medrese Ali Bey Camii Örneği

Günümüzde Medrese Ali Bey Cami olarak bilinen küçük mescid "H.904/M.1498" tarihinde Mustafa oğlu İbrahim tarafından yaptırılmıştır. Zaviye olarak inşa edilen yapı Mahmut Paşa (veli) adına Mimar Sinan tarafından Camiye çevrilmiştir (Osman, 2013).



Şekil 5.25. Medrese Ali Bey Camii Görseli (https://edirne.web.tr/medrese-ali-bey-camii/)

5.2.1. Hazırlık Çalışmaları:

Edirne Vakıflar Bölge Müdürlüğü ve Edirne Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu Müdürlüğü arşivlerinden elde edilen veriler çerçevesinde;

Plan Özellikleri: Sadece minaresinin bir bölümü ayakta olan caminin 2015 yılında projeleri Edirne Vakıflar Bölge Müdürlüğü tarafından hazırlatılmıştır. Edirne Müzesi denetiminde rölöve, restitüsyon ve rekonstrüksiyon projeleri için kazı çalışmaları yapılarak cami ve çevresinin plan ve malzeme özellikleri ortaya çıkarılmıştır. Yapılan kazı çalışmaları sonucunda, planda yaklaşık dıştan dışa 9.62 m X 9.44 m ölçülerinde kare planlı harim bölümü ile harim bölümünün kuzeybatı cephesine bitişik 4.33 m x 9.24 m ölçülerinde dikdörtgen planlı 3 sütunlu, revaklı son cemaat bölümünün olduğu tespit edilmiştir.

Hasarlar ve Onarımlar: Mevcut durumunda son cemaat yeri ve harim bölümü yıkılmış olup sadece minaresi ayakta kalmış durumdadır. Yerinde yapılan kazı çalışmaları sonucunda temeller ve beden duvarlarının bir kısmı sağlıklı olarak ortaya çıkarılmıştır. Plan ölçüleri, harim bölümünde ~9.70 m x 9.44 m, son cemaat yerinde ise ~9.24 m x 4.33 m'dir. Yığma kâgir olan yapı yonu taşı, moloz taş, yatay/düşey tuğla

hatıllı moloz taş duvarlarla inşa edilmiştir. Yapının duvar kalınlıkları, alt kotlarda ~85 cm – 90 cm dir. Kubbe iç çapı ~7.48 m'dir. Yapı yüksekliği, Kubbe üst kotunda ~11.24 m'dir. Yapının kubbesinin yapıtaşı tuğladır. Yapının minaresi, moloz taş örgü kaide üzerine tuğla ile örülerek inşa edilmiştir ve şerefe saçak kotu üst seviyesine kadar ayaktadır.

Yapının Rölöve Çizimleri: Edirne Vakıflar Bölge Müdürlüğü ve Edirne Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu Müdürlüğü arşivlerinden elde edilen veriler çerçevesinde Edirne Ali Bey Camii'ne ait Dor İnşaat tarafından hazırlanmış rölöve ve restorasyon projeleri temin edilmiştir. Yapısal analiz için CAD ortamında bulunan çizimlerden faydalanılarak yapıya ait üç boyutlu katı modellemesi yapılmıştır. Camiye ait plan, görünüş ve kesitler Ek B'de verilmektedir.

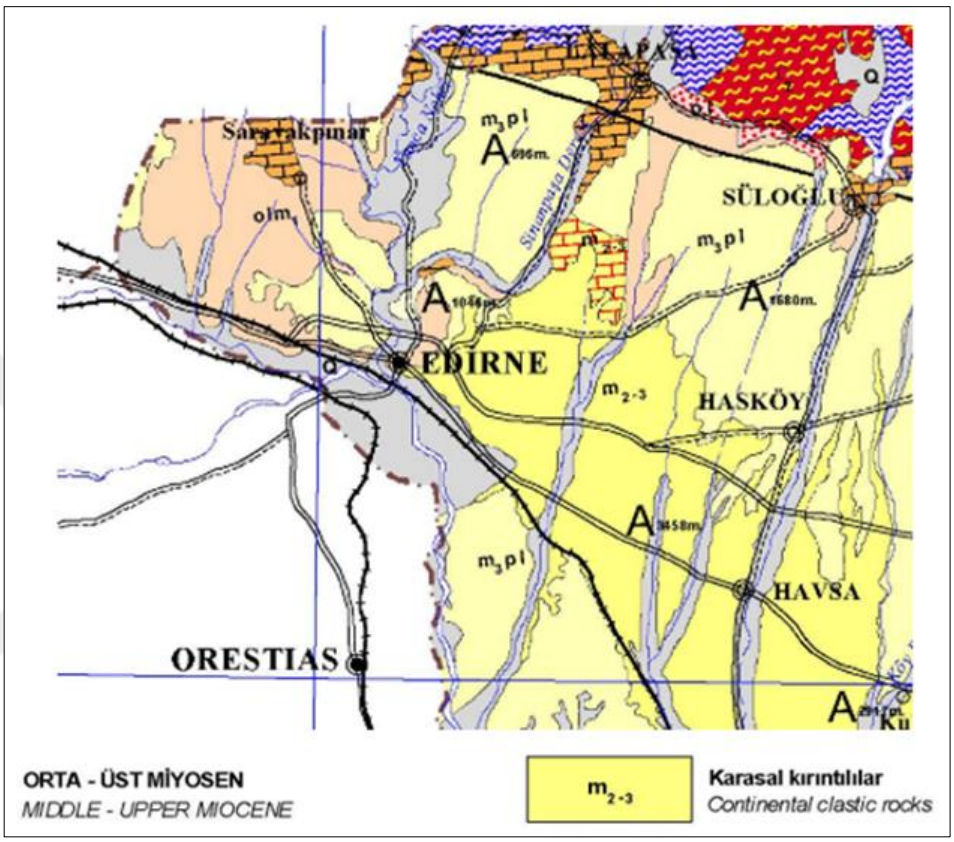
5.2.2. Malzeme ve Zemin Özellikleri

Medrese Ali Bey Camii, beden duvarları küfeki taşından, kubbeler ise tuğla malzeme olarak projelendirilmiştir. Ancak yapılan analizler sonucunda kubbe yüküne bağlı olarak oluşan gerilmelerin fazla olmasından dolayı kubbelerin yükünü azaltmak amacı ile çelik profiller ile taşıyıcı iskelet oluşturulmuştur. Malzemenin fiziksel özelliklerini belirlemek için testler ve deneylerin yapılması gerekmektedir. Ancak yapının tarihsel özellikleri dikkate alınarak Çizelge 5.5'de verilen malzeme özellikleri dikkate alınmıştır (Aköz, 2008; Dabanlı, 2008; Ünay, 2002).

Çizelge 5.5. Modelde kullanılan malzemeler ve kabul edilen emniyet gerilmeleri (Akan, 2010; Yazgan ve Ünay, 2019)

Yapı Elemanı	Yapı Birimi	Eleman Tipi	Malzeme Özellikleri			Emniyet Gerilmeleri		
			Elastiste Modulü	Öz Kütle	Possion Oranı	Basınç	Çekme	Kayma
			E	γ	ν	σ	σ	τ
			(Mpa)	(kg/m3)		(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)
Kubbeler	Tuğla+Harç	Kabuk	3.000	1.800	0,20	0,80	0,120	0,350
Tonozlar	Tuğla+Harç	Kabuk	3.000	1.800	0,20	0,80	0,120	0,350
Kemerler	Tuğla+Harç	Katı	3.000	1.800	0,20	0,80	0,120	0,350
Beden Duvarları	Taş+Harç	Katı	10.000	2.200	0,20	0,30	0,045	0,175
Minare	Taş+Harç	Katı	10.000	2.200	0,20	0,30	0,045	0,175
Sütunlar	Mermer	Katı	30.000	2.400	0,20	20,00	2,500	5,000
Gergiler	Demir	Çubuk	210.000	7.800	0,30	240,00	14,000	30,000
	Ahşap	Çubuk	9.000	500	0,30	2,83	2,830	0,450

Zemin Özellikleri: Edirne ilinin, MTA Yerbilimleri haritasından faydalanarak "http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx" aktif faylar ve jeolojik formasyonlara göre Medrese Ali Bey Cami zemin parametreleri orta-miyosen üst formasyonu m_{2-3} karasal kırıntılar olmak üzere güvenli bölgede kalacak şekilde ZC sınıfı olarak seçilmiştir. Zemin parametrelerine ait veriler Şekil 5.26' de verilmiştir.



Şekil 5.26. Edirne jeolojik formasyonu (http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx)

Medrese Ali Bey Cami temel zemininin durumunu belirlemek amacıyla Mayıs 2015 tarihli hazırlanan zemin etüd raporu'na göre;

- Etüd alanında; -10.50 m. Derinliğinde açılan 2 adet temel sondaj kuyusunda; yeraltı su seviyesi (yss) ile karşılaşılmamıştır.
- Araştırılan zeminler; C Zemin Grubunda ve Z3 Yerel Zemin Sınıfındadır.
- qe (zemin emniyet gerilmesi değeri)= 1.726 kgf/cm^2, k (zemin yatak katsayısının) = 2028t/m^3 olarak hesaplanmıştır.

5.2.3. Deprem Parametrelerinin Belirlenmesi

Yapıya etkiyen deprem kuvvetlerinin bulunması için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY 2018) belirtilen hesap yöntemi sırası ile uygulanmıştır. Yapının Şekil 5.27'de verilen coğrafi konumuna göre, TDTH Web Arayüzü (https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml afad.gov.tr) adresinden; Çizelge 5.2'de belirtilen DD-1 ve DD-2 deprem düzeyleri için spektral ivme katsayıları ZC zemin sınıfı için S1 ve Ss elde edilmiştir. Yapı davranış katsayısı R=3 alınarak azaltılmış tasarım spektral ivme değerleri hesaplanmıştır. DD-1 deprem düzeyleri için hesaplanan azaltılmış spektral ivme değerleri ve grafiği Çizelge 5.6 ve Şekil 5.28'de. DD-2 deprem düzeyleri için hesaplanan azaltılmış spektral ivme değerleri ve grafiği Çizelge 5.7 ve Şekil 5.29'de verilmiştir.

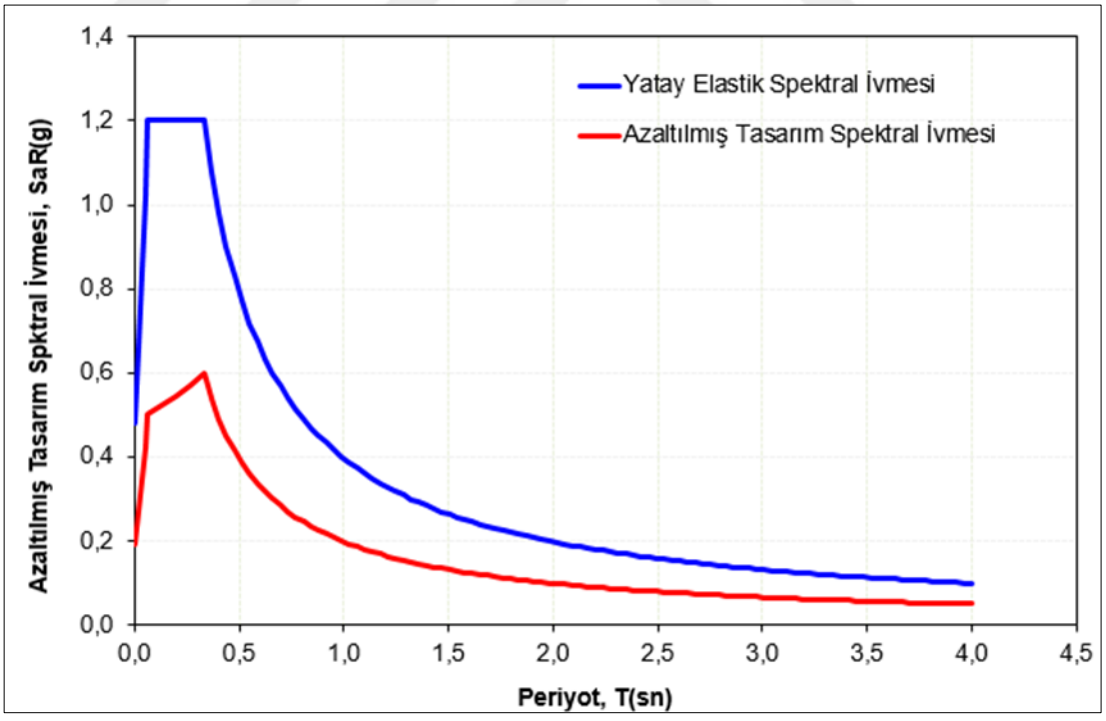


Şekil 5.27. Medrese Ali Bey Camii'nin Coğrafi konumu

TBDY2018'e göre DD-1 deprem düzeyi için azaltılmış tasarım spektral ivmesi

Çizelge 5.6. DD1 deprem düzeyi ve R=3 azaltma katsayısı için elde edilen azaltılmış tasarım spektral ivme değerleri

S_s =	0,999	
S_1 =	0,264	
Zemin Vs30=	ZC	
TL=	6,0	
Şekil için En Son Periyot =	4,0	s
γ_F	1,000	
R, Davranış Katsayısı	3,000	
I, Bina Önem Katsayısı	1,500	
D, Dayanım Fazlalığı	2,500	
Fs =	1,200	
F1 =	1,500	
SDS =	1,199	g
SD1=	0,396	
TB =	0,330	s
TA =	0,066	s

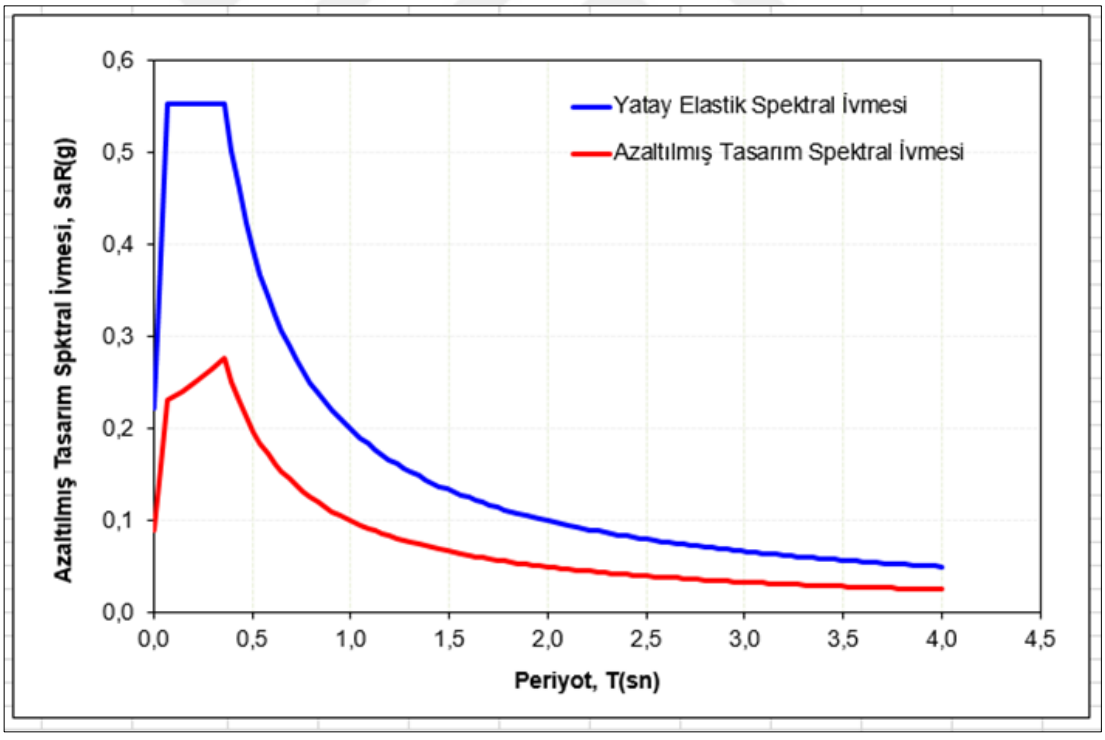


Şekil 5.28. DD1 deprem düzeyi ve R=3 azaltma katsayısı için elde edilen azaltılmış tasarım spektral ivme grafiği

TBDY2018'e göre DD-2 deprem düzeyine göre azaltılmış tasarım spektral ivmesi

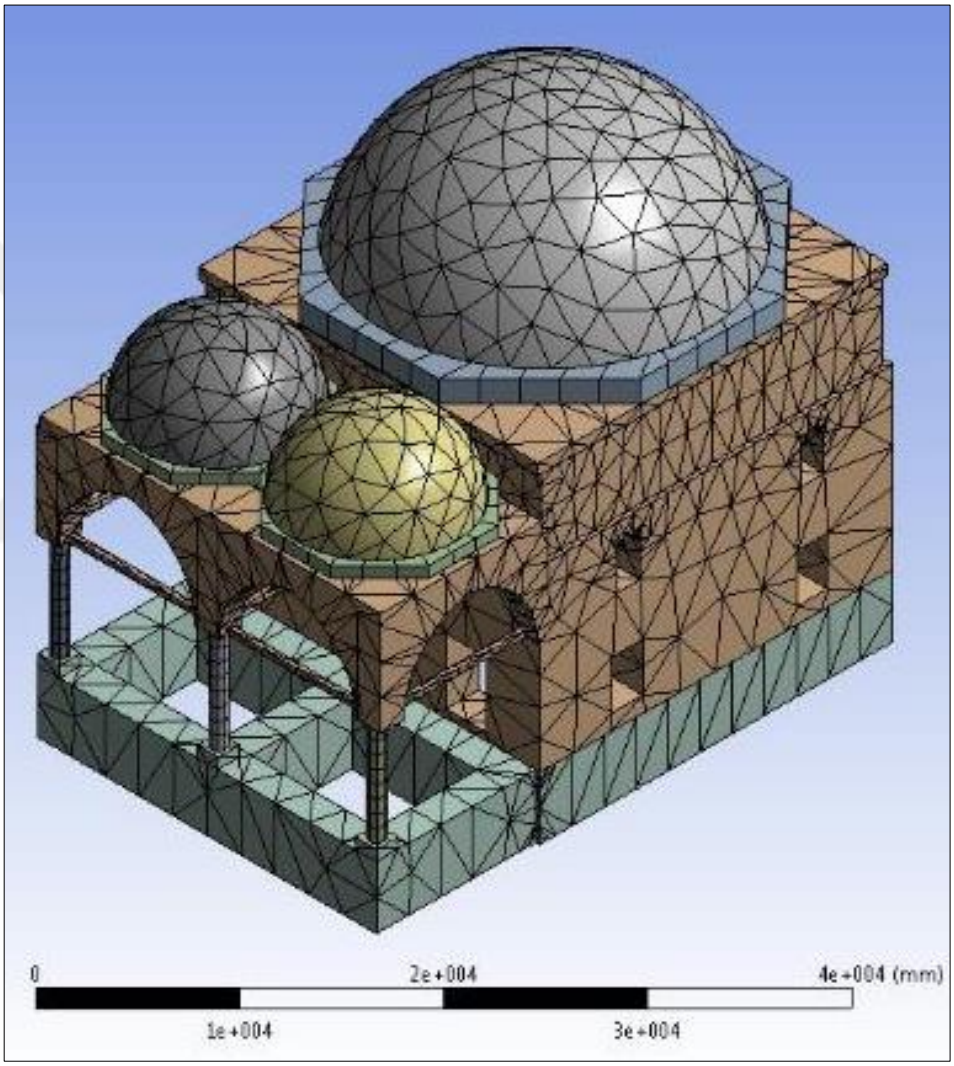
Çizelge 5.7. DD2 deprem düzeyi ve R=3 azaltma katsayısı için elde edilen azaltılmış tasarım spektral ivme değerleri

S_s =	0,426	
S_1 =	0,133	
Zemin Vs30=	ZC	
TL=	6,0	
Şekil için En Son Periyot =	4,0	s
γ_F	1,000	
R, Davranış Katsayısı	3,000	
I, Bina Önem Katsayısı	1,500	
D, Dayanım Fazlalığı	2,500	
Fs =	1,300	
F1 =	1,500	
SDS =	0,554	g
SD1=	0,200	
TB =	0,360	s
TA =	0,072	s



Şekil 5.29. DD2 deprem düzeyi ve R=3 azaltma katsayısı için elde edilen azaltılmış tasarım spektral ivme grafiği

Medrese Ali Bey Camii'nin sonlu eleman modeli Ansys R2021-R.2 yazılımında oluşturulmuştur. Caminin tavan iz düşüm alanı 142,50 m^2' dir. Kubbe ve tonozların kalınlığı 40 cm'dir. Kubbelerin ortalama dış çapı 7,48 m, yükseklikleri ise 4.00 m dir. Caminin temelinin 2 metre aşağıda olduğu kabul edilerek, sonlu eleman büyüklüğü 100 cm'den daha büyük elemanlar kullanılmamaya çalışılarak modelleme yapılmıştır. Yapılan modellemede camii duvar ve minaresi, taş malzeme, kubbe ve tonozlar ise tuğla malzeme özellikleri ile modellenmiştir (Şekil 5.30).



Şekil 5.30. Medrese Ali Bey Camii sonlu elemanlar modeli

Modellemede kullanılan elaman sayıları;

Katı (solid) Eleman Sayısı : 13.755

Düğüm Noktası (node) Sayısı : 28.424

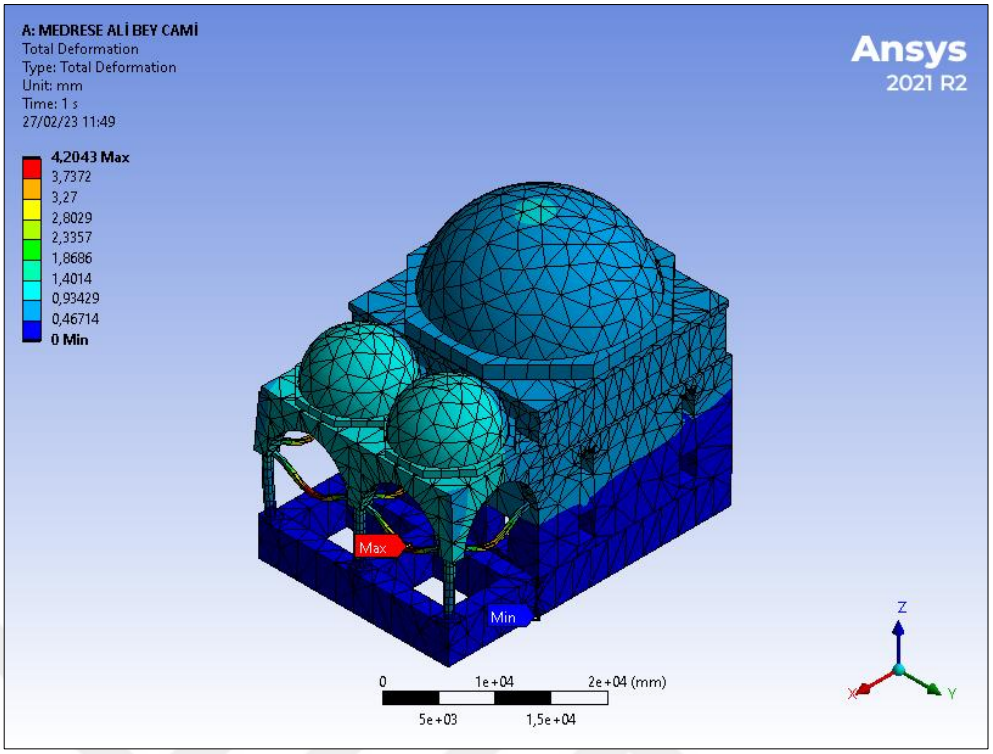
5.2.4. Yapının Sonlu Elemanlar Analizi

Medrese Ali Bey Camii'nin ANSYS programı ile hazırlanan katı modeli, öncelikle düşey yükler altındaki davranışının belirlenebilmesi için sonlu elemanlar yöntemi ile *(G+nQ)* statik analizi yapılmıştır. Yapının düşey yükler altında satabilesinin sağlandığı dikkate alındığında öncelikle yapıda meydana gelen en büyük yer değiştirme ve gerilme dağılışlarının belirlenmesi önem arz etmektedir. Böylece yapıda meydana gelen hasarlar ve çataklar hakkında genel bir bilgiye ulaşılması ve önlem alınması mümkün olmaktadır. düşey yüklemdeki, *G* ile ifade edilen sabit yükler için modellemede kullanılan malzemelerin birim ağırlıkları yerçekimi yönünde tanımlanmış olup, kaplama ve ilave yüklerde zati ağırlığın %10 gibi bir oranla sabit yüklere ilave edilmiştir. *Q* ile ifade edilen haraketli yüke ise kar yükü 0.75 kN/m^2 olarak ilave edilmiştir.

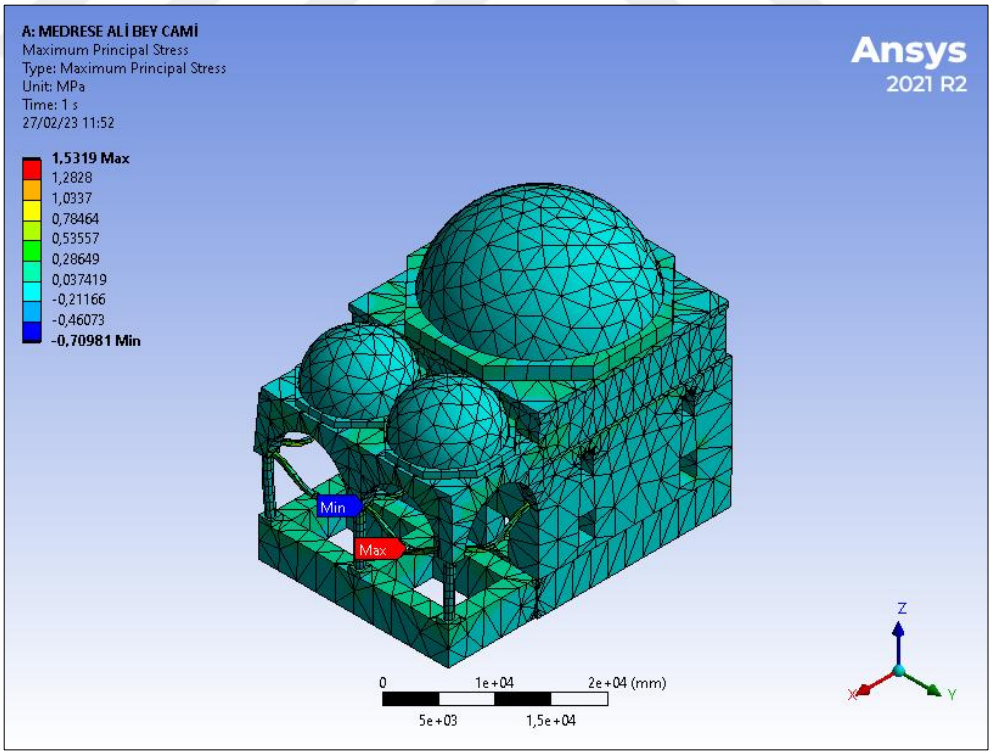
Medres Ali Bey Camii'nde *(G+nQ)* düşey yüklerden dolayı oluşan en büyük yer değiştirme, harimi örten büyük kubbenin tepe noktasının düşey 3 ekseni (z ekseni) üzerindeki 4,20 mm değeriyle, maksimum asal gerilme 1,53 Mpa değeri ile gerçekleşmiştir. Yapının düşey yükler altında oluşan deformasyon ve gerilme dağılımları Şekil 5.31, Şekil 5.32, Şekil 5.33 ve Şekil 5.34' de gösterilmiştir.

Yapının modal analizi yapıldığında, en büyük periyodunun dördüncü modda y yönünde 7.90Hz olduğu görülmüştür. Yapıya ait mod şekilleri Şekil 5.35, Şekil 5.36, Şekil 5.37 ve Şekil 5.38' de gösterilmiştir.

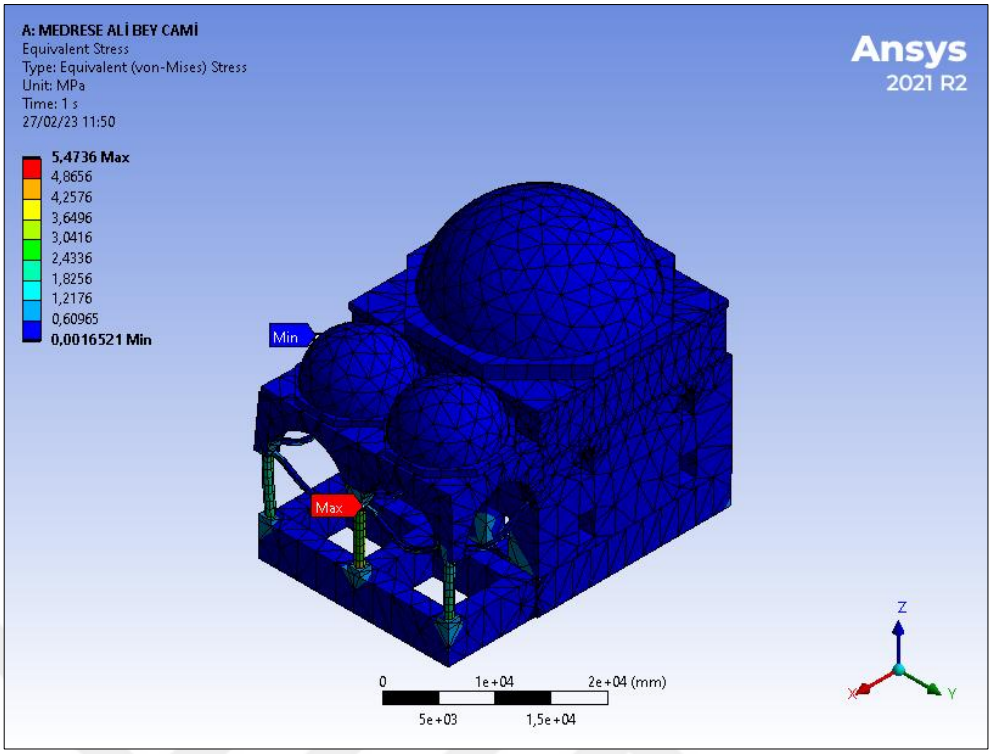
Yapının deprem yükler altındaki analizi sonucunda, maksimum asal gerilme 0,0024 Mpa değeri ile gerçekleşmiştir, maksimum kayma gerilmesinin 0,00035 Mpa değeri ile gerçekleşmiştir. Yapının düşey yükler altında oluşan deformasyon ve gerilme dağılımları Şekil 5.39 ve Şekil 5.40' de gösterilmiştir.



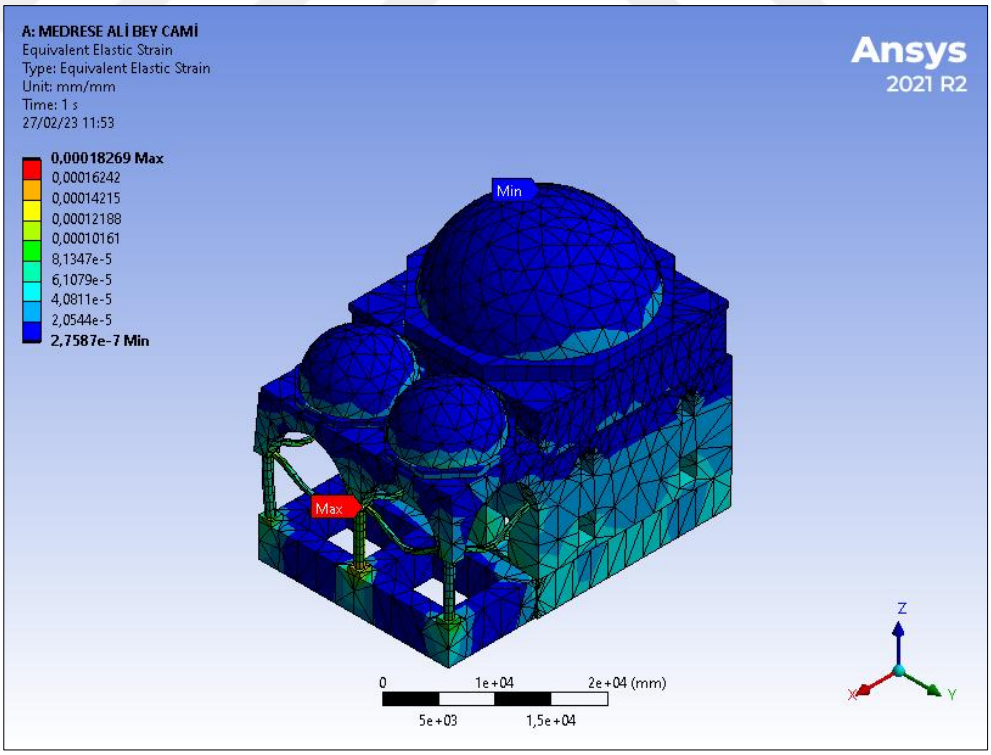
Şekil 5.31. Düşey yüklerde oluşan maksimum deformasyon



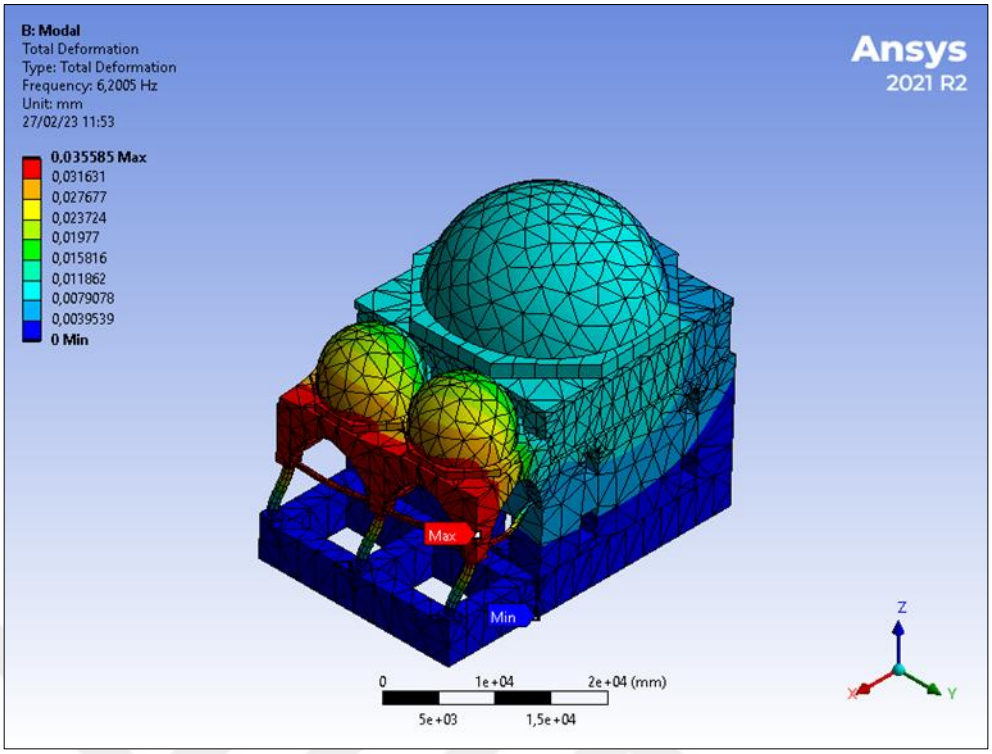
Şekil 5.32. Düşey yüklerden oluşan maksimum asal gerilme



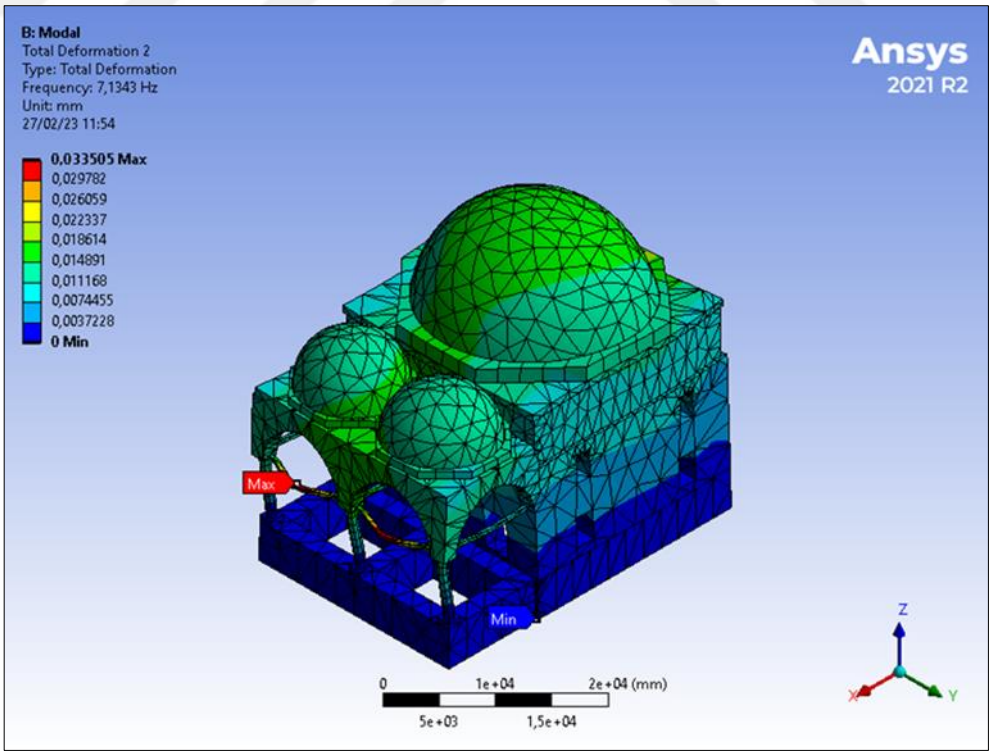
Şekil 5.33. Düşey yüklerden oluşan eşdeğer gerilme (Von-Mises)-σ



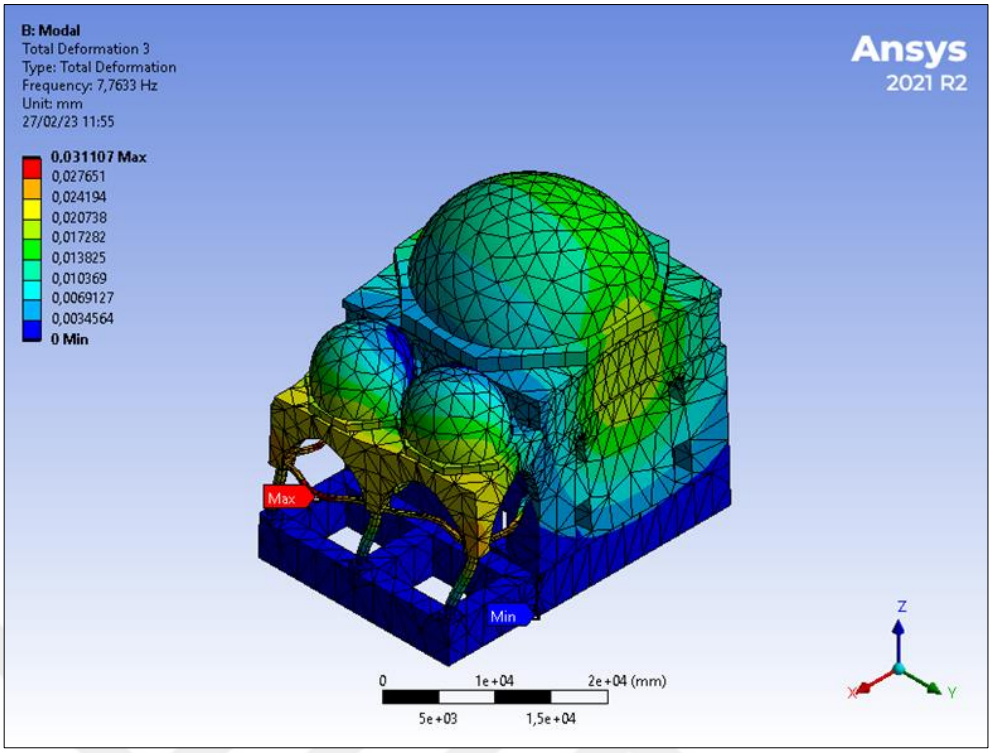
Şekil 5.34. Düşey yüklerden oluşan eşdeğer şekil değiştirme-ε



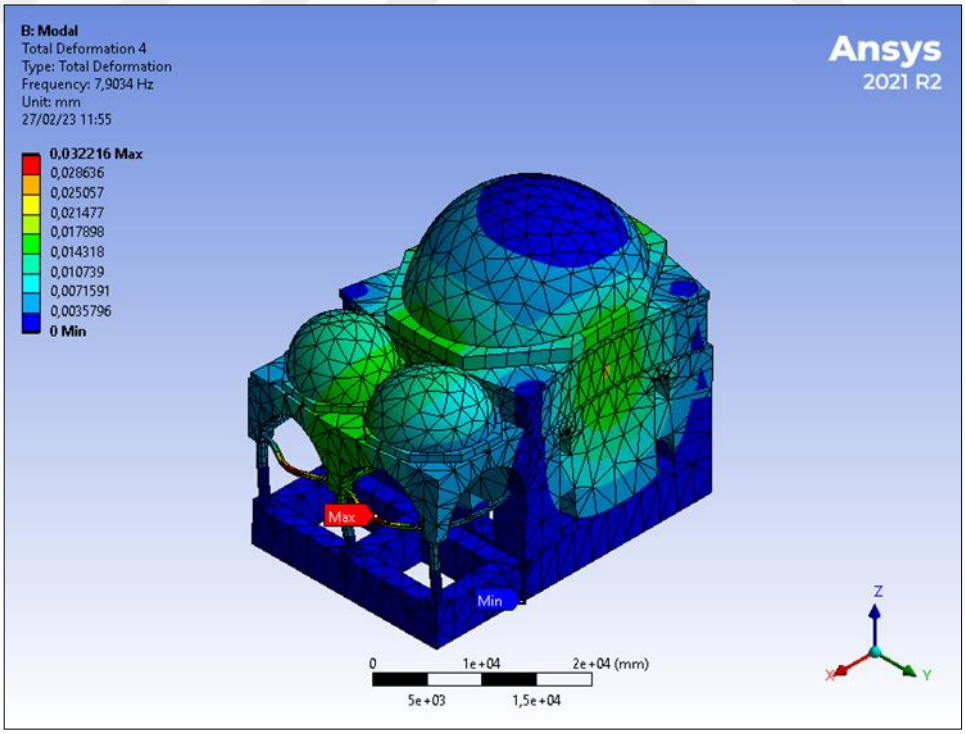
Şekil 5.35. Yapının 1. mod durumu (6.2005 Hz)



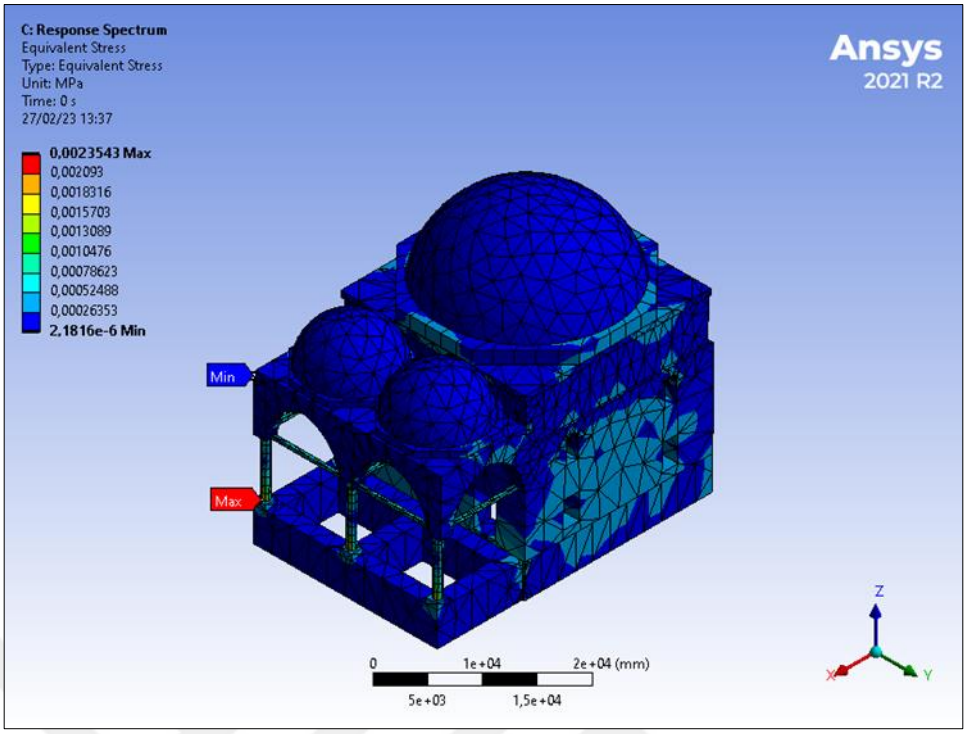
Şekil 5.36. Yapının 2. mod durumu (7.1343 Hz)



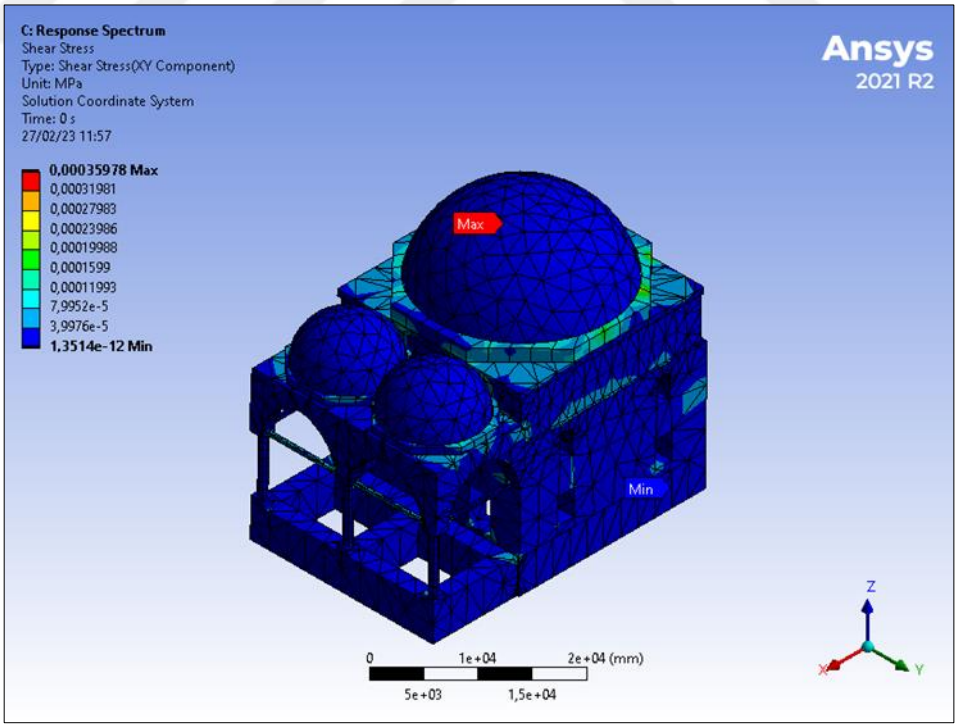
Şekil 5.37. Yapının 3. mod durumu (7.7633 Hz)



Şekil 5.38. Yapının 4. mod durumu (7.9034 Hz)



Şekil 5.39. X yönü maksimum deformasyon durumu



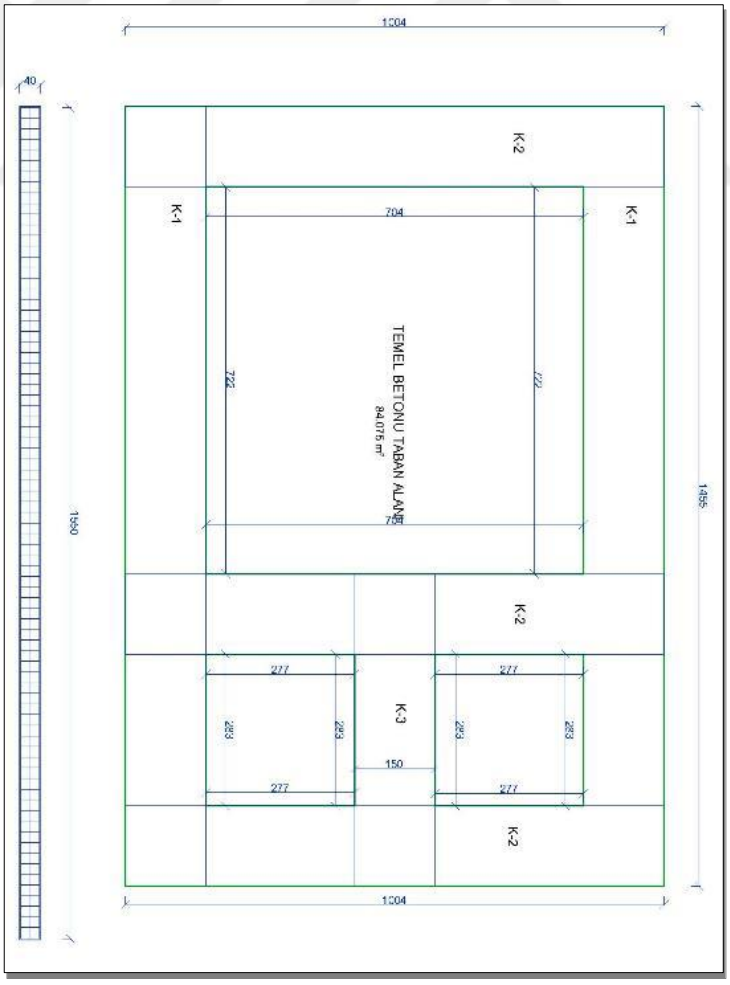
Şekil 5.40. Maksimumum kayma gerilme durumu

5.2.5. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Analiz sonuçlarında yükleme tipine bağlı olarak normal gerilmeler, kayma gerilmeleri, asal gerilmeler ve şekil değiştirmeler Şekil 5.39 ve Şekil 5.40' da grafikler şeklinde gösterilmiştir. Gösterimlerde değeler en küçükten en büyüğe olacak şekilde renk skalası ile ifade edilmiştir. Yapıda yüklemelere bağlı oluşan basınç, çekme ve kayma gerilme değerleri ile malzemelerin karakteristik değerleri karşılaştırılarak analiz sonuçlarının değerlendirilmesi yapılmıştır. Özellikle çekme ve kayma gerilme değerleri ve oluşum yerleri dikkatlice izlenmelidir.

5.2.6. Onarım ve Güçlendirme Önerileri

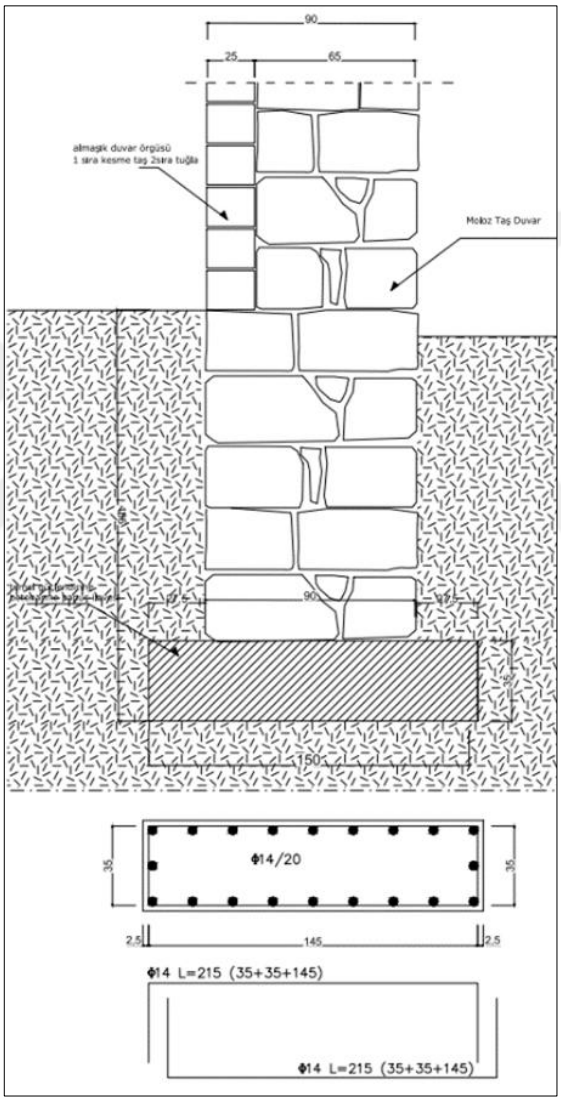
Yapının kazı sonrası ulaşılan duvar ve temel izleri yerinde incelenerek, harim bölümü ve son cemaat yerinin temelleri ve duvarlarının kalıntıları ile izlerinin tamamen sökülerek aslına uygun özgün malzemeler kullanılarak yeniden yapılması önerilmektedir (Şekil 5.41).



Şekil 5.41 Mevcut temel planı

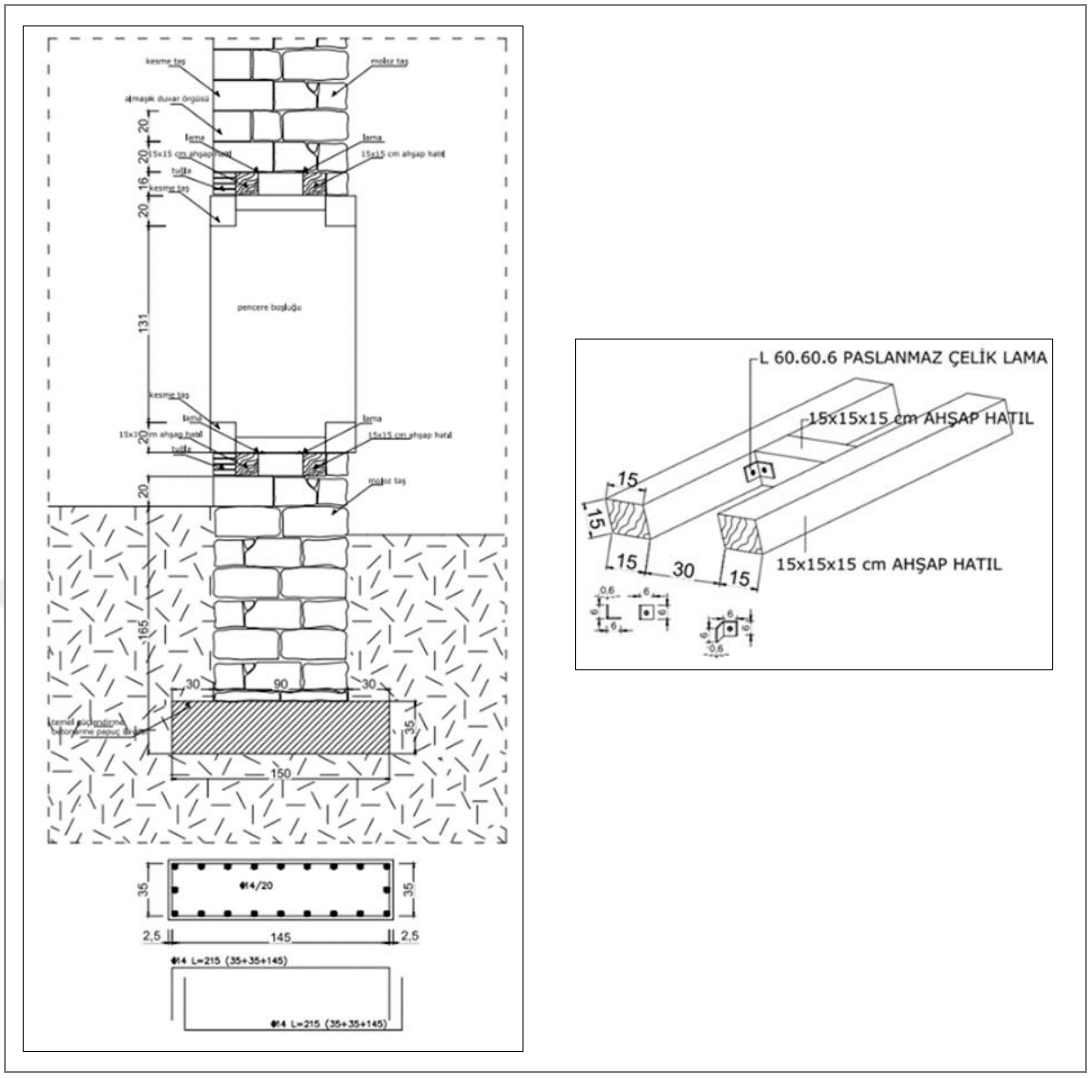
Bu bağlamda;

Temeller: Yapının temel hattı taş temel olup, sağlıksız durumdadır. Sökülüp yeniden yapılması önerilen temel ve duvarlarda 150x40 cm betonarme pabuç temel üzerine özgün harçla 0.00 kotuna kadar moloz taş duvar daha sonra ~65 cm sıralı moloz taş duvar dış yüzeyine ~25 cm yonu taşı örülerek güçlendirme yapılması önerilmiştir (Şekil 5.42).

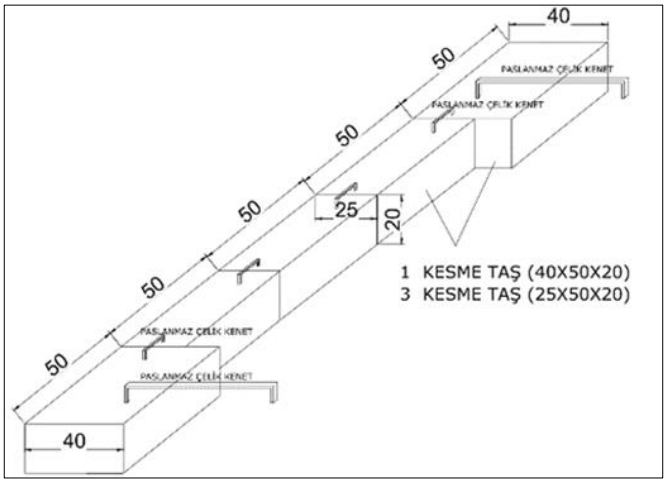


Şekil 5.42. Temel detayı

Duvarlar: Yapı beden duvarlarının büyük bir kısmı yıkılmış olup ayakta kalan kısımları da sağlıksız durumdadır. Mevcut duvarların sökülerek aslına uygun özgün malzemeler kullanılarak Şekil 5.43 ve Şekil 5.44'teki verilen detaylar kullanılmıştır.



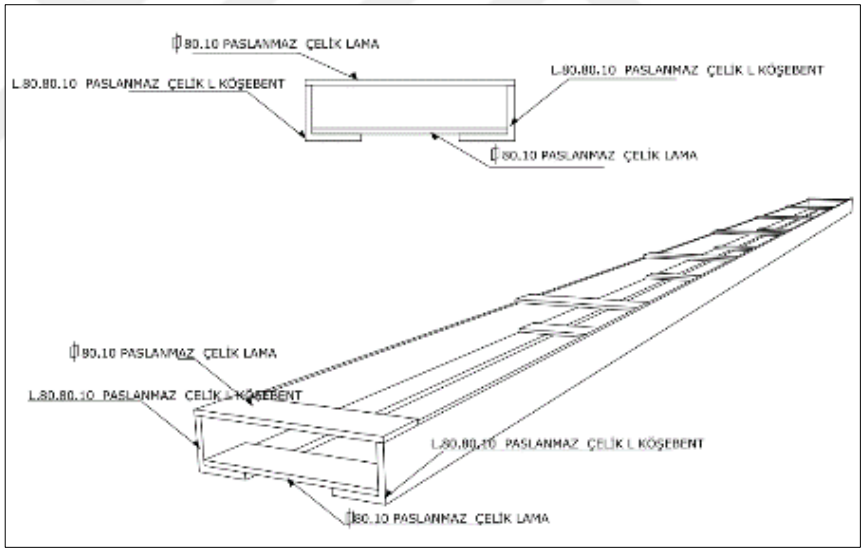
Şekil 5.43. Yeniden yapılacak duvarlarda moloz taş ve ahşap hatıl detayı



Şekil 5.44. Yeniden yapılacak duvarlarda yonu taşı detayı

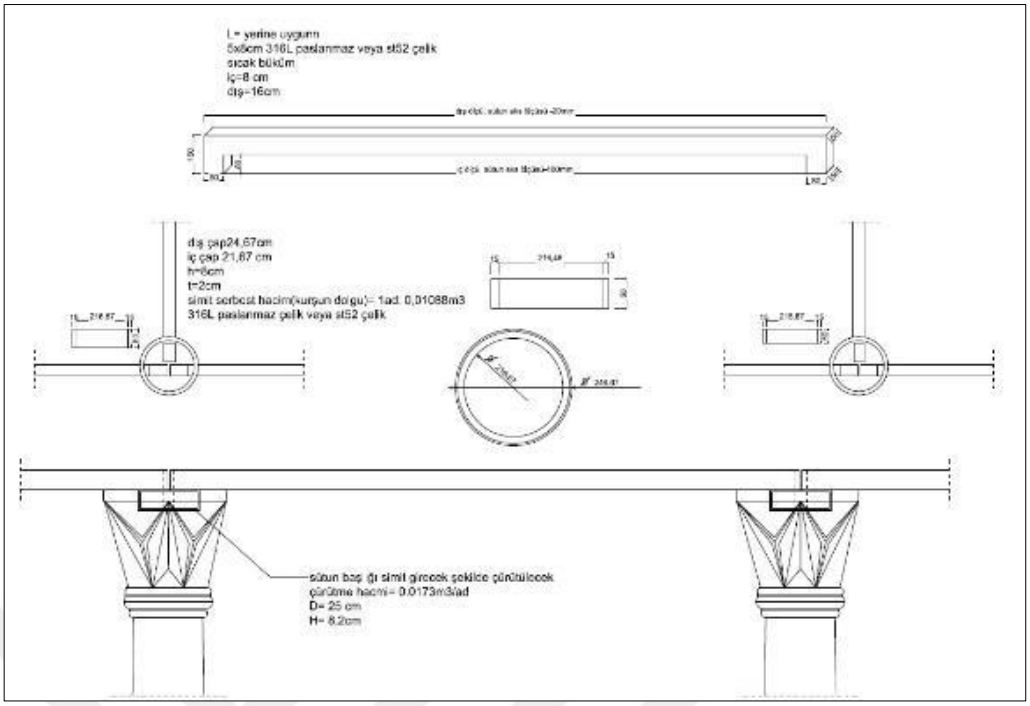
Duvarlar, iç kısımda ~65 cm kalınlığında moloz taş duvar, dış kısımda ise duvar kesitinin birlikte çalışmasını sağlamak amacıyla, yatayda 25x50x20 cm ebatlarında taşlar kullanılarak ve yaklaşık 150 cm aralıklarla (3 sırada 1) 40x50x20 cm derinliğinde taşlar konularak 1 sırasının örülmesi ve duvar örgüsünün 1 sıra yonu taşı, 2 sıra özgün klasik tuğla olarak örülmesi önerilmektedir. Dış cidardaki tüm taşların aisi316 paslanmaz çelik kenetlerle boyuna kenetler, duvara yerleştirilecek olan 40 cm derinliğindeki taşların ise duvar kalınlığında iç cidardaki taşa enine kenetlenmesi önerilmektedir.

Yapının beden duvarlarında meydana gelebilecek çatlak ve açılmaları önlemek amacıyla camiinin giriş (+0.35 kotu) ve alt pencerenin hemen üst kotunda (+2.15 kotu) yapıyı çepeçevre dolaşan yonu taş ve moloz taş almaşık duvar örgününün arasında 15x15x15 cm çift sıra (iç ve dış) her 1 m'de bir 15x15x15cm ara hatılar ve paslanmaz çelik lamalarla birbirine tutturulmak suretiyle daldırma emprenye meşe hatıllar uygulanması önerilmektedir (Şekil 5.45).



Şekil 5.45. Duvar üstü hatıl uygulaması

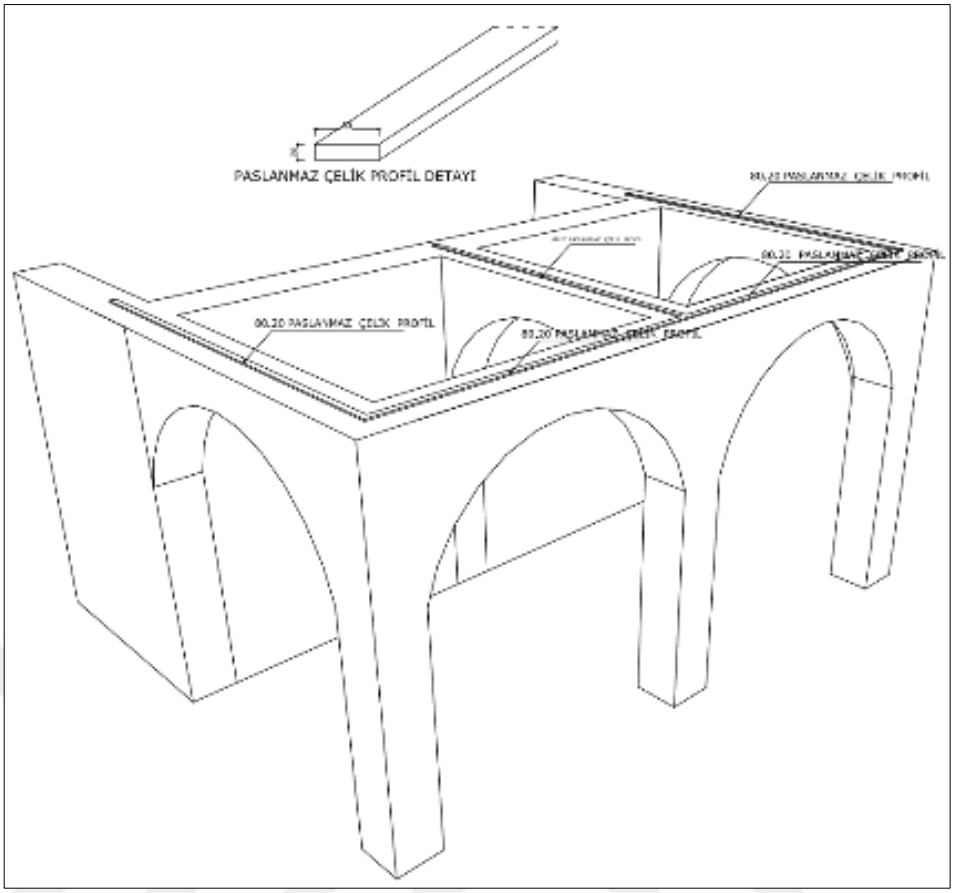
Sütunlar: Yapının kuzeybatı cephesinde son cemaat yeri revakları tamamen yıkılmış durumdadır. Revakların temel güçlendirmesi yapıldıktan sonra yok olan 3 sütunun restitüsyon projesinde belirtildiği detaylara uygun olarak yeniden yapılması önerilmektedir. Sütunların revak kemerleri ile birleşim-bilezik detaylarının ve üzengi seviyesindeki gergi elemanlarının aisi316 paslanmaz çelik elemanlar kullanılarak oluşturulması ve yapının özgün yapısına uygun malzemelerle revak kısmının yeniden inşa edilmesi önerilmektedir (Şekil 5.46).



Şekil 5.46. Sütün başlıklarının onarımı

Kasnaklar: Yapının harim bölümünün üzerini ve son cemaat bölümü üzerini kapatan kubbelerin oturmuş olduğu kubbe kasnakları tamamen yıkılmış durumdadır. Yapının beden duvarları, sütunları ve revaklarında yeniden yapım işlemleri tamamlandıktan sonra son cemaat yeri kemer alınlıklarının üst kısmında +6.30 kotunda son cemaat yeri ile harim bölümü duvar bağlantılarını sağlıklılaştırmak amacıyla 80x20 mm ebatlarında aisi316 paslanmaz çelik Lama ile dış kenarlarda 100c m harim bölümü duvarı, orta duvarda ise 50 cm harim duvarı içine ankre edilecek şekilde hatıl uygulaması önerilmiştir.

Harim bölümü +7.08 kotunda ve son cemaat +6.30 kotunda aisi316 paslanmaz çelik IPE200 profillerle çekme çemberi oluşturularak yapının özgün şekline uygun formda kubbe kasnağı çekme çemberinin oluşturulması önerilmiştir (Şekil 5.47).



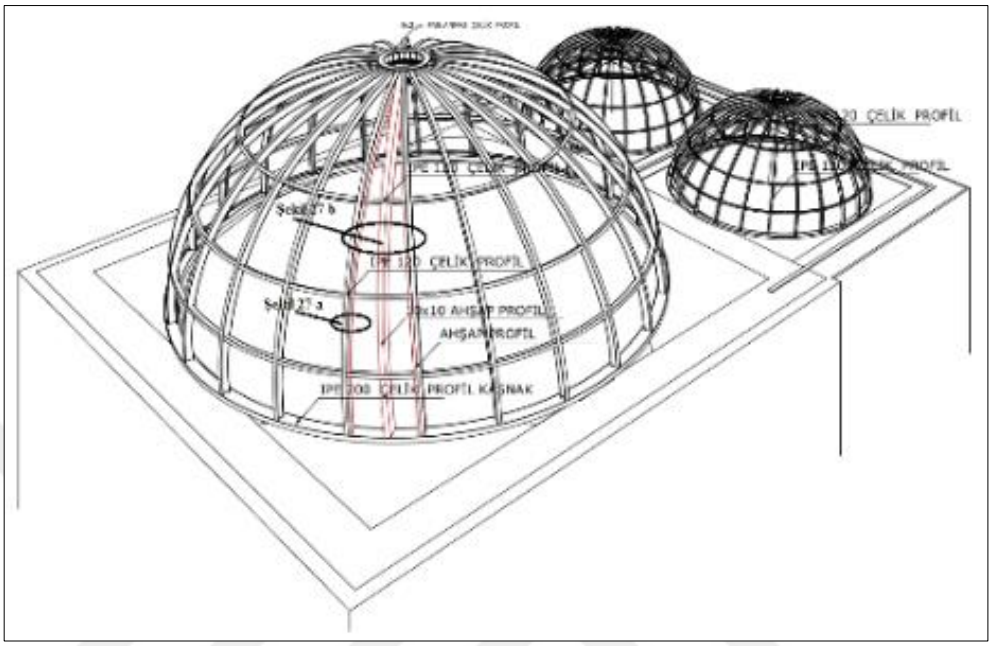
Şekil 5.47. Son Cemaat yeri +6.30 kotunda oluşturulacak 80x20 cm çelik hatıl detayı

Kubbeler: Yapının harim bölümünün üzerini ve son cemaat bölümü üzerini kapatan kubbeleri tamamen yıkılmış durumdadır. Yapının beden duvarının yüksekliği ve duvar kalınlığı dikkate alındığında uygulanacak duvar kalınlığının yetersiz ve narin kalacağı anlaşılmaktadır. Yapının kubbe ağırlığının azaltılarak beden duvarları ve temel elemanlarında oluşacak iç kuvvetlerin güvenli tarafta kalması hedeflenmiştir.

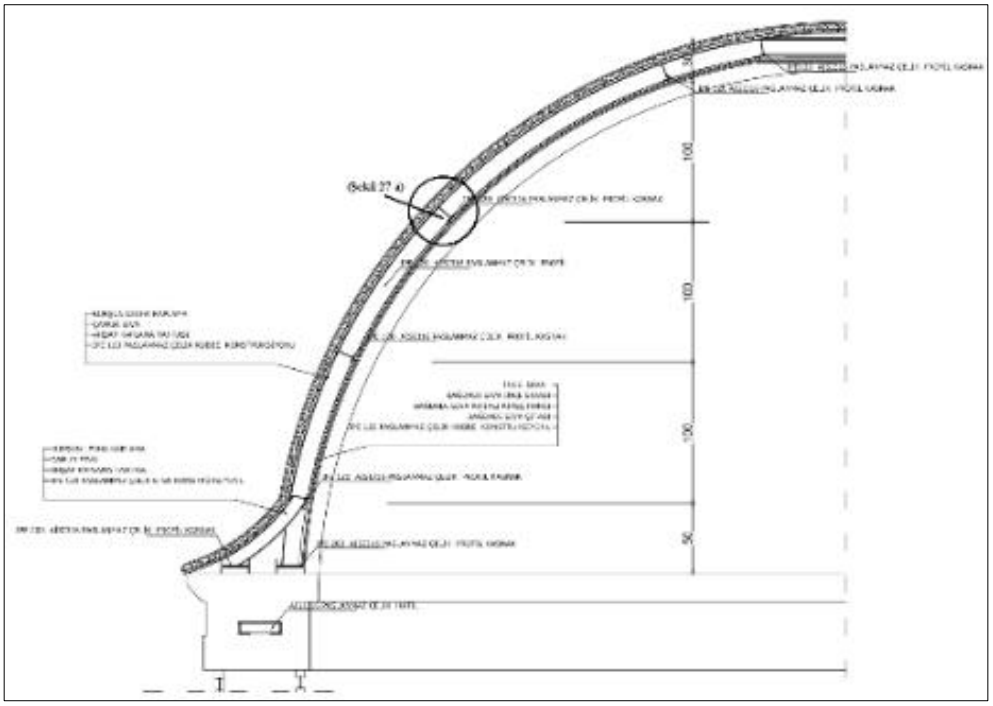
Bu nedenle harim bölümü +7.08 kotunda ve son cemaat yeri +6.30 kotunda, aisi316 paslanmaz çelik IPE200 profillerle çekme çemberi oluşturularak yapının özgün şekline uygun formda; düşeyde her 100 cm'de bir aisi316 paslanmaz çelik IPE120 profil ve yatayda 100 cm de bir aisi316 paslanmaz çelik IPE120 profil kullanılarak kubbe strüktürünün oluşturulması önerilmiştir (Şekil 5.48).

Oluşturulan çelik strüktür düşey profilleri arasına ahşap profiller yerleştirildikten sonra kubbe dış kısmına kaplama tahtaları ve çamur harç üzerine kurşun kaplaması yapılması, iç kısmına ise bağdadi sıva uygulaması yapılarak kubbesinin tamamlanması önerilmiştir. Yapının özgün şekline uygun malzeme ve yapım tekniğiyle harim bölümü

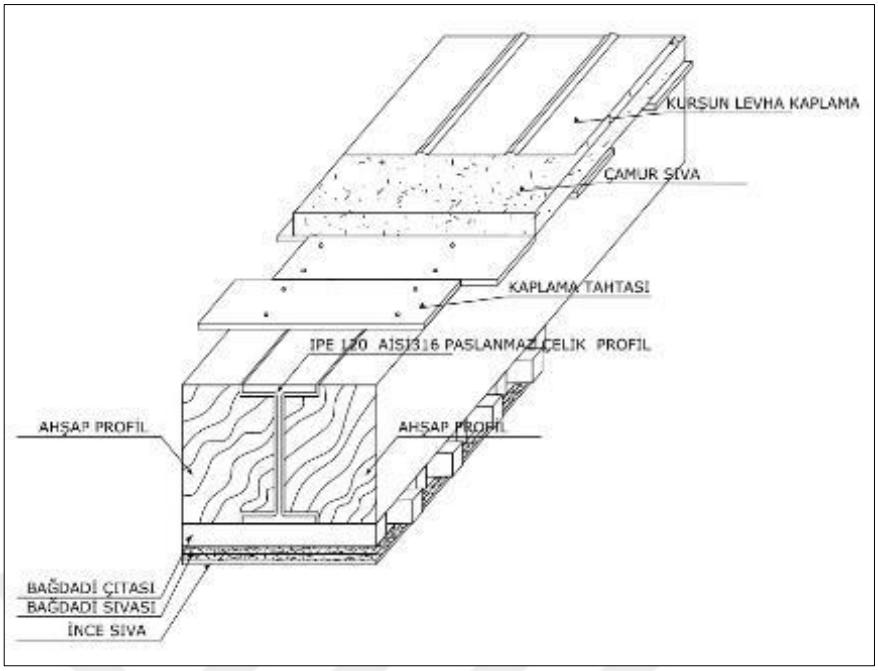
ve son cemaat yeri kubbe örtülerinin tamamlandıktan sonra kasnak kısmı ve kubbe örtüsü kasnakları üst kotlarında aisi316 paslanmaz çelik profillerle çekme çemberi oluşturulması önerilmiştir (Şekil 5.49), (Şekil 5.50).



Şekil 5.48. Kubbelerin çelik konstrüksiyon detayı



Şekil 5.49. Kubbelerin Çelik Konstrüksiyon ve Bağdadi Sıva Detayı



Şekil 5.50. Çelik Konstrüksiyon ve Ahşap Profil Detayı

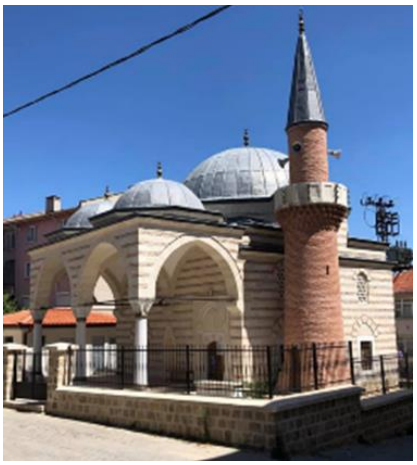
Minare: Yapının batı cephesinde yer alan minaresi moloz taş kaide kısmının üzerine tuğla örgü duvar gövdelidir. Tuğla örgü kirpi saçak üst kotuna kadar ayaktadır. Şerefesinden âlem kısmına kadar olan bölümü ise yıkılmış durumdadır. Mevcut kısımlarında yer yer malzeme boşalması, malzeme kayıpları, derz kayıpları ve oyulmalar, çatlamalar, yüzey kirliliği vb. sorunlar gözlemlenmiştir.

Minare kaide ve gözdesinde yüzey bozulması, malzeme kaybı ya da oyulma görülen bölgelerde, yüzey dikkatlice temizlendikten sonra yapının özgün harcının kalitesine uygun malzeme ile düşük basınç altında 1.5 ~2 bar gibi enjeksiyon yöntemi ile doldurulması önerilmiştir. Daha sonra onarılacak olan mevcut kısmının üzerine minarenin, yapının özgün haline uygun şekilde, özgün yapım tekniğiyle ve yapının özgün malzemesi (tuğla-ahşap) ile uyumlu malzeme kullanılarak yeniden yapılması önerilmiştir.

Minarenin kaide kısmındaki çamur harcın tamamen temizlenmesi ve yerine hidrolik kireç harç kullanılması önerilmiştir. Minarenin kaidesinin toprak altında kalan kısımında yer alan ahşap hatıl boşluğunun donatılı ve hidrolik kireç esaslı harç ile doldurulması önerilmektedir.

5.2.7. Onarım ve Güçlendirme Uygulamaları

Yapılan hesaplamaları sonucunda kubbede oluşan çatlakların onarım ve güçlendirme önerileri doğrultusunda 2015-2017 yılları arasında Edirne Vakıflar Bölge Müdürlüğü kontrolünde uygulamaları yaptırılmıştır. Caminin beden duvarlarının inşası, harim ve revaklar üzerinde bulunan kubbelerin paslanmaz çelik profiller ile yapılmasına ait imalat aşamaları aşağıda verilmektedir (Şekil 5.51).

<table>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Paslanmaz çelik profiller ile kubbe iskeletinin yapılması</td><td>Kubbe iskeleti arasında ahşap karkas imalatların yapılması</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Kubbe ahşap kaplamasının yapılması</td><td>Ahşap kaplama üzerinde yalıtım yapılması</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Kubbenin kapatılması</td><td>Medrese Ali Bey Camin’in genel görünümü</td></tr>
</table>

Şekil 5.51. Medrese Ali Bey Camiine ait imalat aşamaları

BÖLÜM 6.

DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Kültürel mirasın korunması bakımından, tarihi kâgir yapıların onarım ve güçlendirilmesi konusu oldukça önem taşımaktadır. Deprem kuşağında yer alan ve çok sayıda tarihi yapıyı barındıran ülkemizde, mümkün olduğunca en kısa süre içerisinde anıtsal eserlerin deprem güvenliklerinin belirlenerek, yeterli emniyeti bulunmayan yapıların onarım ve güçlendirilmesinin yapılması önem arz etmektedir. Ayrıca tamamen veya yıkılarak yok olma ile karşı karşıya kalan yapılarından dönemlerine uygun şekilde yeniden yapılmaları gerekmektedir. Kagir yapıların çağdaş restorasyon uygulamalında projelendirme, yapısal analizler, onarım ve güçlendirme veya yeniden yapma kararları ile uygulama süreçlerinde işin niteliği göz önünde bulundurularak disiplinler arası kapsamlı çalışmaların esas alınması gerekmektedir. Bu nedenle konusunda uzman, deneyimli ekipler ile gerçekleştirilen bir proje süreci, aynı proje ekibinin uygulama esnasındaki katkısı ile uygulamanın daha sağlıklı gerçekleşmesini sağlayacaktır.

Tarihi kâgir yapıların çağdaş restorasyon uygulamalarında, mevcut durum analizleri sonucunda olduğu gibi korunması, onarım ve güçlendirmelerinin yapılması yanı sıra malzeme ve yapısal hasarların genel durumu dikkate alınarak sökülerek yeniden yapılması en çok karşılaşılan yöntemlerdendir. Tezin kapsamında onarım ve güçlendirme yöntemine örnek teşkil etmesi amacı ile Edirne Eski Camii, yeniden yapılmasına örnek teşkil etmesi amacı ile Edirne Medrese Ali Bey Camii örnekleri ele alınmıştır.

Seçilen örneklerden;

Onarım ve güçlendirme çalışmaları için ele alınan Edirne Eski Camii'nin ilgili kurumlardan temin edilen rölöve projeleri dikkate alınarak ANSY programı yardımı ile

sonlu elemanlar modelli hazırlanmış, gerekli malzeme parametreleri ve zemin yapısı arşiv ve literatür taraması ile belirlenmiştir. Oluşturalar yapı modelinin sırasıyla düşey yükler altında statik analizi, modal analizi ve deprem analizleri yapılarak, oluşan gerilmeler ve şekil değiştirmeleri incelenerek, yapının hedeflenen performans düzeyleri değerlendirilmiştir.

Yapılan çözümlemelerden elde edilen sonuçlar sırası ile;

- Yapı elemanlarında düşey yükler altında oluşan gerilmelerin yapıya olumsuz etkisi olmadığı görülmüştür. Yapı üzerinde gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlara göre yapı, genel olarak (minareler hariç) herhangi bir yapısal tehlike barındırmamaktadır. Yapıda daha önceki oluşan hasarlar dikkate alındığında da hasarların minarelerde oluştuğu görülmüştür.
- Minarelerden biri yapıya bağlı olup, diğeri yapıdan bağımsızdır. Her iki minare de narin olmalarından dolayı yapı genel davranışından çok farklı davranmaktadır. Özellikle yapıya bağlı olan minarede, yapı kütlesinden sonra serbest devam etmesi sonucunda ani rijitlik değişimine bağlı olarak büyük gerilmeler tespit edilmiştir. Beden duvarından ayrı olan minarede, taşlarda yer yer çatlama olduğu ve kurşun örtü tabakası altında hasarların bulunduğu göz önünde alındığında malzeme emniyet gerilmeleri aşıldığından, minareler için önlem alınması gerektiği tespit edilmiştir. Bunun için minarenin rijitliğini artıracak önlemler alınabileceği gibi, aşırı gerilmelerin gözlendiği minare kaidesinde ve minarenin belirli bir bölümünde çekme gerilmelerini karşılayabilecek şekilde lif takviyeli polimer malzemelerle veya çelik bileziklerle minarelerin güçlendirilebileceği kararına varılmıştır. Muhtemel bir depremde minarelerdeki hasarlar, ana yapıya da zarar verebileceğinden, minarenin kaidesindeki duvarların da özellikle köşe noktalarında güçlendirilmesi uygun bulunmuştur.
- Deprem yükleri altında oluşan gerilmelerin malzeme dayanım sınırlarında kaldığı görülmüştür. Yapının mevcut durumda Minimum Hasar veya Hasarsızlık Beklentisi performans seviyesindedir. Ancak minarelerde oluşan yer değiştirmeler bakımından Kültürel Değerin Korunması Performans seviyesindedir. Gerilmeler açısından değerlendirildiğinde ise minareler Göçmenin Önlenmesi Performans düzeyinde olduğu görülmektedir.

- Yapıda oluşan tüm gerilmeler ve deformasyonlar dikkate alındığında, kubbelerin en kritik bölgeler olduğu belirlenerek kubbede oluşan hasarların onarım ve güçlendirilmesi için kubbede meydana gelen çekme gerilmeleri alacak şekilde FRP ile güçlendirilmesi önerilmiştir.
- Yapılan uygulama tarihi yapının mimari ve sanat tarihi özellikleri göz önüne alınarak yapı için tespit edilen teknikler profesyonel ekipler ve yetişmiş kişiler tarafından yapılmıştır.

Yeniden yapım örneklemesi için seçilen Medrese Ali Bey Camii'nin ilgili kurumlardan temin edilen rölöve projeleri dikkate alınarak ANSY programı yardımı ile sonlu elemanlar modelli hazırlanmış, gerekli malzeme parametreleri ve zemin yapısı arşiv ve literatür taraması ile belirlenmiştir. Oluşturalar yapı modelinin sırasıyla düşey yükler altında statik analizi, modal analizi ve deprem analizleri yapılarak, oluşan gerilmeler ve şekil değiştirmeleri incelenerek, yapının hedeflenen performans düzeyleri değerlendirilmiştir.

Yapılan çözümlemelerden elde edilen sonuçlar sırası ile;

- Yapının beden duvarının yüksekliği ve duvar kalınlığı dikkate alındığında uygulanacak duvar kalınlığının yetersiz ve narin kalacağı görülmüştür. Yapının kubbe ağırlığının azaltılarak beden duvarları ve temel elemanlarında oluşacak iç kuvvetlerin güvenli tarafta kalması hedeflenmiştir.
- Yapı beden duvarları büyük bir kısmı yıkılmış olup, ayakta kalan kısımları da sağlıksız durumdadır. Yapı beden duvarlarının sökülerek, aslına uygun özgün malzemeler kullanılarak, Restitüsyon projesine uygun olarak yeniden yapılması önerilmiştir.
- Deprem yükleri altında oluşan gerilmelerin malzeme dayanım sınırlarında kaldığı tespit edilmiştir. Yapının mevcut durumda Minimum Hasar veya Hasarsızlık Beklentisi performans seviyesinde olduğu anlaşılmıştır.

Tarihi kâgir yapıların çağdaş restorasyon uygulamalarına örnek teşkil etmesi amacı ile hazırlananı bu tez çalışmasında, aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

1- Tarihi eserlere uygulanacak her türlü müdahalenin alanında uzaman, restoratör mimarlar, konusunda deneyimli inşaat mühendisleri, sanat tarihçiler ve yapının

durumuna göre gibi farklı disiplinlerdeki uzmanların işbirliği sonucunda belirlenmesi gerekmektedir.

2- Tarihi yapılarda yapılacak onarım ve güçlendirme çalışmalarında esas olan en az müdahale ile en fazla koruma sağlanmasıdır. Yapılacak müdahalede yapının kültürel ve sembolik değerlerinin muhafazası ile güvenliğinin sağlanması arasındaki dengenin korunması öncelikli olmadır. Yapı ve doku ile uyuşmazlığı olan ve estetikten yoksun güçlendirme uygulanmalarından kaçınılması gerekmektedir. Bu nedenle, yapı dokusuyla uyumlu ve çağdaş malzemeler kullanılarak yapılan müdahalenin gerek duyulması halinde geri dönüşümü mümkün olmalıdır.

3- Kâgir yapılarda uygulanacak çağdaş restorasyon uygulamalarına karar verilmesi aşamasında, yapıların mevcut durumlarının tespiti yapılarak yapılardaki oluşan hasarlar, hasarların yerleri ve nedenleri belirlenmelidir. Öncelikle hasar oluşumuna neden olan sebepleri ortadan kaldırıcı tedbirler almak, zemin ve malzeme özelliklerinin belirlenebilmesi için gerekli olana deneylerin yapılması gerekmektedir.

4- Tarihi yapıların analizi için üç boyutlu modelleme yönetimleri kullanılmalıdır. Analiz sonuçlarının güvenirliği ve doğruluğu için hazırlanana modellemede yapı birim elemanları ile harç davranışını idealleştirmek için kompozit malzeme kabulü yapılarak kullanılan birim eleman büyüklüğünün 3~4 katını geçmeyecek sonlu eleman boyutları seçilmelidir.

5- Tarihi yapılarda yapılacak her türlü onarım ve güçlendirme çalışmasının geçici tedbirlerle hasarları gidermesi yerine kalıcılığı ve sürekliliği sağlayacak uygulamalar olması gerekmektedir.

6- Çalışmada yapıya etkiyen düşey yüklerin %40'na kadar etkiyen yatay kuvvetler altında yapıda oluşan gerilmelerin güvenlik sınırları içinde kaldığı öngörülmüştür. Ancak yapının bulunduğu bölgenin depremselliği ve hedeflenen performans hedefleri dikkate alınarak yapıların kapsamlı analizlerinin yapılması gerekmektedir.

7- Kültürel mirasımızda anıtsal değeri büyük olan yapıların özelliklerini yitirmeden, belgeleme amaçlı olarak rölöve projelerinin hazırlamaması ve dijital ortamda ilgili kurumların arşivlerinde saklanarak ulusal veri tabanları oluşturulmalıdır.

8- Onarım ve güçlendirme çalışmalarda yer alacak teknik personel ve nitelikli işçilere yönelik eğitim programları hazırlanmalıdır.

KAYNAKLAR

Ahunbay, Z. (2017). *Tarihi çevre koruma ve restorasyon*.

Akman, S. (2000). Yapı hasarları ve onarım ilkeleri. İMO.

Aköz, A. H. (2008). Deprem etkisi altındaki tarihi yığma yapıların onarım ve güçlendirilmesi [Yüksek Lisans, İTU]. İstanbul.

Aköz, F. (2001). Tahribatsız deney yöntemleri ve yapılarda uygulanması. *Yapı Malzemesi Semineri, TMMOB*.

Aköz, F. (2005). Yığma kagir yapılarda hasar tespiti. *Orta Doğu Teknik Üniversitesi*.

Aköz, F., ve Yüzer, N. (2009). Tarihi yapılarda malzeme özelliklerinin belirlenmesinde uygulanan yöntemler. *İMO-1. İnşaat Mühendisliği Eğitimi Sempozyumu*, 6-7.

Arıcan, Y. (2010). *Yığma yapıların deprem etkisi altındaki davranışı* SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü].

Arıoğlu, N., ve Arıoğlu, E. (1997). Mimar Sinan'ın seçtiği taş: Küfeki ve çekme dayanımı. *14. Türkiye İnşaat Mühendisliği Teknik Kongresi*, 1021-1034.

Arıoğlu, N., Tuğrul, A., Zarif, İ. H., Girigin, Z. C., ve Arıoğlu, E. (1999). Küfeki taşının dayanıklılık analizi: Şehzade Camii örneği-1. *Yapı Dergisi, 214*, 109-113.

Arun, G. (2005). Yığma kagir yapı davranışı. Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı, 1-8.

Arun, G. (2006). Behaviour of Masonry vaults and domes: geometrical considerations. *Structural Analvsis of Historical Constructions, New Dehli*, 299-306.

Arun, G. (2007). Restoration and conservation of architectural heritage. *Structural Engineers World Congress*.

Arun, G. (2009). Yığma Yapı Tanımı ve Davranışı. *İMO Eğitim Seminerleri*.

Aslanapa, O. (1986). Osmanlı devri mimarisi: Orhan Gaziden başlıyarak sonuna kadar padişahlara göre gelişmesi. İnkılâp Kitabevi.

Ayverdi, E. H. (1972). Osmanlı mimarisinde Çelebi ve II. sultan Murad devri. *İstanbul Fetih Cemiyeti Yayınları, İstanbul*.

Baratta, A., ve Corbi, O. (2012). The static behavior of historical vaults and cupolas. *Wiadomości Konserwatorskie*, 65-81.

Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A. C., Sevim, B., Şahin, A., ve Özcan, D. M. (2010). Binaların dinamik parametrelerinin operasyonal modal analiz yöntemiyle belirlenmesi. *Teknik Dergi, 21*(104), 5185-5205.

Bayülke, N. (1995). Depremde hasar gören yapıların onarım ve güçlendirilmesi. *İnşaat Mühendisliği Odası, İzmir Şubesi*.

Bayülke, N. (2011). Yığma yapıların deprem davranışı ve güvenliği. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*.

Beckmann, P., ve Bowles, R. (2012). *Structural aspects of building conservation*. Routledge.

Bernad, M. F. (2003). *Conservation of historic buildings*. Routledge.

Croci, G. (1998). The conservation and structural restoration of architectural heritage (Vol. 1). WIT Press.

Çamlıbel, N. (1983). Geleneksel yapılarda stabilitenin iyileştirilmesi: temellerin takviyesi. Yıldız Üniversitesi Mimarlık Fakültesi.

Çamlıbel, N. (1998). *Sinan mimarlığında yapı strüktürünün analitik incelenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi.

Dabanlı, Ö. (2008). Tarihi yığma yapıların deprem performansının belirlenmesi [Yüksek Lisans, İTÜ]. İstanbul.

Erköseoğlu, G. (2012). Kültürel mirasın depremden korunması ve turizme kazandırılması amacı ile uygulanabilecek güçlendirme teknikleri. *Uzmanlık Tezi, TC Kültür ve Turizm Bakanlığı Yatırım ve İşletmeler Genel Müdürlüğü, Ankara (Turkish)*.

Eurocode 8 En 1998-1. (2003). In.

Gökbilgin, M. A., Akın, V., ve Bulut, C. (2015). Prof. Tayyib Gökbilgin'in Edirne Makaleleri. *Trakya Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Dergisi*, *1*, 304.

Huerta Fernández, S. (2001). Mechanics of masonry vaults: The equilibrium approach, Historical Consturctions.

Huerta, S. (2001). Mechanics of masonry vaults: The equilibrium approach.

Kanca, A. G. (2004). Yığma yapıların depreme karşı dayanımları Beyoğlu postane hizmet binası ve Beyoğlu han binası [Yüksek Lisans, Yıldız Teknik Üniversitesi].

Kazancıgil, R. (1996). Abdurrahman Hıbrî, Enîsü'l-Müsâmirîn Edirne Tarihi 1360-1650. In: Edirne: Türk Kütüphaneciler Derneği Edirne Şubesi Yayınları.

Koçak, A. (1999). Tarihi yapıların statik ve dinamik yükler altında lineer ve non-lineer analizi: Küçük Ayasofya Camii örneği [Doktora, Yıldız Teknik Üniversitesi].

Kuban, D. (1998). *Mimarlık kavramları*. Yapı Endüstri Merkezi Yayınları.

Kuban, D., ve Emden, C. (2007). *Osmanlı mimarisi*. Yapi-Endustri Merkezi.

Lourenço, P. B. (1998). Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behaviour of masonry.

Lourenço, P. B. (2004). Current experimental and numerical issues in masonry research.

Mahrebel, H. A. (2006). Tarihi yapılarda yaşıyıcı sistem özellikleri, hasarlar, onarım ve güçlendirme teknikleri [Yüksek Lisans, İTÜ]. İstanbul.

Osman, R. (1999). Edirne Evkaf-ı İslamiyye Tarihi Camiler ve Mescidler". Sadeleştiren: Ü.(Ayan) Özsoy), Ankara: TC Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü Yayınları.

Osman, R. (2013). Edirne Rehnüması (Edirne Şehir Kılavuzu). 43.

Özen, G. Ö. (2007). Comparison of elastic and inelastic behavior of historic masonry structures at the low load levels ODTÜ].

Peremeci, O. N. (1939). *Edirne tarihi*. Resimli Ay Matbaasi TL Sirketi.

Richardson, B. (2002). Defects and Deterioration in Buildings: A Practical Guide to the Science and Technology of Material Failure. Routledge.

Roca, P. (2007). Damage Types and Repair Methods, Restoration Techniques Applicable to Historical Masonry Buildings

Sallıo, N. (2005). Mevcut yığma yapıların deprem bakımından incelenmesi ve güçlendirilmesi [Yüksek Lisans, Pamukkale Üniversitesi].

Saraç, M. M. (2003). *Tarihi yığma kargir yapıların güçlendirilmesi* Fen Bilimleri Enstitüsü].

Schueremans, L. (2001). Probabilistic evaluation of structural unreinforced masonry. In (pp. 1-329).

Sesigür, H., Çelik, O., ve Çılı, F. (2007). Tarihi yapılarda taşıyıcı bileşenler, hasar biçimleri, onarım ve güçlendirme. *İMO İstanbul Bülten*(89), 10-21.

Şişik, Ö. (2017). Edirnede bulunan 15. yy ve 16. yyda inşaa edilmiş tarihi cami ve türbelerin taşıyıcı sistem analizi ve çözüm önerileri Fen Bilimleri Enstitüsü].

TBDY 2018. (2018). In *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. Ankara: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.

Tolles, E. L., Kimbro, E. E., ve Ginell, W. S. (2003). Planning and engineering guidelines for the seismic retrofitting of historic adobe structures. Getty Publications.

TYDRYK 2017. (2017). In Tarihi yapılar için deprem risklerinin yönetimi kılavuzu: Müdürlüğü, Vakıflar Genel, İstanbul Valiliği, İPKB.

Ulkay, S. (1978). *Yapı bilgisi*. YTÜ Mimarlık Fakültesi Baskı İşçiliği.

Ulusoy, D. (1993). Güzelyurt örneğinde, Kapadokya Bölgesi yığma taş konut mimarisinin korunması için bir yöntem araştırması.

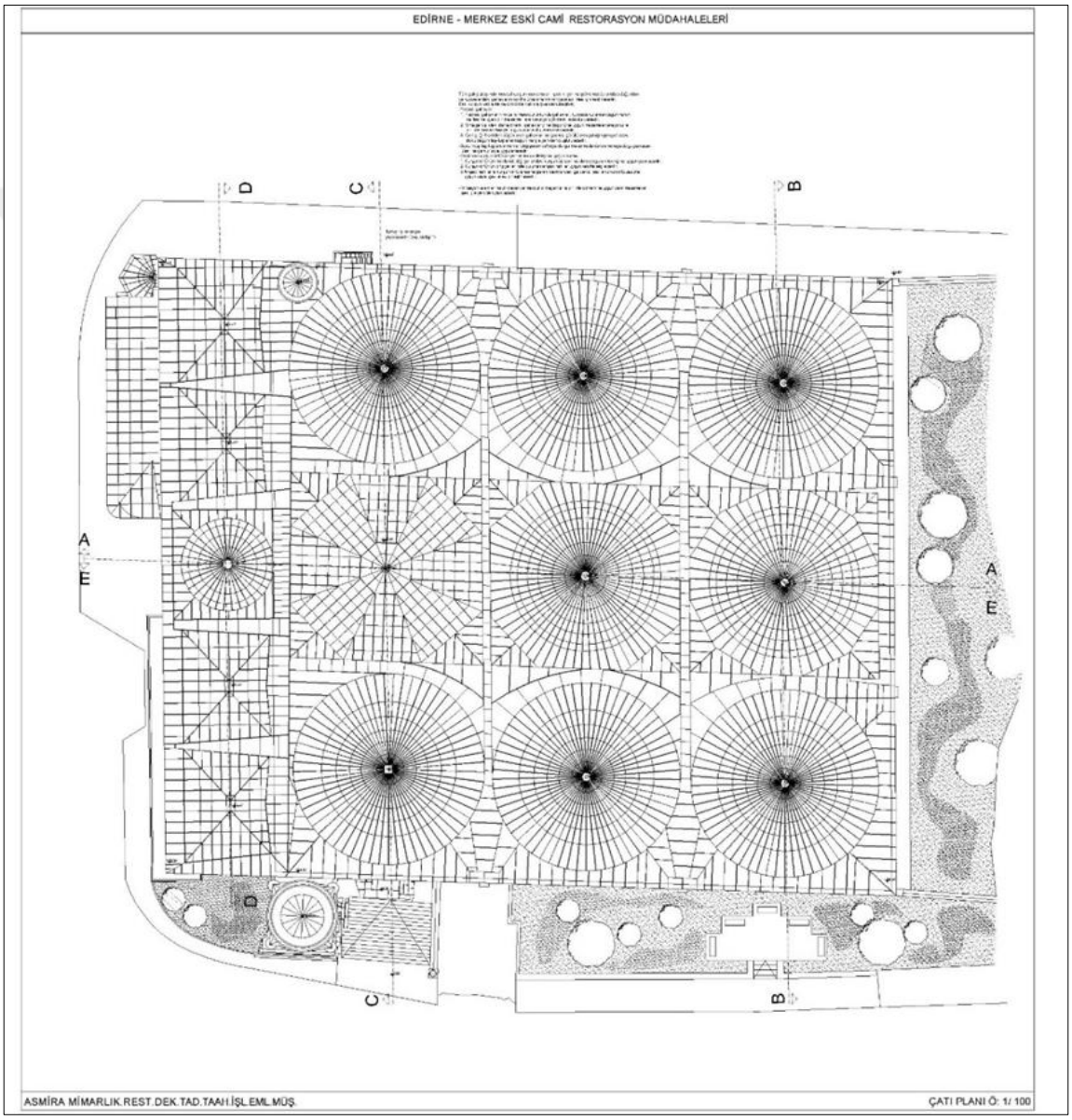
Usal, A. (2006). Edirne Camileri-EskiCamii.

Ünay, A. İ. (2002). *Tarihi yapıların deprem dayanımı*. Orta Doğu Teknik Üniversitesi.

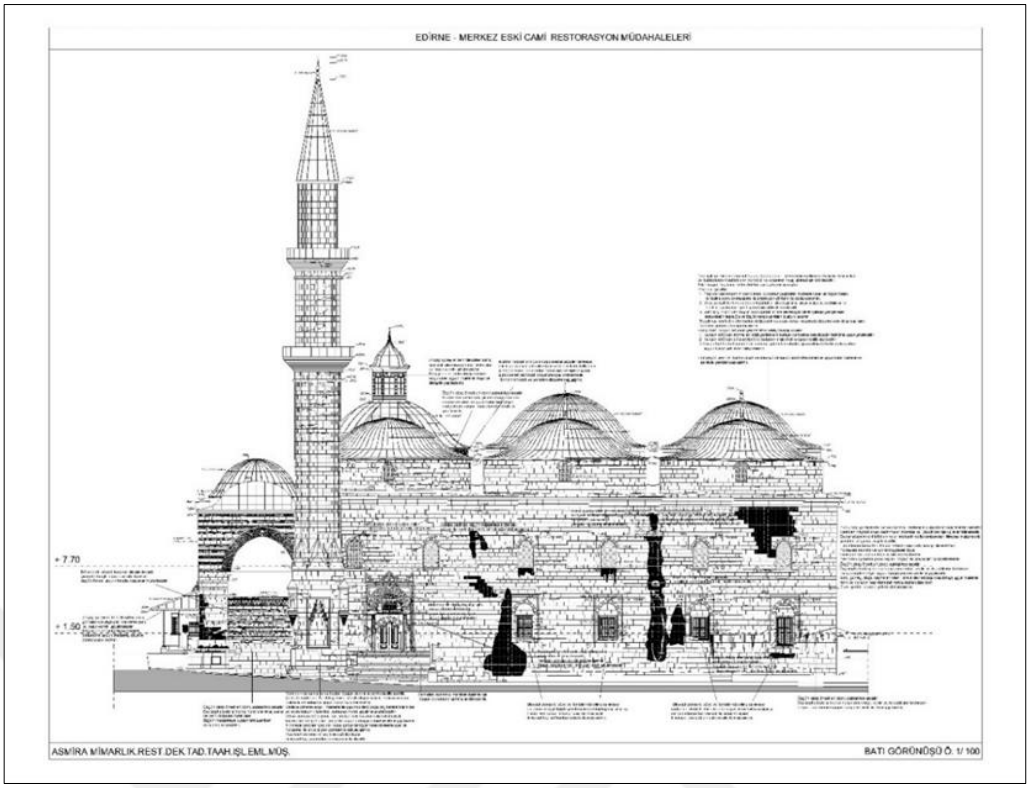
Vatan, M. (2010). Anıtsal yığma binalarda risk düzeyinin tespitine ilişkin bir öndeğerlendirme yöntemi. Basılmamış Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, İstanbul.

EKLER

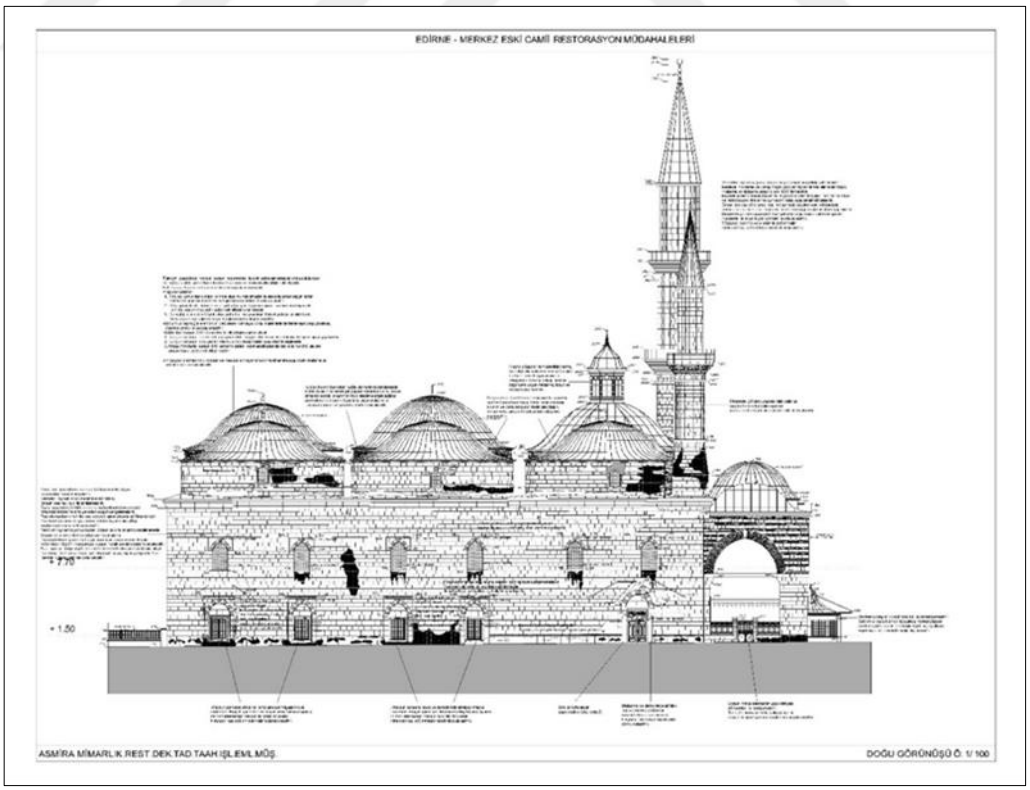
EK-A: Edirne Eski Camii



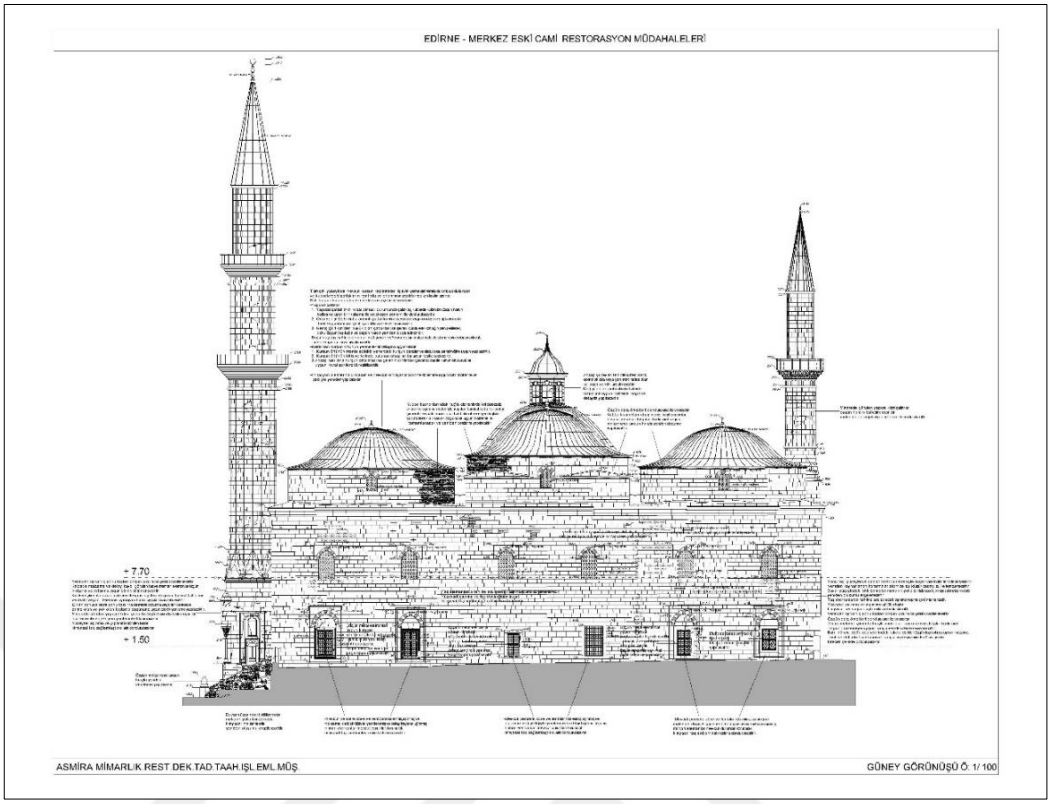
Eski Cami çatı planı



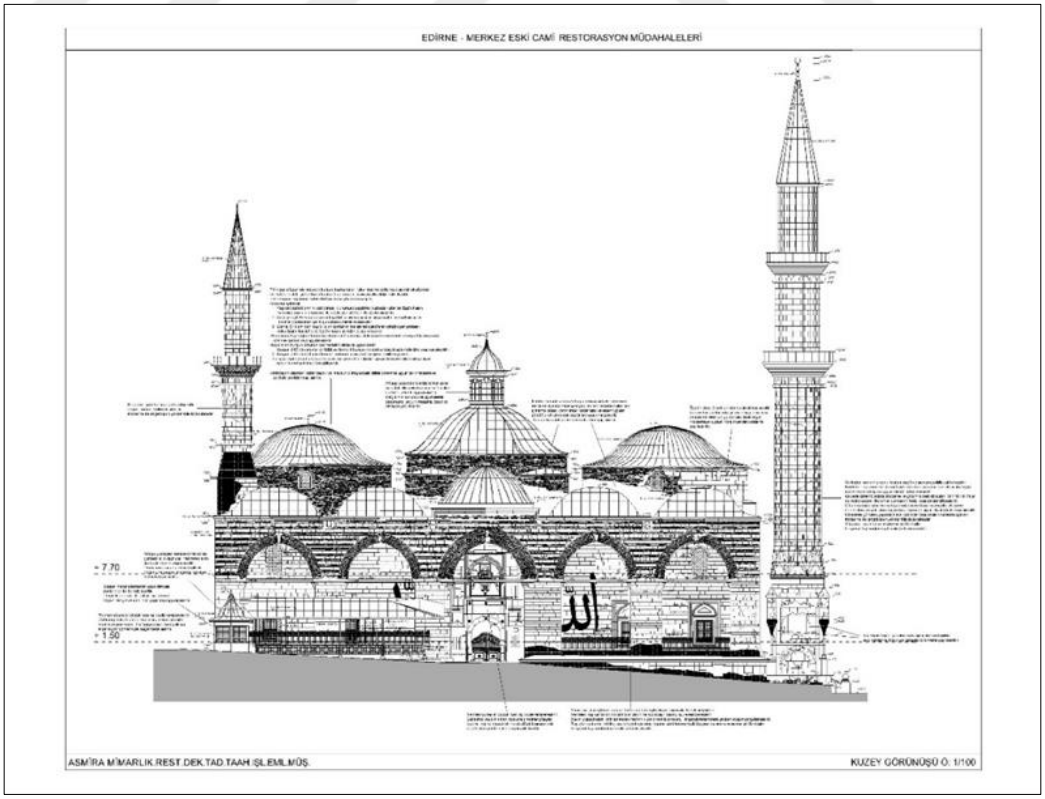
Batı görünüşü



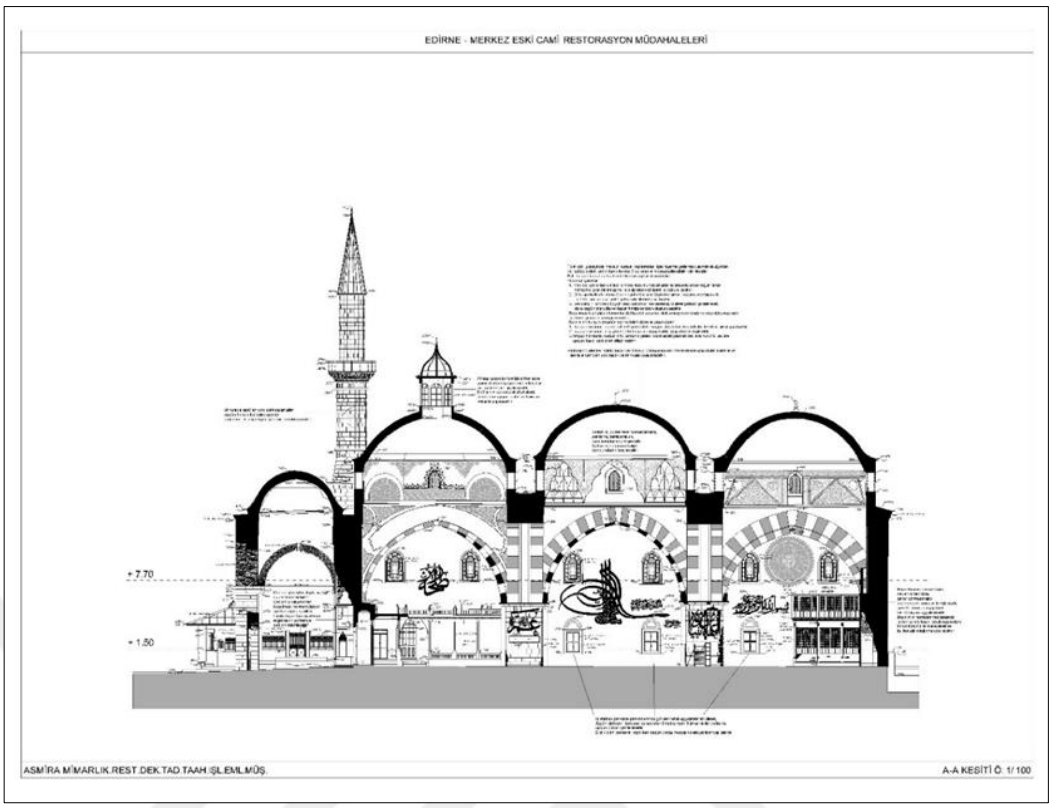
Doğu görünüşü



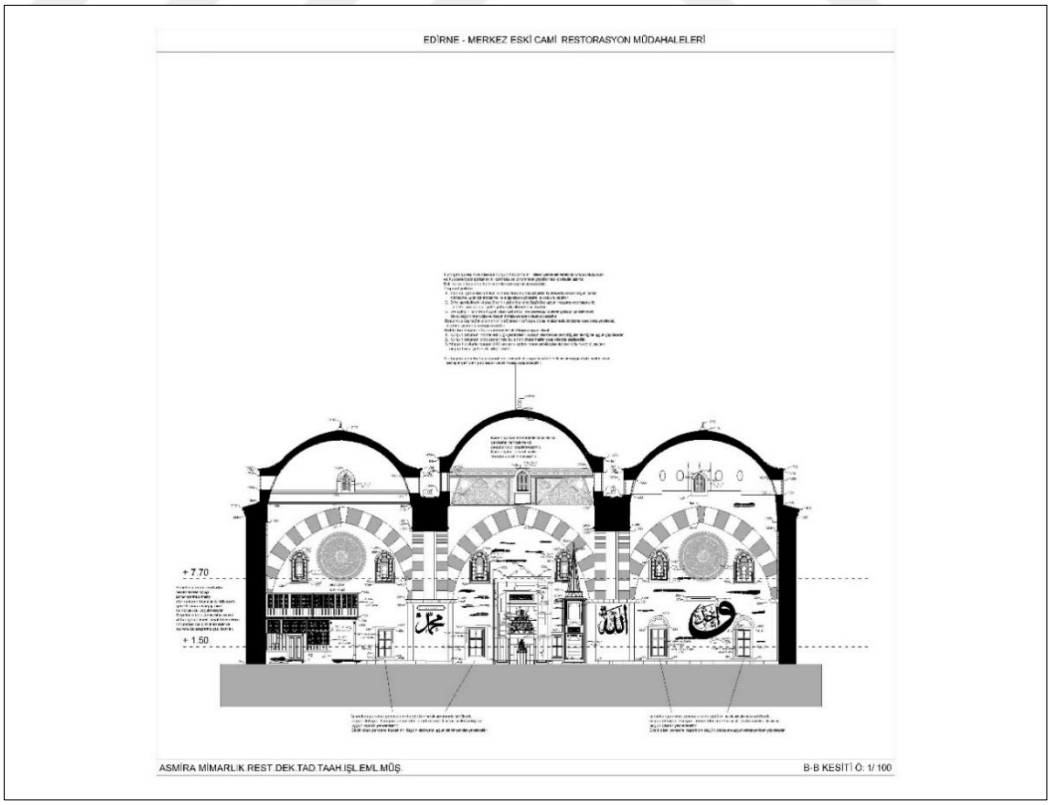
Güney görünüşü



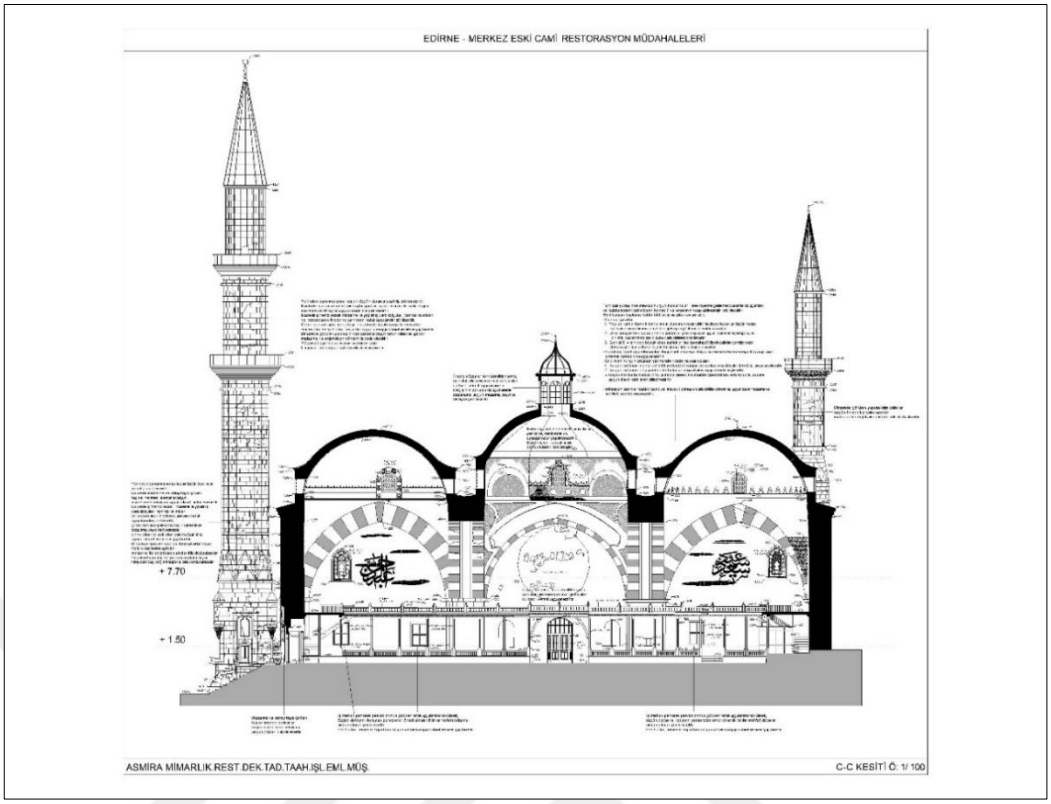
Kuzey görünüşü



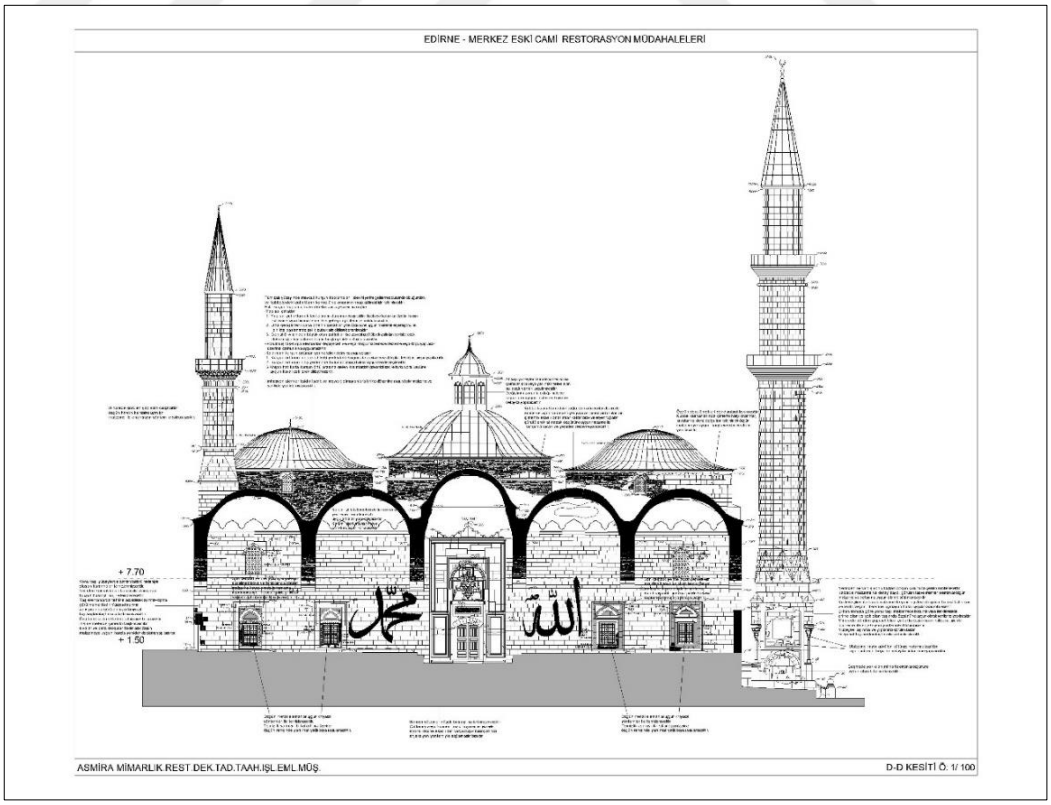
A-A Kesiti



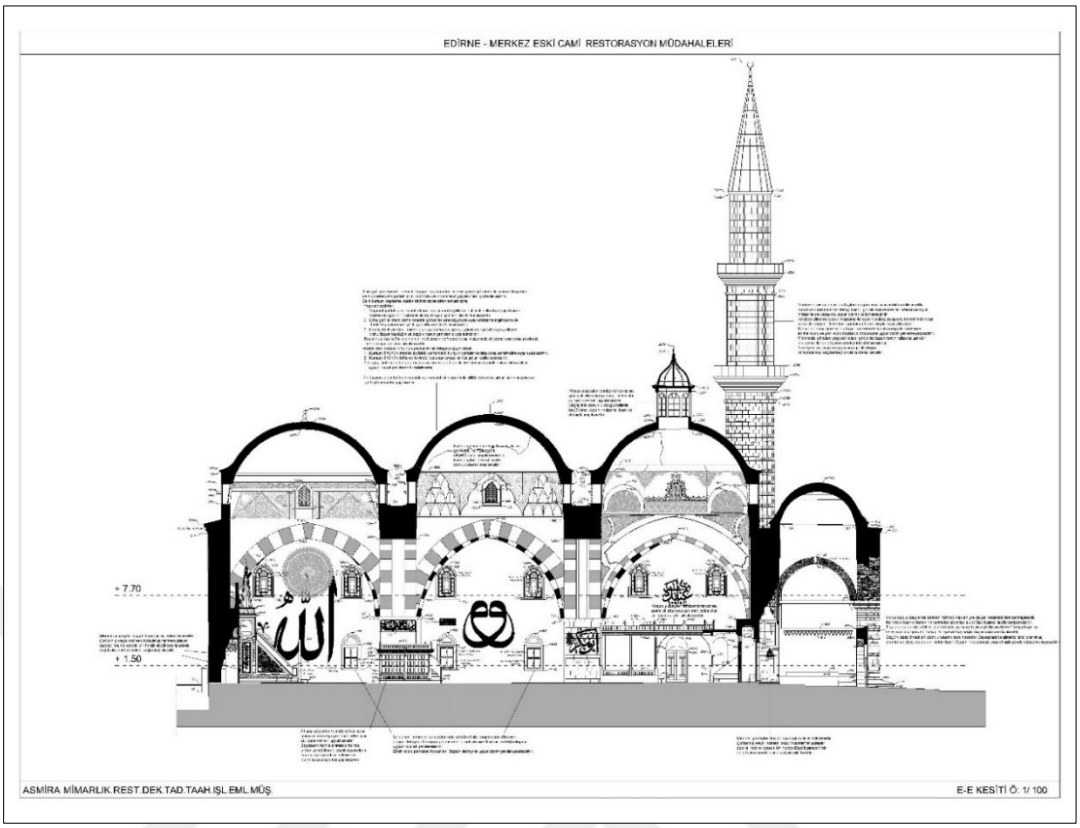
B- B Kesiti



C-C Kesiti

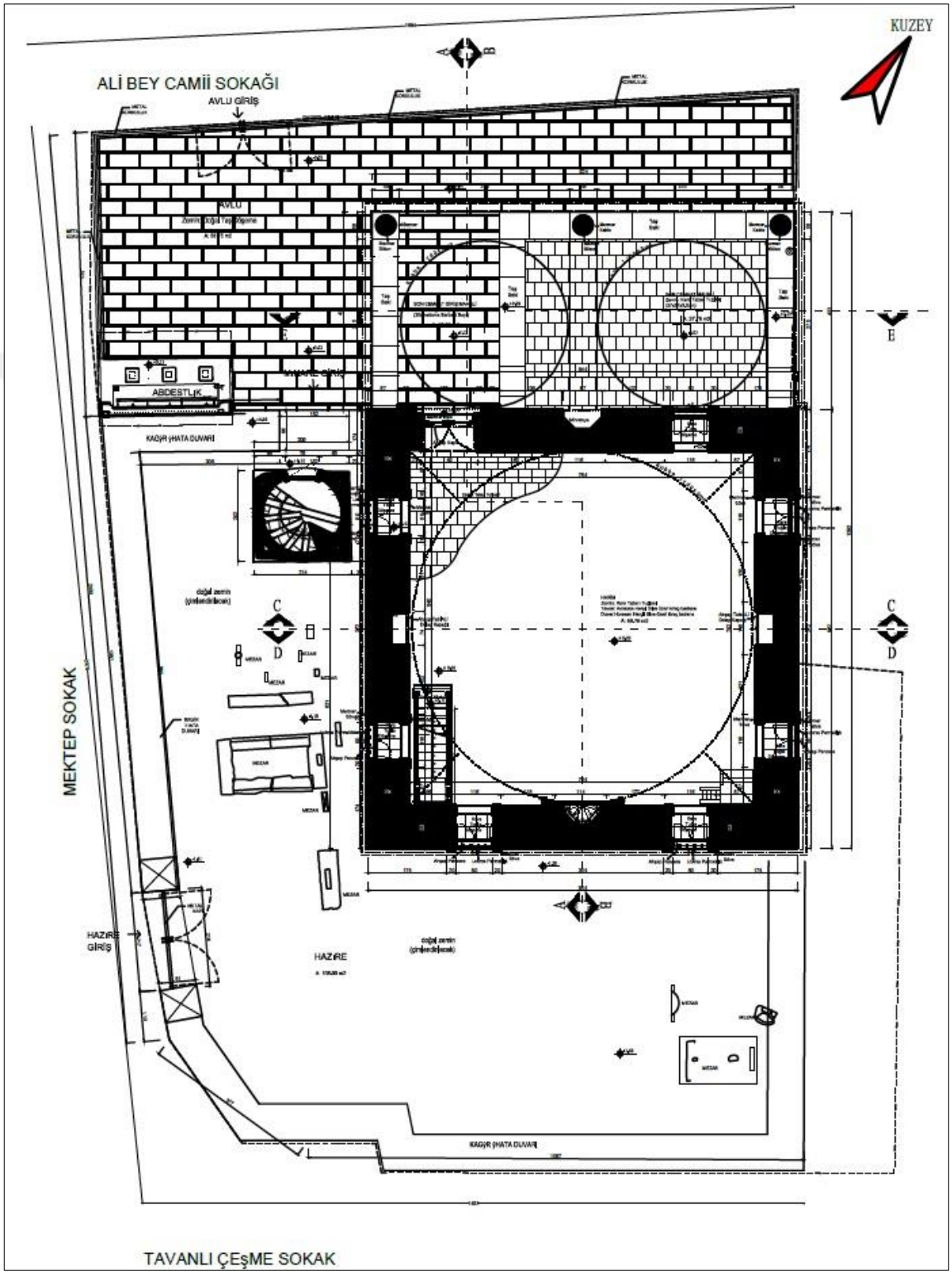


D- D Kesiti

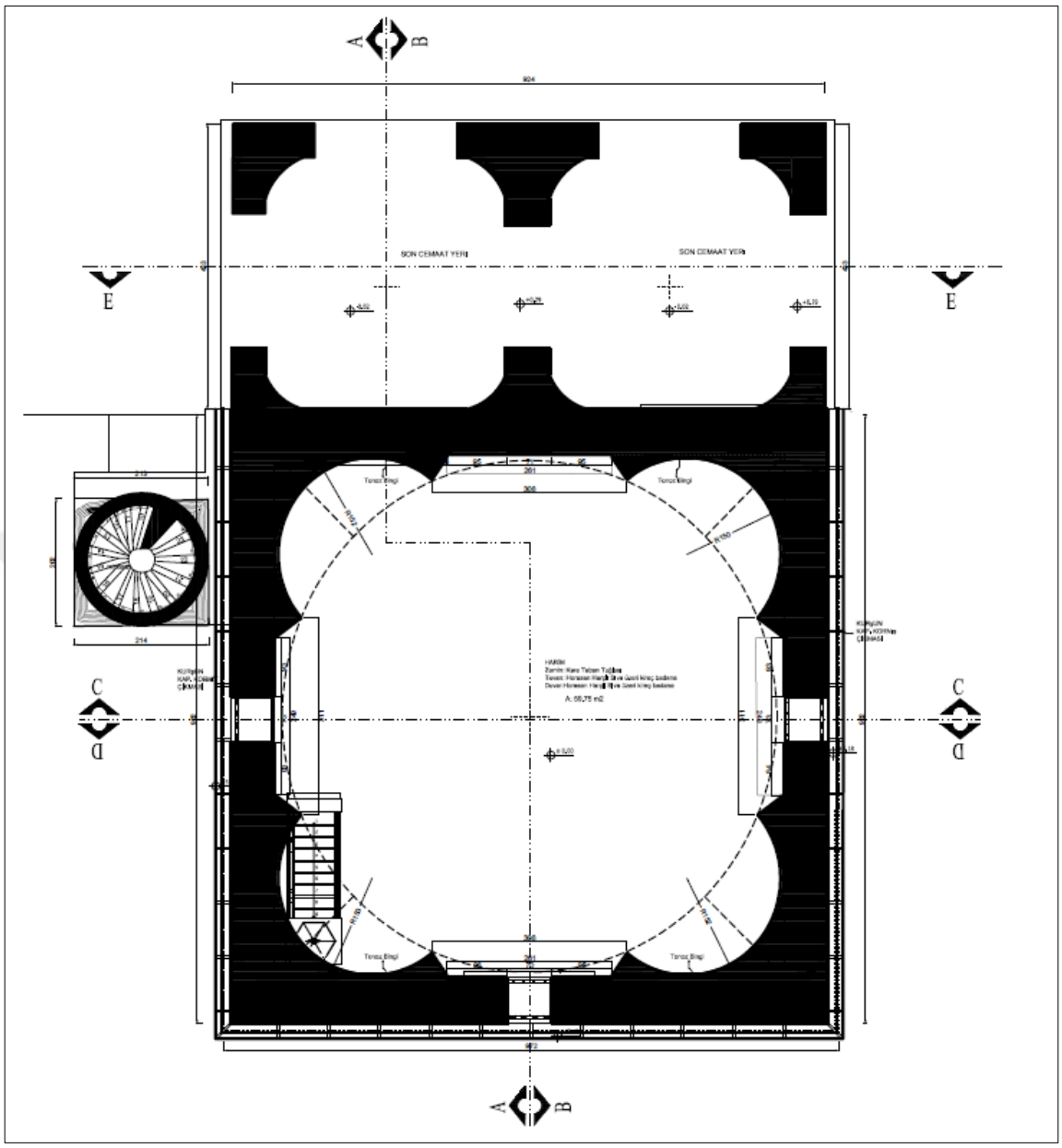

EDİRNE - MERKEZ ESKİ CAMİ RESTORASYON MÜDAHALELERİ
+ 7.70
+ 1.50
ASMİRA MİMARLIK REST.DEK.TAD.TAAH.İŞL.EML.MÜŞ.
E-E KESİTİ Ö: 1/ 100

E-E Kesiti

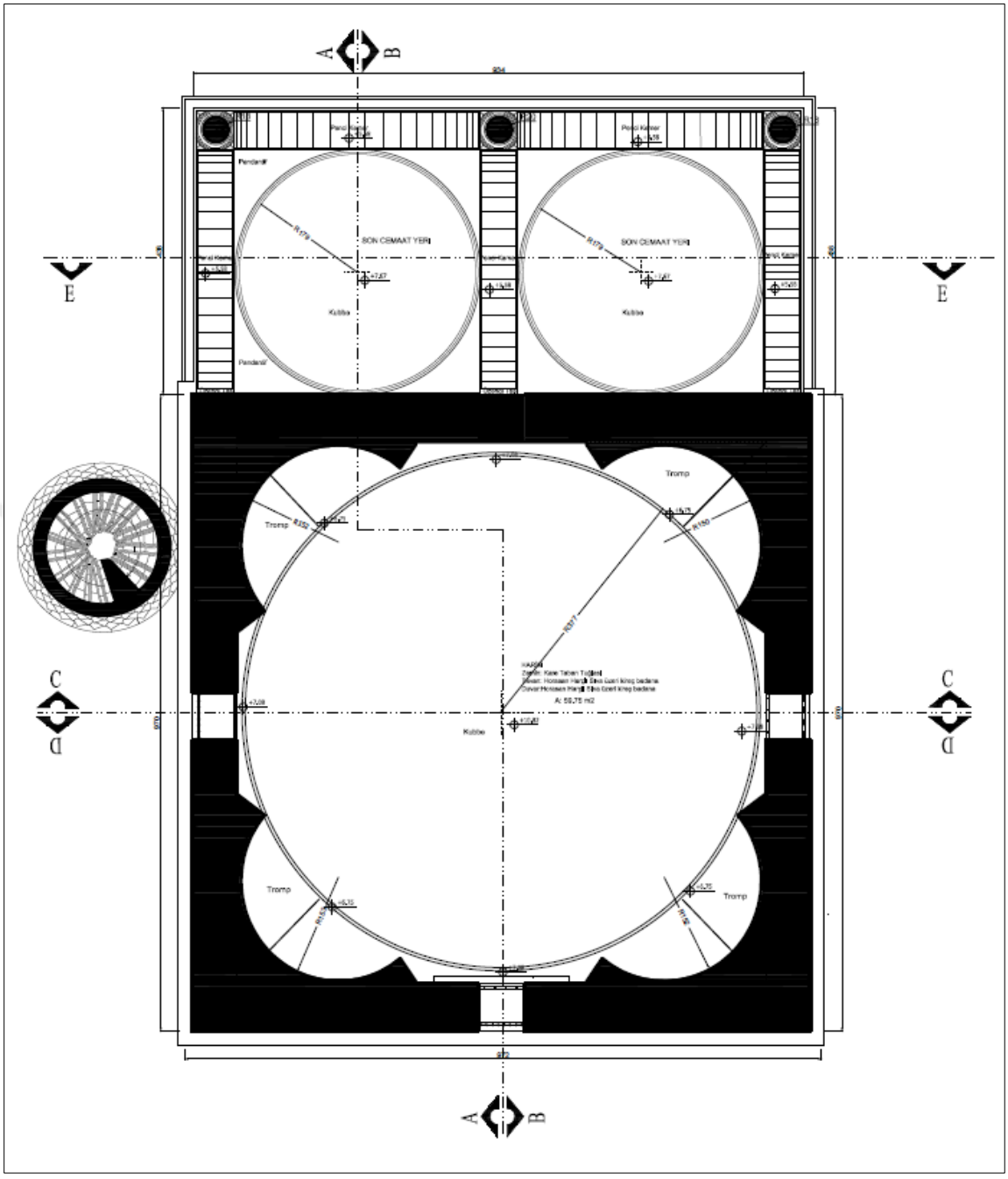
EK-B: Medrese Ali Bey Camii



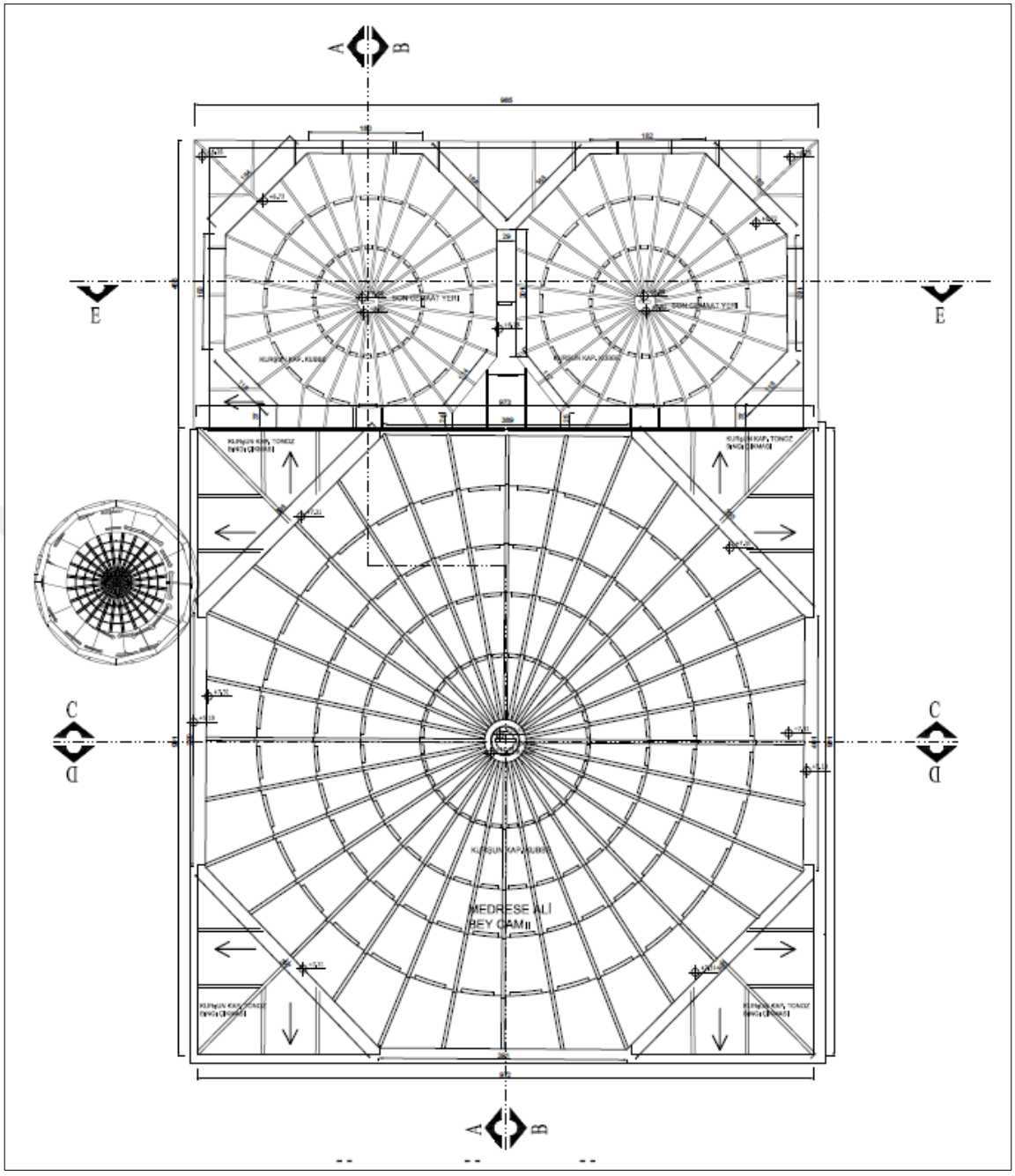
+1.25 Kotu planı



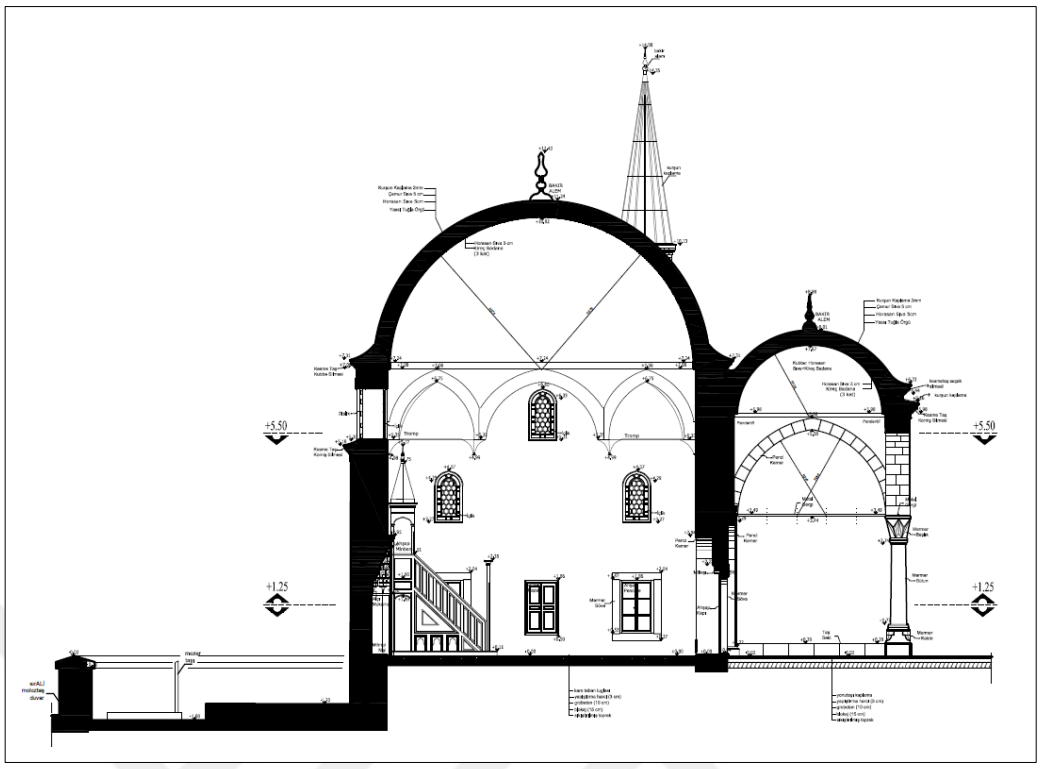
+5.50 Kotu planı



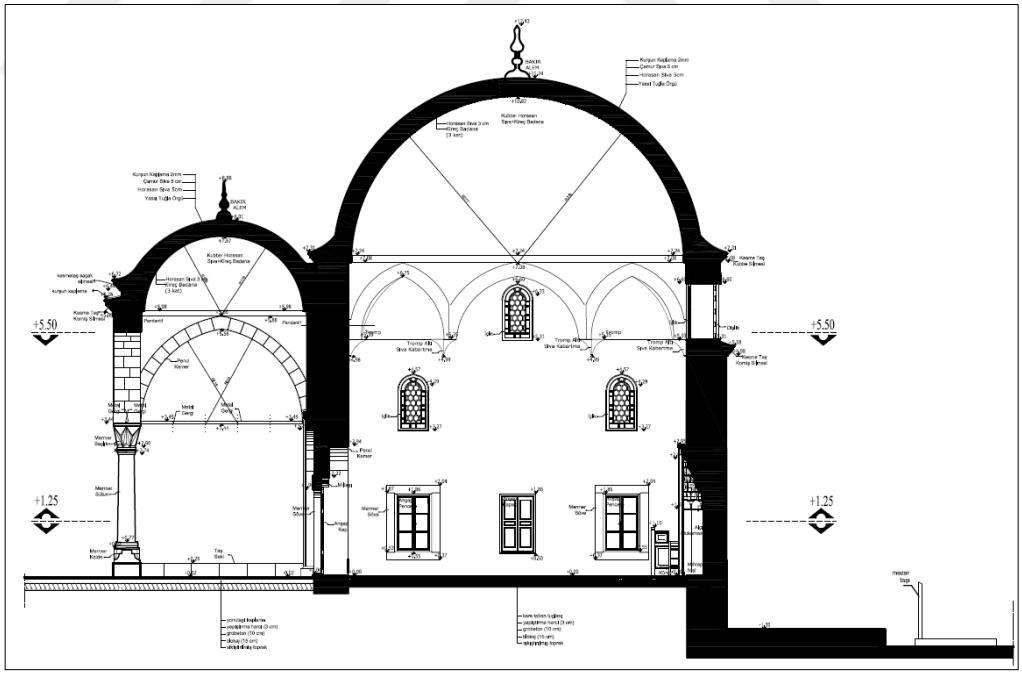
+5.50 Kotu tavan planı



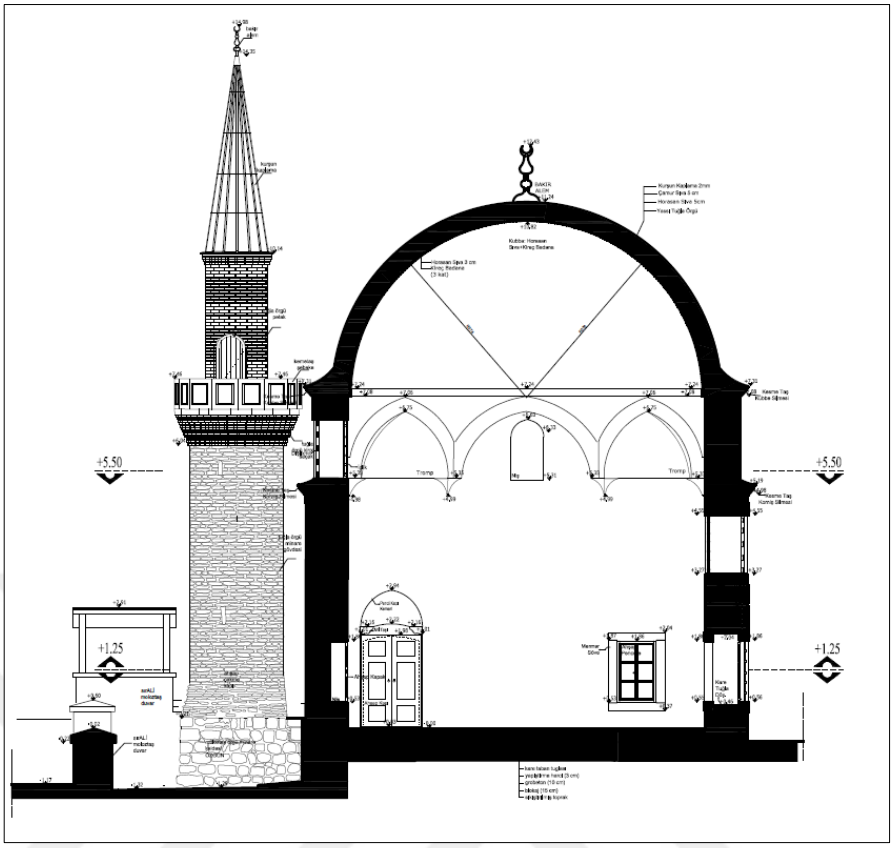
Örtü planı



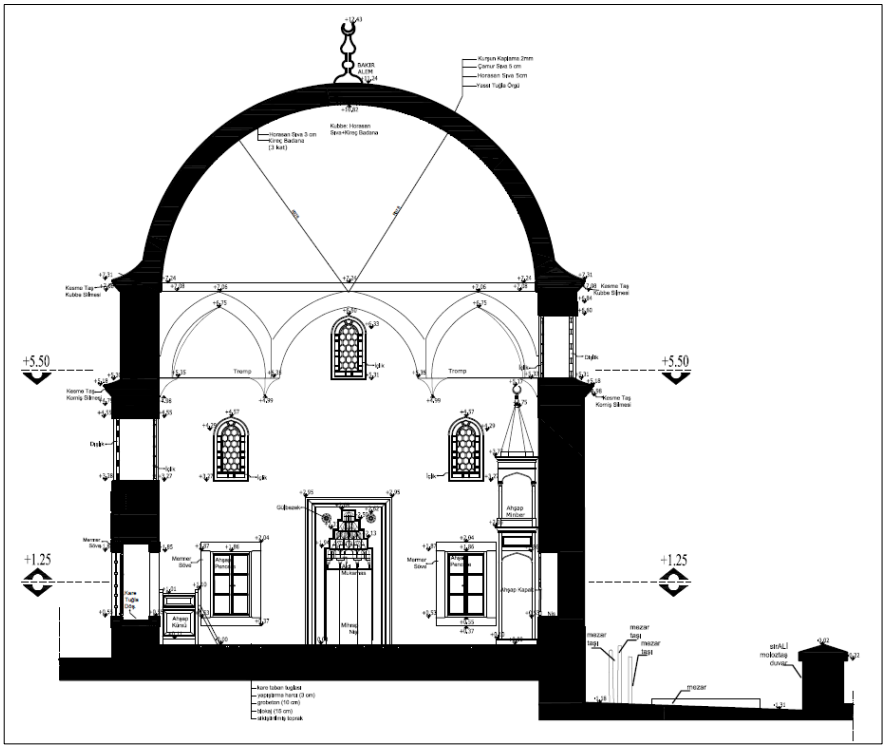
A-A Kesiti



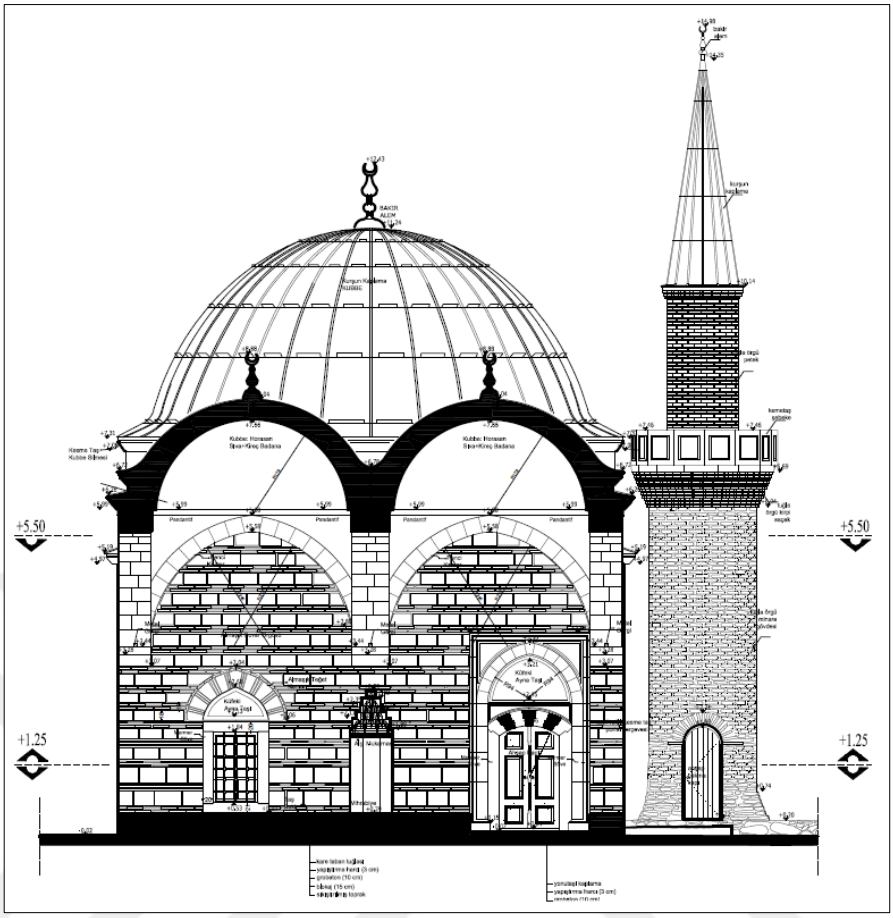
B-B Kesiti



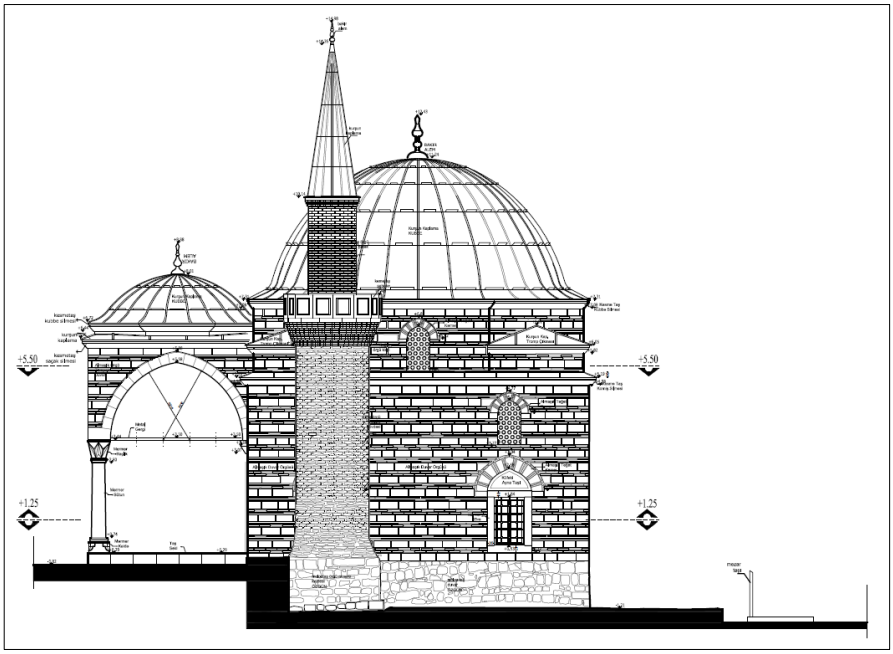
C-C Kesiti



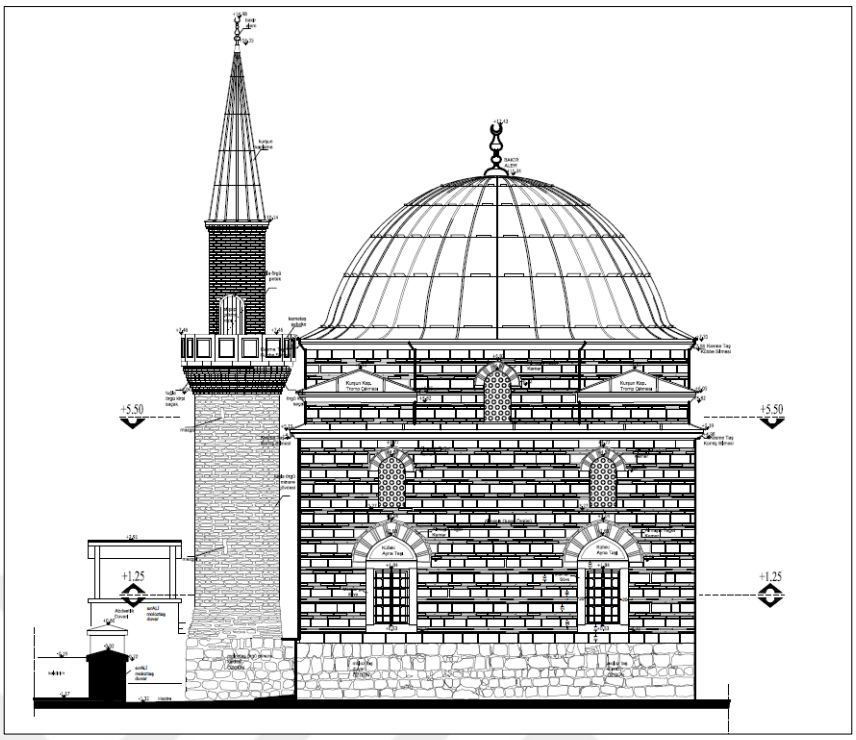
D-D Kesiti



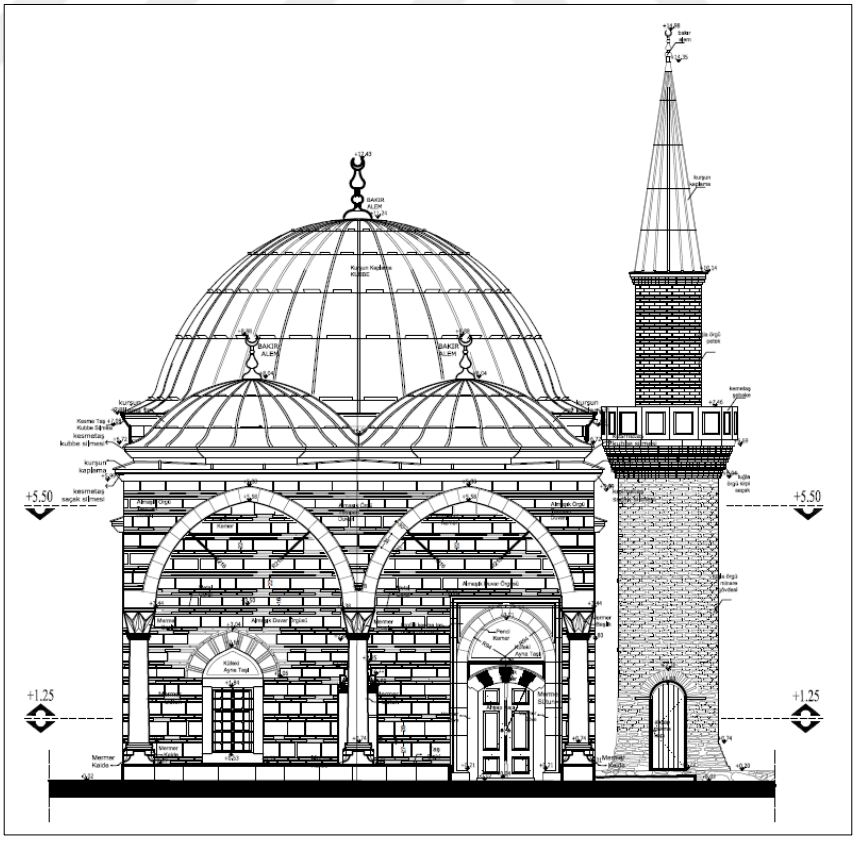
E-E Kesiti



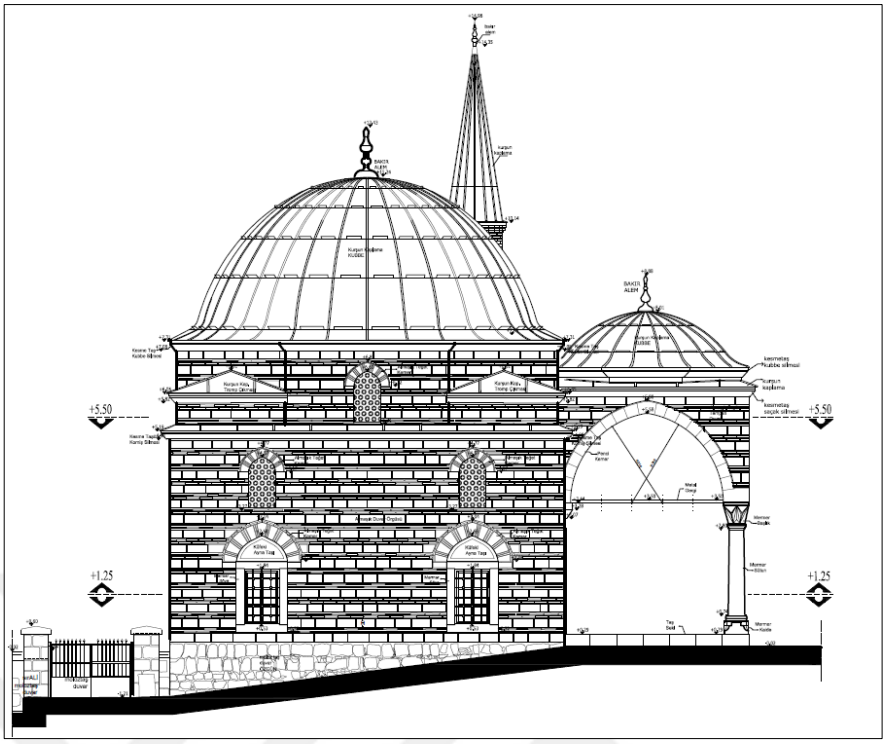
Güney Batı Görünüşü



Güney Doğu Görünüşü



Kuzey Batı Görünüşü



Kuzey Doğu Görünüşü

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mustafa Kemal BOZACI

EĞİTİM

Derece	Adı, Bölüm	Yıl
Lise	: Mustafakemalpaşa Lisesi, Bursa	1987
Üniversite	: Anadolu Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü	1993
Yüksek Lisans	: Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü	1997
Doktora	: Trakya Üniversitesi, Mimarlık Ana Bilim Dalı	2023

YABANCI DİLLER

İngilizce

ÇALIŞTIĞI KURUMLAR

Yıl	Kurum	Görevi
1995-1999	Osmangazi Üniversitesi, İnş. Müh. Bölümü	Arş. Gör.
1999-	Trakya Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi	Öğr. Gör.