



**BÜYÜK KÜTLELİ TARİHİ YAPILARIN ÇEVRESEL ETKİLER ALTINDA
YAPISAL DENGESİNİN ANALİTİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ;
SİNOP KALESİ ÖRNEĞİ**

Rüya KILIÇ DEMİRCAN

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2020

Rüya KILIÇ DEMİRCAN tarafından hazırlanan “BÜYÜK KÜTLELİ TARİHİ YAPILARIN ÇEVRESEL ETKİLER ALTINDA YAPISAL DENGESİNİN ANALİTİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ; SİNOP KALESİ ÖRNEĞİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİYLE BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ali İhsan ÜNAY

Mimarlık Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. İlhami DEMİR

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Baki ÖZTÜRK

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet GÖKDEMİR

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 24/09/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Cevriye GENCER

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Rüya KILIÇ DEMİRCAN

25/09/2020

BÜYÜK KÜTLELİ TARİHİ YAPILARIN ÇEVRESEL ETKİLER ALTINDA YAPISAL
DENGESİNİN ANALİTİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ;

SİNOP KALESİ ÖRNEĞİ

(Doktora Tezi)

Rüya KILIÇ DEMİRCAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2020

ÖZET

Yenilenemez bir kaynak olan mimari miras ve bu mirasın içerdiği tüm değerlerle gelecek nesillere aktarılması toplumsal bir sorumluluktur. Bu sorumluluk bilinci giderek yaygınlaşmakta ve bu konuda yapılan çalışmalar hız kazanmaktadır. En önemli mimari miras olan tarihi yapıların sürdürülebilir olması gerekli koruma-onarım-güçlendirme çalışmalarının uygulanarak yapısal bütünlüklerini devam ettirebilmeleri ile mümkündür. Bu uygulamalar öncesi mevcut tarihi yapının yapısal davranışının araştırılması, uygulanacak yöntem açısından büyük önem arz etmektedir. Teknolojik gelişmeler ışığında sayısal ortamda yapıların modellenmesi ve analizleri günümüzde önemli derecede kolaylaşırken, analizlerin doğru yorumlanması mühendislik önsezisiyle sağlanabilmektedir. Büyük kütleli, düzgün bir geometriye sahip olmayan sur duvarlarının ve kale burçlarının, çevresel etkiler altındaki yapısal davranışları hakkında yorum yapmak kolay değildir. Bu kapsamda Sinop Kalesi sur duvarları ve burçları çalışma alanı olarak seçilmiştir. Mevcut sur duvarları ve burçların dalga kuvvetleri ve zemin problemleri gibi çevresel etkiler altında aşamalı olarak, bir bütün halde yıkılmasının senaryosu için analitik bir yöntem önerilmiştir. Bu analizler ile özel yükler ya da çevresel etkiler nedeniyle, taş duvar örgüsünde herhangi bir ayrışma ve dağılma olmadan, büyük kütlelerin stabilite sorunlarından dolayı bütün olarak devrilmelerinin nedenleri araştırılmıştır. Hazırlanan sonlu elemanlar modelleriyle kalenin sur duvarları ve burçları literatürden alınan ortalama dalga kuvvetlerine maruz bırakılıp zemin özellikleri yaylar ve izolatörlerle sınırlandırılmıştır. Ayrı ayrı aşamalı yıkım senaryosu seri analizlerle gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda uygulanan yöntem, temel mühendislik ilkelerine göre doğrulanmıştır.

Bilim Kodu : 91120

Anahtar Kelimeler : Sayısal modelleme, yapısal stabilite, tarihi yapılar, sonlu elemanlar yöntemi

Sayfa Adedi : 137

Danışman : Prof. Dr. Ali İhsan ÜNAY

INVESTIGATION ON STRUCTURAL STABILITY OF LARGE SCALE HISTORICAL
BUILDINGS UNDER ENVIRONMENTAL EFFECTS WITH ANALYTICAL
METHODS; CASE STUDY: HISTORICAL SINOP CASTLE

(Ph. D. Thesis)

Rüya KILIÇ DEMİRCAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2020

ABSTRACT

It is a social responsibility to pass on the architectural heritage, which is a non-renewable resource, with all its values to future generations. This sense of responsibility is gradually becoming widespread and studies on this subject are gaining momentum. The sustainability of the historical buildings which are the most important architectural heritage is only possible with the maintenance of the structural unity by the implementation of the necessary conservation-repair-strengthening process. Researching the structural behavior of the existing historical building is of great importance in terms of the method to be used prior to the applications. While modeling the structures in digital platform in the light of technological developments along with its analysis is getting significantly easier today, the interpretation of the analysis in a correct way can only be achieved with engineering foresight. It is not easy to comment on the structural behavior of the city walls and bastions which are massive and do not have uniform geometries under environmental influences. In this context, the city walls and bastions of Sinop Castle were chosen as the study area. An analytical method is proposed for the scenario of a gradual collapse of the existing city walls and bastions as a whole under the environmental effects such as wave forces and soil problems. With these analyses, the reasons why the large masses have been overturned as a whole due to the problems of stability were investigated without any segregation and dispersion likely to be caused by specific loads or environmental effects in the masonry. With the finite element models prepared, the city walls and bastions of the castle were exposed to the average wave forces taken from the literature, and the ground properties were limited by springs and insulators. Severally-gradual collapse scenarios were put into action with serial analyses. As a result of the analyses conducted, the method employed has been verified in accordance with basic engineering principles.

Science Code : 91120

Key Words : Numerical modelling, structural stability, historical buildings, finite element method

Page Number : 137

Supervisor : Prof. Dr. Ali İhsan ÜNAY

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmam boyunca tüm bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, yol gösteren ve bu süreçte karşılaşmış olduğum sıkıntılarda yanımda olan ve kıymetli zamanını ayıran tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ali İhsan ÜNAY'a, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma boyunca desteklerini esirgemeyen tez komitesi üyelerim Sayın Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU ve Sayın Doç. Dr. Baki ÖZTÜRK'e, vaka konusu olarak seçmiş olduğumuz Sinop Kalesi verilerini tedarik eden Sinan KARAKAŞOĞLU, Adem YILMAZ, Çetin TEK ve Zeynel Zeki ÖZCANOĞLU'na, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Öğretim Üyesi Doç. Dr. Arzuhan Burcu GÜLTEKİN'e ve araştırma görevlisi mesai arkadaşlarıma, manevi destekleriyle beni yalnız bırakmayan arkadaşlarım Dr. Pınar Sezin ÖZTÜRK KARDOĞAN, Dr. Onur ÇAVUŞOĞLU ve Dr. Kenan TOKLU'ya teşekkür ederim.

Eğitim-öğretim hayatım boyunca her koşulda yanımda olan, desteklerini esirgemeyen annem Ayla KILIÇ, babam Tuncay KILIÇ, kardeşim Umutcan KILIÇ'a, doktora çalışmalarımda sabrını ve desteğini esirgemeyen değerli eşim Murat DEMİRCAN'a ve en önemlisi bu süreçte ikinci tez çalışmam olan, bana yeni deneyimler kazandıran canım oğlum Ahmet Poyraz DEMİRCAN'a en içten sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL ÇERÇEVE VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	7
2.1. Tarihi Kalelerin ve Surların Strüktürel Özellikleri	7
2.2. Kale Yapılarının Mimari Özellikleri	8
2.3. Kalelerin Konumlanması	13
2.4. Literatür Araştırması	15
3. YIĞMA KAGİR YAPILARIN GENEL ÖZELLİKLERİ, HASAR VE BOZULMA NEDENLERİ	33
3.1. Yığma Kagir Yapıların Tarihsel Gelişimi	33
3.2. Yığma Kagir Yapıların Malzeme Özellikleri.....	34
3.2.1. Doğal taş	34
3.2.2. Kerpiç	35
3.2.3. Tuğla.....	37
3.2.4. Harçlar	38
3.3. Yığma Kagir Yapıların Mekanik Özellikleri	40
3.3.1. Yığma yapıların basınç dayanımı	40
3.3.2. Yığma yapıların kayma dayanımı.....	41

	Sayfa
3.3.3. Yığma yapıların çekme dayanımı	42
3.3.4. Elastisite modülü	42
3.4. Yığma Kagir Yapılarda Hasar ve Bozulmaya Etki Eden Unsurlar	44
3.4.1. Depremler	44
3.4.2. Zemin kaynaklı hasarlar	45
3.4.3. Strüktür tasarımındaki hatalar	46
3.4.4. Yapı malzemesinin dayanımını yitirmesi	47
3.4.5. Kötü işçilik ve detay kullanımı.....	47
3.4.6. Yanlış restorasyon uygulamaları	48
3.4.7. Yangınlar, savaşlar ve vandalizm	49
3.4.8. Hava kirliliği, trafik ve bayındırlık etkileri	51
3.4.9. Uzun süreli doğal etkenler	52
4. YIĞMA KAGİR YAPILARIN YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI, MODELLEME VE ANALİZ TEKNİKLERİ	55
4.1. Yığma Yapıların Statik ve Dinamik Yükler Altında Davranışı	55
4.1.1. Statik yükler altında yığma yapıların davranışı	55
4.1.2. Dinamik yükler altında yığma yapıların davranışı	58
4.2. Modelleme Yöntemleri	58
4.2.1. Detaylı mikro modelleme yöntemi	60
4.2.2. Basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi.....	60
4.2.3. Makro modelleme yöntemi.....	61
4.3. Yığma Yapıların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizleri	61
4.3.1. Doğrusal elastik analiz.....	62
4.3.2. Doğrusal olmayan elastik analiz.....	64
5. KALE FORMU PROTOTİP MODELLEME VE STRÜKTÜREL BOZULMA ANALİZLERİ	69

Sayfa

6. TARİHİ SİNOP KALESİ SUR DUVARLARININ VE KULELERİNİN (KUMKAPI MEVKİİ) YAPISAL STABİLİTESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	79
6.1. Sinop İline İlişkin Genel Bilgiler	79
6.1.1. Sinop kalesi ve sur duvarlarının tarihsel gelişim süreci	80
6.1.2. Dış ve iç sur duvarları.....	83
6.2. Kuzey Sur Duvarları ve Kulelerin Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması ve Analiz Tanımlamaları	87
6.2.1. Birinci aşama analizleri ve değerlendirmeleri: Sinop 14. bölge bütün modeli.....	95
6.2.2. İkinci aşama analizleri ve değerlendirmeleri: Sur duvarlarının “aşamalı yıkılma” analizleri	104
6.2.3. Üçüncü aşama analizleri ve değerlendirmeleri: Kale burcunun “aşamalı yıkılma” analizleri	110
7. SONUÇLAR.....	121
KAYNAKLAR	125
ÖZGEÇMİŞ	135

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Yığma kagir duvarların genel mekanik değerleri ortalaması	44
Çizelge 5.1. Dörtgen kesitli (SQR) modelin analiz verileri.....	72
Çizelge 5.2. Dairesel kesitli (CRC) Modelin Analiz Verileri.....	73
Çizelge 5.3. Dörtgen kesitli model hesap sonuçların değerlendirme (düşey yük).....	77
Çizelge 5.4. Dairesel kesitli model hesap sonuçların değerlendirme (düşey yük).....	77
Çizelge 5.5. Altıgen kesitli model hesap sonuçların değerlendirme (düşey yük).....	77

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Basınç altında yığma kagir yapının gerilme-birim deformasyon arasındaki ilişki	43
Şekil 4.1. Eksenel basınç altında yığma birim ve harç birimin davranışı	56
Şekil 4.2. Eksenel çekmeye maruz deney numunelerindeki deformasyonlar ile gerilme-şekil değiştirme diyagramları	57
Şekil 4.3. Yığma duvarlarda modelleme teknikleri (a) detaylı mikro modelleme (b) basitleştirilmiş mikro modelleme (c) makro modelleme	59
Şekil 5.1. X-Y-Z global eksen takımının katı model üzerinde tanımlanması.....	70
Şekil 5.2. Kademeli hesaplar için hazırlanan örnek teşkil eden (prototype) hesap modelleri	72
Şekil 5.3. Dörtgen kesitli (SQR) hesap modeli serisi	73
Şekil 5.4. Dairesel kesitli (CRC) hesap modeli serisi.....	73
Şekil 5.5. Altıgen kesitli (HXG) hesap modeli serisi.....	74
Şekil 5.6. Dörtgen kesitli (SQR) hesap modellerinin düşey yükler altında kademeli hesap sonuçları	75
Şekil 5.7. Dairesel kesitli (CRC) hesap modellerinin düşey altında kademeli hesap sonuçları.....	75
Şekil 5.8. Altıgen kesitli (HXG) hesap modellerinin düşey yükler altında kademeli hesap sonuçları	76
Şekil 6.1. Sinop surlarının aşamalı yıkılma analizleri, birinci aşama analiz modeli	94
Şekil 6.2. Sinop surlarının aşamalı yıkılma analizleri, ikinci aşama analiz modeli.....	95
Şekil 6.3. 1 numaralı burç aşamalı yıkılma analizleri, üçüncü aşama analiz modeli.	95
Şekil 6.4. Sinop Kalesi 14. bölge kuzey surları ve burçları dinamik hesap için spektrum eğrisi	97
Şekil 6.5. Sur duvarlarında sırasıyla G + EQx ve G + EQy yük birleşiminde elde edilen gerilme dağılımı.....	100
Şekil 6.6. 1 numaralı burç sırasıyla G + EQx ve G + EQy yük birleşiminde elde edilen gerilme dağılımı	100
Şekil 6.7. 2 numaralı burç sırasıyla G + EQx ve G + EQy yük birleşiminde elde edilen gerilme dağılımı	100

Şekil	Sayfa
Şekil 6.8. 3 numaralı burç sırasıyla G + EQx ve G + EQy yük birleşiminde elde edilen gerilme dağılımı.....	101
Şekil 6.9. 1 ve 2 numaralı burçlar arasındaki kemerin sırasıyla G + EQx ve G + EQy yük birleşiminde elde edilen gerilme dağılımı.....	101
Şekil 6.10. 2 ve 3 numaralı burçlar arasındaki sur duvarının sırasıyla G + EQx ve G + EQy yük birleşiminde elde edilen gerilme dağılımı.....	102
Şekil 6.11. Sur duvarları katmanları	105
Şekil 6.12. Yapı-zemin birleşim noktaları izolatör tanımlaması	105
Şekil 6.13. Dalgaların neden olduğu basınç ve çekme kuvvetleri	106
Şekil 6.14. W1 PCA 00 Modeli 1, 2 ve 3. Katman sınır çekme gerilmelerinin aşıldığı bölgeler grafiği.....	107
Şekil 6.15. W1 PCA 01 Modeli 1, 2 ve 3. Katman sınır çekme gerilmelerinin aşıldığı bölgeler grafiği.....	108
Şekil 6.16. W1 PCA 02 Modeli 1, 2 ve 3. Katman sınır çekme gerilmelerinin aşıldığı bölgeler grafiği.....	108
Şekil 6.17. W1 PCA 03 Modeli 1, 2 ve 3. Katman sınır çekme gerilmelerinin aşıldığı bölgeler grafiği.....	109
Şekil 6.18. W1 PCA 04 Modeli 1, 2 ve 3. Katman sınır çekme gerilmelerinin aşıldığı bölgeler grafiği.....	109
Şekil 6.19. W1 PCA 05 Modeli 1, 2 ve 3. Katman sınır çekme gerilmelerinin aşıldığı bölgeler grafiği.....	110
Şekil 6.20. Üçüncü analiz serisi için doğrulama modeli.....	112
Şekil 6.21. Doğrulama modelinin mesnetlerinin Winkler yayları ve T/C ISOLATOR elemanlarıyla yapılan hesabı sonucunda elde edilen gerilme ve yer değiştirmeler	113
Şekil 6.22. Doğrulama modelinin mesnet koşullarına göre değişen gerilme dağılımları; a) Mesnetlerde Winkler yayları ve T/C ISOLATOR tanımlanan model ile yapılan birinci analiz, b) Basit mesnetlerle konsol davranışı sergileyen model ile yapılan ikinci analiz, c) Mesnetlerde sadece Winkler yayları tanımlanan model ile yapılan üçüncü analiz.....	114
Şekil 6.23. Doğrulama modelinin temel noktalarında mesnet koşullarına göre değişen deplasmanlar.....	115
Şekil 6.24. Burçların bütün olarak devrilmesini incelemek amacıyla oluşturulan sonlu elemanlar hesaplarında dalgalarının neden olduğu yatay yükler.....	116

Şekil	Sayfa
Şekil 6.25. Burçların bütün olarak devrilmesini incelemek amacıyla oluşturulan sonlu elemanlar analiz modeli	116
Şekil 6.26. Burcun temelindeki noktalarda aşamalı analizler sonucunda elde edilen yer değiştirmeler	117
Şekil 6.27. Seri hesaplar sonucunda seçilen burcun devrilme aşamaları.....	118
Şekil 6.28. Seçilen burcun devrilme aşamalarında kabul edilen sınır çekme gerilmelerinin dağılımı	118

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Requenses kalesi –İspanya/Katalonya	9
Resim 2.2. Dış kale-İç kale ve Varoş bölgesi	10
Resim 2.3. (a) Walton kalesi-Clevedon/İngiltere, (b) Del Monte kalesi- Apulia/İtalya	11
Resim 2.4. İspanya-Segovia Alcazar kalesi	12
Resim 2.5. Fransa Mont Saint Michel kalesi	12
Resim 2.6. Mersin-Mamure kalesi	14
Resim 2.7. Sinop-Boyabat kalesi	15
Resim 3.1. Sinop Kalesi kuzey surları taş duvarları	35
Resim 3.2. Konya Çatalhöyük’te bilinen en eski kerpiç duvar kalıntıları	36
Resim 3.3. (a,b,c) Yemen Şibam’da bulunan kerpiç gökdelenler	36
Resim 3.4. Tuğlanın kemer yapımında kullanılması	38
Resim 3.5. Galata Kethüda Yahya Ağa çeşmesi (1732)	46
Resim 3.6. Suyun etkisiyle taş malzemede oyulma ve tuzlanma	47
Resim 3.7. (a) Beylerbeyi Sarayı (yeni) Mermer Köşkü teras çatı ve (b) eski görünümü	48
Resim 3.8. Ocaklı Ada Kalesi hatalı restorasyon uygulaması	49
Resim 3.9. İshak Paşa Sarayı hatalı restorasyon uygulaması	49
Resim 3.10. Bosna Hersek Mostar köprüsü	50
Resim 3.11. Suriye Halep’te bulunan tarihi Emevi Cami	51
Resim 3.12. Emevi Cami’nin savaş sonrası iç ve dış durumu	51
Resim 3.13. Dalga etkisine maruz kalmış Sinop Kalesi Dış Kuzey Surları	53
Resim 6.1. Sinop genel bakış	79
Resim 6.2. 1853 Sinop’a yapılan Rus baskını-1853	82
Resim 6.3. 1. Dünya Savaşı esnasında Alman Ordusu tarafından çekilen Sinop-1915	82

Resim	Sayfa
Resim 6.4. Sinop Kuzey-Güney Sur duvarları kuşbakışı	83
Resim 6.5. Batı ve güney sur duvarları hattı	84
Resim 6.6. Güney sur duvarları ve iç liman 1935-1940	84
Resim 6.7. Güney sur duvarları doğu cephesinden bakış	85
Resim 6.8. Kuzey sur duvarları hattı	85
Resim 6.9. Kuzey sur duvarlarından bir bölüm	86
Resim 6.10. Kuzey-doğu sur duvarlarından bir bölüm	86
Resim 6.11. Doğu sur duvarları	87
Resim 6.12. Hasankeyf Büyük Saray Kalıntısı.....	88
Resim 6.13. Bolivya'daki Eduardo Avaroa Andean Fauna Milli Parkı çölünde rüzgarın ve kumların neden olduğu kaya oluşumu.....	89
Resim 6.14. Sinop surları duvar kalıntısı.....	89
Resim 6.15. Sinop Kale surları ve ceza evi paftası	91
Resim 6.16. 14. bölge kuş bakışı burç ve surların görünüşleri	91
Resim 6.17. Sinop kuzey sur girişi kum kapı-1910	92
Resim 6.18. 14. bölge kuzey sur ve burçları doğu cephesi görünüş	92
Resim 6.19. 14.bölge kuzey sur ve burçları taban kot ve ölçüleri	93
Resim 6.20. 14.bölge kuzey sur ve burçları üst kot ve ölçüleri	93
Resim 6.21. Sinop surlarındaki bir burcun dalgaların etkisiyle bütün olarak devrilmesi	111

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
E	Elastisite modülü
f_k	Yığma yapı elemanı karakteristik basınç dayanımını
f_m	Harcın ortalama basınç dayanımını
f'_b	Birim elemanın (taş veya tuğla) basınç dayanımını
f	Basınç gerilmesi altında normal dayanım
f_d	Basınç gerilmesi altında tasarım dayanımı
kN	Kilo Newton
m	Metre
m²	Metrekare
m³	Metreküp
mm	Milimetre
mm²	Milimetre kare
MPa	Mega pascal
N	Newton
s²	Saniye kare
ϵ_{mu}	Basınç gerilmesi altında limit uzama
ϵ_{ml}	Basınç gerilmesi altında ilk uzama
τ_o	Kayma gerilmesi
σ	Normal gerilme

Kısaltmalar	Açıklamalar
CEN	Avrupa Standardizasyon Komitesi
DBYBHY	Deprem böl. yapılacak binalar hakkında yönetmelik
DEM	Ayrık Eleman Yöntemi
FELA	Sonlu Elemanlar Limit Analizi
FEM	Sonlu Eleman Yöntemi

Kısaltmalar**Açıklamalar****FNA**

Hızlı Doğrusal Olmayan Analiz

G+EQx

Düşey yük+ X doğrultusunda deprem yükü

G+EQy

Düşey yük+ Y doğrultusunda deprem yükü

ICOMOS

Uluslararası Anıtlar ve Sitler Konseyi

M.Ö.

Milattan Önce

M.S.

Milattan Sonra

NDT

Tahribatsız Test

OMA

Operasyonel Modal Analiz

RILEM

Uluslararası Yapı Malzemeleri Uzmanlar Birliği

SEM

Taramalı Elektron Mikroskobu

TBDY

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

UNESCO

Birleşmişler Milletler Bilim, Eğitim ve Kültür Kurumu

XRD

X-ray Difraksiyonu

XRF

X-ray Flora Işıması

1. GİRİŞ

İnsanlık tarihinin ilk dönemlerinde başlayan ve günümüze kadar gelen barınma ve korunma ihtiyacı yapı kavramını doğurmuştur. İnsanoğlu hayatını sürdürebilmek, doğanın yıkıcı gücünden korunabilmek için bulundukları coğrafyanın imkânları doğrultusunda barınaklar yapmıştır. Zaman içinde sosyal, ekonomik ve teknolojik gelişmelerle beraber, barınakların yerine yapılar inşa etmişlerdir. Bu yapıların bir kısmı zamana ve olumsuz tüm şartlara karşı ayakta durmayı başarmış ve bugüne kadar gelmiştir.

Geçmiş ile günümüz arasında bir köprü görevi gören bu yapılar; ait oldukları zamana dair o toplumun sosyo-ekonomik, kültürel değerler, politik, eğitim ve dini yaklaşım açısından birçok bilgiyi günümüze taşımaktadırlar. Tarihi yapıların korunması, onarılması, güçlendirilmesi ve ileri nesillere aktarılması gerekliliği önemli bir konu olup, bilinçlendirme düzeyi son yıllarda farkındalık yaratmıştır.

Türkiye topraklarında sayısız medeniyetlere ev sahipliği yapmaktadır. Bu medeniyetlerden kalma günümüze birçok tarihi eser ulaşmış olup, yapılan araştırma ve kazılar sonucunda her geçen gün bir yenisi eklenerek kültürel miras çerçevemizi büyötmektedir. Bu eserler ölkemizin kültürel miras açısından evrensel düzeyde zengin olduğunun bir kanıtıdır. Bu durum, Türkiye'ye uluslararası düzeyde bir sorumluluk yüklemektedir. Koruma kavramının öncelikle tüm bilinçli bireylerde uygulanabilir hale gelmesi, koruma sürecinde bulunan tüm kadroların; ulusal çerçevenin yanı sıra uluslararası gelişmeleri ve kararları uygulayabileceği bir zeminde etkileşim halinde olması gerekmektedir.

Avrupa ölkelerinde, özellikle anıtsal nitelik taşıyan tarihi eserlerin korunması için ilk tedbirler 18.yüzyıl sonlarında başlamış ve 19. yüzyıla gelinceye dek tarihi yapılar estetik, işlevsel ve simgesel değerleriyle korunmuştur. 1931 yılında İtalya'da çıkartılan Carte Del Restaura'da (Atina Tüzüğü) koruma ile ilgili kararlar alınmıştır. 1964 yılında Venedik Tüzüğü yayınlanıp koruma kavramının sınırları genişletilerek 1965 yılında "Uluslararası Anıtlar ve Sitler Konseyi (ICOMOS)" da, koruma konusunda alınan kararların takipçisi olan en önemli uluslararası örgüt olarak kurulmuştur. 1974 yılında Türkiye ICOMOS'a üye olarak uluslararası görüş alışverişi yapmaktadır. 1983 tarihli Türkiye Eski Eserler Kanunu, 1987 yılında 2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıkları Koruma Kanunu olarak değiştirilmiştir. Günümüze kadar birçok ek ve değişiklik getirilen mevzuat şu an yürürlüktedir. Yenilenemez

bir kaynak olan kültürel mirasın, toplumumuz için önemli değer olan “emanet” kavramıyla özdeşleştirilerek içerdiği tüm değerleriyle birlikte gelecek nesillere aktarılması toplumsal bir sorumluluktur [1].

Kültürel mirasın en önemli bileşenlerinden biri mimari mirastır. Mimari mirası korumanın amacı; kültürel değerlerin özgünlüğünü bozmadan kimliğini ortaya çıkarmaktır. Tarihi yapıların korunması; kültürel, sanatsal, teknik ve ustalık gerektiren bir eylemdir ve koruma etiğine uygun olarak bilimsel, sistematik araştırma ve değerlendirmelere dayanarak yapılmalıdır. Bu nedenle, mimari mirasın bütünlüğü, parçası olduğu sosyal ve kültürel bağlam ile birlikte dikkate alınmalıdır. Koruma uygulamaları sadece gerekli eğitimi almış, yeterli bilgi ve deneyime sahip kişilerce gerçekleştirilmelidir. Bu husus, koruma sürecinin planlama, projelendirme ve uygulama aşamalarında görev alacak her tür kurum ve kişi için de geçerli olmalıdır [1].

Tarihi yapıların korunması için gerekli tüm eylemler; mimarlık, mühendislik, arkeoloji, sanat, tarih gibi birçok disiplinler arası bilim dalını bir araya getirmektedir. Bir tarihi yapının onarım ve güçlendirme işlemleri öncesinde bu bilim dallarının bir araya gelerek ön çalışmalar yapması gerekmektedir. Mevcut yapının hasar durumu ve hasar nedenleri araştırılarak yapının stabilitesinin nasıl korunacağını kararının verilmelidir. Bu işlem basamağında mühendislerin sıklıkla karşılaştıkları problemlerin başında tarihi yapının yapısal analizleri ve değerlendirmeleri gelmektedir. Bu problem yapının güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Doğru analizler ve değerlendirmeler, tarihi yapının geleceği hakkında yol gösterici olacaktır.

Teknolojik gelişmeler ışığında yapıların modellenmesi ve analizleri günümüzde sayısal ortama daha kolay aktarılabilir. Farklı modelleme teknikleri geliştirilmiş ve amacına yönelik analiz ve değerlendirmeler için sayısal paket programlar üretilmiştir.

Bir tarihi yapının mühendislik hesapları oldukça karmaşıktır. Farklı malzeme karakteristiği ve geometrisi nedeniyle analiz yapmadan, yapısal davranışı hakkında yorum yapmak zordur. Bu nedenle tam anlamıyla malzeme özellikleri, geometrisi dikkate alınarak hesap yapılmalıdır. Ancak planlama aşamasında yapı basitleştirilerek, mühendisliğin temel prensipleri ve genel fizik kuralları çerçevesinde; yer çekimi etkisiyle yapının kendi ağırlığından kaynaklanan deformasyon noktaları tahmin edilebilir. Onarımı planlanan bir

tarihi yapının bu bilgiler ışığı altında değerlendirilmesi ve aynı zamanda sanatsal, kültürel, tarihi değerleriyle yorumlanması gerekmektedir. Tek başına mühendislik bakış açısıyla yapılan değerlendirme, koruma kavramının tam anlamıyla gerçekleştirilememesi demektir. Günümüzde gelinen durum ise mühendislik hesaplarının önemini, yapının özgün kimliğinin önüne çıkartmakta, bu da geçmişten gelen fiziksel izlerin silinmesine, kimliğini yitirmiş bir yapı oluşumuna neden olmaktadır. Bu bağlamda tarihi bir yapının onarımı için bütünsel bir bakış açısı ile hareket edilmesi gerekmektedir.

Bu konuda Modena ve diğerleri (2014) çalışmalarında; yapı mühendislerinin günümüz teknikleriyle tarihi yapıların güvenlik sorunlarına yaklaşımının, koruma kavramıyla örtüşmediğini ifade etmişlerdir. Koruma ve yapısal güvenlik arasındaki olası çatışmanın çözümleri için önerilerde bulunmuşlardır. Yapısal güvenliğe genel yaklaşım, teşhis için araştırma teknikleri, yapısal analiz için metodolojiler ve müdahale teknikleri gibi konularda önemli noktaları farklı kaynaklar aracılığıyla (ICOMOS, RILEM, CEN TC 346 gibi) vurgulamışlardır [2].

Bir onarım-güçlendirme projesinin planlama-karar verme aşamasında yetkili olan otorite detaylı mühendislik bilgilerine sahip olmayabilir ve karışık mühendislik hesaplarını yorumlamasını yapamayabilir. Bu tez; tarihi bir yapının mühendislik problemlerinin ve hesap yöntemlerinin genel çözümünün her otorite tarafından anlaşılır bir düzeyde olmasını amaçlayan bir rehber olarak hazırlanmıştır. Bu tezde; korunması onarılması ve güçlendirmesine karar verilmiş tarihi kalelerin sur duvarlarının ve burçlarının hesapları için sistematik bir sayısal modelleme ve hesap yöntemi geliştirilmiştir. Bu tezin amacı; tarihi sur duvarları ve kale burçlarının; kendine özgü malzeme özellikleri ve farklı geometrik karakteri ile çevre koşulları göz önünde bulundurularak, yapısal dengesinin korunmasını analitik model üzerinde, mühendisliğin temel prensipleri uygulanarak nasıl çözüleceğinin ve yorumlanacağını gösterilmesidir. Bu kapsamda tarihi Sinop kalesi ve sur duvarları vaka çalışması olarak seçilmiştir.

Kale ve sur duvarlarının ana tasarım ilkesi; dışarıdan etki eden kuvvetlere karşı koymaktır. Bu nedenle diğer yapılara göre çok daha büyük kesit özelliklerine daha fazla dayanım gösterebilecek geometrik şekillere sahiptirler. Tarih boyunca kale ve sur duvarlarının çok güçlü mekanik ve ateşli silahlarla hasar gördüğü ve yıkıldığına tanık olduğu halde binlerce yıl geçmiş olan kale ve sur duvarlarının çoğu hala ayakta durmaktadır. Ancak, büyük bir

güç gerektiren mekanik ve ateşli silahların yıkamadığı veya hasar veremediği birçok kale ve sur duvarları başka sebeplerle yıkılmış veya devrilmiştir. Bunun en önemli nedeni, malzeme bozulması ve zemin problemlerinden dolayı ortaya çıkan denge sorunlarıdır. Bu iki faktörün etki ve sonuçlarını sonlu elemanlar hesap yöntemiyle incelemek için Sinop Kalesi kuzey sur duvarları ve kulelerinin matematiksel modeli hazırlanıp, kademeli analizlerle yapının geometrik kararlılığı hakkında yorum yapılmıştır.

Bir köprü, cami, kilise ya da hamam gibi düzenli yapılar; sütun, kemer, tonoz, kubbe ve benzeri nitelikte taşıyıcı elemanlara sahiptirler. Bu nedenle bu yapıların davranışları hakkında yorum yapmak daha kolaydır. Fakat ağır kütleli düzgün bir geometriye sahip olmayan sur ve kale duvarlarının, çevresel etkiler altındaki davranışları hakkında yorum yapmak kolay değildir. Deniz kenarında olması sebebiyle çevresel etkilerin Sinop Kalesi sur duvarları üzerindeki deformasyonlarını değerlendirmek için farklı senaryolar üretilmiştir. Sur duvarları SAP2000 V.14 sonlu elemanlar paket programında üç boyutlu SOLID elemanlar olarak makro modellenmiş farklı senaryolar altında analiz edilerek yorumlanmıştır. Karadeniz kıyısında dalga kuvvetlerine maruz kalan sur duvarlarında; sur temelini oyulması, temelin zayıflayarak yapıda deformasyonlar gözlemlenmesi böylece, yapının statik dengesini koruyamayarak yıkılması ya da dalgaların sur duvarları yüzeyinde oluşturduğu basınç ve emme kuvvetinden dolayı taşların yerinden sökülmesi, zamanla malzeme kaybından dolayı oluşan geometrik stabilitesini sürdürememesi ilk senaryo olarak uygulanmıştır. İkinci olarak; sur duvarlarına bağlantılı olan burcun (1 numaralı burç) aynı senaryo ile bireysel davranışı seri analizler ile açıklanarak yorumlanmıştır.

Bu kapsamda tez altı ana bölümden oluşmaktadır. İlk olarak giriş bölümünde mimari mirasımız olan tarihi yapıların koruma kavramının önemi açıklanmıştır. Koruma kavramı altında günümüzdeki ilerlemeler ve tarihi yapıların mühendislik problemlerine dair yaklaşımlar tez kapsamında incelenecek olan Sinop Kalesi Kuzey Sur Duvarları üzerinde uygulanacak olan analiz çalışmalarına ve tezin amacına yer verilmiştir.

İkinci bölümde; yığma tarihi yapı örnekleri olarak kaleler ve sur duvarlarının yapım teknikleri ve yapılış amaçları, mimari strüktür açısından kullanılan malzemeler ve yapının formu irdelenmiştir. Kale ve surlarla ilgili son yıllarda yapılan çalışmaların özetlerine yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde; yığma kagir yapıların genel özellikleri, tarihi kagir yığma yapıların malzeme özellikleri, mekanik özellikleri ve yapılarda hasar ve bozulmaya etki eden unsurlar ayrıntı olarak verilmiştir.

Dördüncü bölümde; yığma yapıların statik ve dinamik yükler altında davranışları, modelleme teknikleri ve analiz yöntemleri açıklanmıştır.

Beşinci bölümde; Sinop Kalesi ve sur duvarlarına uygulanması planlanan seri analizler, kale formunda hazırlanan prototip modeller üzerinde uygulanmıştır. Prototip modellerin geometrik kararlılığı ve statik denge değişimi mekaniğin temel prensipleriyle yorumlanmıştır.

Altıncı bölümde; vaka çalışmasına konu olan Sinop ili ve Sinop Kalesinin kısa tarihçesi, kalenin strüktür ve malzeme özellikleri, kalede mevcut hasarlar ve yapılan yenileme çalışmalarına yer verilmiştir. Sinop Kalesi Kumkapı mevki kuzey sur duvarlarının SAP2000 V.14 sonlu elemanlar paket programında modellemesi yapılmış, farklı senaryolardaki çevresel etkilerin analizleri model üzerinde uygulanmıştır. Yapılan analizlerin sonuçları genel mühendislik ve fizik prensipleri altında değerlendirilmiş ve bulgular yorumlanmıştır.

2. KURAMSAL ÇERÇEVE VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Zaten bir yapıyı muhafaza etmenin en iyi yolu, o yapıya bir amaç bulmak ve bu amacın gerektirdiği bütün gereksinimleri değişikliğe mahal vermemecesine karşılamaktır. [...] Benzer koşullarda, en iyisi ilk mimarın yerine kendimizi koymak, eğer dünyaya yeniden gelseydi ve bizim önümüze konan programlar onun önüne konsaydı o ne yapardı diye düşünmektir. (E. E. Viollet-le-Duc (Fransız Mimarisinin Açıklamalı Sözlüğü-Restorasyon Maddesi)).

2.1. Tarihi Kalelerin ve Surların Strüktürel Özellikleri

En eski çağlardan günümüze insanoğlu hayatının her döneminde savunma ve güvenlik ihtiyacı duymuştur. Bu ihtiyaç en küçük yapı birimi olan evden kente kadar etkisini göstermiştir. Düşman saldırılarından korunmak ve dış tehlikelerden sakınmak için, stratejik ve askeri önemi olan yerlerde yapılan, halkın ve askerlerin sığınmasına ve savunmaya elverişli kalın ve yüksek duvarları olan sağlam ve muhkem yapılara “kale” olarak tanımlanmaktadır [3].

Kaleler; zaferlerin ve mağlubiyetlerin simgesi, iktidarın ve gücün göstergesi, kahramanlıkların zirvesinde inşa edilmiş görkemli yapılardır. Taşların büyük bir mühendislik bilgisi ile yükseldiği bu denge yapıları mitolojiden destanlara hemen her uygarlığın gurur anıtlarıdır [4].

Kaleler askeri bir amaç ile yapılmış savunma yapılarıdır. Savunma amacını gerçekleştirebilecek şekilde, stratejik olarak önemli noktalarda inşa edilmişlerdir. Ticaret yolları üzerinde, kıyıya yakın mevkide olan adacıklarda, köprübaşlarında, önemli yere giden yolların üzerinde, yol kavşaklarında, dağlar arasındaki boğazlarda, geçit yerlerinde, limanlarda, adalarda, deniz boğazlarında ve burunlarda bir kaleye rastlamak mümkündür [5]. Ancak popüler kültürde kale ya da şato sözcüğü daha çok orta çağda derebeylerin korunaklı özel konutları da olarak bilinir.

Kaleler mimari anlamı ve özellikleriyle iki kategoride tanımlanabilir. Öncelikle kaleler; askeri savunma amacıyla inşa edilen, mimari biçim ve işlevleri diğer mimari eserlerden farklı olarak arazinin konumu ve topografya yapısı, savunma politikası ve stratejisine göre şekillendirilmişlerdir. Bu durumda estetik, geometrik biçim ve günlük yaşam işlevleri daha arka planda kalır. Taşıyıcı sistemin biçimi ve strüktürel dayanımı, kale yapıları için en

önemli kriterdir. İkinci tanım bağlamında kale; parçası olduğu aristokrasinin ve yönetim erkinin prestij değerinin ve gücünün simgelenmesidir. Bu anlamıyla; yukarıda sözü edilen askeri savunma amacının önüne geçmeden, kendi kültür ve simgelerinin de kale tasarımında kullanıldığı görülmektedir. Diğer tarihi ve anıtsal yapılarla karşılaştırıldığında, kale yapılarının “açıklık geçme” anlamında mimari ve mühendislik teknikleri bakımından strüktürel özellikleri çok karmaşık değildir. Genellikle büyük kütleleriyle düşey doğrultuda kendi ağırlığının sağladığı denge ile olası diğer yüklere ve kuvvetlere karşı oldukça dayanıklıdır. Diğer anıtsal yapılarda olduğu gibi çeşitli strüktürel elemanların birbirleriyle belli düzen içinde geometrik biçimlerinin belirlenmesi yerine, tek bir masif elemanla ve muhtemelen taşıma kapasitesinin çok daha fazlasına karşılık gelen kesit boyutlarıyla kalelerin genel geometrik biçimleri oluşmaktadır [6].

Kalelerin tarihi insanlık tarihi kadar eski olup, yüksek ve münferit tepelere yapılmışlardır. Sur duvarları insanların savunmalarını taşla kesikle yaptıkları devirlerde kerpiçle inşa edilmişlerdir. Ok, mancınık, koçbaşları gibi silahlar keşfedildikten sonra insanlığın silaha ve savunmaya bakış açısının değişmesine paralel olarak; kale yapımında taş malzeme kullanılmaya başlanmıştır. Ortaçağın ileri dönemlerinde inşa edilen kalelerin dış duvarları evleri içine alacak şekilde yapılmıştır. Bu duvarlar kimi zaman tüm şehri çevrelemiştir.

Yuvarlak taş ve demir atan topların keşfi ile kale anlayışı tam olarak oturmuştur. Kalelerin ve burçların içlerine, askerlerin koğuşları olarak kullanılan ahşap katlar yapılmıştır. Bu katların üstleri mahrutı şekilde örülmüş ve kurşunlamıştır. Kale ve burçların çoğunun duvar içlerine yapılan ve minare merdivenlerine benzeyen taş merdivenlerle çıkılmıştır [4].

2.2. Kale Yapılarının Mimari Özellikleri

Kaleler planlanırken askeri savunma stratejisi ve inşa edildikleri yerin topografyasının doğal koşulları geometrik biçimlerinin ortaya çıkmasında en önemli rol oynar. Bununla birlikte, mimari plan anlamında sınıflandırılmalar yapılabilir. En sık kullanılan kale planları; kuleler, burçlar ve yüksek kalın sur duvarlarıyla çevrili avludan oluşan plan şeklindedir. Kullanılan mimari elemanların niteliği, bölgenin savunma bakımından önemine göre değişiklik göstermiştir. Bu sebeple her bir kale, ortak mimari elemanlara sahip olsalar dahi, kendi içlerinde özgün bir mimari biçime sahiptirler. Kale kavramına ilişkin terimleri iç kale, dış kale, sur duvarları, kule (burç) ve avlu olarak sınıflandırılabilir. Resim 2.1. de İspanya-

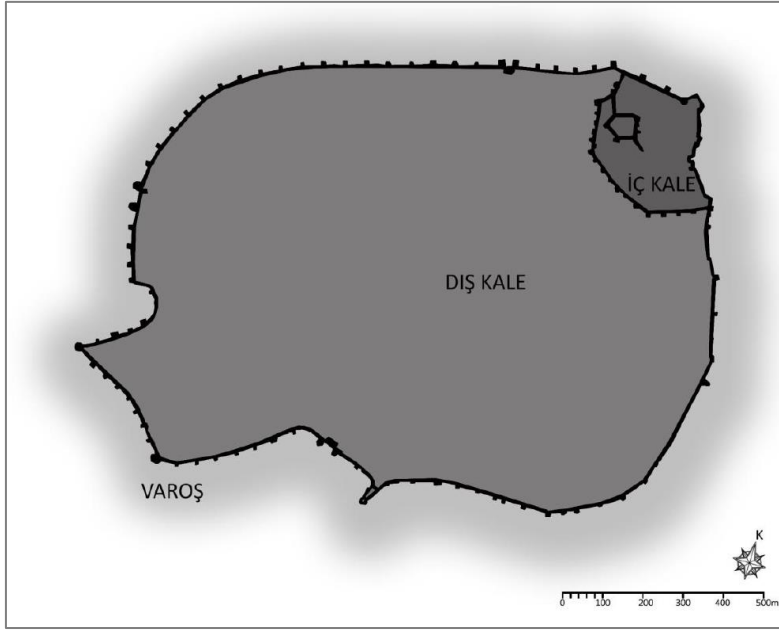
Katalonya da 10. yüzyılda inşa edildiği bilinen küçük çaplı bir kara kalesi olan Requesens Kalesinin bölümleri gösterilmiştir. 1 numara ile gösterilen alan varoş, 2 numara ile gösterilen alan dış kale, 3 numara ile gösterilen alan avlu ve 4 numara ile gösterilen alan iç kaleyi ifade etmektedir.



Resim 2.1. Requesens kalesi –İspanya/Katalonya [7]

İç kale: İç kale, surlarla çevrili bir kentin en yüksek yerinde hükümdarın, beyin ya da komutanın oturmasına ayrılmış, en son savunma yeri olan kale bölümüdür. Bala, hisar ve erek olarak da ifade edilmektedir. Surlarla sınırlandırılmış bir şehir veya kasabaların içinde hâkim bir noktaya yapılan ve hükümdar/kumandanın konakladığı ikinci kaledir [8].

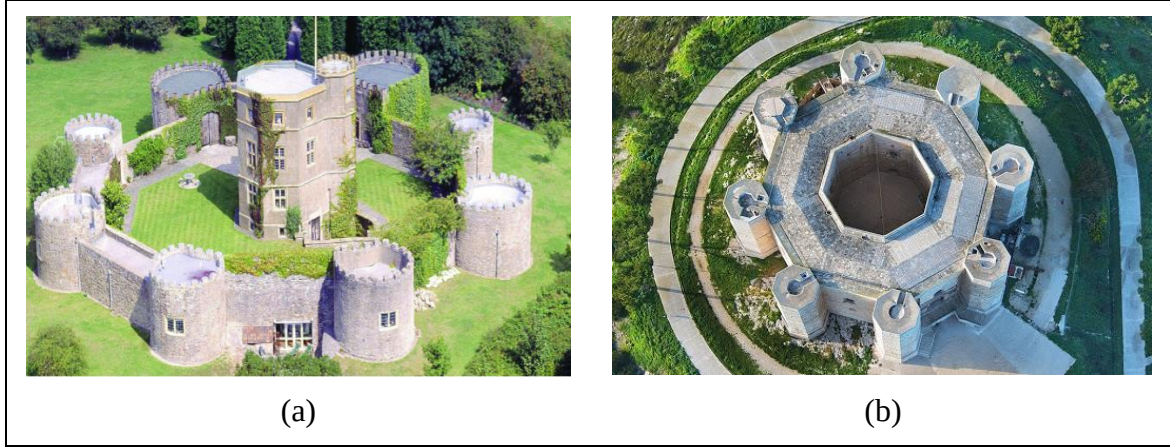
Dış Kale: Kalenin dış bölümünde kalan bölge “Varoş” olarak adlandırılmaktadır. Varoş bölgesiyle sınır oluşturan dış surlarla çevrili alan ise dış kaledir. Dış kale, kentin asıl bölümünü oluşturan şehir, ticaret ve konut alanlarını, dini ve diğer kamu yapılarını içine alan bölümdür [8]. Savunmanın ilk gerçekleştirildiği, güçlü sur duvarlarıyla varoştan ayrılan bu bölüm aynı zamanda askeri birliklerin ve sivil halkın yaşam alanıdır. Resim 2.2. de dış kale, iç kale ve varoşun bir üst görünüşü verilmiştir.



Resim 2.2. Dış kale-İç kale ve Varoş bölgesi [5]

Sur: Kale yapılarının en kilit noktası olan ve yapıyı çevreleyen kalın dış duvarlardır. Bu duvarlara sur, beden, beden duvarı gibi tanımlamalar yapılmaktadır. Coğrafyanın özelliklerine göre taş, tuğla, kerpiç, harç, derz gibi çeşitli malzemeler kullanılarak örülen sur duvarlarının yapımı sırasında, çevre yapı ve kazılardan elde edilen mermer sütun, heykel gibi devşirme malzemeler de kullanılmaktadır [5].

Kule (Burç): Kale yapılarında, savunmada en önemli elemanlardan biri kulelerdir. Kuleler, kale yapısı içinde genellikle stratejik ve savunma bakımından zayıf noktalarda konumlandırılmışlardır. Kuleler kare, daire ve yarım daire, beşgen, altıgen ve sekizgen şekilde inşa edilmektedirler. Resim 2.3. (a) da 17. yüzyılda inşa edilen İngiltere Clevedon da Walton Kalesi sekiz adet daire şeklinde yan kule ve bir adet sekizgen baş kuleden oluşmaktadır. Resim 2.3. (b) de 13. yüzyılda inşa edilen İtalya Apulia da Del Monte Kalesi ise sekiz adet sekizgen yan kule ve bir adet sekizgen baş kuleden oluşan bir kale örneğidir. Bu mimari şekiller içerisinde en çok kare planlı olan kule tiplerine rastlanmaktadır. Bunun sebebi ise dairesel kulelerin inşasında kullanılan taşların yontulmasının maliyeti arttırmasıdır. Akarca kitabında; “... Dört köşe ve yuvarlak kulelerden çok daha az olmakla beraber, beş, altı ve sekiz köşeli kulelerde yapılmıştı. Çok köşeli kuleler, dar köşeli olanların sakıncalı keskin köşelerini ortadan kaldırıyor ve inşası da yuvarlak kuleler kadar masraflı olmuyordu. Bu yüzden daha sonraki tarihlerde çok köşeli kuleler çok rağbet bulmuştur” şeklinde bu bilgiyi paylaşmıştır [9].



Resim 2.3. (a) Walton kalesi-Clevedon/İngiltere [10], (b) Del Monte kalesi-Apulia/İtalya [11]

Kule yerleşimleri sura bitişik şekilde (yarım daire biçiminde) ya da sura bağlı bir şekilde de inşa edilebilmektedir. Kale beden duvarlarında kuleler dışında gözetleme kuleleri gibi yapılarda bulunmaktadır. Kulelerin üst örtüleri genellikle kagir yapı malzemesiyle teras şeklinde yapılırken, iklim farklılığı olan bölgelerde ise üzeri külah şeklinde kurşun kaplı ahşap çatı şekline rastlanmaktadır. Resim 2.4’de görülen İspanya’nın Segovia şehrinde bulunan Alcazar Kalesi bu tip bir kule örneğidir. Bu tür kulelere daha çok Ortaçağ Avrupasında rastlanmakta olup şato olarak da adlandırılan ve dönemin aristokrasisinin, kralının ya da derebeyinin görkemine göre farklılık göstermektedir. Yüksekliği ile ünlenen baş kuleler, kuleleri süsleyen gösterişli burçlar kale tanımını şato ve saraya yöneltmiştir. Bu tarz gösterişli bir kaleye örnek olarak kıyı kalesi olan Fransa Mont Saint Michel Kalesi Resim 2.5’te verilmiştir. Mesqui eserinde bunu aşağıdaki şekilde özetlemiştir; “... Talihin yüzüne güldüğünü gören Arnoul d’Ardres bataklığın ortasında, bölgeye hakim, savunma öğeleri ve mazgal siperleriyle çevrelenmiş, kale burcu da denilen, olağanüstü yükseklikte bir yapma tepe inşa ettirdi. Bu burcu kullanışlı köprüler, kapılar ve yapılarla bezedi.” [12].



Resim 2.4. İspanya-Segovia Alcazar kalesi [13]



Resim 2.5. Fransa Mont Saint Michel kalesi [14]

Avlu: Dini yapı, sarnıç, geçiş gibi ihtiyaçlara karşılık veren, kale bölgelerini ve farklı yükseklikteki kademelerini gösteren, sosyal yaşama katkıda bulunan toplanma alanları olarak tanımlanmaktadır. Bu bölümlerde kalenin varlığı boyunca birçok farklı işlev gerçekleştirilmiştir. Konut inşa edilerek mahalle olarak da işlevlendirilen kaleler bulunmaktadır [5].

2.3. Kalelerin Konumlanması

Konumlandıkları bölgenin topografyası, arazinin durumu ve coğrafi yapısı; kalelerin mimari yapılarının yönlendirilmesinde önemli birer etkidir. Kalelerin öncelikli inşa amacı askeri savunma olması nedeniyle engebeli ve zor topografyalarda kurulması önem taşımaktadır. Bu sebeple, kalelerin belirli bir geometrik biçim ve düzene göre duvar yerleşim dokusu yoktur. Çoğunlukla farklı duvar yüksekliği ve karmaşık kütle dağılımına sahip olduklarından, bu düzensizlik kalelerin mühendislik tasarımının ve strüktürel davranışının daha ön plana çıkmasına neden olmaktadır.

Savunmanın yanı sıra ticari olarak da stratejik yapılar olan kaleler, liman ve ticaret yollarını içine alan bölgeler üzerine inşa edilmişlerdir. Kaleleri coğrafi konum üzerinden sınıflandırmak en doğru ayırım olabilir. Bu konumlar bazen bir liman, bazen bir şehir, bazen de şehrin en yüksek noktası olarak seçilmiştir. Askeri savunma ve barınma önceliğiyle inşa edilen kaleler, coğrafi konumlandırma özelliklerine göre iki grupta sınıflandırılabilir:

Kıyı kaleleri

Savunma ve korunma amacıyla inşa edilen kıyı kaleleri aynı zamanda denizden yapılan ticari taşımacılıkla da bağlantılı olmuştur. Nehir, deniz ve göl kıyısında konumlanan kaleler dışında, ada şeklinde su içerisinde bulunan kaleler de kıyı kalesi olarak değerlendirilmektedir. Resim 2.6'da görülen kale, Mersin ilinin Anamur ilçesinde de bulunan 1500 yıllık tarihiyle Romalılar, Selçuklular, Bizanslılar ve Osmanlılar gibi büyük medeniyetlere ev sahipliği yapmış olan Mamure Kalesidir. Bu kale Türkiye'nin en önemli kıyı savunmasını yapan kalelerinden biridir.



Resim 2.6. Mersin-Mamure kalesi [15]

Kara kaleleri

Stratejik bağlamda önemli bir noktada yani ticari yollarla bağlantılı, su gibi doğal kaynak yakınlarında olmak üzere vadi, ova, dağlık ve kayalık tepelerde konumlanan kale yapıları kara kaleleri olarak tanımlanabilir. Kara kaleleri; tepelik ya da sonradan oluşturulmuş ve kent hâkimiyeti sağlayan yüksek bir konumda olup, aynı zamanda kente hâkim noktalar üzerinde bulunması nedeniyle, şehir güvenliğinin kontrol edildiği mekânlar olarak da kullanılmıştır. Doğal hâkimiyeti açısından kale yapısının yüksek bir konumda olması savunma özelliğini arttırmaktadır. Bu sebeple kale yapıları öncelikle doğal yükseltiler üzerine, doğal yükselti mevcut değilse de yapay yollarla elde edilen tepeler üzerine inşa edilmiştir [5]. M.Ö. 7. yüzyılda Paflagonyalılar tarafından yaptırılan ve Roma, Bizans ve Osmanlı İmparatorluklarına ev sahipliği yapan Sinop-Boyabat Kalesi (Resim 2.7) bu tip bir kara kalesi örneğidir.



Resim 2.7. Sinop-Boyabat kalesi [16]

Özet olarak kaleler, öncelikli olarak savunma ve barınma amacıyla yapılmışlardır. İnşa edildikleri coğrafi konumun ve topografyanın zorlu şartlarına uygun bir mimaride olup biçimsel ve strüktürel açıdan diğer yapılardan farklı özelliktedirler. Kaleler yapılış amaçlarına uygun olarak, büyük savaşlar, kuşatmalar ve doğal afetlere karşı ayakta durabilen, ağır kütleli, düzgün bir geometrik özelliğe sahip olmayan yapılardır. En eski çağlardan günümüze kadar gelebilen bu yapıların, nesillerce ayakta durabilmesi için öncelikli olarak strüktürel davranışları hakkında bilgi sahibi olunması gerekmektedir. Yapının mevcut halinden edinilen bilgiler ışığında, günümüzde teknolojiye gelinen son noktayla; yapı hakkında ileriye dönük gerçekçi yorumlar yapılabilmektedir. Son yıllarda yapılan bu tür çalışmalara aşağıda yer verilmiştir.

2.4. Literatür Araştırması

Tarihi yapı kavramı dünya gündeminde önem kazanmakla beraber, bilinçlendirme, farkındalık ve duyarlılık konusu da buna paralel olarak hızla artış göstermektedir. Bu kapsamda akademik çevrenin yanı sıra diğer çevrelerde bu olguya yarar sağlayarak birçok çalışmaya beraber imza atmışlardır. Yapılan çalışmalarda farklı disiplinler bir araya gelerek önemli değerleri ortaya koymaları ile bu yolu aydınlatmışlardır.

Bu bölümde; kronolojik bir sıra çerçevesinde, tarihi yapılarda özellikle kale ve sur yapı türlerinde yapılan önemli çalışmalara yer verilmiştir. Yapılarda analitik modelleme teknikleri ve analiz türleri, malzeme özellikleri ve malzeme üzerinde uygulanan deney

yöntemlerini içeren makalelerden özetler sunulmuştur.

Türkmen ve Bilgin (2002); İstanbul'daki Süleymaniye Cami'si örtü sistemi ile bu örtü sisteminin geometrik boyutlarını esas alarak yarım kubbesiz, iki yarım kubbeli, üç yarım kubbeli ve dört yarım kubbeli teorik örtü sistemlerinin zati yükleri altında, sonlu eleman yöntemine dayalı SAP 2000 ile statik çözümlerini yapmışlardır. Çözüm sonuçlarında ana kubbe, kemer, yarım kubbe ve pendentif dörtlüsünün karşılıklı yapısal etkileşimini belirlenmiş ve her sistemin yapısal davranışını sayısal olarak ortaya koymuşlardır. Dört eşit rijitlikli kemere oturan, dört yarım kubbeli örtü sisteminin gerek yer değiştirme gerekse de gerilme yönünden diğer sistemlere göre daha emniyetli tarafta olduğunu göstermişlerdir [17].

Gürer ve diğerleri (2008); tek açıklıklı, kemer sistemli tarihi Rize köprülerinden Çamlıhemşin Mikrun (Kavak) Köprüsü ve Lıvık Çakesli Köprüsünün Franc 2d sonlu elemanlar programı ile gerilme analizlerini yapmışlar ve köprüleri statik açıdan incelemişlerdir. Sonuç olarak bulunan değerler yapıların yapısal stabilitesinin oldukça yüksek olduğunu göstermişlerdir [18].

Casolo ve diğerleri (2009) makalelerinde Syracuse'de (Sicilya, İtalya) ortaçağdan kalma "Maniace Kalesi" nin sismik analizine üç farklı sayısal model kullanarak çok adımlı bir strateji uygulamışlardır. Birinci modelde tüm kalenin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli, ikinci olarak; temel statik problemleri olan binanın mimari kısmının detaylı üç boyutlu sonlu elemanlar modelini yapmışlardır. Üçüncü strateji olarak ise periyodik yüklemeye tabi malzemenin bozulmasını dikkate alarak dinamik analiz yapmak için iki boyutlu rijit eleman modellemişlerdir. İlk ikisi üç boyutlu FE modeli, yapının küresel davranışını incelemek, kalenin zayıf noktalarını ve daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulan kısımlarını tespit etmek amacıyla yapmışlardır. Bu ön analizleri sismik yükün daha etkin olduğu doğal titreşim modlarının bir göstergesi niteliğinde olduğunu belirtmişlerdir. Daha sonra üçüncü modeli (iki boyutlu rijit ve yay tanımlayarak) , yığma yapının sütunlarına, payandalarına ve kemerlerine sismik hasarın etkisini araştırmak için kullanmışlardır. RBSM (rijit gövdeli yay modeli), yığma duvarlarını makroskopik davranışını azaltılmış serbestlik derecelerine yakınlılaştırmak için yığma dokunun ve malzemenin enerji yayma kapasitesinin etkisi dikkate alarak özel olarak formüle edilmiştir. Malzeme özelliklerinin belirsizlikleri ve değişkenliği göz önüne alındığında, EC8 (Euro Code 8) sismik koduna uygun olarak geniş bir parametrik

doğrusal olmayan statik analiz ve yapay ve doğal ivmeölçerlerle dinamik analizler yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Sonuçları daha sonra restorasyon tasarımı için basit bir teklif formüle etmek ve doğrulamak için kullanmışlardır [19].

Dönmez ve Karakan (2009), deneysel modal analiz uygulamalarının köprülerdeki önemini belirterek, köprülerde durum tespiti ve hasar tanımlamasında bu analizlerin ne şekilde uygulanabileceği konusunda bilgi vermişlerdir. Laboratuvar ortamında basitleştirilmiş bir maket tasarlamışlardır. Makette uygulanan modal analiz teknikleri ile sonlu elemanlar modeli karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak ilk iki doğal frekans için deneysel ve analiz ölçümleri uyum göstermiştir. Sonraki frekans değerleri farklı olmalarına rağmen her iki yöntemdeki modal şekillerin benzerlik gösterdiğini belirtmişlerdir [20].

Roca ve diğerleri (2010) makalelerinde, ilk olarak, tarihi yapıların modellenmesine ve analizine yönelik yaklaşımların gerçekleştirilmesi ve temel zorluklara dair bir tartışma sunmuşlardır. İkinci olarak, yığma tarihi yapıları incelemek için kullanılan temel mevcut yöntemlere değinilmiş ve tartışmışlardır. Limit analizi, basitleştirilmiş yöntemler, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) makro- veya mikro-modelleme ve ayrık elemanlar yöntemleri (DEM) dahil olmak üzere mevcut ana stratejiler, gerçekçiliği, bilgisayar etkinliği, veri kullanılabilirliği ve büyük yapılara gerçek uygulanabilirliği açısından dikkate alınmıştır. Karmaşık tarihi yığma yapıların gerçekçi analizini gerçekleştirme olasılığına ilişkin bir dizi temel husus sunmuşlardır. Modern gelişmelere rağmen, tarihi yapıların araştırılması, hesaplama çabaları, verilerinin elde edilmesi olasılığı ve yöntemlerin sınırlı gerçekliği ile bağlantılı olarak önemli zorluklarla karşı karşıya olduğunu açıklamışlardır [21].

Ramos ve diğerleri (2010) çalışmalarında; Portekiz-Lizbon'daki Mogadouro Saat Kulesi ve Jero'nimos Manastırı Kilisesi modal ve yapısal tanımlanmasıyla ilgili iki karmaşık vaka çalışmasına değinmeyi amaçlamışlardır. Bu yapılar Minho Üniversitesi tarafından titreşim, sıcaklık ve bağıl hava nem sensörleri ile izlenmiştir. Modal parametreleri tahmin etmek için operasyonel modal analiz, ardından dinamik tepki üzerindeki çevresel etkileri değerlendirmek için istatistiksel analiz kullanmışlardır. Buradaki amaçları; tarihi yapıların korunmasına yardımcı olan bir sağlık ön-izleme sürecinin bir parçası olarak, yığma yapılarda hasar değerlendirmesini erken bir aşamada titreşim verileriyle araştırmaktır. Bu çalışmada, yapı ön izleme görevinden önce gerekli ön dinamik analiz adımları izleme sisteminin kurulumu, sistem tanımlaması ve müteakip sonlu elemanlar (FE) modeli güncelleme analizi,

otomatik modal tanımlama ve tanımlanmış modal parametreler üzerinde ortamın etkisine yer vermişlerdir [22].

Betti ve diğerleri (2011); İtalya- Toscana'da ortaçağdan kalma San Niccolò Kalesi'nin mevcut hasarlarını ve yapılan restorasyon çalışmalarını, hasarların ana kaynaklarını belirlemek ve restorasyon çalışmalarının etkinliğini değerlendirmek için üç boyutlu sayısal kale modelini ANSYS sonlu elemanlar paket programında modellemişlerdir. Rapor edilen analizlerle, hasarın nedenlerini ve geçmiş güçlendirme çalışmalarının etkinliğini değerlendirmişlerdir. Kalenin üç boyutlu sonlu elemanlar modeline statik yükler altında doğrusal olmayan analizler yapmışlardır. Bu çalışmada dikkate alınan değerlendirme yöntemi temel olarak yapısal statik davranış hakkında yeterli bilgiye ulaşılmasıdır. Kalenin restorasyon çalışmalarından önceki hasar ve çatlama modeli analiz edilmiş ve genel bir sayısal modeli tanımlamak için referans olarak kullanmışlardır. Restorasyon çalışması öncesinde sayısal modeli hasar durumuna uyacak şekilde adapte ettikten sonra, geçmiş güçlendirmenin etkinliğini değerlendirmek için doğrusal olmayan analizler yapmışlardır. Sonuçlarda, sergilenen hasara karşı hareket ettiği düşünülen yapıların tüm nedenleri ortadan kaldıramadığını ve uygun bir çözüm sunmak için yeni restorasyon çalışmalarının gerekli olduğunu vurgulamışlardır. Gelişmiş sayısal analizlerin hem mevcut hasarın nedenlerinin anlaşılması hem de minimum ve yeterli güçlendirme tasarımı için önemli bilgiler sunabileceğini ispatlamışlardır. Yapısal davranışın anlaşılmasının, etkili güçlendirme araçları sunarak iyileştirici önlemlerin kapsamını azaltabileceğini belirtmişlerdir [23].

Binda ve diğerleri (2011); geniş kapsamlı bir çalışma sunmuşlardır. Nisan 2009 tarihinde İtalya'nın Abruzzo Bölgesi'nde L'Aquila kenti üzerinde meydana gelen yıkıcı deprem sonrası kültürel mirası korumak için acil durum faaliyetlerini iki paralel seviyede yürütecek bir organizasyon kurulmuştur. Bu organizasyon (Function 15) hasarların araştırılması ve değerlendirilmesi ile geçici güvenlik önlemlerinin uygulanmasını paralel şekilde yürütmüştür. Bu makalede 'Function 15' yapısının organizasyonu, depremden sonra ve acil durumlarda kurtarma ekiplerinin faaliyetleri ve emniyet acil durum eylemleri açıklanmıştır. Ayrıca Kültürel Mirasın en önemli olduğu L'Aquila'daki binalarda uygulanan, geçici yapıların etkinliğini ve olası diğer riskleri kontrol etmek amacıyla acil durumdan kısa bir süre sonra gerçekleştirilen tahribatsız tekniklere (NDT) dayanan ön deneysel araştırma ve izlemenin bir açıklamasını sunmuşlardır. Vaka olarak depremden ağır hasar gören L'Aquila'daki İspanyol Kalesinin hasarlarının tanımlanmış, aktif çökme mekanizmalarının

yorumlanmış, geçici güçlendirme müdahalelerinin tasarımı ve yerinde teşhis araştırmaları açıklanmıştır [24].

Çalık ve diğerleri, (2012) Trabzon Merkez Hacı Kasım Muhittin Cami'nin Taş Minaresinin statik ve dinamik davranışları analitik ve deneysel yöntemlerle araştırmışlardır. Bu araştırmada minarenin malzeme özellikleri yapılan deneylerle belirlenmiş, mevcut durumu SAP 2000 bilgisayar programı ile modellenmiş ve operasyonel modal analiz yöntemi ile minareye ivme ölçerler yerleştirilerek minarenin dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Deneysel ölçümlerin sonuçları çerçevesinde sonlu eleman modeli iyileştirilmiştir. İyileştirilmiş model, kendi ağırlığı ve deprem etkisi, kendi ağırlığı ve rüzgâr etkisi ile kendi ağırlığı ve sıcaklık değişimleri ölçütlerine göre analiz edilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler neticesinde restorasyon aşaması için çeşitli öneriler geliştirilmiş ve öneriler doğrultusunda planlanan imalatların yaklaşık maliyeti tespit edilmiştir. Restore edildiği kabul edilen yapının modeli bu aşamada tekrar analiz edilmiş ve sonuçlar yorumlanmış, restorasyon önerileri getirilmiştir [25].

Betti ve diğerleri (2012) makalelerinde; İtalya da son yıllarda gerçekleşen depremler sebebiyle tarihi yapılarda meydana gelen hasarların güvenlik değerlendirmesinin altını çizerek yeni İtalyan Teknik Şartnamesinin gerekliliklerini ortaya koymuşlardır. Bu kapsamda, Floransa yakınlarındaki küçük bir kasaba olan Pescia'daki Vicarious sarayı (Palazzo del Vicario) vaka çalışması olarak seçilen bu tarihi yığma yapının sismik zafiyeti üzerine çalışma yapmışlardır. Sarayın yapısal davranışını, yığma yapının doğrusal olmadığı varsayımıyla değerlendirildiği sonlu bir eleman modeli kullanarak araştırmışlardır. Sismik davranışı, İtalyan Teknik Şartnameleri kapsamında itme analizi ile değerlendirmişlerdir. Sonuçları limit analizinin kinematik teoremine dayanan basitleştirilmiş bir yaklaşımla elde edilenlerle karşılaştırmışlardır. Sarayın sismik kapasitesi ile beklenen sismik talebin karşılaştırılması, benzer yapı tipolojilerinde sıkça görüldüğü gibi, bu tür binaların zayıflığının depremler altında büyük hasara uğradığını ispatlamışlardır [26].

Şeker ve diğerleri (2013) çalışmalarında Erzurum'da Lala Paşa Caminin yapısal performansını statik ve dinamik açıdan sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmışlardır. Çalışmada sonlu elemanlar paket programı için ANSYS 10 yazılımı kullanılmıştır. Yapının malzeme özellikleri önceki literatür çalışmalarından ve deprem yönetmeliğinde verilen formüller esas alınmıştır. Yapılan analizler sonucunda, caminin statik durumda en çok

zorlanan bölümlerinin pencere ve kapı kenarları olduğu ve ana kubbenin mesnet noktalarında gerilme artışlarının yoğunlaştığı, statik analiz sonucunda yer değiştirmelerin ve gerilmelerin oldukça küçük değerlerde kaldığı ve statik açıdan yapının oldukça iyi durumda olduğunu ispatlamışlardır. Dinamik etkiler sonucunda ise, camide meydana gelen maksimum yer değiştirmelerin ve gerilmelerin daha çok son cemaat bölümünün kubbe kısımlarında ve giriş kapısının üst bölümlerinde meydana geldiği ve bu bölümlerin sismik davranışlar açısından dikkat edilmesi gereken bölümler olduğu sonucuna varılmıştır. Caminin iç kesimlerinde ise ana kubbeyi taşıyan kemerlerin mesnet bölümlerinin yapının performansı açısından en çok dikkat edilmesi gereken alanlar olduğunu tespit edilmiştir [27].

Korkmaz ve diğerleri (2013); Van Akdamar kilisesinin deprem davranışı incelenmiş model ve analiz için SAP 2000 sonlu elemanlar programını kullanmışlardır. Yapıya 23.10.2011 tarihinde meydana gelmiş olan Van depremine ait ivme kayıtları uygulanmıştır. Tarihi yapıda zaman tanım alanında doğrusal analizler yapılmış, yapının deprem etkisi altındaki en büyük gerilme, yer değiştirme ve taban kesme kuvveti değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda deprem kuşağında bulunan kilisenin olası bir deprem durumunda büyük zarar görebileceği, bunun için önlemler alınması gerektiği belirtilmiştir [28].

Çavuş ve Dayı (2013); Tokat ili Niksar Kırk Kızlar Türbesinin yapısal analizini SAP 2000 programında gerçekleştirmişlerdir. Yapıyı kabuk eleman olarak tanımlayarak daha gerçekçi bir sonuç elde etmişlerdir. Toplamda 920 adet kabuk eleman 806 adet düğüm noktasıyla model üzerinde iki ayrı yükleme durumunu uygulamışlardır. İlk olarak sabit yüklerin (EQ_x ve EQ_y) etkitildiği ikinci olarak sabit yükler ve deprem spektrumu ile tanımlanan yer hareketlerinin etkitildiği ($G+EQ_x$ ve $G+EQ_y$) durumu göstermişlerdir. Yapının malzeme özelliklerini ise literatürde daha önce yapılan çalışmalardan elde etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda veriler; kabul edilebilir sınırlar dâhilinde kalmıştır. Bu da yapının depreme karşı dayanımı ile ilgili bir sorun olmayacağı anlamını taşımaktadır. Analizde doğrusal elastik analiz uyguladıklarını vurgulamışlar, taş örgü veya yığma tuğla sistemiyle inşa edilen tarihi yapıların doğrusal olmayan hesap yöntemleriyle değerlendirilmesinin gerekliliğini açıklamışlardır [29].

Betti ve diğerleri (2015); esnek diyaframlara sahip yığma yapıların sismik davranışını araştırmak için kullanılan iki sayısal modelleme yaklaşımı arasında bir karşılaştırmayı sunmuşlardır. Karşılaştırmayı, Casaccia'nın (İtalya) CNR-ENEA araştırma merkezinde bir

sarsma tablasında test edilen iki katlı bir prototip modeli analiz ederek gerçekleştirmişlerdir. İlk sayısal modeli sonlu eleman (FE) tekniği kullanılarak ANSYS’de, ikincisini ise basitleştirilmiş bir makro eleman (ME) yaklaşımı kullanılarak MATLAB’da yapmışlardır. Her iki modeli de hareket denklemlerini adım adım prosedürlerle bütünleşmiş bir şekilde doğrusal olmayan dinamik analizler yapmak için kullanmışlardır. Sarsma tablası testleri, prototipin başlangıçtaki elastik durumdan kapsamlı hasar oluşumuna kadar olan davranışını analiz etmek için simüle edilmiştir. Sarsma tablası testleri sırasında prototipin tabanına uygulanan geçmiş ivme verileri kullanarak zaman alanında doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapmışlardır. İki model ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak taban ivmelenmeleri, taban yer değiştirmeleri, taban kesme kuvvetleri ve çökme modları incelenmiştir. Sonuç olarak deneysel ve sayısal sonuçlar arasında karşılaştırma yapılmıştır [30].

Onat ve Sayın (2015); Tunceli’deki Tağar çayı üzerinde bulunan tarihi Tağar köprüsünün doğrusal ve doğrusal olmayan sismik analizlerini yapmışlardır. Köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli makro modelleme tekniği ile modelleyerek ANSYS programı kullanmışlardır. Sismik etki olarak Erzincan depreminin ivme kayıtları dikkate alınmıştır. Çalışmada her iki analizden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak köprünün sismik davranışı incelenmiştir. Köprünün kemer ve yan duvarları, şekil değiştirme yumuşamasını dikkate alan kırılma ve ezilme yapabilen yayılı çatlak modeli ile dolgu malzemesi ise Drucker-Prager malzeme modeli ile temsil edilmiştir. Dinamik analizler için genelleştirilmiş α algoritması ve tahmin-düzeltilme yönteminin birleştirilmiş formu kullanılmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan çözümlerden elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri ilk hasarın meydana geldiği ana kadar frekans ve genlik açısından aynı değerlere sahip olmaktadır. Bu andan itibaren köprüde meydana gelen hasarlardan dolayı yer değiştirme genliklerinde farklar meydana gelmiştir. Köprüde ilk çatlaklar, köprü kemerinin temel ile birleşen sağ kısmında ve köprü kemerinin solunda bulunan yan duvarın temel ile birleştiği kısımda oluşmuştur. Köprünün titreşim hareketine bağlı olarak köprüde ilerleyen zaman adımlarında yeni çatlak bölgeleri meydana gelmiş ve bu çatlaklar köprü içinde farklı miktarlarda ilerleme kaydetmiştir. Meydana gelen bu hasarların köprünün mevcut performansını tehlikeye atacak büyüklüğe ulaşmadığını vurgulamışlardır [31].

Milani ve diğerleri (2015); 2012 yılında Emilia-Romagna-İtalya deprem sırasında hasar gören farklı yapılardaki yedi yığma kiliseye sistematik bir şekilde çökme analizleri

uygulamışlardır. Bazı önemli bölümlerin, örneğin yapıların kısmi çökmelerinden tipik olarak sorumlu olan pencere alın kısmı, apsis ve neflerin (orta hol) yanal uzun duvarları gibi zayıf yönlerine dikkat çekmişlerdir. Bu çalışmalarında, kiliselerin nihai yük taşıma kapasitesini tahmin etmek amacıyla ele alınan vaka çalışmalarına üç farklı yaklaşım sistematik olarak uygulanmıştır ve eleştirel olarak karşılaştırılmıştır. İlk yaklaşım itme analizi (push over analiz), ikinci İtalyan tüzüklerinde yer alan çökme yükü değerlerinin mevcut yapıda sınır değer olarak uygulanmasıyla, üçüncü yaklaşım ise üst sınır limit FE analizleri şeklinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, sismik bölgelerde tarihi duvar yapılarının güvenlik değerlendirmesi için İtalyan Kültürel Miras Kılavuzunda belirtilen değerlerle karşılaştırılmıştır. FE limit analizi, tartışılan diğer yaklaşımlarla karşılaştırıldığında güvenilir başarısızlık mekanizmalarını sağlayabileceği, ancak çökme sırasında aktif olan makro bloklar üzerinde tartışmalı bir önyargı seçeneğinin benimsenmesine gerek kalmadan daha kısa bir işlem süresi gerektirdiği bulunmuştur [32].

Tiberti ve diğerleri (2016); 20-29 Mayıs 2012 tarihinde Emilia-Romagna İtalya’da gerçekleşen bir dizi deprem sonrasında tarihi Finale Emilia Kalesi’nin üzerindeki etkilerini inceleyerek o bölgede bulunan tüm tarihi yapılar için izlenecek bir ön çalışma hazırlamışlardır. Depremde en büyük hasarı gören Emilia kalesinin Abaqus (FEM) sayısal modellerini oluşturmuşlardır. Yapının kısmi çöküşünün temelindeki nedenleri kavramak ve sismik yükler altında gelecekteki hasarı önlemek için sismik iyileştirme ile rehabilitasyon müdahaleleri önermek için sonuçları eleştirel olarak karşılaştırmışlardır. Sonlu elemanlar modellerine yığma yapı malzemesi için sunulan farklı hipotezler (doğrusal ve elasto-plastik) ile birlikte biri düzgün dört yüzlü elemanlardan oluşturulan inceltilmiş ve diğeri çok daha kaba ve esas olarak düzgün altı yüzlülerden oluşan iki farklı mesh uygulamışlardır. Gerçekleştirilen analizler tekil duvarların malzeme özelliklerine ilişkin farklı hipotezler altında; standart modal analiz, doğrusal olmayan statik itme analizi ve doğrusal olmayan dinamik analizleri içermektedir. Bu üç farklı durum karşılaştırılmıştır. Bunlardan ilki depremden etkilenen (duvarlardan sadece birinin sağlamlaştırıldığı yapı), ikincisi herhangi bir sağlamlaştırılmış duvarı olmayan varsayımsal bir yapı, üçüncüsü ise tamamen rehabilitasyon sonrası durumdur. Sayısal sonuçlardan, çoğunlukla gözlenen hasarlardan malzemelerin yetersiz dayanımının sorumlu olduğu ve belediyenin bir duvarda yaptığı kısmi rehabilitasyonun sismik dizinin zarar verici etkisinin sınırlandırılmasına yardımcı olduğu bulunmuştur. Her durumda, sayısal analizlerin sonucu olarak aktif hasar sürecinin ışığında kalenin yıkılmış bölümlerinin yeniden inşası için, yığma yapının mekanik özelliklerinin

sınırlı bir şekilde yükseltilmesinin, yapının küresel sismik hassasiyetini önemli ölçüde sınırlayabileceğini belirlenmiştir [33].

Hacıfendioğlu ve diğerleri (2016) yığma tipi bir tarihi minarenin modal parametrelerinin (mod şekilleri, modal frekanslar gibi) sayısal ve deneysel analizlerle araştırılmasını amaçlamışlardır. Operasyonel Modal Analiz (OMA) tekniğiyle, tarihi yığma minarelerinin modal parametrelerini elde etmek için deneysel çalışma yapmışlardır. Deneysel analiz için Samsun'da bulunan Büyük Cami'yi seçmişlerdir. Deneysel olarak doğal frekansları ve mod şekillerini tanımlamak için Frekans Alanı Ayırıştırma (FDD) yöntemini kullanılmışlardır. ANSYS 2012 sonlu elemanlar yazılımını, tarihi yığma minarenin üç boyutlu sonlu eleman modellemesini yapmak ve minarenin doğal frekanslarını ve mod şekillerini analitik olarak belirlemek için kullanmışlardır. Minarenin sonlu eleman modeli, yapının modal parametrelerinin daha doğru sonuçlarını elde etmek için tepki yüzeyine dayalı sonlu eleman (FE) modeli kalibrasyon tekniği kullanılarak deney sonuçlarına göre kalibre edilmiştir. Deneysel, başlangıç ve kalibre edilmiş sonlu elemanlar modellerinin sonuçları birbiriyle kıyaslanmıştır. Deneysel ve analitik sonuçları başlangıç koşulları ile karşılaştırırken önemli farklılıklar saptanmıştır. Sonlu eleman modeli kalibrasyonundan sonra, deneysel ve analitik doğal frekanslar arasındaki farkların önemli ölçüde azaldığını belirlenmiştir [34].

Di Gangi ve Monti (2016) makalelerinde İtalya'nın Lazio kentinde yüksek sismik tehlike bölgesinde bulunan Ortaçağ'dan kalma Arnara Kalesi'ni vaka çalışması olarak seçmişlerdir. Çalışmalarında, bir topluluğun eski bir yapıyı yeniden kullanımı için, tarihi kale duvarlarını güçlendirmeyi amaçlayan anti-sismik kavramları içeren tam bir yapı-güçlendirme önerisi vermişlerdir. Mimari olarak; mekânların işlevsel bir şekilde yeniden yapılandırılmasını amaçlamışlardır, böylece kalenin yeniden kullanımına yerli halkın dikkat çekerek, aynı zamanda kalenin bazı değerli mimari özelliklerini öne çıkarmayı planlamışlardır. Yapısal çözüm olaraksa, yığma duvarların sismik direncini artırırken mevcut formu bütünlüğüne yapısal bir müdahale ile geliştirmeyi amaçlamaktadır. Yenileme projesi, kalenin iç avlusunun bir toplanma yeri olarak kullanılması, bu alanı kaplamak için kullanılan eski bir çatının varlığını hatırlatan bir kaplama yapısını tasarlama ve önerme ihtiyacından çıkmıştır. Çatının gerilme ve devrilme durumu tahkik edilerek çelik tel halatlar kullanımı önerilmiştir. Tel halatlarının tasarımında, çatıyı stabil hale getirmek ve aynı zamanda ankraj duvarları üzerinde gerekli stabilize edici kuvveti uygulamak için tel halatlara uygulanacak gerekli kuvveti kolayca hesaplamaya izin veren basitleştirilmiş bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu

makalede; mimari mirasın yeniden keşfedilmesinin, bölgenin kültürel özelliklerini dikkate alarak gereken uygun bir yenileme stratejisi ile bu yapılar için yeni bir kullanım önerisi izlenebileceğini gösterilmiştir [35].

Pantò ve diğerleri (2016); çalışmalarında yığma duvarların düzlem dışı davranışını hesaplayabilen, statik ve sismik yükler altında yığma tarihi yapıların doğrusal olmayan davranışlarının simülasyonu için özgün bir modelleme yaklaşımı geliştirmişlerdir. Önerilen yaklaşım, ayırık makro modelleme kavramına dayanmaktadır ve farklı seviyelerle karakterize edilen birkaç ayırık elemanın bir araya getirilmesiyle tüm bir binanın doğrusal olmayan davranışını yakalamak amacıyla tasarlanmıştır. Yöntem; tarihi bir bazilika planlı, Atripalda'da (Avellino, İtalya) bulunan 1584-1612 yılları arasında M.S. 4. Yüzyılın bir bazilikası üzerine inşa edilmiş olan S. Ippolito Martire Kilisesi'ne uygulanmıştır. Çökme mekanizmaları ve itme eğrileri cinsinden ifade edilen sonuçlar, tarihi yığma yapıların sismik değerlendirmesine sayısal bir örnek, özellikle pratik uygulamalar için kullanımı basit geliştirilebilir bir yöntem olarak uygulanabileceğini belirtmişlerdir [36].

Bakeer (2016); yığma kagir yapıların düşük çekme gerilmeleri nedeniyle eğilme etkilerine karşı çok hassas olması, düşey doğrultuda sıkıştırma altında yük taşıma kapasitesini büyük ölçüde etkilediğini belirtmiştir. Yığma duvarların stabilite teorisini formüle etmek için göreceli bir form tanımı yapmıştır. Bu çalışmanın amacı, transfer-matris yöntemindeki matrislerin boyutlarını en aza indirmek ve denklemleri kompakt bir formda üretmektir. Yöntemin algoritmaları, kullanıcı tanımlı doğrusal olmayan malzeme modeli ile genel sınır ve yükleme koşulları için türetilmiştir. Algoritmalar ve çözüm prosedürleri bilgisayar kodlamasıyla açıklanmış ve uygulanmıştır. İteratif çözümlerin yakınsaması, stabilite veya malzeme çökmesi meydana geldiği durumlar için açık bir şekilde tanımlanmıştır. Geliştirilen çözüm prosedürünün sonuçları, mevcut çözümlerle ve deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Geliştirilen çözüm prosedürünün, yığma duvarların stabilitesi ile ilgili çeşitli sorunları çözmek ve mevcut ampirik yöntemleri kontrol etmek için güçlü bir yöntem olduğu vurgulanmıştır [37].

Uğurlu ve diğerleri (2017); Diyarbakır'da bulunan 16. yüzyılda inşa edilen Şeyh Muhattar Cami'nin dört ayaklı minaresinin yapısal analizini gerçekleştirmişlerdir. SAP 2000 ve Seismostruct paket programlarıyla dört ayaklı minarenin analitik modeli oluşturulmuş, dinamik ve statik yükler altındaki davranışını analiz edilmiştir. Yapılan analizler

doğrultusunda dört ayağın farklı kesitlerde olması ve farklı zemin oturmalarına maruz kalması yapıdaki mevcut çatlakların sebebi olarak görülmüştür. Motorlu taşıtların sebep olduğu titreşimlerin çok katlı yapılaşmaların ve günümüz kent koşullarının yapı da kısmi oturmalara ve yapı stabilitesini bozmaya neden olabileceği vurgulanmıştır [38].

Gençer ve diğerleri (2017) çalışmalarında Aydın ve Muğla il sınırları arasındaki antik dönemde Karya olarak isimlendirilen bölgede konumlandırılan kareye yakın planlı, isodomik (arasında harç bulunmayan) örgüye sahip Alinda ve Latmos adında iki kulenin bağlantı elemanlarının dağılım ve miktarının, boşlukların konum ve boyutlarının yapısal davranışları ile ilişkilerini karşılaştırmışlardır. Her iki kulede aynı bölgede bulunduğu için yapısal davranışı etkileyen çevresel faktörler, zemin özellikleri, yaşanmış afetler gibi özellikler aynı kabul etmişlerdir. Biçimsel özelliklerin kuru yığma duvarlarda etkinliğini göstermek amacıyla, statik analiz yardımıyla yapıların yapısal analizleri gerçekleştirmişlerdir. Taş blokların her birini aralarında harç olmayacak şekilde ayrı ayrı Sketchup 2013’de modellemişlerdir. Rijit kütle modeli kullanılarak quasi-statik eğme (tilt) analizleri MSPPhysics 0.9.9 yazılımı kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sanal bir eğme tablası ile kuleler kademeli bir şekilde eğimlendirilmiş, yapıların hasar durumları gözlenerek çatlak, kısmi yıkılma ve yıkılma açıları tespit edilmiştir. Yapının yıkıldığı eğimdeki zemin ivmesinin yatay bileşenleri, ivmenin en yoğun olduğu seviyeyi bulmaları sağlanmıştır. [39].

Kocaman ve diğerleri (2017) bildirilerinde; Erzurum il merkezinde yer alan Lala Mustafa Paşa Cami’ni vaka çalışması olarak ana taşıyıcı elemanlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesinde yeni bir yöntem kullanmışlardır. İncelenen yapının inşa edildiği döneme ait imalat özellikleri ve restorasyon çalışmalarından ulaştıkları veriler doğrultusunda ana taşıyıcı duvarların 3 katmanlı olarak inşa edildiğini belirtmişlerdir. Duvarın iç ve dış katmanlarının mekanik özellikleri belirlenirken Schmidt çekici deneyi verilerinden ve duvar çatlak yoğunluğu parametresinden yararlanarak, iç katman olan moloz malzeme özellikleri için literatür çalışmalarında verilen değerleri kullanmışlardır. Çalışmada yapının önce üç boyutlu katı modeli oluşturulmuş; daha sonra elde edilen malzeme mekanik özellikleri kullanılarak ANSYS sonlu elemanlar analiz programında makro modelleme yaklaşımı ile yapısal modelini hazırlamışlardır. Bu model, operasyonel modal analiz ile doğrulanmıştır. Sonuç olarak; tarihi yığma yapı malzemelerinin mekanik özelliklerinin tespitinde kullanılan yöntemin incelenen yapı için mühendislik ilkeleri doğrultusunda doğru sonuçlar verdiği, ancak yöntemin yaygın olarak kullanılabilmesi için daha fazla sayıda vaka üzerinde

alışmalar yapılması ve bu yöntemin uygulanması gerektiği sonucuna varmışlardır [40].

Kazaz ve diğerleri (2017); tarihi Erzurum Lala Paşa Cami'nin sonlu eleman modelini ANSYS yazılımını kullanarak oluşturmuşlardır ve modelin doğrusal olmayan dinamik-itme analizlerini yapmışlardır. İtme analizinde yanal yükün bina yüksekliği boyunca değişimi ile kütle ve ivmenin düşeyde değişimini dikkate alarak, iki farklı yanal yük profili oluşturmuşlardır. İlki ivmenin yükseklik boyunca değişimi ihmal edilerek sabit-düzgün yayılı olduğu durum, ikicisi ise; ivmenin birinci mod şekliyle uyumlu olarak dağıldığı modal form durumudur. Yapının itme analizi neticesinde elde edilen yük-yer değiştirime ilişkisi kaydedilmiştir. Gerçek depremlere ait 9 yer hareketinin 3 bileşeninin yapıya uygulanmasıyla gerçekleştirilen dinamik analizler sonucu elde edilen en büyük kuvvet–yer değişirme değerleriyle karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma neticesinde yapının şekil değişirme mekanizması ve yanal yük kapasitesi irdelenmiştir. Kütlenin sabit bir ivmeyle çarpılmasıyla elde edilen kuvvet dağılımı ile yapılan itme analizinin, yapı kapasitesini dinamik yöntemlere göre daha yüksek verdiği ve itme şekli olarak ikinci yöntemin daha uygun sonuçlara ulaştığı belirtilmiştir [41].

Angelis ve diğerleri (2017) alışmalarında, Selanik Heptapyrgion kalesinin (UNESCO Anıtı) kuzey sur duvar yapısının nem ve yapısal problemlerle karşı karşıya olduğu bir bölümünü incelemişlerdir. Heptapyrgion, Selanik'te en önemli anıtlardan biri olduğu için, tahribatsız test yöntemlerinden yararlanmışlardır. Bu yöntemlerden birisi olan GPR (yer radarı incelemesi) araştırması yaparak bu yöntemin verimliliği hakkında yorum yapmışlardır. 250 ve 500MHz antenlerle elde edilen veriler, mevcut problemle ilişkili olarak işlenmiş ve yorumlanmıştır. Yorumlamaya daha fazla yardımcı olmak için 2D GPR modeli simülasyonları yapılmıştır. GPR verileri aynı zamanda duvarın aynı bölümünde elde edilen jeoelektrik verileri ile karşılaştırılmıştır. Genel olarak GPR görüntülerinin mevcut bilgilerle uyumlu olduğunu ve duvar yapısına erişimde çok yararlı bir yöntem olduğunu savunulmuştur [42].

Alaboz ve diğerleri (2017) bildirilerinde, Gelibolu yarımadasında bulunan Seddülbahir Kalesi'nin restorasyon uygulaması kapsamında incelenen Batı ve Güney Kulelerinin mevcut durumlarının değerlendirmişlerdir. Onarım, iyileştirme önerilerinin geliştirilmesi amacıyla yapılan analizler ve dinamik tanımlama testi çalışmalarına yer vermişlerdir. Kale, Çanakale savaşları esnasında ve sonrasında insan ve evre kaynaklı sebepler yüzünden bütünlüğünü

kaybederek özellikle batı ve güney kulelerin büyük bir bölümü yıkılmıştır. Kulelerin mevcut kalan bölümlerinin deprem güvenliğinin belirlenmesi için, rölövelerden elde edilen veriler doğrultusunda yapısal modeller kurulmuş ve doğrusal elastik hesap esasları baz alınarak yapısal analizleri yapılmıştır. Matematiksel modeller tetrahedral elemanlar ile makro modelleme tekniği ile oluşturulup ve analizlerde malzemenin elastik davranışı esas alınmıştır. Batı ve güney kulelerin dinamik özelliklerinin sayısal modellerin özellikleri ile kalibrasyonunu beraber sağlamak amacıyla yerinde dinamik tanımlama testleri için kulelerin uygun noktalarına ivme-ölçerler yerleştirilmiştir. Elde edilen titreşim verilerini yorumlayarak yapıların mod şekilleri ve doğal frekansları elde edilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda kulelerin mevcut hasar durumlarını ortaya çıkaran olası hasar mekanizmaları araştırılarak ve bu hasar mekanizmalarını harekete geçirecek ivme değerleri hesaplanarak her iki kulenin de deprem riski belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar doğrultusunda batı ve güney kulelerin onarım ve iyileştirilmesi ile ilgili öneriler geliştirilmiştir [43].

Ağırlioğlu ve diğerleri (2017) çalışmalarında, askeri koruma amacıyla deniz kıyısına yapılan tarihi Seddülbahir Kalesi'nin zaman içerisinde kendi bütünlüğünü koruyamaması ve kıyı koruma yapısının yıkılmasıyla yapılan restorasyon çalışmasına farklı bir öneri sunmuşlardır. Çanakkale-Seddülbahir Kalesi'nin kıyı koruma yapısı, kalenin onarım projeleri ve eski kıyı koruma yapısının sınırları, göz önünde tutularak yeniden düzenleme ve tasarlamayı sunmuşlardır. Çalışma sonucunda çevre, deniz şartları ve kale ile uyumlu bir kıyı koruma yapısı düzenlemesinin gerekliliğini ve kalenin restorasyonu ile birlikte yürütülecek bir uygulama projesi hazırlamışlardır. Kıyı koruma yapısı ile kale önü arasında yeniden düzenlenen alanının drenaj sistemi için de öneriler sunmuşlardır [44].

Castellazi ve diğerleri (2017) makalelerinde tarihi yapıların yapısal analizi için yenilikçi bir sayısal modelleme stratejisi sunmuşlardır. Strateji, karasal lazer tarayıcı veya kapalı menzilli fotogrametri ile incelenen üç boyutlu nokta bulutunun üç boyutlu sonlu eleman ağına ve otomatik özelliklerine yarı otomatik olarak dönüştürülmesini sağlayan bir prosedüre dayanmaktadır. Böylece, mesh üretim sürecinde otomasyon seviyesinin arttırılabileceği ve geleneksel modelleme prosedürlerine kıyasla sürede büyük bir azalma sağlanmış olabileceği öngörülmüştür. Stratejilerini doğrulamak için San Felice sul Panaro (İtalya) Kalesi vaka çalışması olarak seçilmiştir. Önerilen modelin güvenilirliği, yapısal analizlerin sonuçları ile Emilia depremi (2012) sırasında yapının yaşadığı çatlak modeli arasında karşılaştırma

yapılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca kalenin ana kulesinin kırılma dayanıklılığı değerlendirilmesi, oluşturulan örgü üzerinde yapılan basitleştirilmiş itme analizleri ile gerçekleştirilmiştir [45].

D'Altria ve diğerleri (2018) makalelerinde üst sınırlı sonlu elemanlar limit analizi (FELA) yaklaşımına dayanarak, eğilmiş tarihi yığma yapıların kararlılık analizlerini gerçekleştirmek için otomatik, güçlü ve kullanımı kolay bir prosedürü tanıtmışlardır. Bu prosedür otomatik nokta bulutu manipülasyonunu, yapısal amaçlar için gerçek geometrinin üç boyutlu mesh üretimini (örn. FE mesh) ve sadece aktif birkaç element varsayımıyla büyük ölçüde optimizasyon değişkenlerini azaltan iki adımlı bir FELA'yı içeren kapsamlı bir iş akışından oluşturulmuştur. Yapının yerçekimi yükleri altında çökmesini sağlayan sınır eğiminin kesin bir değerlendirmesi için, 3 boyutlu bir üst sınır FELA'nın özyinelemeli değişkenler çekirdeği ile kullanılması gerekliliği yinelenmiştir. Bu şekilde, kritik eğim açısını gerçek yapı ile karşılaştırarak tarihi bir yapının yapısal sağlık durumunun tahmin edilebileceğinin öngörüldüğü savunulmuştur. Vaka çalışması olarak İngiltere Galler'de Caerphilly Kalesinin güney batısındaki eğimli kulesi (9 m çapında, 17 m yüksekliğinde, 10 derece eğimli) seçilmiştir. Kulenin çökme eğim açılarına sahip çökme mekanizmaları FELA ile değerlendirilmiştir. Önerilen prosedür ile (FELA), her bir operasyonel düzeyde yüksek derecede otomasyon sunmaktadır. Bu nedenle tarihi yapıların yapısal sağlık durumunu sınıflandırmak ve yararlı bilgiler sağlamak için bu prosedürün etkili bir şekilde kullanılabilirliğini ispatlamışlardır [46].

Stavroulaki ve diğerleri (2018) çalışmalarında Yunanistan'ın Girit adasında ortaçağdan kalma Frangokastello kalesinin yapısal davranışını incelemişlerdir. Mevcut geometrinin modellenmesi için anıtın tarihi, yapı malzemelerinin kalitesi ve zemin koşulları dikkate alınmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile ilk olarak, çatlaksız yapının özdeğer (kendi yükleri altında) analizi ve dinamik modal analizi gerçekleştirilmiştir. Ardından, statik ve dinamik yükleme altında yapının sınır durumunu araştırmak için Yunan yönetmeliğine göre tasarım spektrumu için spektral analiz modeli yapılmıştır. Son olarak, incelenen tüm modeller için farklı depremlere karşılık gelen çeşitli geçici dinamik analizler yapılmış ve yapının kritik alanları tahmin edilmiştir. Sonuç olarak temas mekanizmalarının aktivasyonu, yük transfer mekanizmalarının değiştirilmesine, özellikle de maksimum yer değiştirmenin lokal olarak azaltılmasına ve aynı zamanda yapının farklı konumlarında daha yüksek maksimum değerlerin ortaya çıkmasına yol açmıştır [47].

Olivito ve diğerleri (2019); tarihi yığma yapılarda yapının şeklini saran uygun sayıda Sınır Kontrol Noktası (BCP) dikkate alarak itme analizinden (push over analysis) elde edilen sonuçları temsil etmek için bir çift sayısal-geometrik metodoloji geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bunun için İtalya'nın güneyinde, Calabria Bölgesi'nde bulunan San Fili Stignano Kalesi üzerinde sayısal simülasyonlarla doğrulama yapmışlardır. San Fili Stignano Kalesinin model verileri dijital fotogrametri yöntemleriyle elde edilmiştir. Modellemede ayırık elemanlar yöntemi uygulanmıştır. Analizlerde Abaqus (FEM) paket programı kullanılmıştır. Sınır şartı olarak eigen-frekans analizi için elastik yaylar tanımlayıp doğrusal olmayan statik itme analizi (push over analysis) yapılmıştır. Kale de üç spesifik kontrol noktası seçerek zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz (RHA Response History Analysis) gerçekleştirilmiştir. Son olarak kalenin önemli cephelerinde limit analiz teoremi ile Kinematik Analiz (KA) yapılmıştır. PA, RHA ve KA analizlerinden gelen spektral ivme değerleri karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda tarihi kalenin sismik güvenliği hakkında yorumlar yapılmıştır [48].

Valente ve diğerleri (2019) makalelerinde, 2012 Emilia sismik deprem dizisinin vurduğu Mantua'daki (Kuzey İtalya) kültürel mirasın en ünlü anıtsal yapılarından biri olan St.George Kalesi'nin sismik tepki ve kısmi çökme mekanizmalarını araştırmışlardır. Çalışmanın ilk kısmı, kalenin doğru bir şekilde bilinmesi ve depremden kaynaklanan hasarın uygun bir şekilde değerlendirilmesi için tarihsel analiz, belgesel araştırma, fotoğraf toplama ve saha araştırmalarına dayanmaktadır. Toplanan tüm bilgiler, kalenin temsili ve ayrıntılı sonlu eleman modeli oluşturmak için kullanılmışlardır ve doğrusal olmayan dinamik analizler, yığma yapı için basma ve çekme gerilmelerinde farklı yumuşama davranışına sahip bir hasar plastisite modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar simülasyonlarını Abaqus (FEM) ile kalenin sismik tepkisi hakkında ek bilgiler sağlayarak farklı sismik yoğunluk seviyeleri için hasar düzenlerini ve en savunmasız kısımları belirlenmiştir. Sayısal sonuçlarda, köşe kuleleri ve tonozların kalenin en hasarlı unsurları olduğu tespit edilmiştir [49].

Ramacciotti ve diğerleri (2019); Roma döneminden Modern Çağ'a kadar farklı yapı evreleri ile karakterize edilen en önemli ve en iyi korunmuş İspanyol arkeolojik ve mimari eserlerinden biri olan İspanya Sagunto Kalesi'nin bünyesinden karbonat kaya küllerinden bir arkeometrik çalışma yapmışlardır. Sagunto Kalesi'nin on üç farklı bölgesinden toplanan kırk örnek ile Sagunto tepesinde bulunan iki taş ocağından alınan örnekler karşılaştırılmıştır.

Numuneler, mineralojik ve elementel kompozisyonlarını belirlemek için X-ışını difraksiyonu (XRD), X-ışını florışması (XRF) ve endüktif olarak birleştirilmiş plazma kütle spektrometresi (ICP-MS) ile analiz edilmiştir. Elde edilen veriler sonucunda şehir ocaklarında çıkarılan kayaçlar ile yapıları inşa etmek için kullanılan kayaların arasında benzer kimyasal ve mineralojik özellikler olduğu belirlenmiştir. Bu da yapıların yüzyıllar boyunca farklı dönemlerden inşa etmek için kullanılabileceğini şeklinde açıklanmıştır [50].

Paraccha ve diğerleri (2019) Portekiz'in güneyindeki Algarve'de bulunan 12. yüzyılda inşa edilen Paderne kalesinden alınan malzeme örnekleri ile yapı hakkındaki bilginin artırılmasına katkıda bulunmayı amaçlamışlardır. Bu yapıya 20. ve 21. yüzyıllarda yapı üzerindeki müdahalelerden elde edilen verilerin mikroyapısal ve mineralojik tekniklerle karakterize edilmişlerdir. Kalenin malzeme yapısı o bölgede sıkça görülen sıkıştırılmış topraktır. Malzeme örnekleri üzerinde Stereozoom mikroskop gözlemi, petrografik analiz, X-ray ışını mikroanalizi ile SEM (elektron mikroskop taraması), X-ray difraksiyonu (XRD), Termogravimetrik (ısıl ağırlıklı ölçümsel) analiz ve kimyasal analizler uygulanmıştır. Sonuç olarak örneklerden elde edilen karakterizasyon sonuçları ile bu ve benzeri malzeme içeren tarihi yapılarda; gelecekte uyumlu, etkili ve geri dönüşümlü müdahaleleri desteklemek için geçmişte kullanılan malzemeler ve yapım teknikleri hakkında bilgi verilmiştir [51].

Kujawa ve diğerleri (2020); makalelerinde, 1323 yılından önce yapıldığı bilinen Polonya da Gnojewo Kilisesi geometrisinin lazer tarayıcılarla taranarak sonlu elemanlar yöntemi Abaqus (FEM) kullanılarak modellenmesine yönelik bir vaka çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının temel amacı, yığma duvarların çatlama ve ezilme nedenleridir. Hasar malzeme plastisitesi modeli ile doğrusal olmayan dinamik açık bir analiz (dynamic explicit analysis) yapılmıştır. Yığma yapı modellemesinde kullanılan malzeme parametrelerini elde etmek için homojenizasyon kıstasları uygulanmıştır. Sayısal analizde kilise yapısı, temeller ve zemin arasındaki etkileşimleri (zeminler modellenmiştir) dikkate almışlardır. Elde edilen sonuçlarla yerinde inceleme yapılan tüm yapının hasarlı bölgesi ile iyi eşleşen sonlu elemanlar modelinin, çatlak duvarların nedenlerinin ve etkilerinin nitel anlamda oldukça kesin bir şekilde tanımlanmasına izin verdiğini vurgulanmışlardır [52].

Anton ve diğerleri (2020) çalışmalarında Navarre-İspanya'da 14. ve 17. yüzyıllar arasında inşa edilen Amaiur Kalesi'nden örnekledikleri arkeolojik kireç harçlarının kimyasal-mineralojik bir çalışmasını sunmuşlardır. Elde ettikleri örneklerle, optik mikroskopi, X-ışını

mikroanalizi ile taramalı elektron mikroskopisi, mikro-Raman spektroskopisi ve X-ışını difraksiyonu (XRD) uygulayarak kireç harçlarının dolomitik agregaları çevresinde gözlemlenen reaksiyonunun kimyasal, mineralojik ve dokusal karakterizasyon için analitik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [53].

Micelli ve diğerleri (2020); makalelerinde, 14. yüzyıl civarlarında Soletto-İtalya da inşa edildiği bilinen Raimondello Orsini del Balzo adlı anıtsal bir çan kulesinin (yani veri edinimi ve detaylandırılmasından güvenlik açığı analizi ve müdahalesiz bir güçlendirme prosedürü önerisine kadar) rapor etmişlerdir. Tarihi bir çan kulesinin kapsamlı bir yapısal çalışmasını değerlendirmek için tarihsel araştırma, temel toprağının karakterizasyonu, geometrik araştırma, yapısal patolojilerin, mekanik ve yapısal özelliklerin belirlenmesi, yapısal modelleme ve güçlendirici müdahalelerin tasarımı gibi hususları kapsayan analiz yönteminin geliştirilmesini açıklamışlardır. Kullanılan NDT (tahribatsız deney yöntemleri) teknikleri arasında mikroskobik incelemeler, boroskop incelemeleri, ultrasonik testler, sklerometre testleri, termografik testler, higrometrik testlerin yanı sıra, yapısal analizler ile ilgili olarak, modal analiz, itme analizi ve doğrusal olmayan kinematik analiz yapılar ayrıntılı şekilde açıklamışlardır [54].

Tarihi yapıların strüktürel analizi bilgisayar sistemlerinin ve programların hızla gelişmesiyle son 20 yılda büyük bir önem kazanmıştır. Alışılmamış ve farklı geometrik biçim sergileyen, yığma taş ya da tuğla yapım sistemiyle inşa edilen yapıların strüktürel davranışı klasik mekanik bilgileri ve deneyimle belirlenebilir. Günümüzde tarihi yapı olarak tanımlanan binaların ve diğer yapıların inşa edildikleri dönemde strüktürel davranışı veya dayanımı da bu şekilde belirlenmektedir. Bu yöntem tarihi yapıların strüktürel davranışını belirlemek için hala ilk başvurulacak yöntemdir. İyi bir mekanik ve yapım bilgisiyle, bu alandaki deneyimle en karmaşık şekle sahip yapıların bile çeşitli yük ve çevresel etkiler altında gösterdiği tepkiler ve davranış yaklaşık olarak saptanabilir.

Tarihi yapıların strüktürel davranışını ve dayanımı belirleyebilmek için hesap yöntemlerine uygun olacak şekilde yapının geometrik boyutlarını ve malzeme özelliklerini doğru bir şekilde tanımlayan matematiksel modeller hazırlanmalıdır. Her biri kendine özgü geometrik boyut ve malzemeye sahip olan tarihi yapıların bu özelliklerini kendi kendine dikkate alarak modelleyecek ve hesaplarını yapacak bilgisayar programları henüz mevcut değildir. Bu nedenle bilgisayarla hesapları gerçekleştirecek araştırmacının tarihi yapının bütün özellikleri

hakkında bilgi sahibi olması gerekir.

Özetlenen çalışmalar doğrultusunda; tarihi yığma yapılar ve özellikle kale tipi düzgün bir geometriye sahip olmayan, ağır kütleli yapılar için önemli düzeyde araştırmalar yapıldığı ifade edilebilir. Bu araştırmalar sayesinde yapıyı; malzeme karakteristikleri, yapısal davranışları, yapı-zemin etkileşimleri, modelleme ve sayısal analiz türleri ve prototip geliştirerek analitik modelleme ile karşılaştırma gibi bir çok açıdan tanıma seçeneği sunulmuştur. Genellikle paket bilgisayar programları kullanılarak yapılan bu araştırmalarda bilgisayar programının izin verdiği ölçüde doğru ve hassas sonuçlar elde edilmektedir. Birçoğu bilime bu alanda büyük katkı sağlayan bu çalışmalar, tarihi yapıların korunmasına ve güçlendirilmesine büyük katkı sağlamışlardır. Ancak modelleme ve hesap yöntemleri, hazır paket programlarının sınırları çerçevesinde yapıldığından her biri kendine özgü özellikler arz eden yapıların matematiksel modellerinin oluşturulması sırasında çok basit mekanik teorisine bile ters düşecek hatalar ya da ihmaller yapılabilmektedir. Bu doktora tezinde yukarıda özetlenen çalışmalardan farklı olan amaç ise; bir tarihi kale, sur duvarları ve burçlarının çevresel etkiler altında zamanla oluşabilecek malzeme aşınımının, yapıda oluşturacağı stabilite kaybını kademeli seri analizler ile her çevreden ilgilenen kişiye anlaşılacak seviyeye indirgemektir.

3. YIĞMA KAGİR YAPILARIN GENEL ÖZELLİKLERİ, HASAR VE BOZULMA NEDENLERİ

Bu bölümde yığma kagir yapıların tarihsel gelişim süreci hakkında kısa bir bilgi verilmiştir. Kagir yapı malzemeleri; doğal taş, kerpiç, tuğla ve harç olarak sınıflandırılmıştır. Yığma yapıların mekanik özellikleri ve bu yapılarda hasar ve bozulmaya neden olan etkenler açıklanmıştır.

3.1. Yığma Kagir Yapıların Tarihsel Gelişimi

İnsanoğlu, varoluşundan günümüze kadar olumsuz doğa koşullarından korunabilmek, güvende olma gereksinimini karşılayabilmek kısacası hayatlarını devam ettirebilmek için barınaklar inşa etmiştir. İlerleyen zamanla değişen şartlar ve gereksinimlerin karşılanması amacıyla barınakların yerini yapı inşa etme süreci almıştır. Çevredeki farklı malzemelerin bir araya getirilmesiyle yığma yapıları inşa etmiştir.

Yığma yapılarda en sık rastlanan ve en eski yapı malzemesi taştır. Taş; çamur, harç ve ahşap ile birleşerek yapı oluşturabilen, şekillendirilebildiği için sık tercih edilen, iklim şartlarına uyum gösteren en dayanıklı yapı malzemesidir [55]. Dayanıklılığı sebebiyle günümüze kadar mevcut halini koruyarak gelmiştir. Tüm bu özelliklerinin yanı sıra birçok prestijli anıtın ve yapının sembolik anlamı, taş yığma yapıya yüklenmiştir. Mısır'da bulunan Memphis ve Ghiza piramitlerinde olduğu gibi sonsuzluk ve refahlık fikrini nesillere aktarmak için yığma taş yapılar inşa etmişlerdir. Meksika'da tarih öncesi anıtlar, büyük Çin Seddi, Roma Bizans yapıları ve kaleler yığma kagir yapı örnekleri arasındadır [56].

Taş malzemenin az bulunduğu ya da bulunmadığı coğrafyalarda insanlar kil bazlı toprak ile bağlayıcı görevi görmesi için lif içeren bitkileri su ile karıştırıp güneş altında pişirerek kerpici elde etmişlerdir. Kerpiç malzemenin tarihi M.Ö. 8000'li yıllarda Filistin'e dayanmaktadır. Anadolu da ki ilk örneği ise, Çatalhöyük'te M.Ö. 7500'lü yıllarda yapılan yığma yapılarda rastlanmıştır.

Kerpiç gibi tuğla malzemede milattan önceki zaman dilimlerine dayanan geçmişle bilinmektedir Tuğla malzemede, kil bazlı toprağın çamur haline getirilerek içerisine kamış, saman gibi malzemelerin bağlayıcı malzeme olarak katılması ve yüksek sıcaklıkta

pişirilmesi ile oluşmaktadır. Birçok ortaçağ mimari eserine hayat veren tuğla, günümüzde de sıklıkla kullanılan bir yapı malzemesidir.

3.2. Yığma Kagir Yapıların Malzeme Özellikleri

Yığma kagir yapı malzemeleri yapının bulunduğu konumun coğrafi özellikleri, yapının işlevselliği ve inşa edildiği dönemin yapılm teknolojilerine göre farklılık göstermektedir. Kagir yapı malzemeleri birim eleman doğal taş, kerpiç, tuğla ve ara (bağlayıcı) eleman harç olarak sınıflandırılabilir.

3.2.1. Doğal taş

Taş en eski yapı malzemelerinden biridir ve kalıcı olması düşünülen yapıların inşaatında özellikle tercih edilmiştir. Taşın tarihi yapılarda yaygın olarak kullanılmasının nedeni; hemen hemen her yerde ve arazi koşullarında kolaylıkla bulunabilmesinin getirdiği avantajdır. Taş malzeme; yapısal olarak çok dayanıklı bir malzemedir. Olumsuz çevre koşullarına karşı çok uzun süreler ayakta durabilir. Resim 3.1’de görüldüğü gibi yapımı, M.Ö. 800’lü yıllara dayandığı bilinen ve bugüne kadar farklı medeniyetler tarafından onarım geçiren Sinop Kalesi yığma taşlardan meydana gelmiştir.

Taşın yapısal dayanıklılığı, jeolojik ve kimyasal özellikleri ile incelenebilir. Taş basınç kuvvetlerine karşı çok dayanıklı, çekme kuvvetlerine karşı ise zayıftır [57]. Bu özelliğinden dolayı, doğal taşın sadece basınç kuvvetini karşılayan kemerler, tonozlar ve kubbelerde kullanılması uygundur. Basınç kuvvetlerini karşılayan duvarlar ve ayaklar da taş malzemedен yapılmıştır. Basınç altında bazı taşların deformasyonu, beton malzeme ile benzer özellikler gösterir. Betonun elastisite modülü $E = (14000 \sim 30000) \text{ MPa (N/mm}^2\text{)}$ iken, granitin elastisite modülü $E = (15000 \sim 70000) \text{ MPa (N/mm}^2\text{)}$ mertebesinde-dir. Elastisite modülünün bilinmesi, taşıyıcı elemanın yüklenmesi sonucu yaptığı sehım hesabı için gereklidir [58].



Resim 3.1. Sinop Kalesi kuzey surları taş duvarları (Çetin Tek Arşivinden)

3.2.2. Kerpiç

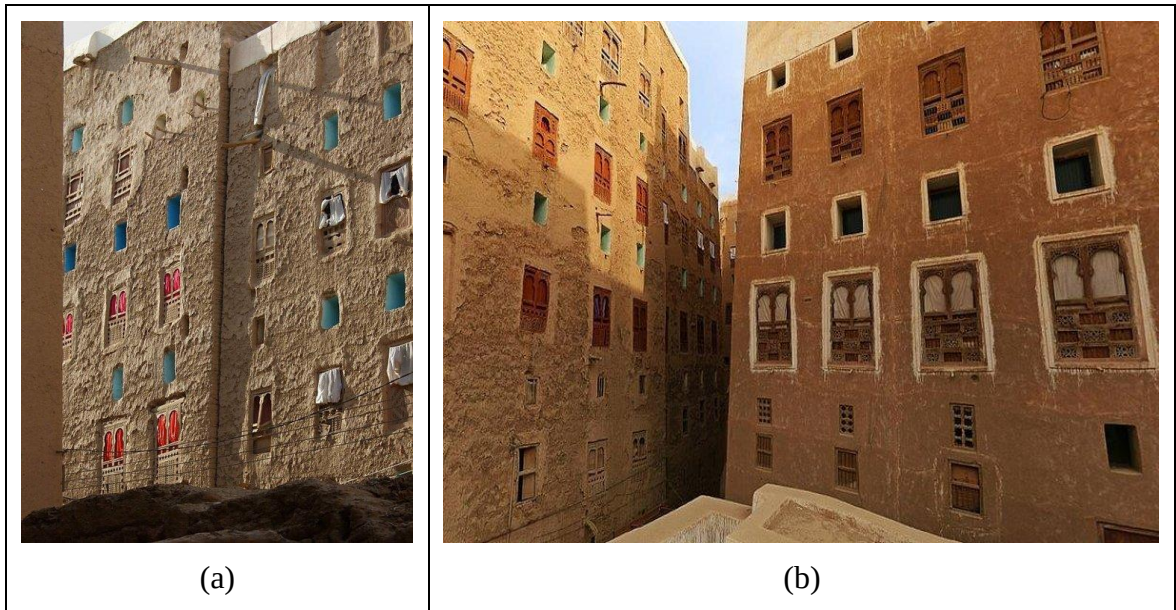
Kerpiç; killi veya uygun nitelikte toprağın içine bağlayıcı olarak saman veya diğer bitkisel lifler (saz türünden bitkiler, kenevir lifleri, kuru funda, çam iğneleri, ağaç dalları, talaş) ilave edilerek yeterli su ile yoğurulup kalıplara dökülmesiyle şekillendirilen ve sonra açık havada kurutularak elde edilen bir yapı malzemesidir. İçeriğinde kullanılan malzemelerin oranı ve kurutulma süreci ile dayanıklılığı değişen kerpiç malzeme, yağmur ve nem gibi olumsuz etkiler karşı ise dayanıksızdır [59]. Neme karşı dayanıksız olmasının aksine doğal bir malzeme olduğu için iç ortamın havasını temiz tutar ve nem dengesini sağlar, ayrıca ısı depolama özelliği çoğu yapı malzemesine göre daha yüksektir. Su içerisinde çözünmediği için yeniden kullanılabilir, geri dönüşümle doğaya zarar vermez. Yapım yerinde üretildiğinden transfer gideri yoktur ve çok az enerji tüketilerek üretilir [60].

Dünya'nın birçok yerinde tarihi farklı kerpiç yapı örnekleri bulunmaktadır. Anadolu topraklarında bilinen en eski örneği ise Resim 3.2'de de görüldüğü gibi Konya Çatalhöyük'de bulunan neolitik çağdan kalma kerpiç yığma duvarlardır.



Resim 3.2. Konya Çatalhöyük'te bilinen en eski kerpiç duvar kalıntıları [60]

Başka bir örnek olarak 16 yüzyılda inşa edilen Yemen'deki Şibam şehrinde her biri 5 ila 11 arası kata sahip, her katta tek bir ailenin yaşadığı 500 civarı kerpiç kule konut bulunmaktadır. Şehir Bedevi saldırılarından korunmak amacıyla yüksek kerpiç yapılardan oluşmuştur. Şibam halen pek çoğu 30 m üzerinde yüksekliğe sahip olarak, dünyanın en yüksek kerpiç yapılarına sahiptir [61]. UNESCO'nun Dünya Kültür Mirası Listesinde yer alan Şibam kerpiç evleri, Resim 3.3 (a) (b) ve (c)'de görüldüğü üzere bitişik nizam ve dar ara sokaklara sahiptir. Bu sıklıkla yapılmasının amacı ısıl izolasyona dayanıklı olmadığı bilinen kerpiç malzemenin gündüz ve gece oluşan ısı farklılığının yapılara daha az etki etmesidir.



Resim 3.3. (a,b,c) Yemen Şibam'da bulunan kerpiç gökdelenler [62]



Resim 3.3. (devam) (a,b,c) Yemen Şibam’da bulunan kerpiç gökdelenler [62]

TS 2514’te katkısız kerpicing en küçük basınç dayanımı $0,8 \text{ MPa (N/mm}^2\text{)}$ ’den az ve ölçülen numunelerin ortalama basınç dayanımı $1 \text{ MPa (N/mm}^2\text{)}$ ’den düşük olmamalıdır. Toprağın cinsi, su miktarı, bitkisel katkı oranları, kalıplama, kurutma süresi ve yöntemi, bağlayıcı madde cinsi ve miktarı, kerpicing basınç mukavemetini değiştiren etkenler olarak sayılabilir [63].

3.2.3. Tuğla

Tuğla, yapılan araştırmalar doğrultusunda, Romalılar döneminden çok önce kullanılmaya başlanmış olan ve günümüzde hala sıklıkla kullanılan doğal bir malzemedir. Dere yataklarında yüzeysel olarak biriken kum kalıntılarından elde edilir. Killi toprak, balçık ve benzer organik maddelerin birleşimiyle sıkıştırılıp şekil verilen tuğlalar o dönemlerde fırın teknolojisi bulunmaması nedeniyle doğrudan güneş ısıyla pişirilmişlerdir [55].

Ana malzemesi kil olan tuğlanın içinde kum, kireç, alçı, demir birleşikleri, organik maddeler de bulunur. Kilin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesiyle elde edilir ve ebatlarına, işlevlerine göre çeşitleri vardır. Tarihi yapılarda kullanılan tuğlalar saf kaolin ve kil karışımının fırınlarda yüksek ateş altında pişirilmesiyle elde edilmiştir. Tuğlanın iyi pişirilmiş olması, mukavemeti ve çevre şartlarına karşı direnci açısından çok önemlidir [64].

Tuğla, diğer yapı malzemelerine göre temini daha kolay ve ekonomik olması nedeniyle en çok kullanılan yapı malzemesidir. Hafif bir malzeme olan tuğlalar, uzun açıklıklı kemerler Resim.3.4'te görüldüğü gibi kubbeler, yığma duvarlar, zigurat ve piramitlerde kullanılmışlardır. Tarihi yapılarda kullanılan tuğlalar da, taşlar gibi basınç dayanımı (yaklaşık olarak 10-30 MPa) yüksek, çekme dayanımıysa (yaklaşık olarak 2.7-5 MPa) düşüktür.



Resim 3.4. Tuğlanın kemer yapımında kullanılması [65]

3.2.4. Harçlar

Bağlayıcı malzeme, dolgu malzemesi ve suyun belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen, şekil verilebilen, yapışma ve katılaşma özelliği olan malzeme harç olarak tanımlanmaktadır. Harçlar, içinde kullanılan bağlayıcı malzemelere göre alçı harcı, kireç harcı, çimento harcı gibi harçları olarak ya da kullanıldıkları yere göre duvar harcı ve sıva harcı olarak adlandırılırlar [65].

Tuğlanın ve kerpicin yapı malzemesi olarak kullanılmasıyla bağlayıcı eleman gerekliliği harcın temel gereksinim nedeni olmuştur. Tarihte bağlayıcı niteliğinde ilk olarak çamur kullanılmıştır. İlerleyen dönemlerde, Romalılar döneminde kireç harcının kullanılmaya başlandığı bilinmektedir. Kireç harcının kum ile karışımının içine pişirilmiş kil ya da doğal puzolan olan volkanik tüfün karıştırılmasıyla su ile birleşiminde sertleşen bir bağlayıcı elde edilmiştir. Tarihi yığma yapılarda özellikle, Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı mimarisinde ise horasan harcı adı verilen bağlayıcı kullanılmıştır [66].

Horasan, tuğla, kiremit, çömlek gibi pişmiş kilin kırılıp öğütülerek toz haline getirilmesiyle oluşan bir malzemedir. Horasanın belirli oranlarda kireç, su ve katkı maddelerinin karıştırılmasıyla meydana gelen bağlayıcı malzemeye ise horasan harcı denir. Bazı horasan harcı karışımlarında nohut büyüklüğünde iri tuğla kırıkları kullanılmış, bazılarında ise kum kullanılmıştır. İçinde tuğla veya kiremit kırıkları içeren harç karışımları diğer harçlardan farklı bir yapıya sahip olup günümüz betonuna eşdeğer, taşıyıcı bir yapı taşını meydana getirmektedir. İri taneleri ihtiva eden horasan harcına “horasan betonu” denilmektedir. Ayrıca, horasan harcı suya karşı oldukça dayanıklı bir bağlayıcı malzemedir. Nemli ve ıslak bölgeler için kullanılacak en uygun malzeme olduğu söylenebilir [67–69].

Horasan harcına Bizans, Roma, Selçuklu ve Osmanlı dönemindeki yapılarda rastlanmaktadır. Horasan kelimesi İran’ın doğusundaki Horasan bölgesinden gelmektedir. Bu harç türüne Roma ve Bizans döneminde ‘Roman’ harcı, Osmanlı ve Selçuklu döneminde ise Horasan toprağının renk ve dokusuna benzediği için ‘Horasan’ harcı denilmiştir [68,70].

Genel olarak harçların ana görevi, taş, tuğla ve kerpiç gibi malzemeleri bir arada tutarak birleşik bir yapı elemanı oluşturmaktır. Yığma yapı elemanın bağlanma şekli ve özellikleri strüktürel güvenilirlik bakımından çok önemlidir. Elemanın basınç dayanımı, kayma dayanımı ve çekme dayanımı açısından harcın çok önemli bir rolü vardır. Yığma yapı elemanlarında esas olarak, çekme birleşim dayanımı vardır. Çekme dayanımı tuğla ve taş harcın birleşim noktasına dik yönde oluşan çekme kuvvetlerine, kayma dayanımı ise bu noktalar paralel oluşan kuvvetlere karşı koyarlar [57].

3.3. Yığma Kagir Yapıların Mekanik Özellikleri

Yığma yapılar bünyelerinde kagir elemanlar ve harç malzeme taşıdığı için kompozit bir yapı oluşturmaktadır. Yığma yapılar homojen olmayıp ve anizotropik özellik göstermektedirler. Bu nedenle, yığma yapıların mekanik özellikleri hakkında tahmin yürütmek kolay değildir.

Yapı elemanlarının ve yapı malzemelerinin temel gereksinimi yeterli dayanım ve rijitliğe sahip olmalarıdır. Malzemelerin bu özellikleri, karşı koyabileceği en yüksek gerilme değeri ile ölçülmektedir. Birçok malzeme için dayanım ve rijitlik yüklemenin şekline göre değişmektedir. Gerilmeler, basınç ve çekme gerilmeleri olarak eleman içinde birçok yönde ölçülebilir. Deformasyonlar genellikle sabit oranda artmamaktadır. Bu nedenle yığma yapı elemanında gerilme ve rijitlik, deformasyonun oranına göre değişim göstermektedir. Malzemenin özelliklerindeki bu değişim gerilme –birim deformasyon eğrileri ile gösterilmektedir. Malzemenin genel karakteristik özellikleri ve davranışı bu eğriler incelenerek araştırılmaktadır [57].

3.3.1. Yığma yapıların basınç dayanımı

Yığma yapı elemanları birleşik bir malzeme olarak göz önüne alınmakta ve her bileşeni doğrusal elastik kırılğan bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Geometrik özellikleri, biçimi, dayanımı, birim elemanın su emme özelliği, harcın karışım oranı, nem miktarı, harç kalınlığı ve deformasyon özelliği yığma yapıların basınç dayanımını etkileyen faktörlerdir. Yığma yapı elemanları strüktürel formlarından dolayı genellikle basınç gerilmeleri etkisinde kalmaktadırlar. Yığma yapı elemanlarının basınç dayanımı, olası boşlukla göz önüne alınmaksızın, elemana etki eden en büyük basınç kuvvetinin net kesit alanına bölünmesi ile tanımlanır. Basınç dayanımı, genellikle harç ve birim elemanı ile birlikte hazırlanmış örneğin ya da yalnızca birim elemanın laboratuvarında test edilmesi sonucunda belirlenir. Tuğla gibi düzenli birim elemanları ile örülmüş elemanların basınç dayanımı, birim elemanın basınç dayanımına çok yakın bir değerdedir. Genellikle taşın birim eleman olarak kullanıldığı daha katı ve masif olan düzensiz elemanlarda ise yığma yapı elemanının basınç dayanımı, birim elemanları bağlayan harcın cinsinden ve kalınlığından daha fazla etkilenir. Böylece birim elemanın basınç dayanımının elemanın genel dayanımındaki etkisini azaltır [57].

Yığma yapıların dayanım özelliklerini belirleyebilmek için farklı tip ve özellikte olan yığma yapı elemanları üzerinde birçok test ve deney yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Bu veriler kullanılarak yığma yapının karakteristik basınç dayanımı denklemine ulaşılmıştır. Benzer malzeme özelliği gösteren yığma yapılar için bu denklemlerden yararlanılabilir. Yığma yapı elemanların karakteristik basınç dayanımı Eurocode EC6 da aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [57];

$$f_k = K(f'_b)^{\alpha}(f_m)^{\beta} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1.'de

f_k	yığma yapı elemanı karakteristik basınç dayanımını (MPa)
f_m	harcın ortalama basınç dayanımını (MPa)
f'_b	birim elemanın (taş veya tuğla) basınç dayanımını (MPa)
K, α, β	sabit değerleri göstermektedir.

3.3.2. Yığma yapıların kayma dayanımı

Yığma yapıların kayma dayanımı yanal yüklere karşı yaptığı dirençtir. Eurocode EC 6'da yığma yapıların karakteristik kayma gerilmeleri yapılan deneyler doğrultusunda formüle edilmiştir ve aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır [71];

$$f_{vk} = f_{vko} + 0,4\sigma_d \quad \text{düşey doğrultuda harçla doldurulmuş kagir yapılar} \quad (3.2)$$

0,0065 f_b veya f_{vlt} ' den daha büyük olmadığı koşullarda.

$$f_{vk} = 0,5f_{vko} + 0,4\sigma_d \quad \text{düşey doğrultuda harçsız kagir yapılar} \quad (3.3)$$

0,0045 f_b veya f_{vlt} ' den daha büyük olmadığı koşullarda.

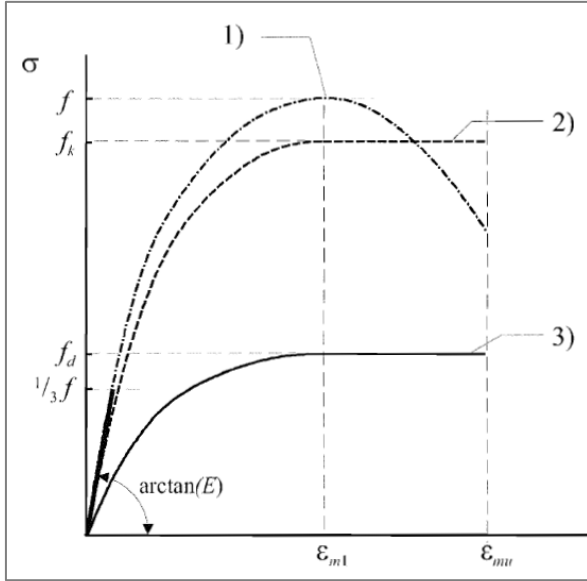
f_{vko}	basınç gerilmesi altında olmayan ilk karakteristik kayma dayanımını (MPa)
f_{vk}	karakteristik kayma dayanımını (MPa)
σ_d	tasarım basınç gerilmesini
f_b	birim elemanın (taş veya tuğla) basınç dayanımını (MPa)
f_{vlt}	karakteristik kayma dayanımının (f_{vk}) limit değerini göstermektedir.

3.3.3. Yığma yapıların çekme dayanımı

Yığma yapı elemanları gevrek bir malzeme olduklarından dolayı çekme dayanımlarına karşı zayıftırlar. Tarihi yığma yapılarda; kubbe, kemer, tonoz, pendentif gibi örtü elemanlarında yani eğilmeye yatkın yapı elemanlarında çekme gerilmeleri görülmektedir. Duvar ve sütun gibi elemanlarda da kayma gerilmelerinden dolayı diyagonal çekme gerilmeleri oluşur. Nemden ve ısı değişimlerinden dolayı uzama ve kısalma gibi şekil değiştirmeler de önemli ölçüde çekme gerilmesi oluşmasına neden olur. Yığma yapı elemanlarında, eğilmeden dolayı oluşan çekme gerilmeleri, aksel çekme gerilmelerine göre daha fazla önem taşır. Çünkü tarihi yapılarda doğrudan aksel çekme gerilmeleri etkisinde kalan elemanlara çok ender rastlanmaktadır. Araştırmalar yığma yapı elemanlarında eğilmeden dolayı oluşan çekme gerilmesi dayanımının, malzemenin birim elemanın nem oranı, harcın yoğunluğu ve birim elemanın yüzey dokusu ile doğrudan ilgili olduğunu ortaya çıkarmıştır. Harcın kalınlığı da daha fazla dayanım sağladığından, ince birleşim noktaları malzemenin çekme dayanımı artırmaktadır [57].

3.3.4. Elastisite modülü

Basınç etkisi altındaki yığma yapıların gerilme-birim deformasyon (σ - ϵ) grafiğine göre doğrusal olmayan bir ilişki bulunmaktadır. Kagir yığma yapı kesitinin amaçlanan tasarımına göre grafik; doğrusal, parabolik, parabolik dikdörtgen ya da dikdörtgen olarak alınabilir. Şekil 3.1. de 1 numaralı eğri normal, 2 numaralı eğri idealleştirilmiş eğri, 3 numaralı eğri ise tasarım eğrisi olarak verilmiştir [71].



Şekil 3.1. Basınç altında yığma kagir yapının gerilme-birim deformasyon arasındaki ilişki [71]

- f basınç gerilmesi altında normal dayanım
 f_d basınç gerilmesi altında tasarım dayanımı
 ϵ_{mu} basınç gerilmesi altında limit uzama
 ϵ_{ml} basınç gerilmesi altında ilk uzama

1 numaralı eğride de görüldüğü gibi yığma kagir yapılarda gerilme-birim deformasyon (σ - ϵ) eğrisinin şekli betonda olduğu gibi paraboliktir. İlk sertleşme bölgesinden sonra, eleman üzerindeki yük arttıkça harcın sıkışmasıyla dayanımının daha da arttığı ve bunun sonucunda elastisite modülünün de arttığı görülmektedir.

Yığma yapı elemanının elastisite modülünü (E_m) etkileyen faktörler öncelikle yığma yapı elemanını oluşturan bileşenler, yani taş veya tuğla birim elemanlarıyla, bağlayıcı malzeme harcın elastisite modülüdür [57]. Yapılan çeşitli araştırmalar ve laboratuvar deneyleri sonucunda yığma yapı elemanının elastisite modülü E_m (σ - ϵ eğrisinin doğrusal kısmından elde edildiği kabul edilir) denkleme göre hesaplanabilir;

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

Söz konusu denklemler doğrultusunda Magenes ve Penna (2009) çalışmalarında, yığma kagir duvarların türlerine göre mekanik değerlerinin genel ortalamalarını Eurocode 8'e bağlı olarak Çizelge 3.1'de özetlemişlerdir [72].

Çizelge 3.1. Yığma kagir duvarların genel mekanik değerleri ortalaması

Yığma Duvar Türü	$f_m(N/mm^2)$	$\tau_o(N/mm^2)$	$E(N/mm^2)$	$\sigma(N/mm^2)$	W (kN/m^3)
	Min-Max	Min-Max	Min-Max	Min-Max	
Düzensiz yığma yapı (çakıl, düzensiz taş)	1,0-1,8	0,020- 0,032	690-1050	230-350	19
Sınırlı kalınlıkta ve dolgu yapılı duvarlara sahip biçimsiz yığma yapı	2,0-3,0	0,035- 0,051	1020-1440	340-480	20
İyi bağlantılı kesme taş yapı	2,6-3,8	0,056- 0,074	1500-1980	500-660	21
Yumuşak taş yapı (tuf, kireç taşı vb.)	1,4-2,4	0,028- 0,042	900-1260	300-420	16
Dikdörtgen yontulmuş yapı (kesme taş)	6,0-8,0	0,090- 0,120	2400-3200	780-940	22
Kireç harçlı masif tuğla duvar (genel)	2,4-4,0	0,060- 0,090	1200-1800	400-600	18

3.4. Yığma Kagir Yapılarda Hasar ve Bozulmaya Etki Eden Unsurlar

Yığma kagir yapılar gevrek malzemelerden meydana geldiği için basınç, çekme ya da kayma gerilmeleri altında zamana ve malzemenin dayanımını yitirmesine bağlı olarak rastlanmaktadır. Bu hasarlar yapının çeşitli bölgelerinde farklı nedenlere bağlı olarak karşımıza çıkmaktadır. Örneğin; zemindeki oturmaya bağlı olarak yapı elemanlarında çatlamlar, derz ayrılmaları, kopma ve parçalanmalar gözlenmektedir. Bunun yanı sıra tarihi yapılar insan ve doğa kaynaklı hasarlara da maruz kalmaktadır. Bu hasarlar aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

3.4.1. Depremler

Yerküre içerisindeki enerji birikiminin herhangi bir noktada boşalmasıyla oluşan titreşimlerin yeryüzünde yapmış olduğu sismik dalgalar deprem olarak tanımlanabilir. Depremler, yeryüzündeki hareketleriyle büyük yıkımlara neden olabilir. Bu nedenle yeni inşa edilecek yapıların yer hareketinin neden olduğu titreşimin şiddetine karşı koyabilecek şekilde tasarlanması önemlidir. Mevcut yapılar ve tarihi yapılar içinse depreme karşı bir takım önlemler alınması gerekebilir.

Tarihi yapıların strüktürel sistemini en çok etkileyen tehlikelerden biri depremlerdir. Tarihi kâgir yapılar genellikle taşıyıcı ayaklar, sütunlar, taşıyıcı duvarlar, payandalar, kemerler, tonozlar, kubbeler, gergiler ve ağırlık kuleleri gibi taşıyıcı bileşenlerden oluşur. Tarihi

yapıların olası depremlerde hasar görmemeleri ve yıkılmamaları için öncelikle yapının depreme karşı davranışı doğru olarak belirlenmeli yapısal sistemin zayıf noktaları tespit edilmelidir. Tarihi yapıların deprem güvenliğinin tespiti amacıyla deprem analizi yapılması ön şarttır. Analiz sonuçlarına dayanarak, eğer gerekirse, seçilecek güçlendirme yöntemleri sırasında tarihi yapıya yapılacak müdahaleler, uluslararası koruma tüzükleri çerçevesinde, yapının özgün mimari özelliklerine zarar vermeden gerçekleştirilmelidir [73].

3.4.2. Zemin kaynaklı hasarlar

Yapının üzerine oturduğu zeminin mukavemetinin düşük olması ya da homojen olmaması zamanla yapıda bazı hareketlerin oluşmasına ve dönme, farklı oturma gibi gözle görülebilen bozulmalara neden olabilir. Temel altındaki zemin homojen olmadığında yapıda çatlamlar görülür. Çatlakların yapıdaki yerlerine, doğrultularına bakılarak hasar nedeninin zeminden kaynaklanıp kaynaklanmadığı hakkında kabaca fikir edinilebilir. Bir yapının fay hattı üzerinde yer alması ya da oluşumunda çatlaklar bulunan bir kaya üzerinde inşa edilmiş olması da yapının bozulma, yok olma riskini arttıran etkenlerdir [74].

Yapıların bünyelerinde bulunan zeminle ilgili hasarlar; örneğin farklı oturmalarından kaynaklanan çatlaklar genellikle ilk inşa edildikleri senelerde ortaya çıkmaktadır. Uzun zaman sonra yapıda meydana gelen zemin kaynaklı hasarlar genellikle çevresel koşulların değişmesinden meydana gelmektedir. Tarihi yapıların çevrelerinden yol geçmesi, kazı yapılması gibi etkenler yapı zemininde meydana getirdiği titreşim ile yapının olumsuz yönde etkilenmesine sebebiyet verebilmektedir.

Zeminde yüzey ve yeraltı suyu büyük önem taşımakta ve yapıların stabilitesini sağlamak için bu sulara karşı korunması gerekmektedir. Bu tip sorunların varlığında yapılarda drenaj sistemleri yapılmaktadır. Drenaj sistemleri yapı zemininde istenmeyen su ve havanın drene edilmesini sağlamaktadır. Yapı temelindeki drenaj sistemlerinin göz ardı edilmesi ile oluşan hasarlara da başka bir zemin problemi olarak rastlanmaktadır. Bu sistemlerin tıkanması, düzenli bakımlarının yapılmaması, restorasyon ve çevre düzenlemesi yapılırken drenaj sistemlerinin dikkate alınmaması ve suyun zeminde meydana getirdiği fiziksel ve kimyasal değişimlerle yapıya zarar vermektedir.

Tarihi yapılarda zeminden kaynaklı yapı hasarları; zemin oturmaları, temel zemininde ayrışmalar, kabarma ve şişme, parça kopması, çatlaklar ve kaymalar olarak gruplandırılabilir. Resim 3.5'te İstanbul Galata'da bulunan Kethüda Yahya Çeşmesi'nin farklı oturması sebebiyle dönme yaptığı gözlenmektedir.



Resim 3.5. Galata Kethüda Yahya Ağa çeşmesi (1732) [75]

3.4.3. Strüktür tasarımındaki hatalar

Yapıların ilk tasarımından kaynaklı olarak taşıyıcı sistemleriyle alakalı boyutlandırma hataları varsa duvar, ayak, payanda gibi taşıyıcılar yatay ve düşey yükleri karşılayacak kesitlerde yapılmamışlarsa ciddi hasarlar ortaya çıkabilir. Kesitleri yetersiz bir duvar zamanla bel verir, aynı durum payandalarda da ortaya çıkarsa destek verdiği kemer, tonoz ve kubbede açılmalara hatta sistemde yıkılmalara neden olduğu düşünülmektedir.

Taşıyıcı sistemi hatalı tasarlanmış olduğu düşünülen yapıların en önemlisi İstanbul Ayasofya'dır. İlk tasarımda alçak bir yelken tonozla örtülen bina, 31 m açıklığındaki kubbeyi destekleyecek bir sisteme sahip olmadığı için kubbenin itmesiyle yan duvarlarda açılmalar olmuş ve geçirdiği ilk deprem sonrasında 558 yılında çökmüştür. Strüktür yeni baştan inşa edildiğinde itmeyi azaltmak için merkezi kubbenin yüksekliği 6,25 m artırılmıştır. Bu strüktür de deprem etkisine dayanamamış ve 989 yılı depreminde batı tarafındaki yarım kubbe, 1346 yılında da doğu tarafındaki yarım kubbe, kemer ve merkezi kubbenin 1/3'ü ile birlikte çökmüştür. Ayasofya'nın günümüze kadar ayakta kalması sürekli olarak yapılan onarım ve güçlendirmeler sayesinde mümkün olmuştur. En etkin güçlendirme Mimar Sinan'ın yapının çevresinde dıştan belli aralıklarla inşa ettiği güçlü 24 taş payandanın yarattığı bir tür kuşaklama etkisiyle sağlanmıştır [74,76].

3.4.4. Yapı malzemesinin dayanımını yitirmesi

Tarihi yapılarda kullanılan taş, tuğla, ahşap, kerpiç gibi malzemeler kullanıma uygun nitelikte olmalıdır. Aksi takdirde zamanla bozulmaya uğramakta ve yapılarda büyük hasarlara sebep olmaktadır. Tuğla malzemelerin iyi pişirilmesi tuğlanın dayanımını artırmaktadır. Uygun koşullarda hazırlanmamış tuğla malzemelerde zamanla aşınma, dökülme, ayrışma ve dağılmalar gözlenmektedir. Taş malzemeler mevsimlik ve günlük sıcaklık farklılığı nedeni ile taş iç yapısındaki farklı minerallerin genleşme-büzülme göstermesi zamanla taş hacminde yorulma yapar ve bu sebeple taşlar dayanıklılığını kaybedip dağılıbilir. Aynı şekilde donma-çözülme olayları da gevrek bir malzeme olan taşın iç yapısında çatlaklar meydana getirerek malzemenin dayanımını yitirmesine sebep olur.. Nem, güneş ışığı ve rüzgar etkisi de taş malzemenin dayanımını doğrudan etkilemektedir. Yağmur ve yeraltı suları ile taşınan kil yapısı taşların içinde şişer ve genişterek malzemeyi hızla aşınmaya uğratar. Resim 3.6'da taş malzemenin zamanla oyulması ve birleşim noktalarında tuzlanma oluşması olayları gözlenmektedir. Ahşap yapı elemanlarında da söz konusu doğal etmenler ve yapıda zamanla oluşan böceklenme, malzemenin önce aşınmasına ve taştan daha büyük bir hızla dayanımını yitirmesine neden olmaktadır [77].



Resim 3.6. Suyun etkisiyle taş malzemedeki oyulma ve tuzlanma [78]

3.4.5. Kötü işçilik ve detay kullanımı

Yapılarda kullanılan malzemelerin iyi nitelikte olmasının yanı sıra uygun teknik ve kalifiye işçilikle bir araya getirilmesi gerekmektedir. Taş yapılarda, blokları birbirine bağlamak için bağlantı elemanı olarak kullanılan metal malzemeler, özensiz işçilik sebebiyle zamanla derzlerden içeri giren nem ile korozyona uğrayarak hacimce büyümektedirler. Paslanan

malzeme, taş malzemeyi ezmekte ve genişip çatlamasına da neden olmaktadır. Bu sebeple demir malzeme korozyona karşı korunma tedbirleri alınarak kullanılmalıdır.

Başka bir hatalı tasarım ve işçilik detayı ise İstanbul Beylerbeyi Sarayı içinde Mermer Köşk'te (Resim 3.7.(a) ve (b)) teras çatı altındaki tavanda nemden kaynaklanan kabarmaların içeride bulunan resimleri tehdit etmesi olarak belirtilebilir. Bu sorun eğimli ve kurşun örtülü bir çatı yapılarak çözülmeye çalışılmıştır.



Resim 3.7. (a) Beylerbeyi Sarayı (yeni) Mermer Köşk'ün teras çatı ve (b) eski görünümü [79]

3.4.6. Yanlış restorasyon uygulamaları

Tarihi eserler zamanla çeşitli sebeplerden dolayı hasar görmekte hatta yıkılmaktadırlar. Bu hasarların giderilmesi için gerekli onarım ve güçlendirme müdahaleleri gerekebilir. Öncelikle söz konusu yapının hasar nedenleri araştırılıp gerekli önlemler alınmalıdır. Hasar durumuna göre uygun müdahale yöntemi, uzman kişiler, mimarlar, inşaat mühendisleri, restoratörler tarafından yine yapının özgünlüğünü yitirmeyecek şekilde yasa ve tüzükler çerçevesinde uygun malzeme ve teknikle seçilmelidir. Günümüzde yapılan birçok yanlış uygulama örneği bulunmaktadır. Resim 3.8'de görüldüğü gibi Şile'de bulunan ve Cenevizliler döneminden bugüne kadar gelen 2000 yıllık Ocaklı Ada Kalesi'ne 2015 yılında uygulanan onarım, yapının farklı bir görünüm kazanmasına neden olmuştur. Resim 3.9'da Ağrı-Doğubeyazıt'ta bulunan İshak Paşa Sarayı, 2011-2014 yılları arasında restore edilmiştir. Tarihi taş yığma yapının üzerine cam, metal ve plastik malzemeden oluşan ve mimari dokuyla hiçbir uyumu olmayan çatı örtüsü yapılmıştır.



Resim 3.8. Ocaklı Ada Kalesi hatalı restorasyon uygulaması [80]



Resim 3.9. İshak Paşa Sarayı hatalı restorasyon uygulaması [81]

3.4.7. Yangınlar, savaşlar ve vandalizm

Türkiye’de ve dünyada sıkça görülen yangınlar, özellikle ahşap strüktürlü konutların ve yerleşim bölgelerinin tahrip olmasında önemli bir etkidir. Günümüzde bu yangınların bir kısmı kasıtlı olarak bir kısmı dikkatsizlik ve ihmal yüzünden çıkmakta ve tarihi yapıların kullanılamaz hale gelerek çoğunlukla yıkılmasına neden olmaktadır. Ancak yapılan yasal düzenlemelerle mevcut yapı tamamen yansa da yerine eldeki verilere göre aynı ölçülerde yapılması öngörülmektedir [74]. Bakımsızlık, yapıyı terk etme, vandalizm (kasıtlı tahrip)

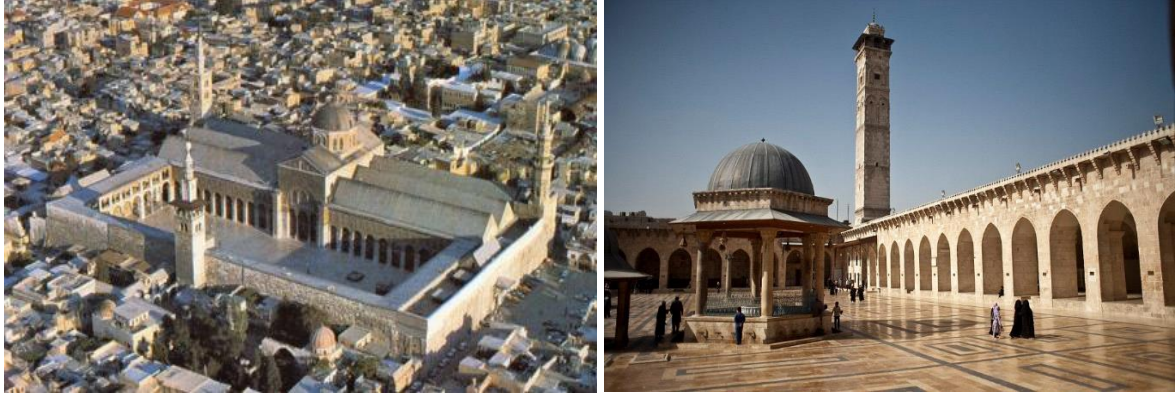
gibi eylemler ile insanlar tarihi yapıların hasar görmelerine hatta yok olmalarına neden olmaktadır.

Savaşlar, günümüzde hala yoğun bir şekilde gündemde yer tutarken sonuçları tüm evreni etkilemektedir. Özellikle günümüz savaş araç ve gereçlerinin yıkım etkisinin artmasına da paralel olarak savaşlar tarihi yapılara büyük zarar vermektedir. Hatta bu zararlar tarihi yapının tamamen yok olmasına da neden olmaktadır. Resim 3.10'da Bosna Hersek'de 1993 yılında savaşta bombalanarak yıkılan tarihi Mostar Köprüsü görülmektedir. Köprü'nün 1997 yılında restorasyonuna başlanarak 2004 yılında kullanıma açılmıştır.

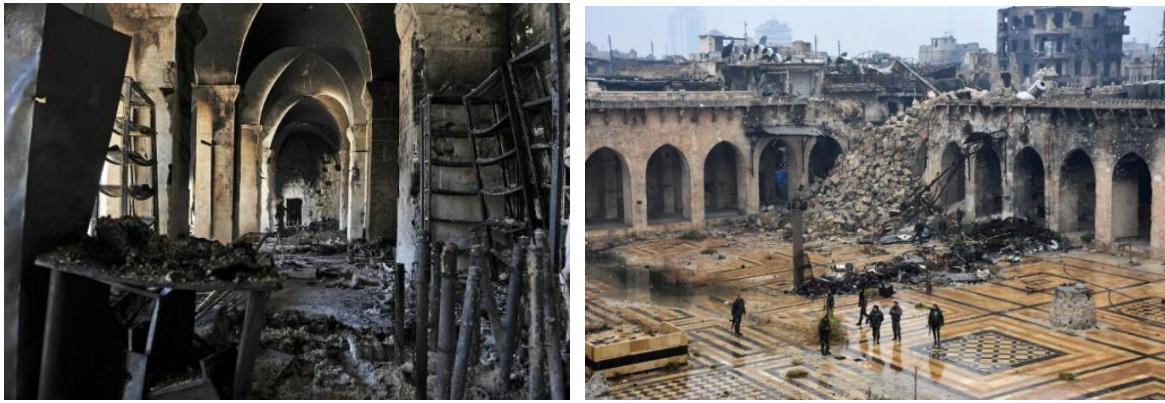


Resim 3.10. Bosna Hersek Mostar köprüsü [82]

Ortadoğu'nun 'açık hava müzesi' olarak nitelendirilen üç büyük dinin kutsal mekanlarına ev sahipliği yapan Suriye'de 2011 yılından günümüze kadar gelen iç ve dış savaşlar nedeniyle sayısız tarihi eser yok olmuştur. Yıkımın en ağır darbesinin hissedildiği Halep'te bulunan 7000 yıllık Emevi Camii ağır hasarlar almıştır. Resim 3.11'de caminin hasar görmeden önceki durumu ve Resim 3.12'de caminin savaş sonrası iç ve dış hasar görüntüleri verilmiştir.



Resim 3.11. Suriye Halep’te bulunan tarihi Emevi Cami [83]



Resim 3.12. Emevi Cami’nin savaş sonrası iç ve dış durumu [83]

3.4.8. Hava kirliliği, trafik ve bayındırlık etkileri

Atmosferi kirlüten çeşitli gazlar ve eriyikler yapıların dış cephelerine zarar vererek zamanla yapı malzemelerinin aşınmasına ve özelliklerini yitirmesine sebep olmaktadır. Cephelerde biriken kurum mimari ayrıntıların algılanmasını engellemekte ve bu kir tabakası altında kalan taşlar özelliklerini yitirerek erimektedir. Zamanla kabaran, dökülen kabuklar sülfatlaşma belirtisi gösterir. Gözenekleri kalsiyum sülfatla dolan taşlar, bozulma derinliğine bağlı olarak yüzeyden ıslanma alanı sınırına kadar, tabaka halinde dökülür.

Tarihi kentlerin insan ve at arabası trafiğine göre düzenlenmiş olan sokak dokusunun kamyon ve benzeri ağır taşıt trafiğine açılması, bu yollar çevresindeki yapılarda titreşimler ve temellere yapılan baskı sonucu ortaya çıkan hasarlara neden olmaktadır. Korunması istenen kentsel dokularda gerekli kararlar alınarak yayalaştırma bölgeleri oluşturmak, trafiği denetlemek ve daha uygun yerlere kaydırmak gerekmektedir.

Yeni yollar açılması, barajlar yapılması gibi bayındırlık etkinlikleri de tarihi çevreyi ve yapıları tehdit edebilmektedir. Değişik tarihi dönemlere ait arkeolojik sit alanları barajların altında kalmıştır. Önlem almadan tarihi binaların bitişiğinde derin kazılar gerçekleştirmek, yer altı geçitleri ve tünelleri yapmak temellere zarar vererek hasara yol açmaktadır [74].

3.4.9. Uzun süreli doğal etkenler

Yapılar, uzun zaman etkin doğa koşullarında gerekli koruma ve tedbirler alınmadığı takdirde hasar görürler. Sıcaklık farkları, nem, donma-çözünme döngüleri, rüzgarlar, seller gibi doğa olayları tarihi yapıların fiziksel görünüm ve strüktürel yapısına zarar verirler. Önlem alınmaması durumunda yapıların yıkılmalarına bile sebep olabilirler.

Isı farkları, donma çözünme döngüleriyle malzemeler yorulur, yıpranır; sıcak yaz günlerinde aşırı sıcak karşısında genleşen malzemeler, soğuk kış günlerinde dona maruz kalır. Suyun, kapilarite ile bina içindeki hareketi de yapı malzemelerinde hasara neden olmaktadır. Zeminden yükselen nem taşıyıcı sisteme gelen yükü fazlaştırdığı gibi, içinde taşıdığı tuzların duvar yüzeyinde buharlaşması sonucu çiçeklenmelere ve duvarın fiziksel ve kimyasal yapısını bozucu etkilere neden olabilmektedir.

Yağmur sularının bozulan bir çatı kaplaması veya deresinden dolayı binadan hızla uzaklaştırılamaması, yosun ve otların gelişmesi ve buna bağlı olarak ahşap malzeme de mantarlaşmaya sebep olmaktadır. Ciddi hasarların başlangıcı olabilecek bu bozulmaların sürekli bakımla giderilmesi gerekir.

Rüzgarın taşıyarak getirdiği ve çatılara, duvar oyuklarına, boşalmış derzlere yerleştirdiği tohumların gelişmesiyle birçok bakımsız binanın cephesinde bitkilerin büyümesi gözlenmektedir. Rüzgar, özellikle deniz tuzu ve kumlarla birlikte etkidiğinde hızlı ve ciddi yüzey aşınmalarına neden olabilmektedir.

Dalgalar da sürekli etkileriyle kıyı yapılarında, rıhtım ve limanlarda aşınmaya ve yıpranmalara neden olmaktadır. Dalgalar, rıhtım ve benzeri türdeki yapıların altındaki zemini oyarak yakın yapıların temellerinin zayıflatmaktadır [74].



Resim 3.13. Dalga etkisine maruz kalmış Sinop Kalesi Dış Kuzey Surları (Çetin Tek Arşivinden)

4. YIĞMA KAGİR YAPILARIN YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI, MODELLEME VE ANALİZ TEKNİKLERİ

Yığma kagir yapıların analizlerine yönelik sonuç fikri yürütmek için öncelikle yapıya etki eden yüklerin, yapı üzerindeki davranışları hakkında doğru bilgiye sahip olmak gerekmektedir. Yapının bütününe bakıldığında, birim eleman ve bağlayıcı elemandan oluştuğu yani heterojen bir yapıya sahip olduğu ve dolayısıyla farklı elemanların bölgesel zorlamalarda farklı davranışlar göstereceği bilinmelidir.

4.1. Yığma Yapıların Statik ve Dinamik Yükler Altında Davranışı

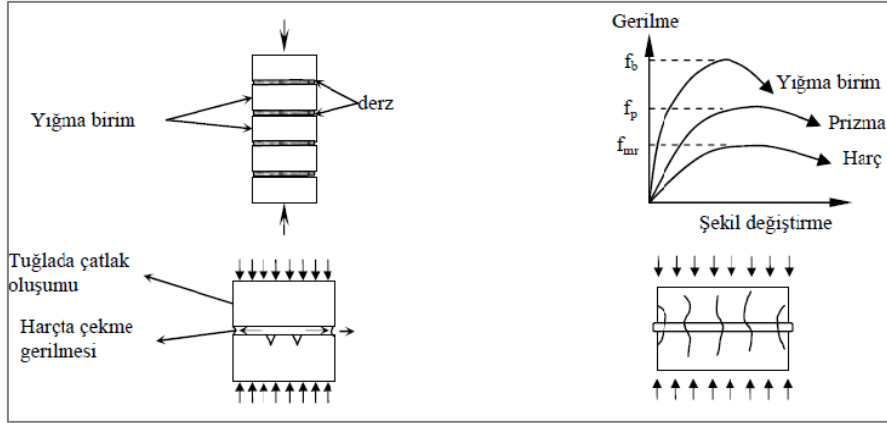
Yığma kagir duvarlar; kerpiç, tuğla ve taşın harç ara elemanı ile bağlanarak oluşan heterojen yapıdaki esas taşıyıcı yapı elemanlarıdır. Yığma duvarların çeşitli yükler altındaki davranışları incelenirken esas birim elemanın (tuğla, taş ya da kerpiç), harcın ve birim eleman-harç arasındaki aderansın davranışı önem kazanmaktadır. Heterojen olan yığma duvarlarda meydana gelecek deformasyonlar; duvara etkiyen yüklere göre değişkenlik göstermektedir. Bu bölümde yığma yapıların statik ve dinamik yükler altındaki davranışları irdelenmiştir.

4.1.1. Statik yükler altında yığma yapıların davranışı

Yığma yapılar statik yükler altında eksenel basınç, eksenel çekme, eğilme ve kayma etkilerine maruz kalırlar.

Eksenel basınç etkisi

Eksenel basınç altında, kuvvetten ötürü harç biriminde yatay doğrultuda çekme kuvvetleri oluştururken yığma birimler üzerinde düşey doğrultuda çatlak oluşumuna sebep olurlar. Şekil 4.1. de görüldüğü gibi harç ile taş veya tuğlanın birim deformasyon özelliklerinin farklı olmasından dolayı yığma birim elemanlar arasındaki harç plastik gibi davranır ve basınç gerilmesine maruz kaldığında oldukça büyük yatay birim deformasyon oluşur. Yatay yönde oluşan deformasyon tuğla ya da taşın düşey doğrultuda çatlamasına neden olur. Düşey yükler altında, taş veya tuğlada çekme kırılması olduğundan, bu birim elemanların çekme dayanımları büyük önem kazanır [84].



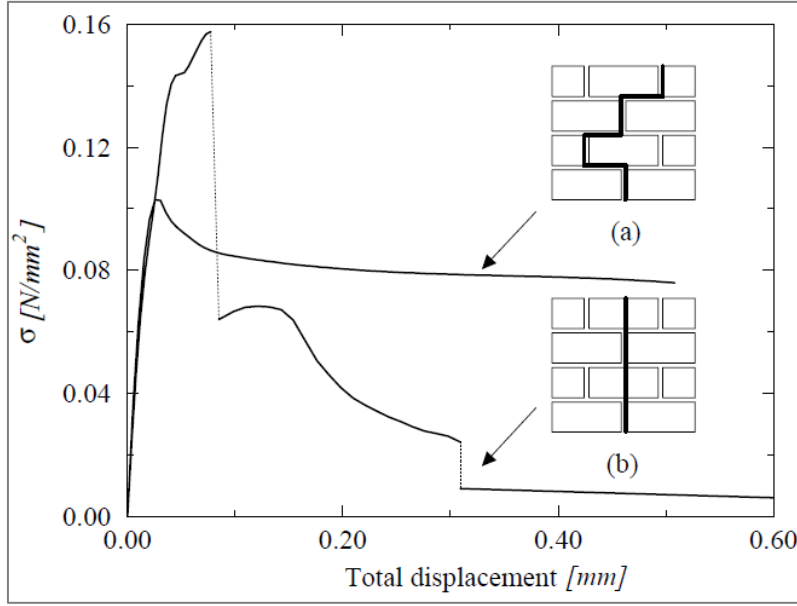
Şekil 4.1. Eksenel basınç altında yığma birim ve harç birimin davranışı [84]

Eksenel çekme etkisi

Yatay derze dik olan çekme yükleme için, kırılmaya genellikle yatay derz ve birim eleman arasındaki nispeten düşük çekme bağ dayanımının yetersizliği neden olur. Kaba bir yaklaşım olarak, yığma birim çekme gerilmesi, bağlantı ve birim eleman arasındaki çekme bağ dayanımına eşit olacağı söylenebilir.

Yığma yapılarda, düşük çekme dayanımlı birim elemanlar ile yatay derz ve birim eleman arasında daha iyi çekme bağ dayanımı olduğu varsayım söz konusudur. Örneğin; yüksek mukavemetli harç ve bir zıvana etkisi oluşturan birçok küçük delikli birim eleman kullanılması durumunda çökme, birim elemanın çekme dayanımını aşan gerilmelerin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Yani bu durumda yığma yapının çekme gerilmesi birim elemanın çekme gerilmesine eşit olabilir.

Yığma yapılarda eksenel çekme etkilerinden oluşan deformasyonlar iki şekilde meydana gelir. Şekil 4.2’de de görüldüğü gibi ilk deformasyon şekli olarak; birim eleman ile harç arasındaki aderansın kaybolmasından kaynaklı zigzag şeklinde meydana gelen deformasyonlar söz konusudur. İkinci deformasyon şeklinde ise yatay derze dik doğrultuda yığma birim elemanda ve harçta çekme eksenine dik meydana gelen deformasyonlardan söz edilebilir. Birinci deformasyon şeklinde tipik bir gerilme- yer değiştirme grafiği bir müddet sonra sabit gerilme ile uzamanın devam ettiğini göstermektedir. İkinci deformasyon modelinde gerilme-şekil değiştirme grafiği ise gerilme tepe noktaya ulaşır aşamalı olarak sıfır noktasında yer değiştirmeye yumuşak bir geçiş yapmaktadır. Kırılma noktaları düşey derz bölgelerini ifade etmektedir [85].



Şekil 4.2. Eksenel çekmeye maruz deney numunelerindeki deformasyonlar ile gerilme-şekil değiştirme diyagramları [85]

Kesme (kayma) etkisi ve eğilme

Yığma yapı elemanlarının dizilim şekillerine bağlı olarak kayma gerilmeleri, birleşim noktalarında oluşan kayma ve diyagonal kayma yani aynı doğrultu üzerinde birbirine ters yönde yüklemelere maruz kalma durumu olmak üzere iki şekilde gerçekleşmektedir. Birleşim noktalarında oluşan kayma kırılması, komşu ana birim elemanlarının arasındaki harcın yatay yönde oluşan ötelenmeye karşı koyduğu direnç sonucunda oluşur. Diyagonal kayma kırılması ise yığma yapı elemanında kesme kuvvetinin etki ettiği doğrultuya göre belli bir açıyla oluşan kayma gerilmesi sonucunda meydana gelmektedir.

Yığma duvarlarda ve diğer yapı elemanlarında, kesme kuvvetleri normal şartlarda birim elemanların birleşim dizilimlerine paralel yönde etki eder. Diyagonal çekme kırılmasının önlenmesi için de yığma yapı elemanını oluşturan birim elemanlar ile harç arasında iyi bir bağlantı sağlanması gerekmektedir [84,86].

Yığma yapılar, genellikle gevrek malzemeden yapılırlar ve ani çekme kırılmalarına karşı zayıf direnç gösterirler. Bu nedenle eğilmeden meydana gelen çekme gerilmeleri öncelikle birleşim yerlerinden başlamak üzere kırılmalar meydana getirir. Bu kırılmanın ardından dengesi bozulan yapı elemanında çatlaklar artar ve yapının tamamının veya bir kısmının göçmesine sebep olur [57].

4.1.2. Dinamik yükler altında yığma yapıların davranışı

Yığma yapılar birim ve bağlayıcı elemanlardan meydana gelmelerinden dolayı heterojen bir bütünlüğe sahip olup sünek bir davranış sergilemezler. Bu sebeple, dinamik yükler altındaki davranışları hakkında yorum yapmak oldukça karmaşık ve zordur. Yığma yapıların dinamik etkiler altındaki davranışları hakkında yorum yapabilmek için mod şekilleri, sönüm oranları ve periyotları gibi dinamik özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak gerekmektedir. Bu bilgiler mevcut yapılardan bazı zor deneysel yöntemlerle elde edilmekte ve çoğu zaman yapılan kabuller doğrultusunda yorumlanabilmektedir. Tasarım aşamasındaki bir yığma yapının deprem etkileri altındaki davranışları hakkında yorum yapmak için ise ilgili yönetmeliklere başvurulmaktadır.

4.2. Modelleme Yöntemleri

Mevcut ya da tasarım aşamasındaki bir yapının davranışları hakkındaki doğru bilgiyi edinmek için yapının sayısal ortama aktarılması yani matematiksel olarak modellenmesi gerekmektedir. Matematiksel modelleme ile yapının tamamının, belli bir bölümünün ya da taşıyıcı elemanlarının çeşitli yükler veya fiziksel etkiler altında gerçek davranışları hakkında bilgi edinilebilir. Tarihi yapıların yapısal analizlerinin en önemli aşaması sayısal modellenmesidir. Sayısal modelleme, malzeme özellikleri farklı ve değişken kesit geometrisine sahip taşıyıcı sistem elemanlarının mekaniğin temel prensiplerine göre doğru ve uyumlu bir şekilde matematiksel terimlere dönüştürülmesi olarak tanımlanabilir [87].

Yığma yapıların davranışları hakkında yorum yapmak günümüzde yaygın olarak kullanılan yapı malzemeleri olan betonarme ve çelik gibi malzemelerden daha zordur. Bu nedenle yığma yapıların matematiksel modellenmesi aşamasında birçok sadeleştirme yapılması yorumlama aşamasında kolaylık sağlayacaktır.

Toker ve Ünay (2004) çalışmalarında yapıların çeşitli yük ve çevresel etkiler altındaki davranışlarını, deformasyonları ve yapı elemanlarında oluşan kuvvetleri doğru bir şekilde elde etmek için yapılacak olan matematiksel modellemenin temel prensiplerini aşağıdaki şekilde belirtmişlerdir [88]:

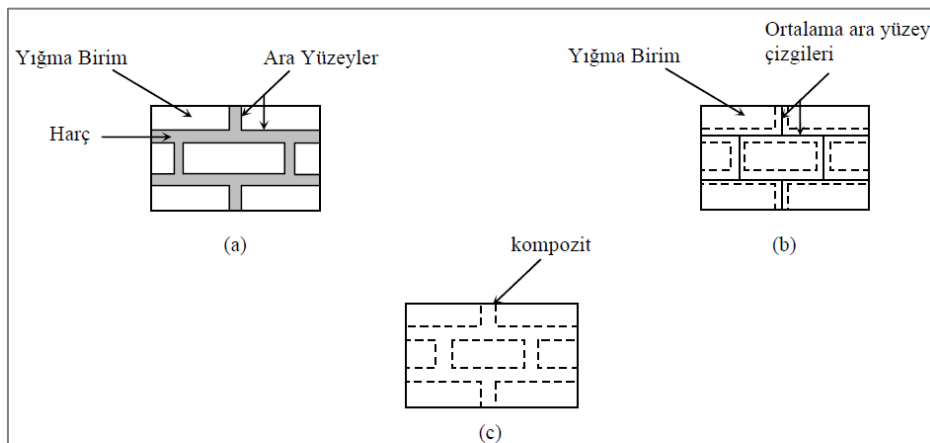
En basit olan model her zaman en iyi sonucu verendir. Analizin amacının ve kapsamının

dışına çıkan daha ayrıntılı ve karmaşık modeller hata riskini artırır.

Matematiksel modeli oluşturan elemanların boyutları seçilirken, analiz için gerekli olan bütün strüktürel etkiler göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin bir kemerin analizinde, eğer burulma momentinden dolayı oluşan deformasyon hesaplanacaksa, modelde kemeri tanımlayan eleman, eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve burulma momenti değerlerini verecek şekilde boyutlandırılmalı ve kesit özellikleri bu değerlerin sonuçlarını verecek şekilde tanımlanmalıdır.

Yapının tamamını tanımlayan büyük bir modelin bir bölümünü ayırarak yapılan model, bölümün ya da elemanın ayrıntılı davranışını incelemek için yeterli değildir. Ayrıntılı davranış için sınır koşullarını ve bağlantı şekillerini doğru bir şekilde tanımlayan modeller gereklidir.

Günümüzde bilgisayar teknolojisinin hızla gelişmesiyle, yapıların sayısal modellemesi ve analizleri daha hızlı ve az zamanda çözümlenebilir hale gelmiştir. Fakat yığma yapılarda homojen bir yapı olmaması nedeniyle, sayısal modelleme ve analiz konusunda bazı sıkıntılarla karşılaşmaktadır. Bu durumda daha önce yapılmış araştırma ve deneylerden elde edilmiş kabullere uygun olarak sayısal modelleme teknikleri geliştirilmiştir. Bunlar; detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme olmak üzere sınıflandırılmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Yığma duvarlarda modelleme teknikleri (a) detaylı mikro modelleme (b) basitleştirilmiş mikro modelleme (c) makro modelleme [85]

Mikro modelleme yöntemleri; yığma yapı elemanlarının detaylı incelenmesi gereken çalışmalarda uygun görülürken makro modelleme yöntemi, büyük ve karmaşık yığma yapı sistemlerinde tercih edilmektedir. Olmati vd. (2019) makalelerinde detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme yöntemlerinin uygulandığı çalışmalar hakkında araştırma yaparak en uygun yöntemin malzemenin mekanik karakterizasyonuna göre seçileceğini ve son yıllarda basitleştirilmiş modelleme tekniklerinin yaygın olarak kullanıldığını belirtmişlerdir [89].

4.2.1. Detaylı mikro modelleme yöntemi

Detaylı mikro modelleme yaklaşımında, yığma duvarlarda tüm birim elemanlar (tuğla, taş) ve ara elemanlar (harç) sürekli elemanlardır ve tek tek modellenmektedirler. Her elemanın mekanik karakteristikleri kendine özgü dikkate alınmaktadır. Malzemeler arası yüzeylerdeki bağlantılar ayrı şekilde tanımlanmaktadır. Bu modelleme yaklaşımında her eleman ayrı modellenerek analiz edildiği için deneysel verilere en yakın sonuçların alındığı gözlemlenmiştir. Ancak çok fazla farklı eleman verisi modellemenin zaman almasına ve zorlaşmasına neden olmaktadır. Bu sebeple kompleks ve detay gerektirmeyen yığma yapı modellemelerinde tercih edilmemektedir. Bu yaklaşımda deformasyonların taş veya tuğla ile harç ara yüzeyinde meydana geleceği varsayımı yapılmaktadır [85].

4.2.2. Basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi

Detaylı mikro modelleme yaklaşımının getirmiş olduğu kısıtlamalar sebebiyle daha büyük boyuttaki yığma yapıların modellenmesi için farklı teknikler geliştirilmiştir. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği Şekil 3.3(b)'de görüldüğü gibi iki yığma birim elemanın arasındaki harç kalınlığının yarısı kadar genişletilerek harç kalınlığının ihmal edildiği varsayılmaktadır ve yığma birim elemanlar ortalama ara yüzey çizgileriyle birbirinden ayrılmaktadır. Dolayısıyla yığma birim elemanların, bu ara yüzey çizgilerinde birbirine bağlanmış bir dizi elastik blok oldukları varsayılmaktadır. Meydana gelebilecek kayma, kırılma gibi deformasyonların bu ara yüzey çizgisinde meydana geleceği kabul edilmektedir [85,90].

4.2.3. Makro modelleme yöntemi

Yığma yapıların doğru bir şekilde modellenmesi özellikle doğrusal olmayan çözümleme teknikleri uygulanması sürecinde önem arz etmektedir. Büyük sistemlerin çözülmesi gereken durumlarda rijitlik matrisinde bilinmeyen sayısının çözüm süresini artırması nedeniyle Lourenço (1996) bu sorun için homojenleştirme tekniğini önermiştir. Homojenleştirme; taş ya da tuğla ile harçtan meydana gelen yapı elemanının tek bir malzeme gibi tanımlandığı modelleme tekniğidir. Makro modelleme yaklaşımında elemanlar süreklidir ve yığma duvarlar homojenleştirilebilen kompozit yapılardır. Yığma duvarların homojenleştirilerek modellenebilmesi için, yığma duvar üzerinde kendisini periyodik olarak tekrar eden elemanter yığma duvar parçalarından yararlanılır [91].

4.3. Yığma Yapıların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizleri

Yığma yapıların karışık geometrisi ve mekanik davranışları hakkında nitel gözlemlerle yorum yapmak oldukça zordur. Son yıllarda bilgisayar teknolojisinin hızla gelişmesiyle beraber yapıların nümerik analizlerinde de büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Bilimsel ve profesyonel topluluklar tarafından ilgi gören yığma yapıların nümerik analizleri hakkında yorum yapmak, bu ilerlemeler sayesinde artık daha kolay bir hale gelmiştir. Yapısal analiz yöntemleri arasında sonlu elemanlar yöntemi, farklı kesit geometrisine ve karmaşık mekanik özelliklerine sahip yığma yapıların analizleri için en uygunu olarak bilinmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminde model, sonlu sayıda elemana bölünmektedir. Elemanların boyutları küçüldükçe problemin hata oranı azalmakta, fakat çözüm süresi uzamaktadır. Modeli oluşturan elemanların her birine sonlu eleman ve birleştikleri köşe noktalarına düğüm noktaları denilmektedir. Her elemanın sahip olduğu düğüm noktalarında bazı serbestlik dereceleri tanımlanmaktadır. Eleman davranışının belirlenmesinde bu serbestlik derecelerini içeren denklemler önemli rol oynamaktadır. Şekil fonksiyonları belirlenen elemanların matrisleri belirlenir. Eleman matrisleri birleşerek sistem matrislerini oluşturur. Düğüm noktalarında ve eleman sınır yüzeylerinde bazı süreklilik sınır şartları sağlandığında yapının matematiksel bir modeli elde edilmekte ve her bir sonlu eleman parçasının davranış denklemlerinin çözülmesi sonucunda tüm taşıyıcı sistemin davranışı belirlenmiş olmaktadır [92].

Sonlu elemanlar yönteminde, problemin analizi, istenen doğruluk derecesi için eleman tipine, eleman sayısına ve eleman yoğunluğunun seçildiği alanın geometrisine bağlıdır [93]. Sonlu elemanlar yönteminin katı cisimler mekaniğinde kullanımı; yer değiştirme (deplasman), denge ve karışık yöntem olmak üzere üç şekildedir [86,94].

Yer değiştirme (deplasman) yöntemi

Bu yöntemde önemli olan düğüm noktalarının yapmış olduğu deplasman miktarlarıdır. Modele ait elemanların rijitlik ve deplasman değişkenleri minimum potansiyel enerji ilkesi yardımıyla elde edilmektedir. Deplasman bileşenleri düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler cinsinden ifade edilmektedir.

Denge yöntemi

Bu yöntemde her elemanın dengeyi sağlayan gerilme alanı ve düğüm noktalarındaki gerilme bileşenleri asıl bilinmeyenler olarak kabul edilir. Gerilmeler elde edildikten sonra deplasmanlar hesaplanmaktadır.

Karışık yöntem

Bu yöntemde deplasmanlar ve gerilmeler her eleman için ayrı kabul edilip, asıl bilinmeyen duruma göre deplasman ya da gerilme olarak hesaplanır.

Sonlu elemanlar yöntemi doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler üzerinde uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntemler TBDY yönetmeliği kapsamında aşağıda açıklanmıştır.

4.3.1. Doğrusal elastik analiz

Yapının doğrusal (lineer) analizi, malzemenin lineer-elastik davranış kabulüne dayanmaktadır. Doğrusal davranış ile yapının limit durumları analiz edilebilir. Ayrıca, yapıda meydana gelen kademeli çatlak ve hasarların incelenmesiyle kullanılabilirlik sınırları da elde edilebilmektedir. Deforme olmuş elemanların rijitliklerinde azaltmalar yapılarak yeniden gerilmelerin dağılımı yardımıyla limit yük analizi de yapılabilmektedir.

Doğrusal elastik analizde sistem sonlu sayıda elemanlara ayrılmaktadır. Sistemi oluşturan elemanların her biri düğüm noktalarında diğer elemanın düğüm noktasıyla birbirlerine bağlandıkları kabul edilmektedir. Daha sonra sonlu eleman yüzeyinin şekil değiştirmesi, düğüm noktalarının yer değiştirme parametrelerine bağlı olarak ifade edilmektedir. Bu değişkenler; yer değiştirme bileşenleri, dönmeleri ve burulma eğriliği gibi yer değiştirme vektörlerini içermektedir. Yani; eleman yer değiştirmeleri, seçilen şekil fonksiyonu vasıtasıyla düğüm noktası yer değiştirmelerine bağlı olarak belirtilmektedir.

Eğilme hesaplarında düğüm noktalarının deplasman parametrelerinin belirlenmesi, sistemin deplasman yüzeyinin ve her düğüm noktasındaki kesit tesirlerinin bulunması için yeterlidir. Seçilen deplasman parametreleri ve şekil fonksiyonu yardımıyla sistemin malzeme özelliklerine göre rijitlik matrisi, sisteme etkiyen yüklerin durumuna göre de yük vektörü hesaplanmaktadır. Eleman rijitlik matrisi ve yük vektöründen yola çıkarak sistemin rijitlik matrisi ve yük vektörü bulunmaktadır. Buradan da sınır şartları göz önüne alınarak düğüm noktası bilinmeyenleri hesaplanmaktadır [95].

Analiz yöntemlerinden en yaygın doğrusal elastik yöntem uygulanmakta, tek ve çok modlu olan yöntemlerde mevcuttur. Tek modlu olan Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ve çok modlu olan Mod Birleştirme Yöntemi olarak bilinmektedir.

Eş değer deprem yükü

Bu yöntem; gerçekte dinamik bir etkiye sahip olan depremin, eşdeğer deprem yükü yöntemi ile yatay statik bir yüke dönüştürülerek yapıya etkiletilmesidir. Bu yarı dinamik yöntemin hesabı yapılırken yapının birinci doğal titreşim periyodu kullanılmaktadır. Yapının ağırlığı, sünekliği, zemin bilgileri, bulunduğu deprem bölgesi göz önünde bulundurularak eşdeğer deprem yükü hesaplanmaktadır. Bu hesap yönteminde yapının elastik ötesi davranışından dolayı oluşan kapasite artırımını ve depremin yapıdan talebinde olan azalma, R_a Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı ile hesaba katılır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli husus ise yapının deprem yükü azaltma katsayısı ile ilgili olan elastik ötesi şekil değiştirmeleri yapabilme (süneklik) özelliğinin bulunması ve bu tür hasarın ilgili deprem etkisi altında kabul edilebilir olmasıdır [69,77,96].

Türker (2010) yüksek lisans tez çalışmasında, mevcut bir yığma yapının deprem yükleri altında mekanik davranışlarının nümerik analiz yöntemleriyle gösterilmesini amaçlamıştır. Bu yapının yapısal davranışlarını, dinamik yükleri altında uğradığı hasar çeşitlerini, kullanılan malzemelerin deneysel olarak incelemiştir. TBDY' nin klavuzluğunda binayı lineer eşdeğer deprem hesabı analiz yöntemiyle irdelemiştir. Vaka çalışması olarak İ.Ü. Eczacılık Fakültesi Dekanlığını (A Blok) kullanmıştır. Bu tezde, yapının bütün duvarlarının basınç gerilmelerini sağladığı yalnız kayma gerilmelerini sağlamadığı belirlenmiştir. Kayma gerilmelerinin sağlanamamasının ise duvar kalınlıklarının az olması ve kat yüksekliklerinin fazla olmasından kaynaklandığı ortaya çıkmıştır. Yapıda rijitlik ve kütle merkezlerinin çakışmamasından dolayı büyük burulma momentlerinin oluştuğunu gözlenmiş ve yapı merkezinde yapılacak olan güçlendirmenin binayı depreme karşı daha dayanıklı hale getireceğini vurgulamıştır [97].

Mod birleştirme yöntemi

Bu yöntem dinamik analiz yöntemi olup yaklaşık denklemlerle yapının doğal titreşim periyodu hesaplanarak deprem kuvvetinin bulunmasıyla gerçekleştirilir. Maksimum iç kuvvetler ve yer değiştirmeler, yapıda yeterli sayıda doğal titreşim modunun her biri için hesaplanan maksimum katkıların istatistiksel olarak birleştirilmesiyle elde edilir. Elde edilen mod şekillerinden yapının deprem davranışı ve deprem etkisinde ortaya çıkan gerilme ve yer değiştirmelerden de yapının en çok zorlanan bölümleri anlaşılabilir.

Doğrusal elastik analizden dolayı, genellikle gerilmeler büyük değerlere ulaşabilir. Ancak, yapının doğrusal olmayan davranışı sebebiyle ortaya çıkan bölgesel ezilmeler, gerilmelerin sınırlı kalmasını sağlar. Meydana gelmesi beklenen gerilmeler azaltılmış deprem etkilerinden, yer değiştirmeler ise azaltılmamış deprem etkilerinden elde edilir.

4.3.2. Doğrusal olmayan elastik analiz

Deprem etkisi altında mevcut binaların yapısal performanslarının belirlenmesi ve güçlendirme analizleri için kullanılacak doğrusal elastik olmayan hesap yöntemlerinin amacı, verilen bir deprem için sünük davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme istemleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet istemlerinin hesaplanmasıdır. Bu istem büyüklükleri,

yönetmelikle verilen şekil değiştirme ve iç kuvvet kapasiteleri ile karşılaştırılarak, kesit ve bina düzeyinde yapısal performans değerlendirmesi yapılır [98,99].

Tarihi yapılarda doğrusal elastik olmayan yöntem kullanılırken iki önemli hususa özen göstermek gereklidir. İlk husus olarak yapıda yeterli elastik ötesi şekil değiştirme kapasitesinin yani sünekliğin bulunması gerekmektedir. Diğer husus ise doğrusal olmayan analiz sonuçlarının, analiz ve malzeme parametrelerine bağlılığının yüksek olması nedeniyle sayısal sonuçların kullanılabilir olması için bu parametrelerin olabildiğince gerçekçi olarak belirlenmesi ve analizde bu parametrelerin değişim aralığının da incelenmesinin gerekliliğidir [77].

Artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi

Artımsal eşdeğer deprem yükü yönteminin amacı birinci (deprem doğrultusunda hakim) titreşim mod şekli ile orantılı olacak şekilde, deprem istem sınırına kadar tek düze olarak adım adım arttırılan eşdeğer deprem yüklerinin etkisi altında doğrusal olmayan itme analizinin yapılmasıdır.

Tek modlu statik itme analizi olarak da bilinen bu yöntemde, artan yükler altında yapı elemanlarındaki iç kuvvetlerin yeniden dağılımı dikkate alınarak gerçekçi sonuçlar elde edilmektedir. Eşdeğer statik yatay yüklerin yapıya adım adım arttırılarak uygulandığı bu yöntemde, ilk adımlarda yapı doğrusal elastik davranır. Daha sonraki adımlarda, taşıyıcı yapı elemanlarında yer değiştirme ve şekil değiştirme meydana gelir, plastik mafsallar oluşmaya başlar ve yapı elastik ötesi (plastik) davranış gösterir. Son adımda maksimum değerler hesaplanır [96,99].

Artımsal mod birleştirme yöntemi

Artımsal Mod Birleştirme yöntemi ile çözümde modal kuvvetler binaya birbirinden bağımsız şekilde ayrı ayrı etkilerek statik itme analizi yapılır ve göz önüne alınan bütün modlara ait modal kapasite diyagramları ve modal yerdeğiştirme istemleri elde edilir. Elde edilen modal değerler bir istatistik yöntemle birleştirilerek taşıyıcı sistemde meydana gelen yer değiştirme, plastik dönme ve iç kuvvet istemleri hesaplanır [96].

Artımsal Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ile itme analizinin en önemli sakıncası, taşıyıcı sistemin deprem davranışının sadece birinci (deprem doğrultusunda hakim) doğal titreşim modundaki davranıştan ibaret olduğunun varsayılmasıdır. Bu nedenle yöntem, çok katlı olmayan ve deprem doğrultusuna göre planda simetrik veya simetriğe yakın olan binalarla sınırlıdır [99].

Zaman tanım alanında hesap yöntemi

Yapıların zaman tanım alanında doğrusal elastik ya da doğrusal elastik olmayan deprem hesabı için, yapay yollarla üretilen, daha önce kaydedilmiş veya benzeştirilmiş deprem yer hareketleri kullanılabilir. Doğrusal veya doğrusal olmayan hesapta; üç yer hareketi kullanılması durumunda sonuçların maksimumu, en az yedi yer hareketi kullanılması durumunda ise sonuçların ortalaması tasarım için esas alınmaktadır [99].

Bu kapsamda yapılan bazı çalışma örnekleri aşağıda özetlenmiştir.

Güllü ve Karabekmez (2016); Gaziantep Kurtuluş Cami'sinin deprem etkisi altındaki davranışının incelenmesini ve zaman-tanım alanında hesaba katılan deprem hareketinin literatürdekilere alternatif olarak hızlı-doğrusal olmayan (fast-nonlinear) analiz (FNA) yöntemi kullanılmışlardır. Hem sonlu elemanlar modeli hem de deprem analizleri SAP 2000 paket programı kullanmışlardır. Deprem etkisi altında Kurtuluş Cami'sinde oluşan yer değiştirme, ivme, gerilme, taban kesme kuvveti ve değişik modlardaki doğal titreşim periyotları hesaplayarak bulguları değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak en büyük yer değiştirme 76 mm ile minarenin en üst noktasında olduğunu kabul edilen oranın üzerinde olmadığı için risk taşımadığını göstermişlerdir. En yüksek ivme değerinin minarenin tepesinde olduğu ve diğer yerlerde oluşan ivmelerden oldukça büyük olmasının risk oluşturabileceğini belirtmişlerdir. Camideki en büyük çekme gerilmesinin 4,59 MPa olarak çıkması sınır değerlerinin aşıldığını ve bunun sonucunda hasarların oluşabileceğini, en büyük basınç gerilmesinin 6,94MPa olarak hesaplanmasının müsaade edilen gerilme değerinin altında olduğu için tehlike arz etmediğini belirtmişlerdir. Deprem taban kesme kuvveti, bina ağırlığının X-yönünde %44'ü, Y-yönünde ise %43'ü olarak bulunmuştur. Bu kuvvetlerin, Gaziantep merkezi temsil eden etkin yer ivmesi değerlerinden (0,2g-0,3g) daha büyük bir etki göstereceğini, caminin doğal titreşim periyodu 0.5 s bulunmuş olup senaryo

depremlerle cami birbirlerine yakın periyotlarda seyretmekte olduğunu bu durumun rezonans olasılığını güçlendirdiğini ifade etmişlerdir [100].

Aydın (2012) çalışmasında literatürdeki performans tahmin etme ve modelleme yöntemlerinin mevcut betonarme yapılara uygulandığı takdirde gerçek değerlere ne kadar yakın sonuç verdiğini araştırmıştır. Bu amaçla 23 Ekim 2011 Van depreminde Alaköy/Van’da ağır hasar görmüş 3 katlı betonarme bir yapıyı inceleyerek DBYBHY-2007’de belirtilen doğrusal eşdeğer deprem yükü, artımsal eşdeğer deprem yükü ve doğrusal olmayan zaman tanım alanında hesap yöntemlerini kullanmıştır. Sonuçları olarak, yapının performans analizini ve deprem sonrası yapıda oluşan hasarları değerlendirerek hesap yöntemlerinin doğruluğunu ve güvenilirliğini saptamıştır [101].

5. KALE FORMU PROTOTİP MODELLEME VE STRÜKTÜREL BOZULMA ANALİZLERİ

Kaleler ve şehir surları ilk çağ ve orta çağda genellikle savunma amaçlı inşa edilmiş askeri yapılardır. Ancak popüler kültürde kale ya da şato sözcüğü daha çok orta çağda derebeylerin korunaklı özel konutları da olarak bilinmektedir.

Kaleler planlanırken askeri savunma stratejisi ve inşa edildikleri bölgenin topografyası; geometrik biçimlerinin ortaya çıkmasında en önemli rolü oynamaktadır. Bununla birlikte, mimari bir plan anlamında bazı sınıflandırılmalar da yapılabilir. En sık kullanılan kale planları; kuleler, burçlar ve yüksek kalın duvarlarla çevrili avlulardır. Bu plan tipini; kalelerin yapılış amaçları göz önünde bulundurulduğunda belirli bir şekil ya da mimari tarz ile tanımlamak pek mümkün değildir [102].

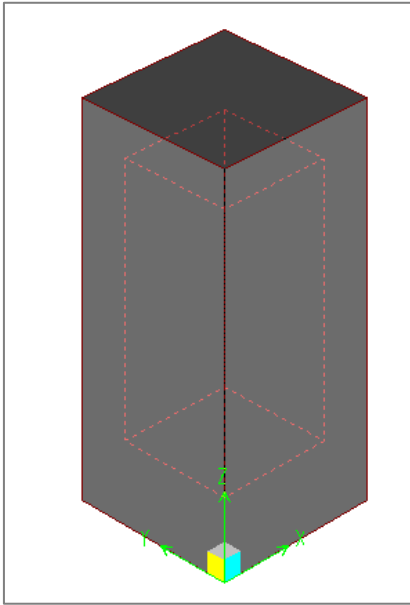
Bu form yapıların modellenmesi ve yapısal analizlerinde bilgisayar sistemlerinin ve programların hızla gelişmesiyle son yıllarda büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Alışılmamış ve farklı geometrik biçim sergileyen, yığma taş ya da tuğla yapım sistemiyle inşa edilen yapıların strüktürel davranışı klasik mekanik bilgileri ve deneyimle belirlenebilir. Günümüzde tarihi yapı olarak tanımlanan binaların ve diğer yapıların inşa edildikleri dönemde strüktürel davranışı veya dayanımı da bu şekilde belirlenmektedir. İyi bir mekanik ve yapı bilgisiyle, bu alandaki deneyimle en karmaşık şekle sahip yapıların bile çeşitli yük ve çevresel etkiler altında gösterdiği tepkiler ve davranış yaklaşık olarak saptanabilir.

Kale ve sur duvarlarının inşasındaki ilk amaç; dışarıdan etki edebilecek büyük kuvvetlere karşı koymaktır. Bu nedenden dolayı diğer yapılara göre çok daha büyük kesit özelliklerine daha fazla dayanım gösterebilecek geometrik yapıya sahiptirler. Tarih boyunca kale ve sur duvarlarının çok güçlü mekanik silahlardan dolayı hasar gördüğü, yıkıldığına tanık olunduğu halde binlerce yıl geçmişe rağmen çoğu da hala ayakta durmaktadır. Birçok kale ve sur duvarları da bu etkenler altında yıkılmış veya devrilmiştir. Bunun en önemli nedeni malzeme bozulması ve zemin problemlerinden dolayı ortaya çıkan denge sorunlarıdır. Bu iki faktörün etki ve sonuçlarını sonlu elemanlar hesap yöntemiyle incelemek için farklı geometrik şekle sahip üç tip kale burcunun prototip matematiksel modeli hazırlanmıştır. Bu burçların malzeme kaybı senaryosu ile geometrik kararlılığı ve statik denge değişimi kademeli seri analizlerle incelenmiştir.

Modellemeler SAP 2000 V.14 programında SOLID eleman olarak modellenmiştir. SAP 2000 yazılımı, global eksen takımında x, y ve z eksenleri farklı gerilmeleri ifade etmektedir.

Bu eksenleri temsilen ifade eden gerilmeler dikdörtgen prizması şeklinde bir model üzerinde Şekil 5.1 de gösterilmiştir.

Global z eksen yönünde meydana gelen gerilmeler; S-33, x eksen yönündeki gerilmeler; S-11, y eksen yönündeki gerilmeler ise; S-22 olarak ifade edilmiştir. S-MAX; çekme kuvvetlerinin neden olduğu bileşke gerilmeleri; S-MIN; basınç kuvvetinin neden olduğu bileşke gerilmelerini tanımlamaktadır. S-MIN ve S-MAX; kendi içlerindeki asal gerilmeleri renk skalası ile değerlendirmektedir.



Şekil 5.1. X-Y-Z global eksen takımının katı model üzerinde tanımlanması

Mühendislik hesap yöntemleri genellikle konvansiyonel yapı formları için geliştirilmiş kalıplar ve yük tanımlarına göre yapılır. Farklı geometrik biçimde ve konumda olan, kendine özgü malzeme özelliklerine sahip özel yapıların strüktürel hesaplarında yapının bütüncül davranışını ve dikkate alınacak yük ve diğer zorlamaların ayrıntılı bir şekilde düşünülmeden seçilmesi, genel mühendislik hesap kurallarına göre doğru kabul edilse bile çoğu zaman yapının gerçek davranışını yansıtmaktan uzak kalmaktadır.

Gelişen bilgisayar yazılımları ve matematiksel modelleme teknikleri sayesinde son yıllarda tarihi yapıların ve anıtların strüktürel davranışları ve dayanımlarının belirlenmesinde büyük

aşamalar kaydedilmiştir. Sonlu elemanlar hesap yöntemi, özellikle karmaşık geometrik formlar ve malzeme karakterlerine haiz olan yığma taş ya da tuğla örgü sistemi ile inşa edilmiş tarihi yapıların ve anıtların strüktürel hesapları için en uygun olanıdır. Hasar görmüş bir tarihi yapının mevcut strüktürel kapasitesinin hesaplanması ya da koruma-restorasyon amaçlı yapılacak işlemlerin yapının strüktürel kapasitesine etkilerinin belirlenmesi amacıyla ayrıntılı hesaplar yapılır. Bu hesaplar yapının malzeme, yapım tekniği, taşıyıcı sistem ve zemin özelliklerini içeren ayrıntılı bilgileri dikkate alınarak, her türlü yük ve dış etkilere göre yapılır.

Tarihi kaleler ve surlar genellikle topografyanın belirlediği düzensiz şekil ve kütle dağılımıyla inşa edilmiştir. Bu nedenle strüktürel davranış ve dayanımlarının hesaplanmasında öncelikle geometrik kararlılığının belirlenmesi gerekir. Mühendislik hesaplamalarında düzenli geometrik formu olan yapılar için bu çok temel ve basit bir işlem gibi görünse de karmaşık geometrik biçim ve kütle dağılımı olan yapılarda bu hesaplar için daha fazla dikkat ve özen gerekir.

Örnek çalışma olarak ele alınan Sinop Kalesi burç ve deniz surlarının strüktürel bozulma nedenlerinin araştırılmasına yönelik hesaplar yapılmadan önce, tarihi kale ve sur yapılarının sayısal analiz yönteminin sistematik bir şekilde incelenmesine yönelik bazı analizler yapılmıştır. Kale burçları ve kuleler genellikle temel geometrik formlardan oluşur. Bunlar sırasıyla, dörtgen (genellikle kare kesit), dairesel kesit ve beşgen, altıgen, yedigen veya sekizgen kesitlerdir. Kale burçları ve surları zamanla yavaş yavaş aşınmanın neden olduğu malzeme kaybı ile yapının statik denge ve kararlılığının bozulması sonucunda yıkım ve hasara uğrarlar. Bu süreci gözlemek amacıyla, üç adet temel geometrik formu simgeleyen, örnek teşkil eden (prototip) hesap modelleri hazırlanmıştır. Bu temel formların statik denge ve kararlılıklarındaki değişim her seferinde aşınma ve malzeme kaybını temsil eden geometrik şekil değişiklikleri uygulanarak kademeli hesaplarla incelenmiştir.

Sonuçlar geometrik form ve aşamalı bir şekilde malzeme kaybı sonucunda ortaya çıkan şekil değişimi ile karşılaştırılmıştır. Bu yüzden, hazırlanan bu üç farklı modelin boyutlarının, kütlelerinin ve kesit düzleminde her iki eksen etrafındaki atalet momentlerinin birbirine yakın değerlerde olmasına dikkat edilmiştir. Şekil 5.2’de gösterildiği gibi, sırasıyla dörtgen (kare) kesit, dairesel kesit ve altıgen kesite sahip modeller tercih edilmiştir.



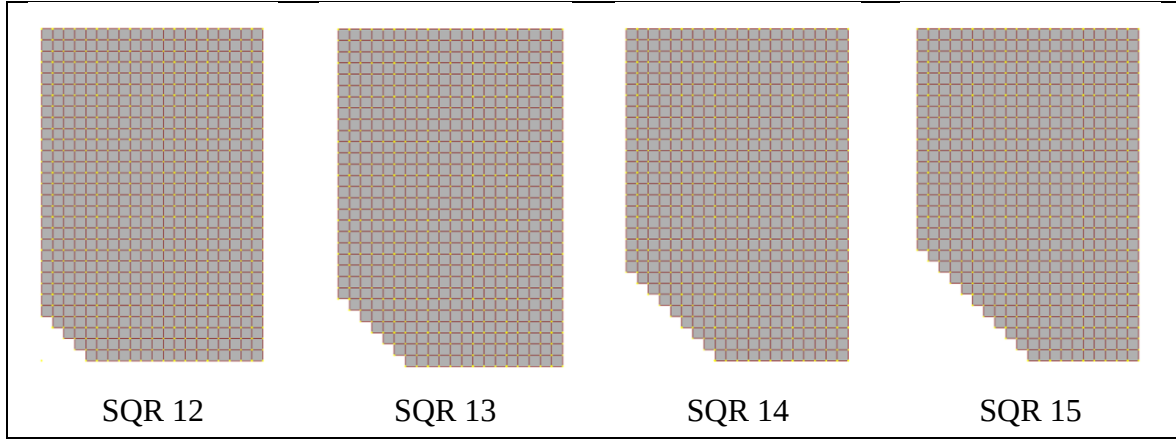
Şekil 5.2. Kademeli hesaplar için hazırlanan örnek teşkil eden (prototype) hesap modelleri

Kademeli hesaplar, x-y düzlemine göre x ekseninden saat yönünün tersine 225 derece açıya karşılık gelen köşeden (plan görünümüne göre sol alt köşe) sırasıyla 2 m, 3m, 4 m ve 5 m yüksekliğe kadar düşey eksene göre 45 derecelik açıyla, kalenin burç duvarlarını temsil eden SOLID (3 boyutlu katı eleman) elemanlarının hesap modelinden çıkartılması suretiyle yapılmıştır.

SQR kod tanımı ile adlandırılan dörtgen kesitli hesap modelinin yüksekliği 15 metre, kesit boyutları $10 \times 10 \text{ m}^2$ şeklindedir. Duvar kalınlığı 1,5 metre, kabul edilen elastisite modülü ise $E=1\,000\,000 \text{ kN/m}^2$ olarak literatür çalışmalarından elde edilmiştir [103,104]. SQR 11 başlangıç hesap modeli olup, 2m, 3m, 4m ve 5 m yüksekliğe kadar malzeme kaybı modellemeleri ise sırasıyla SQR 12, SQR 13, SQR 14 ve SQR 15 olarak kodlanmıştır. Yapılan modellemelerin malzeme kaybı (Şekil 5.3.) ile oluşan ağırlık değerleri Çizelge 5.1. de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Dörtgen kesitli (SQR) modelin analiz verileri

SQR kodu	Kütle Azalma Oranı (%)	Ağırlık (kN)	Düğüm Noktası	SOLID Eleman
SQR 11	Başlangıç Kütlesi	16830	8432	6120
SQR 12	%0,3	16775	8413	6100
SQR 13	%0,9	16676	8375	6064
SQR 14	%1,89	16511	8307	6004
SQR 15	%3,26	16280	8207	5920

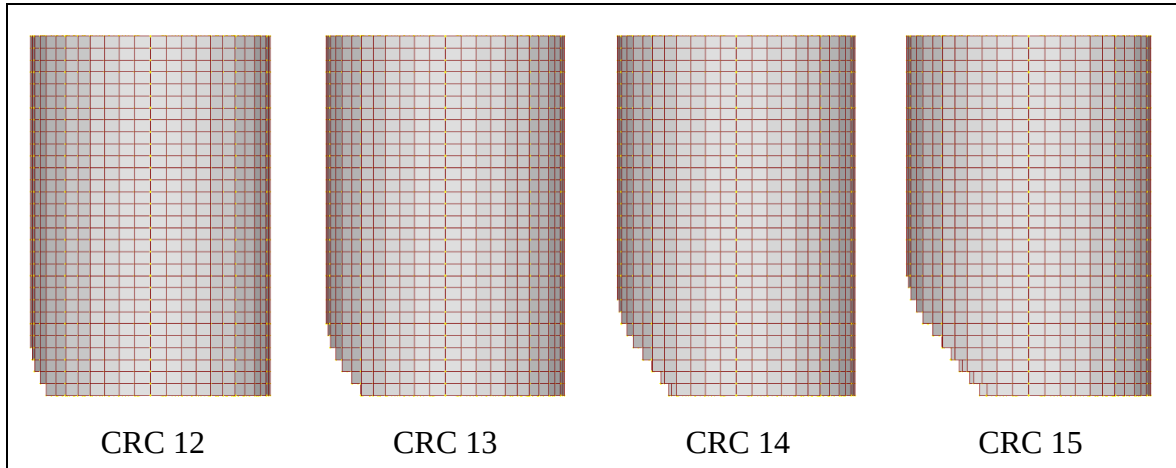


Şekil 5.3. Dörtgen kesitli (SQR) hesap modeli serisi

CRC kod tanımı ile adlandırılan dairesel kesitli hesap modelinin yüksekliği 15 metre, çapı 10 metre, duvar kalınlığı ise 1,5 metredir. Kabul edilen elastisite modülü $E=1\ 000\ 000\ \text{kN/m}^2$ 'dir [103,104]. CRC 11 başlangıç hesap modeli olup, 2m, 3m, 4m ve 5 m yüksekliğe kadar malzeme kaybı modellemeleri ise sırasıyla CRC 12, CRC 13, CRC 14 ve CRC 15 olarak kodlanmıştır. Yapılan modellemelerin malzeme kaybı (Şekil 5.4) ile oluşan ağırlık değerleri Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Dairesel kesitli (CRC) Modelin Analiz Verileri

CRC kodu	Kütle Azalma Oranı (%)	Ağırlık (kN)	Düğüm Noktası	SOLID Eleman
CRC 11	Başlangıç Kütlesi	13067	5953	4320
CRC 12	%0,9	12948	5920	4282
CRC 13	%2,18	12782	5860	4228
CRC 14	%4,01	12543	5768	4150
CRC 15	%6,42	12228	5648	4047

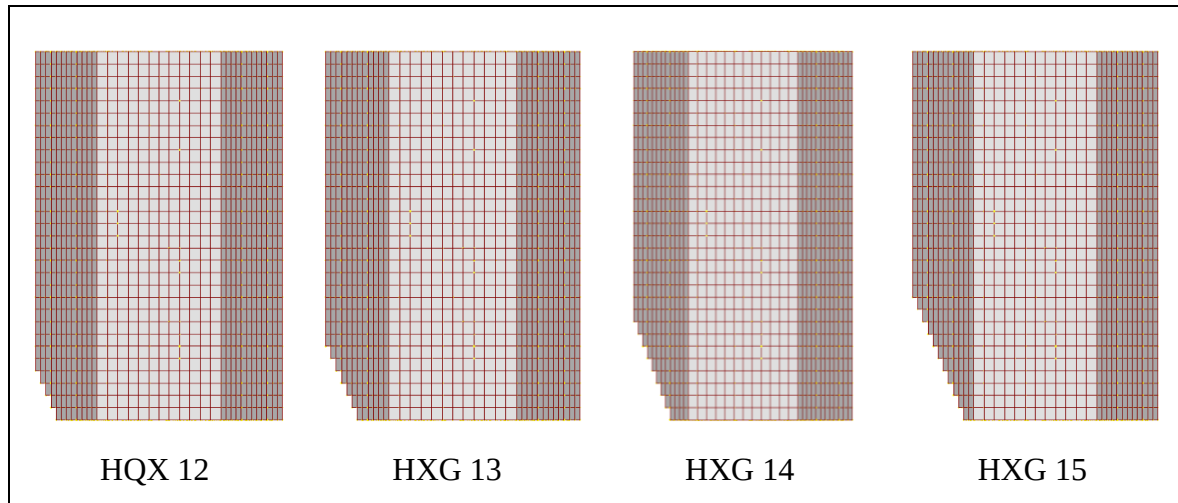


Şekil 5.4. Dairesel kesitli (CRC) hesap modeli serisi

HXG kod tanımı ile adlandırılan altıgen kesitli hesap modelinin yüksekliği 15 m, en geniş kesit boyutu 10 m en dar kesit boyutu 8,66 m'dir. Duvar kalınlığı 1,5 metre, kabul edilen Elastisite modülü ise $E=1\ 000\ 000\ \text{kN/m}^2$ 'dir [103,104]. HXG 11 başlangıç hesap modeli olup, 2m, 3m, 4m ve 5 m yüksekliğe kadar malzeme kaybı modellemeleri ise sırasıyla HXG 12, HXG 13, HXG 14 ve HXG 15 olarak kodlanmıştır. Yapılan modellemelerin malzeme kaybı (Şekil 5.5) ile oluşan ağırlık değerleri Çizelge 5.3'de gösterilmiştir.

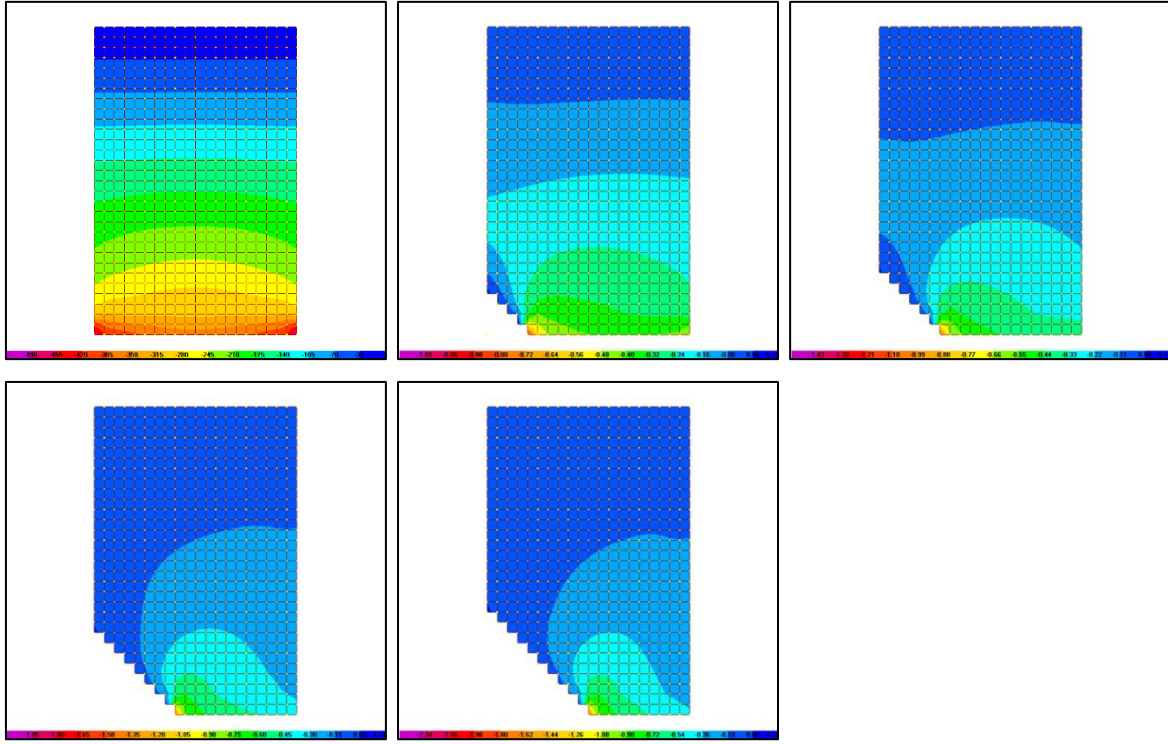
Çizelge 5.3 Altıgen kesitli (HXG) Modelin Analiz Verileri

HXG kodu	Kütle Azalma Oranı (%)	Ağırlık (kN)	Düğüm Noktası	SOLID Eleman
HXG 11	Başlangıç Kütlesi	10931	8929	6480
HXG 12	%0,61	10864	8896	6442
HXG 13	%1,45	10772	8836	6388
HXG 14	%2,67	10639	8744	6310
HXG 15	%4,26	10465	8620	6208

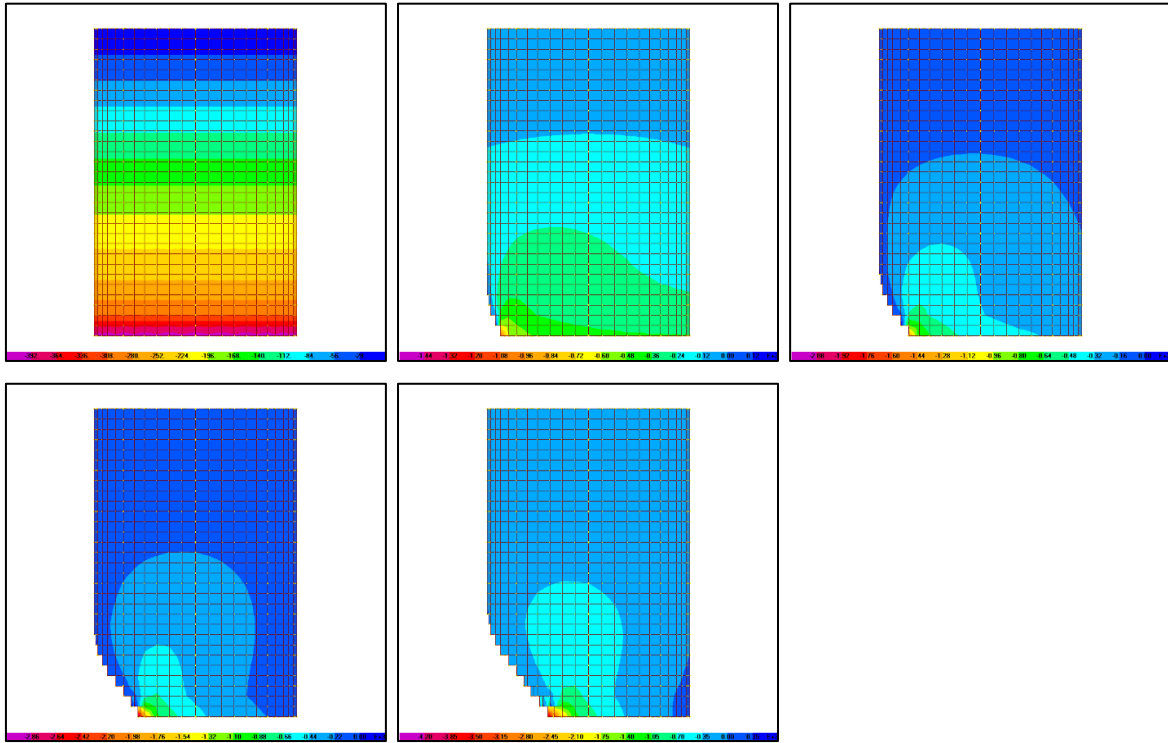


Şekil 5.5. Altıgen kesitli (HXG) hesap modeli serisi

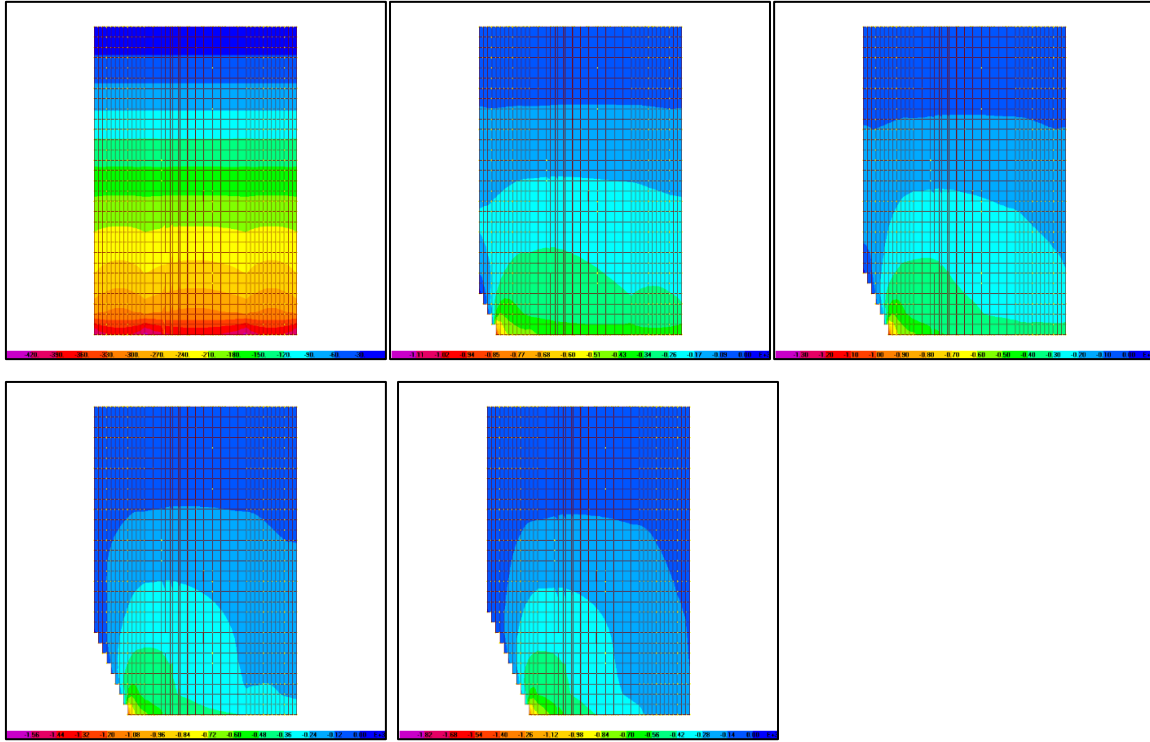
Kademeli hesaplar her üç model serisi için lineer statik yük kabulü ile kendi ağırlığı altında oluşan düşey yük, x ve y eksenleri doğrultusunda ayrı ayrı olmak üzere kütesinin %40'ı kadar yatay ivme (yerçekimi ivmesi; $9,81\ \text{m/s}^2$) kuvveti altında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.6, 5.7 ve 5.8). Bu kademeli hesapların temel amacı, çeşitli yükler altında geometrisinin neden olduğu davranış özelliklerinin, gerçekleştirilen modelleme ve hesap yöntemiyle karşılaştırılarak değerlendirilmesi ve doğrulanmasıdır. Böylece çok daha karmaşık boyut ve şekildeki yapıların hesaplarında, daha kolay anlaşılabilir ve daha doğru karar verilebilir bir yöntem sağlanmaktadır.



Şekil 5.6. Dörtgen kesitli (SQR) hesap modellerinin düşey yükler altında kademeli hesap sonuçları



Şekil 5.7. Dairesel kesitli (CRC) hesap modellerinin düşey altında kademeli hesap sonuçları



Şekil 5.8. Altıgen kesitli (HXG) hesap modellerinin düşey yükler altında kademeli hesap sonuçları

Kademeli hesap serisi ilk olarak dörtgen kesitli hesap modelleri (SQR) ile yapılmıştır. Şekil 5.5 de görüldüğü gibi kendi ağırlığı altında düşey doğrultudaki (z eksen doğrultusu) çekme gerilmelerinin ve basınç gerilmelerinin dağılımını genel mekanik teorilerine uygun bir şekilde göstermektedir. Yukarıda anlatıldığı gibi modelin belirlenen yerindeki malzeme kaybı sonucunda meydana gelen şekil değiştirmeye uygun bir biçimde her adımda çekme gerilmesinin arttığı açık bir şekilde görülmektedir. Aynı kademeli hesaplar dairesel kesitli hesap modelleri (CRC) ve altıgen kesitli hesap modelleri (HXG) için tekrarlanmış, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 de görüldüğü benzer davranış ve sonuçlar elde edilmiştir.

Daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi taş-tuğla yığma yapım tekniği ile inşa edilmiş tarihi yapıların sayısal analizleri çok fazla kriterin göz önüne alınarak yapılmasını gerektirir. Malzemenin doğrusal elastik olamayan özelliklerinin tanımı, yapının her yerinde aynı örüntü şeklinin olmaması, kesit içinde olası boşlukların bulunması bunlardan sadece birkaç tanesidir. Ancak tezin amaçlarında da anlatıldığı gibi, bu hesapların amacı tarihi kalelerin sur duvarları ve burçlarının hesapları için sistematik bir sayısal modelleme ve hesap yöntemi geliştirmektir. Gerçek yapı hesaplarında her ne kadar çatlama ve kırılma için sınır değerlerinin saptanması çok zor da olsa, yapının dayanımı ve strüktürel performansının belirlenmesi sınır gerilme

değerleri için bazı kabuller yapılır. Bu çalışmada her ne kadar kesit alanı ve atalet momentlerine dayalı rijitlikleri benzer kesitlerin sonuçları karşılaştırılmış olsa da, geometrik şekil olarak tamamen farklı olan hesap modellerinin çekme ve basınç kırılma gerilmeleri farklı yerlerde oluşacaktır. Gerilme dağılımı haritalarından da görüleceği gibi her bir modelin sınır gerilme değerleri bakımından en kritik yeri malzeme kaybının tanımlandığı köşenin üst bölgesinde yoğunlaşmıştır. Bu nedenle sistematik bir karşılaştırma amacıyla her bir modelin malzeme kaybının olduğu köşesinin en üst noktasındaki yer değiştirmeler (deplasmanlar) ve aynı köşenin modelin yüksekliğinin orta yeri olan 7 metre yüksekliğinde seçilen SOLID elemanındaki asal gerilmeler karşılaştırılmıştır. Dörtgen kesitli (SQR), dairesel kesitli (CRC) ve altıgen kesitli (HXG) hesap modellerinin kademeli hesaplarında elde edilen sonuçlar sırasıyla Çizelge 5.4, Çizelge 5.5 ve Çizelge 5.6 da gösterilmiştir. Çizelgelerde de görüldüğü yer değiştirme ve gerilme değişimleri modellerin beklenen şekil değiştirme ve gerilme dağılımına uygun bir şekilde elde edilmiştir.

Çizelge 5.3. Dörtgen kesitli model hesap sonuçların değerlendirilmesi (düşey yük)

Hesap Kademesi	$\sigma_{\max}$ (kN/m ²)	$\sigma_{\min}$ (kN/m ²)	Δ_x (mm)	Δ_y (mm)	Δ_z (mm)
SQR 11	1,34	- 162,53	0	0	-2,39
SQR 12	2,42	-155,30	-0,37	-0,37	-2,61
SQR 13	4,12	-138,36	-1,04	-1,04	-3,07
SQR 14	6,88	-108,45	-2,25	-2,25	-3,99
SQR 15	10,64	-73,86	-4,05	-4,05	-5,47

Çizelge 5.4. Dairesel kesitli model hesap sonuçların değerlendirilmesi (düşey yük)

Hesap Kademesi	$\sigma_{\max}$ (kN/m ²)	$\sigma_{\min}$ (kN/m ²)	Δ_x (mm)	Δ_y (mm)	Δ_z (mm)
CRC 11	2,36	-159,67	0	0	-2,44
CRC 12	19,28	-145,28	-0,74	-0,74	-2,89
CRC 13	35,54	-120,29	-2,01	-2,01	-3,73
CRC 14	48,04	-83,98	-4,03	-4,03	-5,38
CRC 15	52,83	-46,28	-8,36	-8,36	-8,49

Çizelge 5.5. Altıgen kesitli model hesap sonuçların değerlendirilmesi (düşey yük)

Hesap Kademesi	$\sigma_{\max}$ (kN/m ²)	$\sigma_{\min}$ (kN/m ²)	Δ_x (mm)	Δ_y (mm)	Δ_z (mm)
HXG 11	1,34	-170,13	0	0	-2,43
HXG 12	9,79	-139,03	0,33	5,56	-2,68
HXG 13	17,62	-141,26	0,74	1,28	-3,05
HXG 14	25,76	-116,68	1,33	2,31	-3,61
HXG 15	33,45	-87,82	2,15	3,72	-4,43

Tablolarda da görüldüğü üzere tüm modellerin kademeli olarak malzeme kaybı ile deplasman değerleri giderek artmaktadır. Aynı şekilde 7 m yüksekliğinde ki SOLID elemanlarda oluşan çekme gerilmeleri malzeme kaybının kademeli artışı ile artmakta, basınç gerilmeleri ise azalmaktadır. Artan çekme gerilmeleri sonucunda yapı; literatürden alınan çekme gerilmelerini aşması halinde (7. metreden sonra) yıkılacağı ön görülmektedir.

Malzeme kaybının meydana getirdiği stabilite sorunun analitik olarak gözlenmesi ile prototip geliştirme amacına ulaşmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda Sinop Kalesi ve surlarının kademeli malzeme kaybı bu prensipler doğrultusunda incelenecektir.

6. TARİHİ SİNOP KALESİ SUR DUVARLARININ VE KULELERİNİN (KUMKAPI MEVKİİ) YAPISAL STABİLİTESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1. Sinop İline İlişkin Genel Bilgiler

Karadeniz bölgesinin en kuzeyinde yer alan Sinop ili, Anadolu kıyılarından Karadeniz'e kadar uzanan Bozburun veya Boztepe olarak adlandırılan bir yarımada üzerinde kurulmuştur. Güneydoğusunda Büyük Liman (İç Liman), Kuzeybatısında Ak Liman (Dış Liman) ile sınırlandırılmıştır. Resim 6.1'de görüldüğü üzere Sinop'un yerleşim bölgesi olarak, bir adayı karaya bağlayan kıyı kordonunun en dar yerinde fırtınalara karşı, kıyı kordonu ile korunan bir liman kenarını seçmiş olduğu görülmektedir [105].

Sinop; sahip olduğu doğal limanı, coğrafi konumu ve topografyasının vermiş olduğu avantajlar ile yüzyıllarca birçok medeniyete ev sahipliği yapmıştır. Anadolu ve Karadeniz'de hâkimiyet kuran devletlerin daima ellerinde tutmak istedikleri bir konum olmuştur. Bölgedeki tek doğal ve geniş limana sahip olması, deniz yoluyla farklı coğrafyalara açık olması nedeniyle hızla gelişmiştir. Konumunun sağladığı avantajlar, Sinop'u dönemin en önemli ticari üslerinden biri haline getirmiştir.



Resim 6.1. Sinop genel bakış [106]

Tarihi efsanelere dayanan Sinop; adının mitolojide Asopus'un kızı ırmak tanrıçası Sinope'den aldığı bilinmektedir. Hitit kaynaklarında geçen ismi Sinova, birçok medeniyetin yerleşimi ile farklı olarak değişmiştir. Bunlardan islam kaynaklarında geçen; Sanub, Sinab, Yunan kaynaklarında geçen Sinopolli, Rus kaynaklarında geçen; Sinopolis olarak bilinmektedir [107].

Sinop; Tunç Çağı'nda insanlar tarafından iskân edildiği bilinmekle beraber M.Ö. 3000 yıllarında Karadeniz'in yerli kavimlerinden Gaşkalar tarafından kurulmuştur. Asurlular, Hititler ve Frigler uzun bir süre burada yaşamışlardır. M.Ö. 8. yüzyılda kendilerine yeni topraklar arayan Miletliiler ticaret sahasına elverişli ve stratejisi kuvvetli olan bugünkü Sinop'a yerleşmiştir. Kurdukları bu yeni şehre Sinope adını vermişlerdir. Şehir hızla gelişerek zamanın en büyük ticaret şehirleri ile rekabete başlamıştır. Sinop dünya üzerinde önemli bir üne kavuşmuş ve şehir adına para bastırılmıştır. M.Ö. 4. yüzyılda Büyük İskender tarafından Pers'lerden alınan şehir, M.Ö. 2. yüzyılda Paflagonyalılara ev sahipliği yapmıştır. M.Ö. 70 yıllarında Romalıların hâkimiyetin de bulunan Sinop, Bizanslılar, Selçuklu İmparatorluğu ve Pontus Rum Devletinin de izlerini taşımaktadır. 1261 yılında Pervaneoğulları'nın egemenliğine giren Sinop, Osmanlılar döneminde büyük onarım görmüş; tersane, liman ve kale şehri olarak Türk kültürünün yayılmasına hizmet vermiştir [108].

Birçok medeniyete ev sahipliği yapan Sinop; tarihi ve kültürel açıdan çok zengindir. Bu medeniyetlerden kalma önemli eserlerden bazıları; Sinop Kalesi ve Sur Duvarları, Eski Tersane ve Cezaevi, Paşa Tabyaları, Alaaddin Cami, Balatlar Kilisesi, Şehitlik ve Şehitler çeşmesi, Pervane Medresesi sayılabilir.

Bu tez kapsamında Sinop Kalesi ve Sur Duvarları vaka çalışması olarak seçilmiştir.

6.1.1. Sinop kalesi ve sur duvarlarının tarihsel gelişim süreci

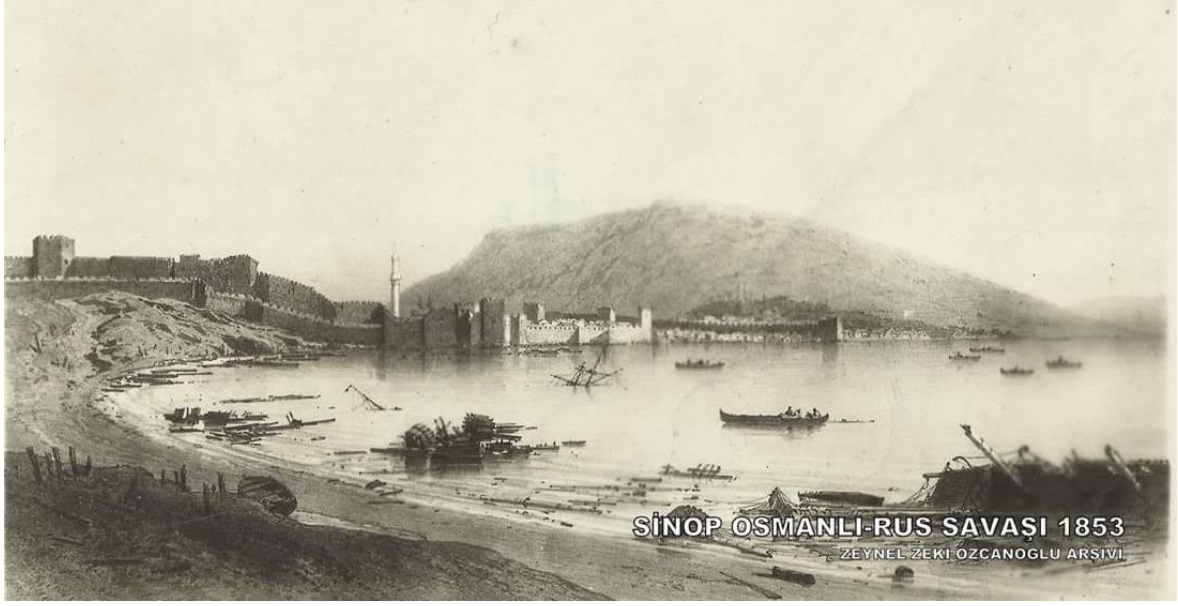
Sinop ve Sinop Kalesi'ne dair en erken tarihli kaynak M. Ö. 5. Yüzyılın sonlarında İran Kralı Artakserkses'in kardeşi Kyros'un, Yunanlılardan oluşturduğu askerler içinde yer alan komutanlardan biri olan Ksenophonu'un sefer sonrası Yunanistan'a geri dönüş macerasını anlattığı 'Anabasis' ya da 'Onbinlerin Dönüşü' olarak bilinen adlı eserdir. Sinop Kalesi'nin tam olarak ne zaman yapıldığı bilinmemekle beraber bu eserler ışığında yazılan Nazmi

Sevgen'in 1959 baskılı 'Anadolu Kaleleri' eseridir. Bu eserinde Sinop Kalesi'ne dair yazmış olduğu metinde Sinop Kalesi tasviri yapılmıştır.

(...) Sinop Kalesi'nin tarihi Hitit devrine kadar uzanmaktadır. Fakat bugünkü kalenin kurucusu Pontus Kralı Büyük Mihrdat IV. dır. İnşa tarihi M.Ö. 72'dir. Ondan sonra kale, muhtelif istihaleler, ilaveler, tamirler görmüştür. Sinop Kalesi iç ve dış olmak üzere iki manzume halindedir. Şarken 500, garben 270, cenuben 400 metre imtidadında olan surların yüksekliği 10-15 m arasındadır. Burç ve Kuleler ise 20-25 m yüksekliğindedir. Surların taarruza müsait yerleri mazgallarla tahkim edilmiştir. Kalenin şark cephesinde surların ve bazı kulelerin mazgalları eski vaziyetini muhafaza etmektedir. Kalenin şimal kısmı, bugünkü şehri, denizin tehacümünden korumaktadır. Şimali şarkiye isabet eden sur ve burçlar bugün kamilen yıkılmış haldedir. Garp cephesi ve Türklere ait eserleri ihtiva eden iç kalenin cazı aksamı harap olmuştur. Limana bakan cephedeki sur ve burçlar eski vaziyetini muhafaza etmektedir. Kalenin şark, şimal ve cenup kısımlarında Türklere ait daha çok kitabelere tesadüf edilir. Kalenin kara kısmı geniş bir müdafaa hendeğiyle takviye edilmiştir. İç kale şimal ve cenupta olmak üzere iki grup halindedir. Şimaldeki iç kalenin genişliği 2200 m, cenubdakinin 9500 m murabbıdır. Cenubdaki iç kale meşhur Sinop Hapishanesi, şimaldeki de depolar, cephanelik ve harap bir camii vardır. Şimaldeki iç kaleye evvelce bir asma köprü ile geçilirdi. Kalenin vaktiyle dört kapısı vardı. Cenupta kara kapısı, şark da iskele kapısı, şimal de kara ile deniz arasındaki düzlüğe açılan ova kapısı ve yine denize bakan garp kapısı bulunurdu. Bu kapı denize bakmakla beraber liman tarafında değildi (...) [109].

Şeklinde sunmuş olduğu metin, kale ile ilgili en detaylı bilgileri sunmaktadır. Bu kaynakların kullanımından yola çıkarak, kalenin inşası M.Ö. 70'li yıllara dayandırılrsa da, bazı kaynaklarda bu tarih daha eskilere çekilerek Miletli kolonistlerle ilişkilendirilmektedir. Kalenin hangi bölümünün, hangi dönemde yapıldığına dair bilgi bu kaynaklarda bulunmamaktadır. Kale ile ilgili yapılan herhangi bir bilimsel kazı çalışması bulunmamasına rağmen, batı sur duvarlarının iç kale ile ilişkili güney kesimlerinde görülen duvar malzemesi örgü tekniği ve taşların bosajlı işlemesi M.Ö 4. ve 5. yüzyıllarda uygulanan yaygın tekniklerdir [109].

Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı gibi büyük imparatorluklara ev sahipliği yapan Sinop Kalesi bu medeniyetlerin savaşlarına tanıklık etmiş, savaşların izlerini silmek için birçok onarım geçirmiştir. Günümüze en yakın olarak bilinen Osmanlı-Rus Savaşlarından (1827-1828) sonra Sinop baskını 1853'te gerçekleşmiş ve Sinop kalesi, sur duvarları ve limanı ağır hasar almıştır. Bu savaş sonrası kale ve sur duvarları önemli ölçüde hasar görmüş, fakat akabinde büyük bir onarım geçirmiştir [110]. Resim 6.2'de bu savaşın izlerinin tarihteki tek fotoğrafı olarak bilinmektedir.



Resim 6.2. 1853 Sinop'a yapılan Rus baskını-1853 (Zeynel Zeki Özcanoglu Arşivi)

Bu tarihten sonra kale onarımında, iç kale bölümünde Sinop Cezaevi inşa edilmiştir (1877). 1915 yılında Birinci Dünya Savaşı esnasında Alman Ordusu tarafından çekilen bir fotoğraf kalenin güney surlarının (iç liman bölgesi) onarıldığını göstermektedir (Resim 6.3).



Resim 6.3. 1. Dünya Savaşı esnasında Alman Ordusu tarafından çekilen Sinop-1915 (Adem Yılmaz Arşiv)

6.1.2. Dış ve iç sur duvarları

Dış sur duvarları

Doğu-batı doğrultusunda, doğuya doğru gidildikçe mevcut topografik yapıya uygun olarak genişleyen ve düzensiz bir plan yansıtan dış surlar; kuzeyde ve güneyde denizle kesilirken, batıda anakara ile bağlantının tamamını karşılayacak şekilde, doğuda ise anakaradan denize uzanan yarımada'yı ikinci defa kesecek şekilde ancak daha geniş tutularak tasarlanmıştır. Kuzey surları, Karadeniz ile kara ilişkisini kesecek şekilde sahil boyunca uzanmaktadır. Mevcut durumda limandan daha içte kalan güney surları, deniz ile ilişkili görülse de, güney eksende ve güney batıda bulunan uzatma duvarları ve güçlendirilmiş kuleler ile bu alanda geriye çekilerek, tersaneye alan ayrılmıştır (Bkz. Resim 6.4) [109].



Resim 6.4. Sinop Kuzey-Güney Sur duvarları kuşbakışı [111]

Kuzey-Güney surlarını birbirine bağlayan Batı surları büyük oranda yıkılmıştır. Güneyden kuzeye doğru gidildikçe formunu kaybeden ve yol çalışması nedeniyle yıkıldığı söylenen Batı surları, günümüz ölçümlerine göre 270 m uzunluğunda olup ana cadde (Fatih Caddesi) bitiminde tekrar başlamaktadır. Bu sur duvarı yıkılmadan önce üzerindeki kitabelere göre ‘Kum Kapı’ girişini oluşturuyordu. Resim 6.5’de Güney sur duvarları ile Batı sur duvarları hattı gösterilmiştir. Güney sur duvarları (400 metre) en az tahribat almış yer yer kare tipi kulelerle sürmektedir. Güney sur duvarlarının 1935 yılına ait fotoğrafı Resim 6.6 ve Resim 6.7’de gösterilmiştir.



Resim 6.5. Batı ve güney sur duvarları hattı [111]



Resim 6.6. Güney sur duvarları ve iç liman 1935-1940 (Zeynel Zeki Özcanoglu Arşivinden)



Resim 6.7. Güney sur duvarları doğu cephesinden bakış (Çetin Tek Arşivinden)

Takriben 880 m olan dış kuzey surları kuzey batı burcundan başlayarak deniz kıyısını takip ederek kuzey doğu burcuna kadar devam eder. Resim 6.8’de görüldüğü üzere denize sıfır noktasında inşa edilmiş olan bu surların, çevresel etkenlerden dolayı bir kısmı denizin içine yıkılmış, bir kısmı da dikey durumdan ayrılarak ana bedenden kopmuş ve denize doğru yatmıştır [112]. Kuzey (Kum Kapı Mevkii) sur duvarları ve kulelerinde (Bkz. Resim 6.9) geometrik denge kaybı mevcutken, Kuzey-doğu hattında (Tophane Mevkii) sur duvarları genel stabilitesini (Bkz. Resim 6.10) korumuştur.



Resim 6.8. Kuzey sur duvarları hattı [111]



Resim 6.9. Kuzey sur duvarlarından bir bölüm [106]



Resim 6.10. Kuzey-doğu sur duvarlarından bir bölüm (Çetin Tek-Arşivinden,2018)

Doğu sur duvarları günümüzde neredeyse sürekliliğini yitirmiştir. Resim 6.11’de doğu sur duvarlarının kuzey ve güney sur duvarlarıyla birleştiği mevcut hali gösterilmiştir.



Resim 6.11. Doğu sur duvarları (Çetin Tek Arşivinden)

İç sur duvarları

İç Kale olarak adlandırılan ve içinde hapishanenin bulunduğu saha ise 1214'te Sinop'u zapt eden Selçuklu Sultanı I. İzzeddin Keykavus tarafından, limanı kontrol amacıyla sefere katılan komutanların da katkıları ile ana kalenin kuzeyden güneye inen dik bir surla kesilmesiyle meydana getirilmiş ve 11 adet burç ile desteklenmiştir. Burçların yüksekliği denize hâkim güney bedende 22 m'dir. Kale surlarının yüksekliği ise 18 m olup, kalınlığı da ortalama 3 m'dir. Bu 3 metrelik duvarlar üzerinde iç kaleyi bir uçtan diğerine kadar gezebilme imkânı veren muhafızların gezi yolları bulunmaktadır. Kuzeydeki iç kale 16.875 m², cezaevini oluşturan güneydeki iç kale ise 9.500 m²'lik bir alan kaplamaktadır [113].

6.2. Kuzey Sur Duvarları ve Kulelerin Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması ve Analiz Tanımlamaları

Tarihi yapıların ve anıtların korunması, sağlamlaştırılması, onarılması ve yeniden işlevlendirilmesi sürecinin en önemli aşamalarından biri yapısal analizdir. Tarihi yapıların mevcut durumu ve hasar seviyesi göz önüne alınarak belirlenen senaryolara göre matematik ve mekanik teorileri, formüller ve malzeme özelliklerinin tanımlanmasıyla hesap modelleri

geliştirilir. Belirlenen veya tahmin edilen yüklere göre hesaplar gerçekleştirilir. Önceki bölümlerde ayrıntılı bir şekilde anlatılan sonlu elemanlar model ve hesapları bu teori, formüller ve kabul edilen malzeme özelliklerine bağımlıdır ve çoğunlukla tarihi yapının gerçek davranışını tam olarak yansıtamazlar. Her ne kadar yapılan analitik modelleme ve hesaplar problemin birçok kriterini göz önüne alıyorsa da özellikle taş veya tuğla tarihi yapıların malzeme tanımlama modelinden kaynaklanan sorunlar vardır. Başka bir deyişle gerçekleştirilen hesaplar tanımlanan malzeme modelinin belirlediği sonuçlardır. Sahada elde edilen sonuçlar çoğu zaman yapılan hesaplarla tam uyum sağlamaz. Kısmen hasar görmüş taş veya tuğla tarihi yapılar ve rüzgar, su veya kumların şekillendirmesiyle meydana gelen doğal jeolojik oluşumlar çoğu kez mekanik teorisiyle tanımlanamazlar. Resim 6.12’de gösterilen Hasakeyf antik kentindeki saray kalıntısı, Resim 6.13’deki doğal kaya oluşumları ve Resim 6.14’deki Sinop surlarında dalgaların neden olduğu oluşumlar bunu gösteren örneklerdir.



Resim 6.12. Hasankeyf Büyük Saray Kalıntısı (Ali İhsan Ünay Arşivinden)



Resim 6.13. Bolivya'daki Eduardo Avaroa Andean Fauna Milli Parkı çölünde rüzgarın ve kumların neden olduğu kaya oluşumu [114]



Resim 6.14. Sinop surları duvar kalıntısı (Ali İhsan Ünay Arşivinden)

Tarihi yapıların korunması, sağlamlaştırılması ve onarılması işlerinin mühendislik planlamasında yapının mevcut yapısal performansının doğru olarak belirlenmesi sağlıklı bir onarım için çok önemlidir. Bunun için mühendislik deneyimi ve önsezisi belirleyici bir faktördür. Bu çalışmanın ana hedeflerinden biri hasarın ve yıkılmanın (göçmenin) nedenlerinin mühendislik bilgisi ve önsezisine göre belirlenmesidir. Sayısal analiz yöntemlerinin bu amaçla kullanılması da mümkündür. Bilimsel çalışmalarda elde edilen deneyimlerin ışığında, doğru ve bilinçli kararlarla, basit ve kontrol edilebilir bir şekilde temel mühendislik bilgileriyle birleştirilerek geliştirilecek sayısal analiz yöntemleriyle tarihi

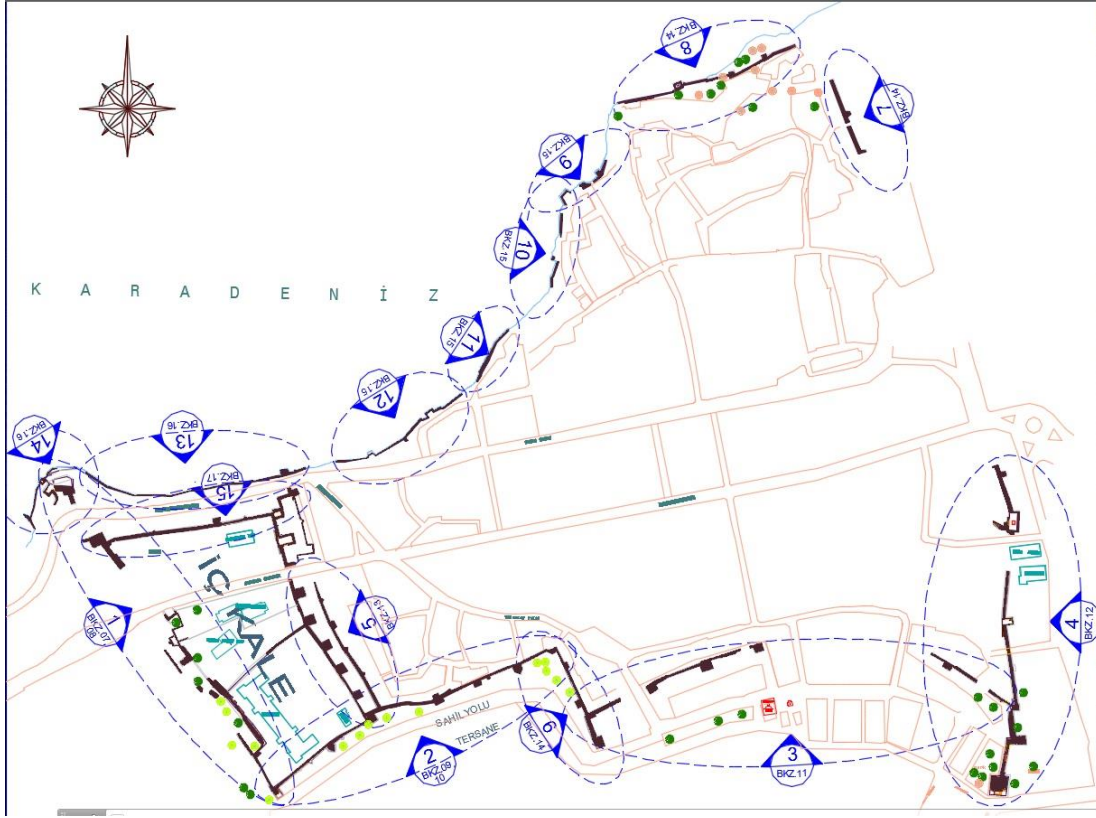
yapılarda meydana gelen hasarların nedeninin saptanması ve yıkılma sürecinin belirlenmesi mümkün olabilir.

Bu bağlamda Sinop sur duvarlarında yıllar boyunca dalgaların neden olduğu hasar ve tahribatın nasıl geliştiğini tahmin edebilecek bir dizi sayısal analiz modeli ile hesaplar yapılmıştır. Daha önce de söz edildiği gibi tarihi yapılarda sayısal analiz ile yapının gerçek davranışını ve tepkisini kesin olarak hesaplamak mümkün değildir. Surların yıkılma senaryosunu tanımlayabilmek için dalga dizilerinin neden olduğu sayısız yükleme kriteri ve tam olarak tanımlanamayan malzeme özellikleri vardır. Bu nedenle matematiksel modelleme sırasında benzer yapılar için daha önce gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen malzeme özellikleri kullanılmıştır. Yıkılma/devrilme sürecini belirlemek için basitleştirilmiş ancak ilgili mühendislik teorileriyle uyumlu yükleme senaryoları uygulanmıştır.

“Progressive collapse” (Aşamalı yıkılma) analizleriyle surların ve burçların yıkılma ve devrilme sürecini belirlemek amacıyla Sinop surlarının daha önce tanıtılan bölümü için çeşitli sonlu elemanlar modelleri hazırlanmıştır.

İlk olarak; 2004 yılında Kalan Mühendislik tarafından başlatılan Tarihi Sinop Kalesi ve Ceza Evi röleve, restitüsyon ve restorasyon çalışmalarından ve yerinde inceleme-değerlendirme ile Kalenin Kumkapı mevkiinde bulunan kuzey surlarının bir kısmı ve burçları modellenmiştir [113]. Kalan Mühendislikten alınan röleve dosyaları incelenerek AUTOCAD 2017 paket programında kalenin gerekli kot ölçüleri ve koordinat noktaları tespit edilmiştir. Elde edilen veriler SAP 2000 V.14 sonlu elemanlar paket programında 3 boyutlu SOLID eleman olarak modellenmiştir. Bu aşamalar aşağıda sıralı olarak verilmiştir.

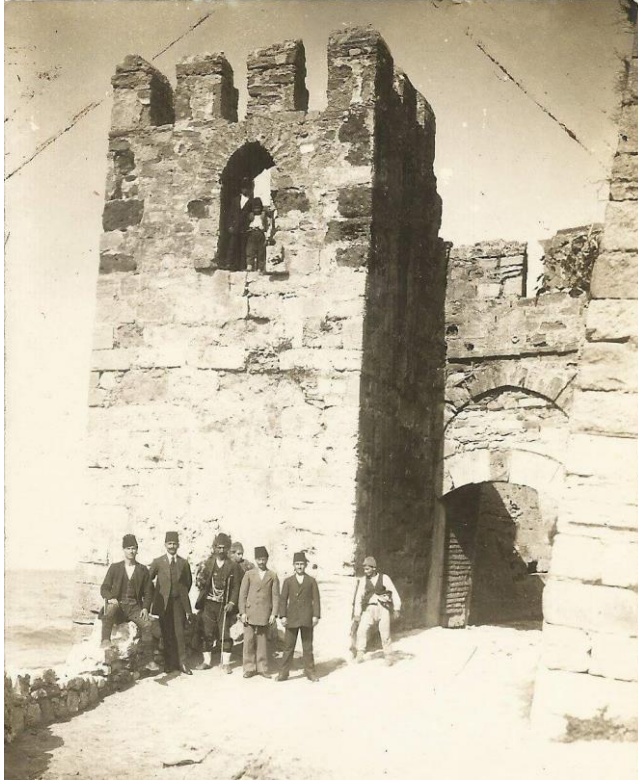
Resim 6.15’de görüldüğü üzere hazırlanmış olan planda kalenin surları ve ceza evi bölgelere ayrılmıştır. 8-14 bölgeler arası kalenin kuzey surları olarak adlandırılmıştır ve kalenin 880 m uzunluğuyla en uzun sur duvarlarıdır. Karadenize kıyı konumunda bulunan surların M.Ö. 8. yüzyılda inşa edildiği bilinmektedir. Çalışma alanı 14. bölge ile sınırlandırılmış olup üç burç ve bağlantı surları modellenmiştir. Resim 6.16’da 14. bölgenin kuş bakışı ve Resim 6.17’de bu bölgeye ait 1910 yılında çekilmiş olan fotoğrafı bulunmaktadır.



Resim 6.15. Sinop Kale surları ve ceza evi paftası [109]

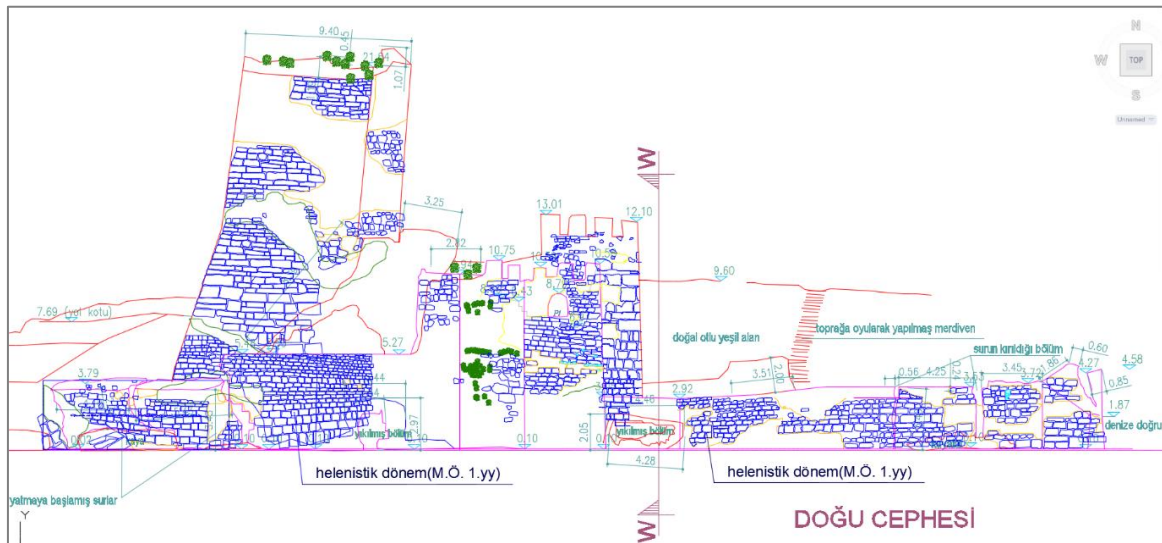


Resim 6.16. 14. bölge kuş bakışı burç ve surların görünümü [106]

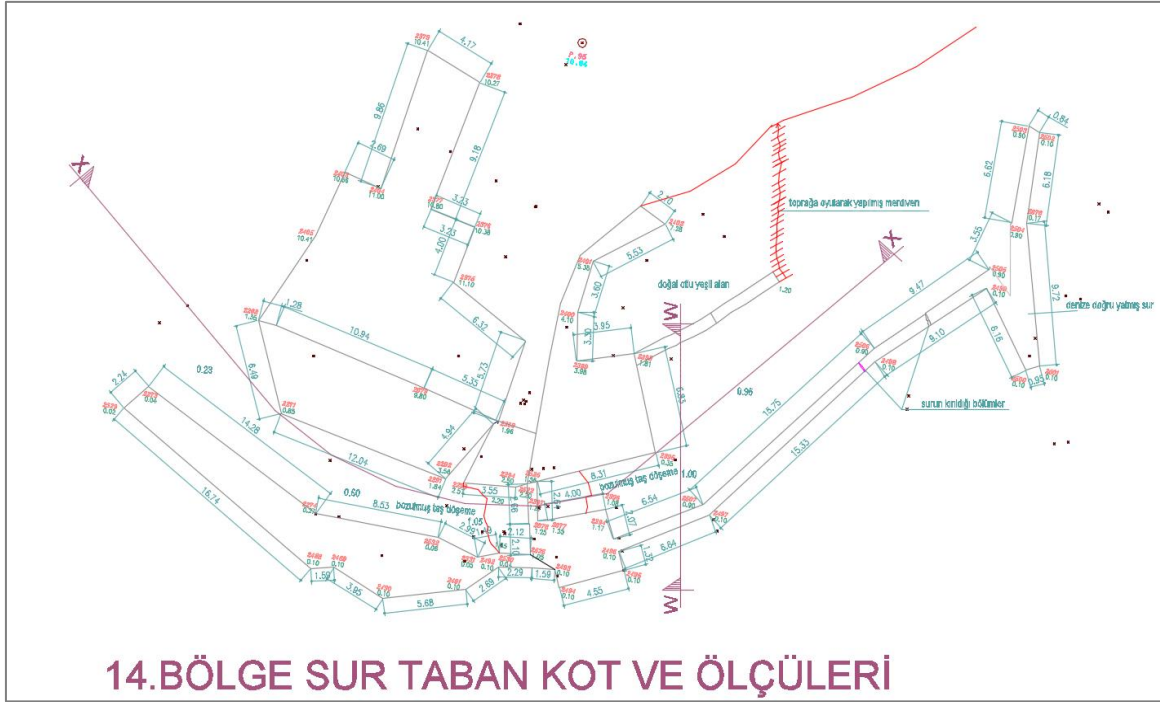


Resim 6.17. Sinop kuzey sur girişi kum kapı-1910 (Zeynel Zeki Özcanoglu Arşivinden)

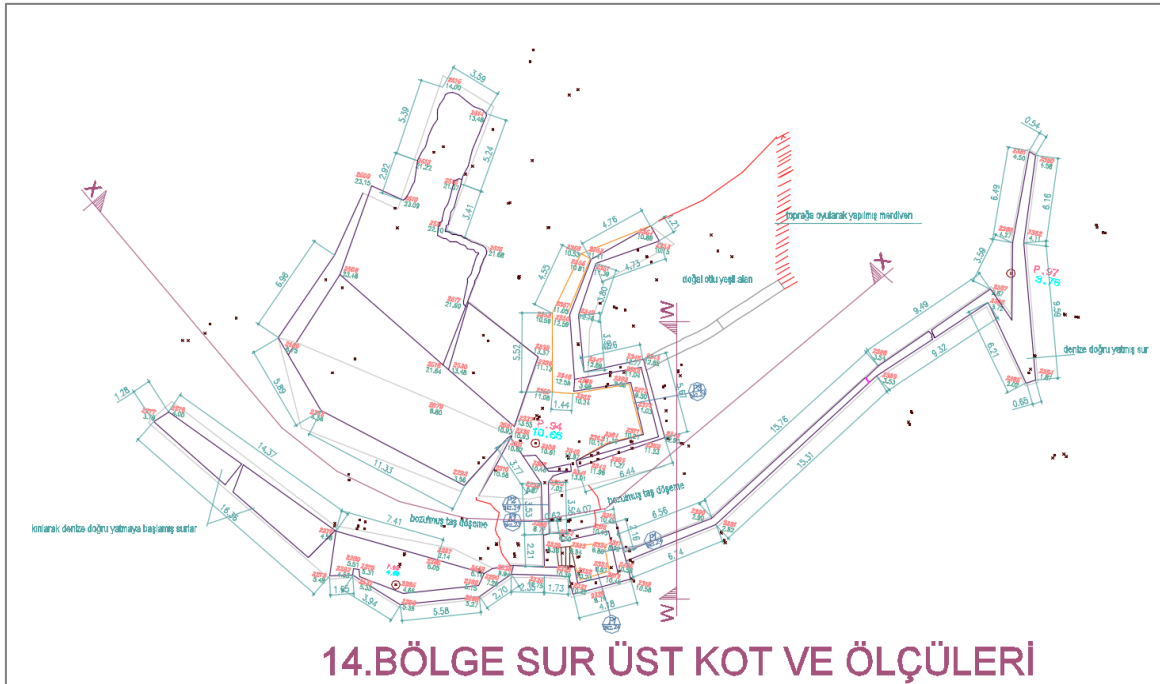
Rölevesi mevcut olan 14. Bölgenin AUTOCAD dosyaları üzerinden koordinat noktaları alınmıştır. Bunun için Resim 6.18’de 14. bölge kuzey sur duvarları ve burçları, Resim 6.19’da 14. bölge sur taban kot ölçüleri ve Resim 6.20’de 14. Bölge sur üst kot ölçülerinden yararlanılmıştır.



Resim 6.18. 14. bölge kuzey sur ve burçları doğu cephesi görünüş [109]



Resim 6.19. 14.bölge kuzey sur ve burçları taban kot ve ölçüleri [109]

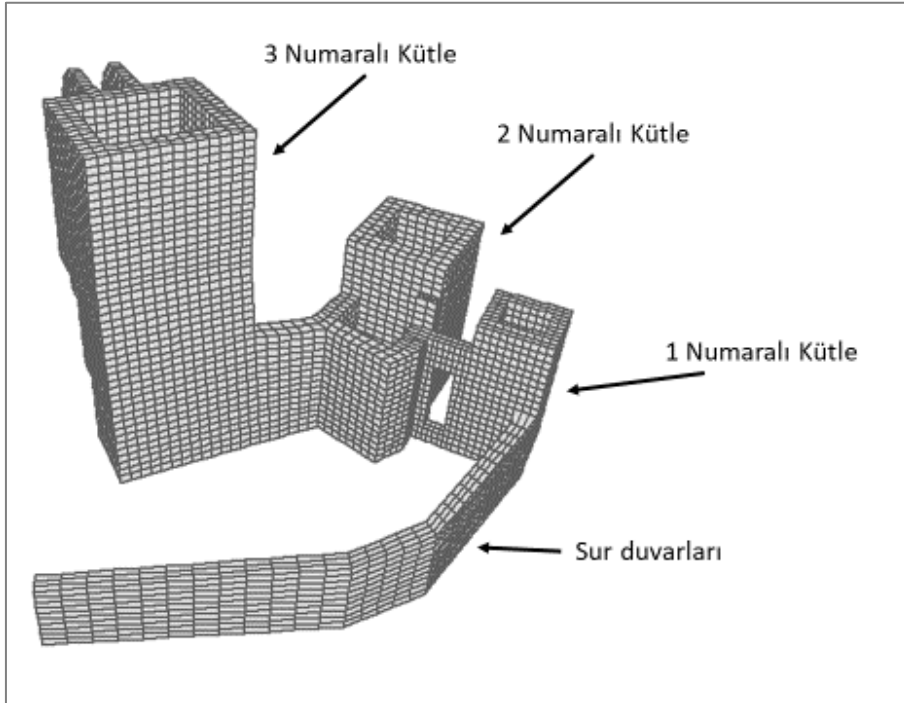


Resim 6.20. 14.bölge kuzey sur ve burçları üst kot ve ölçüleri [109]

Analizlerin tanımlanmasının ilk aşamasında Şekil 6.1’de görüldüğü gibi, Sinop surlarının deniz kıyısındaki sur duvarları ve çeşitli boyutta üç adet burcun yer aldığı sonlu elemanlar modeli ile farklı geometrik şekil ve boyuttaki kütlelerin yapısal davranışının birlikte incelenmesi sağlanmıştır.

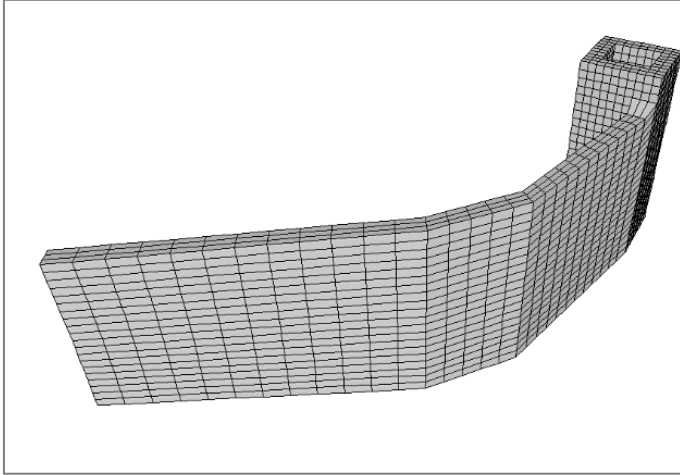
Bu analizin amacı “progressive collapse (aşamalı yıkılma)” hesapları ile doğrudan ilişkili olamamakla birlikte;

- Düzensiz ve karmaşık geometriye sahip tarihi bir yapının sonlu elemanlar analizi için genel kural ve prensiplerin kontrol edilmesi,
- Sur duvarlarının ve burçların yapısal davranışı hakkında genel bir bilgi edinilmesi,
- Kabul edilen malzeme ve modelleme kurallarının uyumunun gözden geçirilmesi,
- Hesap sonuçlarının değerlendirilmesi ve genel mühendislik teorileri ve deneyimleriyle uyumunun karşılaştırılmasıdır.



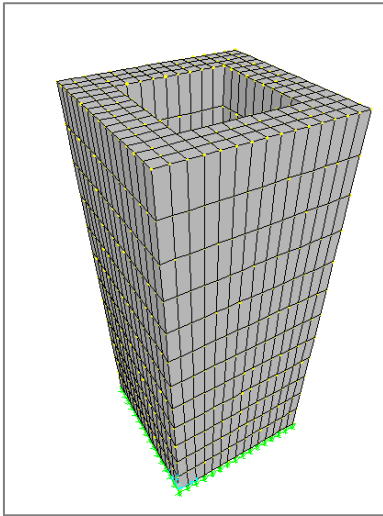
Şekil 6.1. Sinop surlarının aşamalı yıkılma analizleri, birinci aşama analiz modeli

İkinci aşamada ise sur duvarlarının en sorunlu olarak belirlendiği ve yakın zamana kadar dalgaların verdiği zararın belirgin bir şekilde kayıt altına alındığı bölümündeki sur duvarlarının “aşamalı yıkılma” analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. Sinop surlarının aşamalı yıkılma analizleri, ikinci aşama analiz modeli

Üçüncü aşama analizleri ise aynı bölgede dalgaların tahribatına açık olarak konumlanmış bir burcun “aşamalı yıkılma” sürecini tanımlamaktadır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3. 1 numaralı burç aşamalı yıkılma analizleri, üçüncü aşama analiz modeli.

6.2.1. Birinci aşama analizleri ve değerlendirmeleri: Sinop 14. bölge bütün modeli

Sinop surlarının bu bölümü, 40 metre uzunluğunda olup kalınlığı 1,5 m ile 2 m arasında değişen deniz tarafındaki sur duvarları ve farklı kesit boyut ve yüksekliğe sahip üç adet burcu kapsamaktadır. Şekil 6.1 de 1 numaralı burç olarak tanımlanan kütle, 5,0 m x 5,0 m kare şeklinde olup yüksekliği 11 metredir. 2 numaralı burç olarak tanımlanan kütle, 7,5 x 7,5 m kare şeklindedir ve yüksekliği 12,60 metredir. 3 numaralı burç olarak tanımlanan kütle ise

10,5 m x 10,5 m kare şeklinde olup yüksekliği 22 metredir. Ayrıca burçlar arasında bağlantıyı sağlayan kemerler ve duvarlar bulunmaktadır.

Sinop surlarının bu bölümünün sonlu elemanlar modeli SAP2000 programının modelleme özellikleri ve kurallarına göre hazırlanmıştır. Yapının analitik modelinin meydana getirilmesi için gerekli olan bütün geometrik boyutlar ve ölçüler, daha önce hazırlanmış olan rölöveler kullanılarak elde edilmiştir. Modelleme ve hesap parametreleri aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

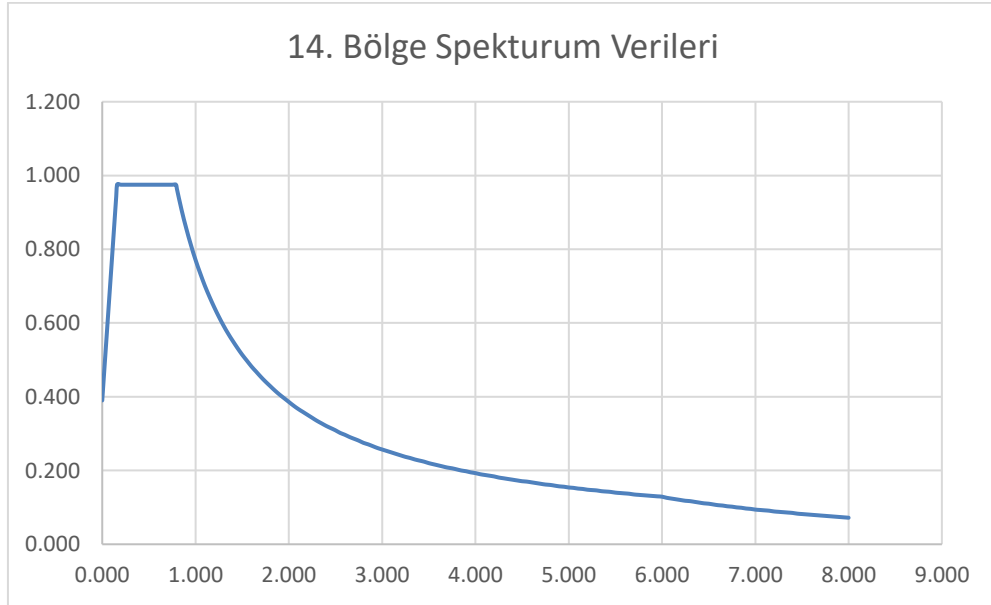
- Yapının tamamı üç boyutlu SOLID elemanlar ile modellenmiştir.
- Hesaplarda kullanılan analitik model 14106 düğüm noktası ve 9114 SOLID elemanı ile oluşturulmuştur.
- Sur duvarlarının ve burçların malzeme özellikleri, benzer yapılar için daha önce yapılan çalışmalar sonucu üretilmiş, uluslararası hakemli dergiler tarafından yayınlanmış ve uluslararası literatürde önerilen bağıntılardan yararlanılarak, yürürlükte olan şartnamelerde geçen yığma yapılar için önerilen değerler dikkate alınarak seçilmiştir.
- Taş yığma yapı elemanlarının, harç ile birlikte bütün bir malzeme özelliği gösterdiği varsayılarak, elastisite modülü ve birim ağırlık kabulleri yapılmıştır.
- Hazırlanan hesap modeli üzerinde, sabit yükler ve deprem spektrumu ile tanımlanan yer hareketinin yol açtığı zorlamaların göz önüne alındığı iki ayrı esas yükleme durumu uygulanmıştır. Spektrum, EQx ve EQy yükleme olmak üzere ayrı ayrı iki asal doğrultuda uygulanmıştır.
- Sonuçların kolaylıkla değerlendirilebilmesi için, G + EQx (Sabit yükler + x eksen doğrultusundaki deprem yüklemesi) ve G + EQy (Sabit yükler + y eksen doğrultusundaki deprem yüklemesi) olmak üzere iki ayrı yük kombinasyonu tanımlanmıştır.
- Deprem tesirlerinin belirlendiği spektral hesapta ilk 12 mod dikkate alınmıştır.

Sinop Kalesi 14. Bölge Kuzey Surları ve Burçları'nın sonlu elemanlar modelinde kabul edilen bazı malzeme özellikleri Çizelge 6.1'de özetlenmiştir. Doğrusal elastik malzeme özelliklerini Laurenceo (2001,2002) makalelerinden ve Daniel (2003) bloklaşmış yığma yapıların nümerik ve deneysel analizlerini araştırdığı doktora tez çalışmalarından elde edilmiştir [103,115,116].

Çizelge 6.1. Sinop Kalesi 14. bölge kuzey surları ve burçları sonlu elemanlar modelindeki malzeme özellikleri

Eleman Tipi	Elastisite Modülü E (kN/m ²)	Özgül Ağırlık (kN/m ³)	Kütle (t/m ³)
Sur duvarları (harç ile birlikte)	1 000 000 (1000 MPa)	20	2.04
Burçlar (harç ile birlikte)	1 000 000 (1000 MPa)	20	2.04
Diğer duvarlar ve payandalar (harç ile birlikte)	1 000 000 (1000 MPa)	20	2.04
Dolgu malzemesi	150 000 (150 MPa)	20	2.04

Sinop coğrafi konum olarak deprem riski bakımından en az riskli bölge olarak tanımlanmaktadır. Bu aşamada sismik analizin de dikkate alınmasının nedeni geliştirilen “aşamalı yıkılma” analizlerinin doğrulaması ve karşılaştırılmasıdır. Düşey yük ve sismik hesaplar benzer tarihi yığma taş binalar Sinop ili 14. bölgede dinamik hesaplarında kullanılan spektrum değeri Şekil 6.4’de gösterilmiştir [117].



Şekil 6.4. Sinop Kalesi 14. bölge kuzey surları ve burçları dinamik hesap için spektrum eğrisi

Hesap sonuçlarının değerlendirilmesi sırasında kabul edilen sınır gerilme değerleri önceki bilimsel çalışmalarda taş yığma duvarlar için sınırlayıcı basınç gerilmesi $f_{m(basınç)}=2,4$ MPa, sınırlayıcı çekme gerilmesi $f_{m(çekme)}=0,15$ MPa ve sınırlayıcı kayma gerilmesi $\tau_m = 1,05$ MPa olarak önerilmektedir (Çizelge 6.2).

Çizelge 6.2. Malzeme Grupları için kabul emniyet gerilmeleri

Malzeme Tipi	Basınç Gerilmesi (MPa)	Çekme Emniyet Gerilmesi (MPa)	Kayma Emniyet Gerilmesi (MPa)
Sur duvarları	2,4	0,15	1,05
Burçlar	2,4	0,15	1,05
Diğer duvarlar ve kemerler	2,4	0,15	1,05

Sinop surlarının yapısal hesabı yukarıda belirtilen yük kombinasyonlarına göre SAP 2000 sonlu eleman programı ile gerçekleştirilmiştir. Bütün düğüm noktaları ve taşıyıcı elemanlarda elde edilen ötelenme, kuvvetler ve gerilmelerin tek tek incelenerek yorumlanması neredeyse imkansızdır. Bu sebeple, hesap sonuçlarının yorumu, SAP 2000 programının ürettiği renk kodlu şekil ve gerilme haritaları kullanılarak en elverişsiz değerler dikkate alınarak yapılmıştır. Çizelge 6. 3'te çeşitli yük durumu ve yük kombinasyonuna göre elde edilen taban kesme kuvveti mesnet reaksiyonları özetlenmiştir.

Yapının toplam ağırlığı 38405 kN, doğu-batı (modele göre X yönü) doğrultusunda uygulanan deprem etkisi altında meydana gelen toplam taban kesme kuvveti 4611 kN, güney-kuzey (modele göre Y yönü) doğrultusunda uygulanan deprem etkisi altındaki toplam taban kesme kuvveti 1444 kN olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre, yapının maruz kaldığı taban kesme kuvvetinin, X yönünde toplam ağırlığının %12'sine, y yönünde ise %4'üne karşılık geldiği görülmektedir.

Çizelge 6.3. Taban kesme kuvvetleri ve eksenel kuvvetler

Yükleme tipi	Analiz Tipi	Aşama	X yönünde taban kesme kuvveti kN	Y yönünde taban kesme kuvveti kN	Düşey yönde reaksiyonlar kN
G (Düşey yük)	Doğrusal Statik				-38405
EQx	Doğrusal Davranış Spektrumu	Max	4611	1444	233
EQy	Doğrusal Davranış Spektrumu	Max	1444	4435	559
G+Ex	Kombinasyon	Max	4611	1444	-38172
G+Ex	Kombinasyon	Min	-4611	-1444	-38638
G+Ey	Kombinasyon	Max	1444	4435	-37846
G+Ey	Kombinasyon	Min	-1444	-4435	-38964

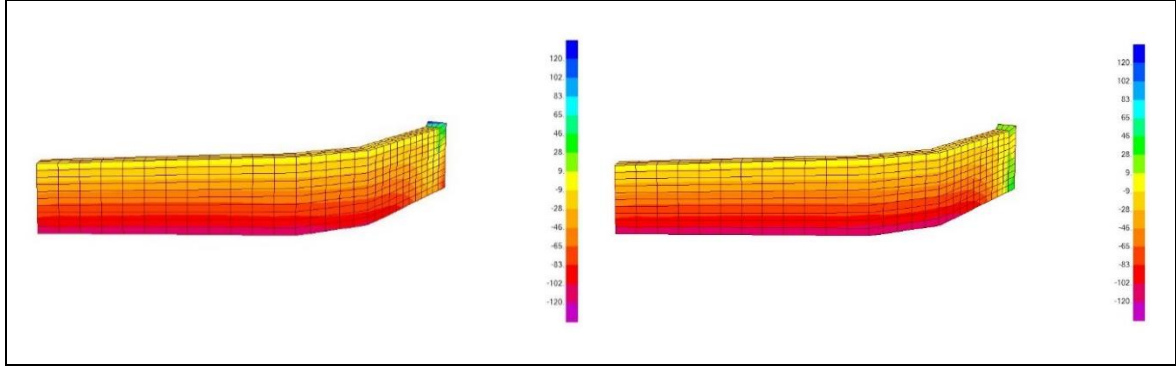
X yönündeki deprem yüklemesi sonucunda x yönündeki en büyük ötelenme $\Delta_x=8$ mm, Y yönündeki deprem yüklemesi sonucunda y yönündeki en büyük ötelenme ise $\Delta_y=2,6$ mm'dir. Yer değiştirmeler modelin en üst kotunu temsil eden 3 numaralı Burç olarak tanımlanan kütlenin en üst noktasını temsil etmektedir.

Sinop surlarının yapısal davranışını belirlemek için yapılan sonlu elemanlar hesabında, SOLID elemanlarında hesaplanan gerilmelerden, düşey doğrultuda (SAP2000 programının formatına göre S33 olarak tanımlanan) meydana gelen çekme veya basınç gerilmeleri yapının dayanımı hakkında en açıklayıcı sonucu vermektedir.

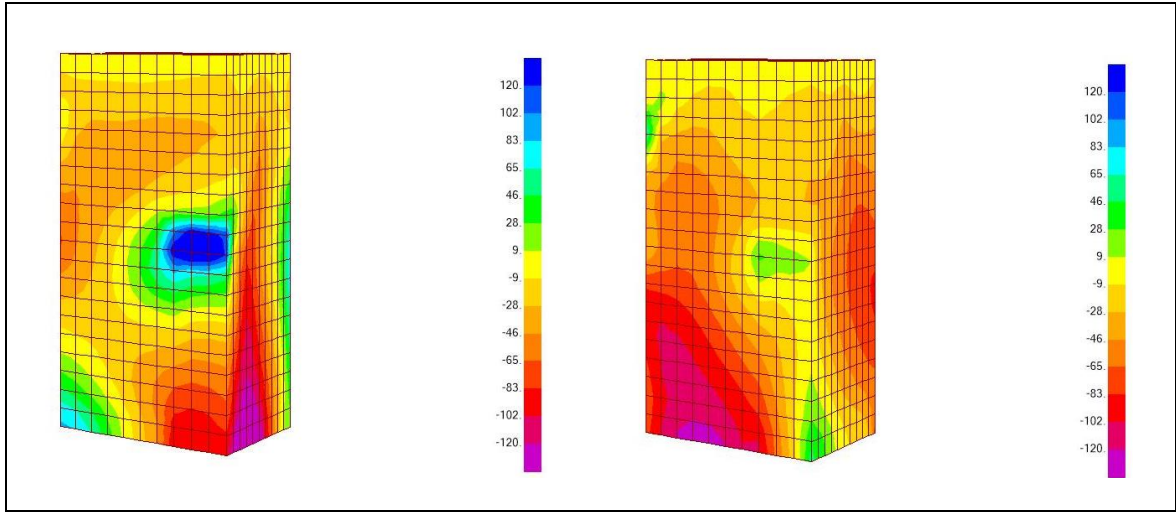
Yapının davranışını etkileyen karakteristik yapı elemanları S33, SMAX ve SMIN gerilme değerleri için G + EQx ve G + EQy yük kombinasyonlarına göre elde edilen gerilme haritaları kullanılarak incelenmiştir. Çizelge 6.4'te her bir grup için en büyük basınç ve çekme gerilmeleri gösterilmiştir. Eleman gruplarının konumu bazı karakteristik gerilme dağılımı haritaları Şekil 6.5, Şekil 6.6, Şekil 6.7, Şekil 6.8, Şekil 6.9, ve Şekil 6.10 de ayrı ayrı gösterilmiştir.

Çizelge 6.4. Çeşitli eleman gruplarında elde edilen en büyük gerilmeler (S33)

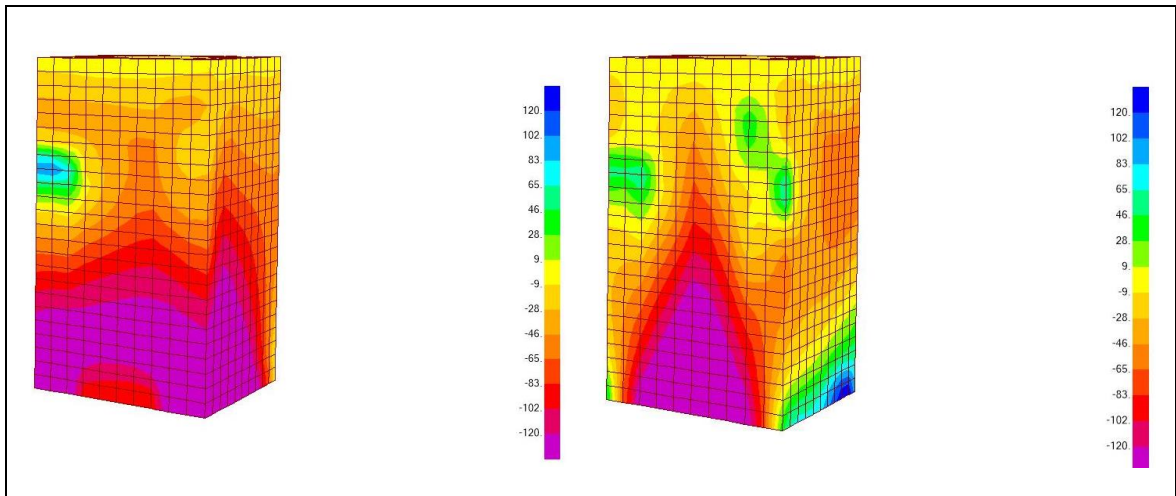
Eleman Grubu		G + EQx Yüklemesi MPa	G + EQy Yüklemesi MPa
Sur duvarları	Basınç	-0,14	-0,12
	Çekme	0,08	0,05
1 Numaralı Burç	Basınç	-0,17	-0,13
	Çekme	0,15	0,05
2 Numaralı Burç	Basınç	-0,21	-0,17
	Çekme	0,09	0,14
3 Numaralı Burç	Basınç	-0,16	-0,14
	Çekme	0,34	0,24
1 ve 2 numaralı burçlar arasındaki kemer	Basınç	-0,16	-0,09
	Çekme	0,06	0,14
2 ve 3 numaralı burçlar arasındaki bağlantı duvarı	Basınç	-0,14	-0,16
	Çekme	0,13	0,10



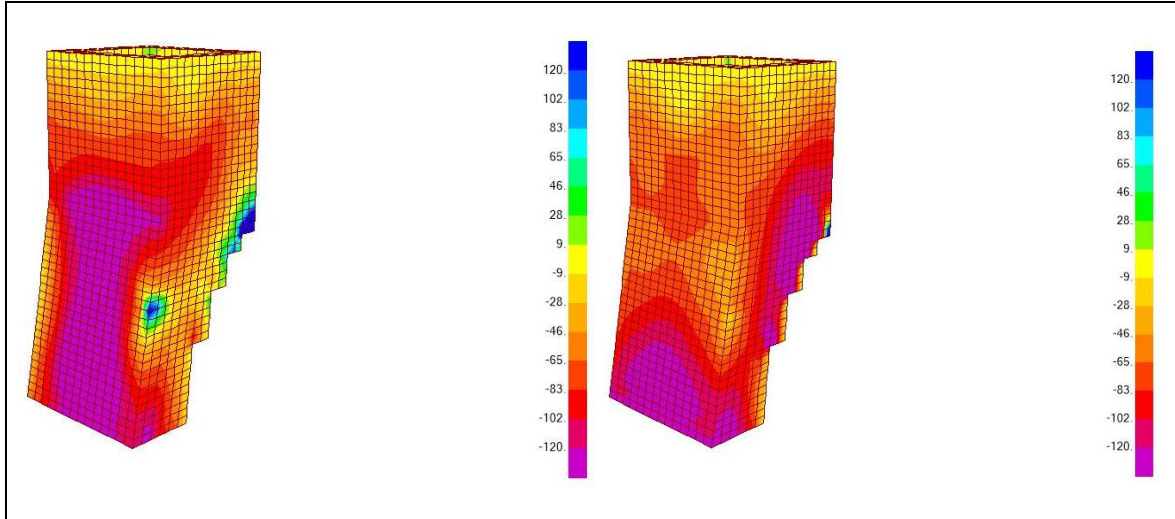
Şekil 6.5. Sur duvarlarında sırasıyla $G + EQ_x$ ve $G + EQ_y$ yük birleşiminde elde edilen gerilme dağılımı



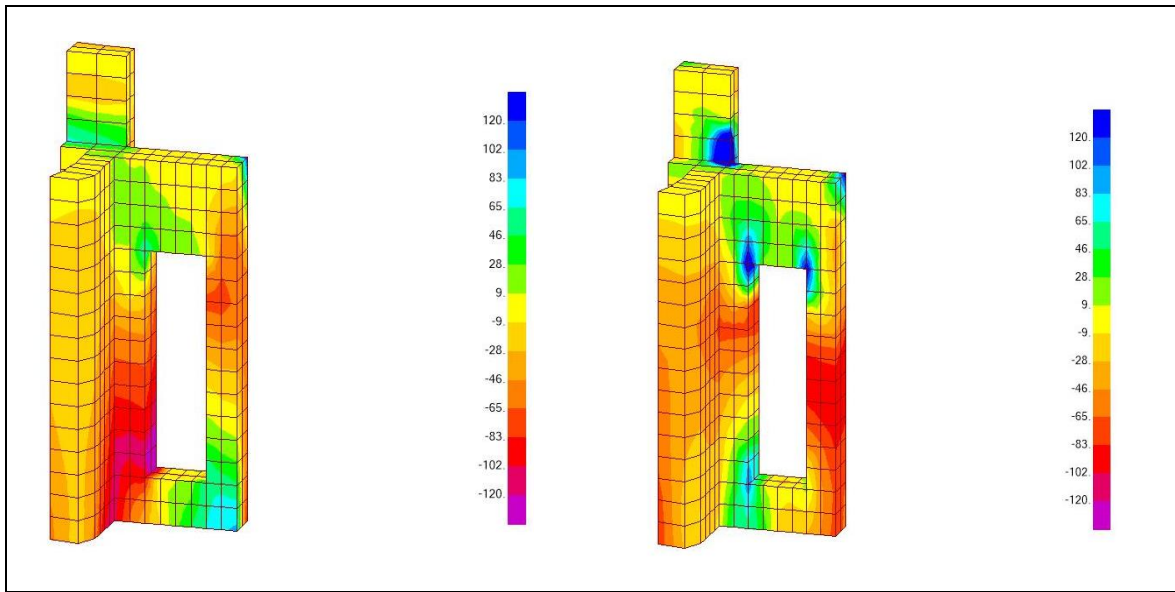
Şekil 6.6. 1 numaralı burç sırasıyla $G + EQ_x$ ve $G + EQ_y$ yük birleşiminde elde edilen gerilme dağılımı



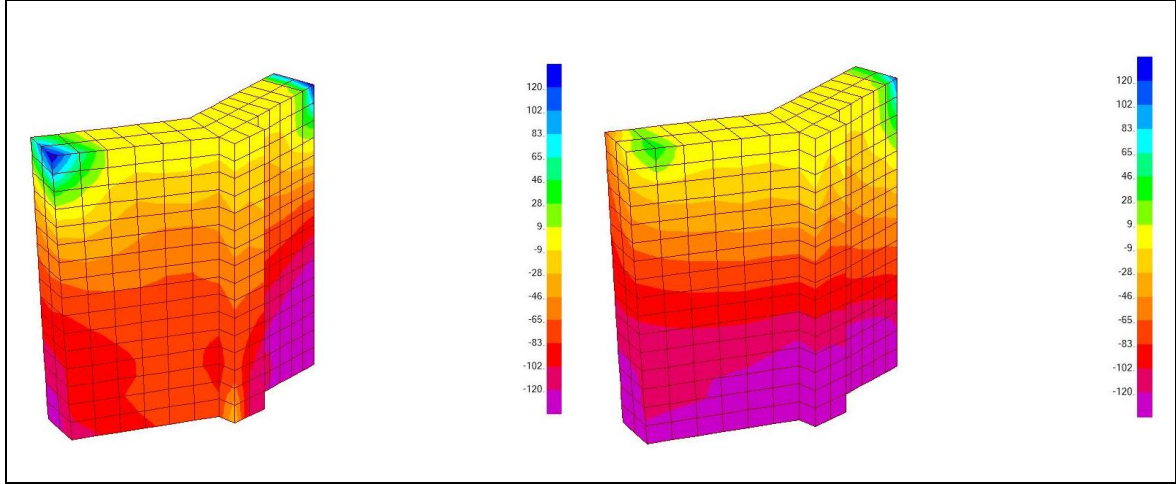
Şekil 6.7. 2 numaralı burç sırasıyla $G + EQ_x$ ve $G + EQ_y$ yük birleşiminde elde edilen gerilme dağılımı



Şekil 6.8. 3 numaralı burç sırasıyla $G + EQ_x$ ve $G + EQ_y$ yük birleşiminde elde edilen gerilme dağılımı



Şekil 6.9. 1 ve 2 numaralı burçlar arasındaki kemerin sırasıyla $G + EQ_x$ ve $G + EQ_y$ yük birleşiminde elde edilen gerilme dağılımı



Şekil 6.10. 2 ve 3 numaralı burçlar arasındaki sur duvarının sırasıyla $G + EQ_x$ ve $G + EQ_y$ yük birleşiminde elde edilen gerilme dağılımı

Sonlu elemanlar hesap sonuçlarının değerlendirilmesi

Bu bölümde Sinop surlarının yapısal davranışının incelenmesi ve “aşamalı yıkım” analizleri için referans ve karşılaştırma amacıyla yapılan sonlu elemanlar metoduna dayalı gerilme hesaplarının sonuçları değerlendirilmiştir.

Örnek hesapların ele alındığı boyut ve kapsamdaki tarihi bir yapının lineer veya daha üst seviyedeki bir hesap yaklaşımı içinde değerlendirilmesi çok kapsamlı ve uzun süreli çalışma gerektirir. Yapının kritik noktalarından örnek alınması ve bunların hangi mekanik özelliklere karşı geldiğinin bilinmesi şarttır. Yüzlerce yıldan beri ayakta kalmış ve bu süre içinde onarım veya yapısal değişiklik geçirmiş bir yapının üzerindeki bu müdahalelerin nasıl yapıldığı hakkında bilgi sahibi olmak da gereklidir. Ancak bu koşullarda hazırlanan analiz modelinin güvenilirliği anlaşılabilecek ve sonuçların yorumlanmasında kolaylık sağlanacaktır. Sinop surlarının geometrik ölçüleri hassas bir şekilde tespit edilmiş olmasına rağmen onun tamamlayıcısı olan yan bilgiler elde edilememiştir. Çalışmanın kapsamına giren yapılar tahribatlı numune alınımına uygun bir bölge değildir ve tahribatsız malzeme testleri bu tez kapsamında yürütülememiştir.

Sonuçların değerlendirilmesi aşamasında analitik hesap verilerine ve mühendislik kıstasları içinde yapının nasıl bir davranış aralığında olabileceğine yönelik tahminler yapılmıştır. Bu sorumluluk duygusuyla sonuçların “en doğru” sonuçlar olduğu iddiasında olmak mümkün değildir.

Yapılan hesaplar sonucunda Sinop surlarının kendi ağırlığının neden olduğu düşey yükler ve muhtemel bir deprem ya da diğer yatay yükler etkisindeki davranışı ve taşıyıcı elemanlarının karşılaştıkları etkilere karşı dayanımı ile ilgili şu gözlemler yapılmıştır.

- Sinop surlarının bu bölümündeki sur duvarlarının ve burçların oldukça rijit bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Hesap spektrumu Şekil 6.4’de verilen deprem etkisine göre yapılan analizler sonucunda elde edilen en büyük ötelenme değerleri 3 numaralı burç olarak tanımlanan kütlenin en üst noktasında x yönünde 8 mm ve y yönünde ise 2,6 mm’dir. Bu noktanın en alt kota göre yüksekliğinin 22 m olduğu dikkate alındığında 0,0004 görelî yer değiştirme oranına karşı geldiğinden kabul edilebilir sınırların içinde kalmaktadır. Çünkü bu görelî yer değiştirme sınırında duvarlarda yapıldıkları malzemeye bağlı olarak çatlamanın ortaya çıkması beklenebilir bir durum olsa da yıkılmanın uzak bir olasılık olduğu söylenebilir.
- Yapının tamamının değerlendirilmesinde sadece en büyük yer değiştirme değil bütün noktalarının hangi oranlarda yer değiştirdiğinin bilinmesi ön plana çıkmaktadır. Yukarıda da belirtildiği gibi çok sayıda düğüm noktasının birleştirilmesi ile elde edilen analiz modelinin öngörülen deprem etkisi altında nasıl bir performans gösterdiği yer değiştirmelerin yerel gerilmelere dönüştürülmesi ile görülebilir ve yapının genel performansı bu davranış dikkatli bir şekilde incelenerek cevaplandırılabilir.
- Yapısal analizler sonucunda elde edilen etkilerin incelenmesinde, Sinop surlarının taşıyıcı elemanlarında Türk Deprem Yönetmeliğinde yığma yapılar için önerilen basınç ve kayma gerilmesi değerlerinin aşılmadığı gözlenmiştir.
- Çekme gerilmelerinin ise sadece boşluk köşelerinde ve duvar alt köşe bölgelerinde küçük alanlarda aşıldığı gözlenmiştir. Kullanılan elemanların ağ yapısı ve mesnet şartları gereği yatay yüklemelerde bu gerilmelerin oluşması kabul edilebilir düzeydedir.
- Yapılan gerilme hesapları sırasında, yapının taşıyıcı sistemini oluşturan elemanların malzeme özelliklerinin literatür araştırması ve mevcut yönetmeliklerde önerilen değerler doğrultusunda belirlenmiş olduğu dikkate alınmalıdır. Bu durumda, yapının belirli yerlerindeki olası bir malzeme bozulması ya da taşıyıcı elemanlarda meydana gelebilecek malzeme kayıplarının yapının davranışını etkileyebileceği söylenebilir. Ancak, elde edilen yer değiştirmeler ve gerilmeler kabul edilebilir sınırlar içinde olduğundan, bu tür bir varsayım sonucunda bile Sinop surlarının incelenen bu bölümünün öngörülen düşey yük ve yatay yüklere karşı dayanımı ile ilgili bir olumsuzluğun meydana gelmesi olasılığı çok zayıftır.

- Bu hesaplar sonucunda, Sinop surlarının “aşamalı yıkım” analizleri için modelleme yönteminin altyapısı belirlenmiş ve tanımlanmıştır. Bu aşamada elde edilen makul sonuçlar “aşamalı yıkım” analizlerinin modelleme yöntemi ve kabullerini doğrulamıştır.

6.2.2. İkinci aşama analizleri ve değerlendirmeleri: Sur duvarlarının “aşamalı yıkılma” analizleri

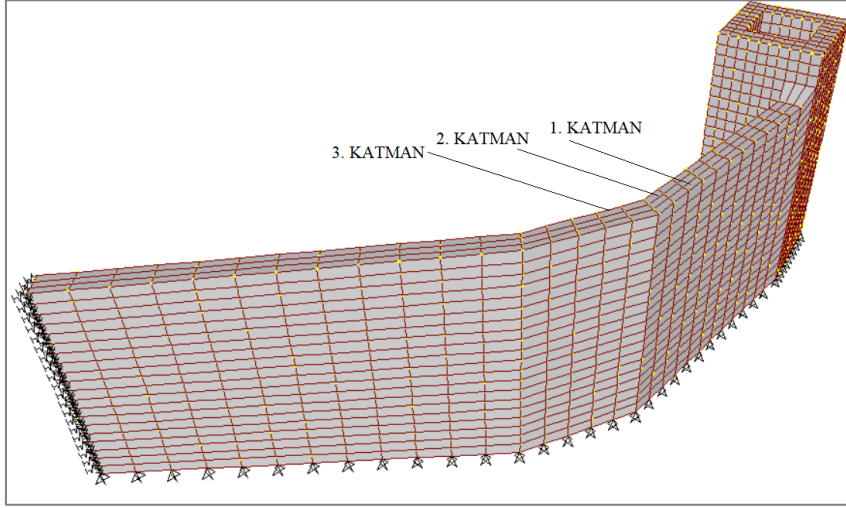
Aşamalı yıkılma analizleri Sinop surlarının dalgalara maruz kalarak hasar gördüğü bölümleri için yapılmıştır. Birinci aşama analizlerinde de yer alan yaklaşık 40 m uzunluğundaki sur duvarları aşamalı yıkılma analizleri için modellenmiştir.

Aşamalı yıkılma analizlerinin asıl amacı mevcut yapının gerçek yapısal davranışının belirlemek değildir. Bu analizler ile özel yükler ya da çevresel etkiler nedeniyle, taş duvar örgüsünde herhangi bir ayrışma ve dağılma olmadan, büyük kütlelerin stabilite sorunlarından dolayı bütün olarak devrilmelerinin nedenleri araştırılmıştır.

Dalgaların verdiği hasara maruz kalan sur duvarlarının sonlu elemanlar hesap modeli birinci aşama analizlerinde olduğu gibi üç boyutlu SOLID elemanlar ile SAP2000 yapısal analiz programının modelleme özellikleri ve kurallarına göre hazırlanmıştır. W1 PCA 00 – W1 PCA 05 adıyla tanımlanan analitik modellerle 6 adet analiz sırasıyla gerçekleştirilmiştir. Her analiz aşamasında, önceden kabul edilen gerilme sınır değerlerine göre sur duvarlarında oluşan aşınma sonucunda meydana gelen geometrik şekil değişikliği modellere yansıtılarak yıkılma süreci izlenmiştir.

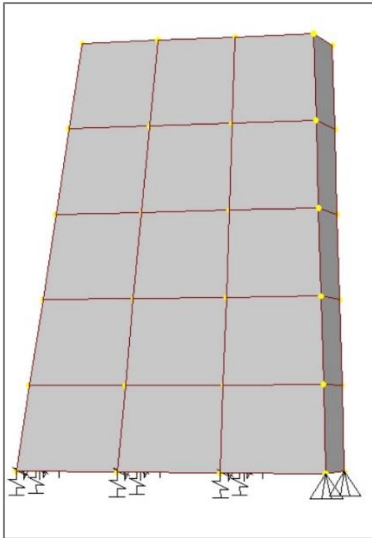
- Hesaplarda kullanılan başlangıç hesap modeli 4740 düğüm noktası ve 3232 SOLID elemanı ile oluşturulmuştur her yeni hesap kademesinde düğüm noktası ve eleman sayısı aşınan bölümlerin konumuna göre azaltılmıştır.
- Taş yığma yapı elemanlarının harç ile birlikte tek bir malzeme özelliği gösterdiği varsayılarak elastisite modülü ve birim ağırlık kabulleri yapılmıştır. Elastisite Modülü $E=1000000 \text{ kN/m}^2$ (1000 MPa), birim ağırlık 20 kN/m^3 olarak tanımlanmıştır.
- Taş duvar için sınır basınç gerilmesi $f_{m(\text{basınç})}=2,4 \text{ MPa}$, sınır çekme gerilmesi ise $f_{m(\text{çekme})}=0,15 \text{ MPa}$ kabul edilmiştir.
- Hesap sonuçlarının kolay bir şekilde değerlendirilebilmesi için Şekil 6.11 de gösterildiği gibi hesap modelleri duvar üç ayrı bölgeye ayrılarak duvar kalınlığı içinde 3 katmandan

oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece her hesap aşamasında duvarın belirli bölgesinde ve duvar kalınlığı içinde çekme gerilmelerinin ilerlemesi kolayca izlenmiştir.



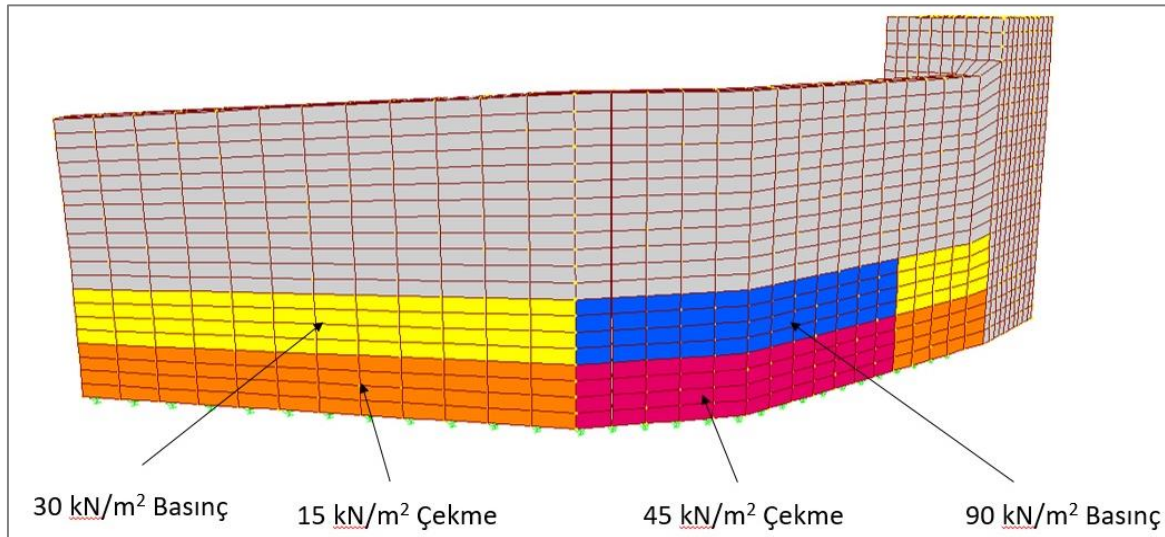
Şekil 6.11. Sur duvarları katmanları

- Sur duvarlarının zemin ile birleşimi başlangıç analizinde (W1 PCA 00) $k = 10000 \text{ kN/m}$ Winkler yayları ile tanımlanmıştır. Bu değer yumuşak kum zemin özelliğine karşılık gelmektedir [118].
- Birinci analizden sonra yapı-zemin birleşim noktalarında gözlenen çekme gerilmelerinin meydana geldiği düğüm noktalarına Şekil 6.12 de gösterildiği gibi T/C ISOLATOR (çekme-basınç tanımlı düğüm noktası) elemanları yerleştirilmiştir.



Şekil 6.12. Yapı-zemin birleşim noktaları izolatör tanımlaması

- T/C ISOLATOR elemanlarının basınç için rijitlik değeri Winkler yaylarında olduğu gibi $k=10000 \text{ kN/m}$, çekme için rijitlik değeri ise denge denklemlerinin çözülebilmesi için çok küçük bir değer olarak 10 kN/m tanımlanmıştır. Aslında burada amaçlanan sur duvarlarının temelini çekme kuvvetlerine karşı hiçbir dayanım göstermeden sadece basınç gerilmelerine mukavemet göstermesidir. Böylece devrilmenin geometrik olarak izlenmesi mümkün olacaktır.
- Hesaplarda statik doğrusal olmayan analiz seçeneği tercih edilmiştir.
- Sur duvarlarının kendi ağırlığının neden olduğu düşey yükler (G) ve dalgaların neden olduğu basınç ve çekme kuvvetlerin uygulandığı yatay yükler (WTR-PRS) uygulanmıştır.
- Sonuçların değerlendirilmesinde düşey yük + yatay yük kombinasyonu kullanılmıştır.

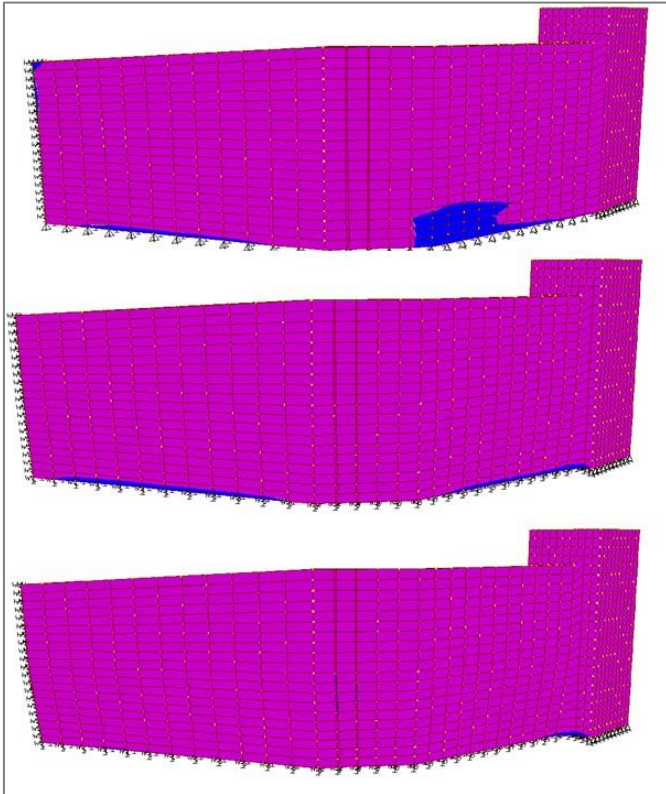


Şekil 6.13. Dalgaların neden olduğu basınç ve çekme kuvvetleri

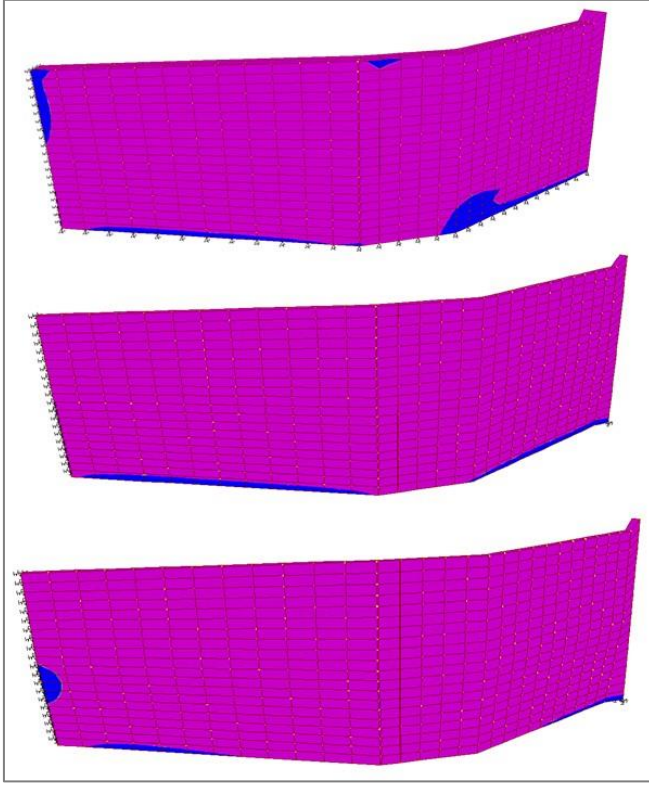
Yatay yük olarak; Şekil 6.13’de gösterildiği gibi sur duvarlarının 0-2 metre yüksekliğindeki bölümünde dalgaların neden olduğu çekme kuvveti olarak $15 \text{ kN/m}^2 - 45 \text{ kN/m}^2$ arasında değişen yüzey basıncı uygulanmıştır. Sur duvarlarının 2-4 metre yüksekliğindeki bölümünde ise dalgaların neden olduğu basınç kuvvetini temsilen $30 \text{ kN/m}^2 - 90 \text{ kN/m}^2$ arasında değişen yüzey basıncı uygulanmıştır. Bu analizler daha önce de belirtildiği gibi sur duvarlarının gerçek davranışını belirlemek amacıyla değil yıkılma sürecinin geometrik stabilite bakımından izlenmesini ve kontrol edilmesini amaçlamaktadır. Dalgaların deniz yapılarında neden olduğu gerçek kuvvetlerin hesapları oldukça karmaşık ve uzun yıllara dayanan

istatistiksel verilere bağlıdır. Bu nedenle bu yük kabulleri ortalama değerler göz önüne alınarak seçilmiştir [119].

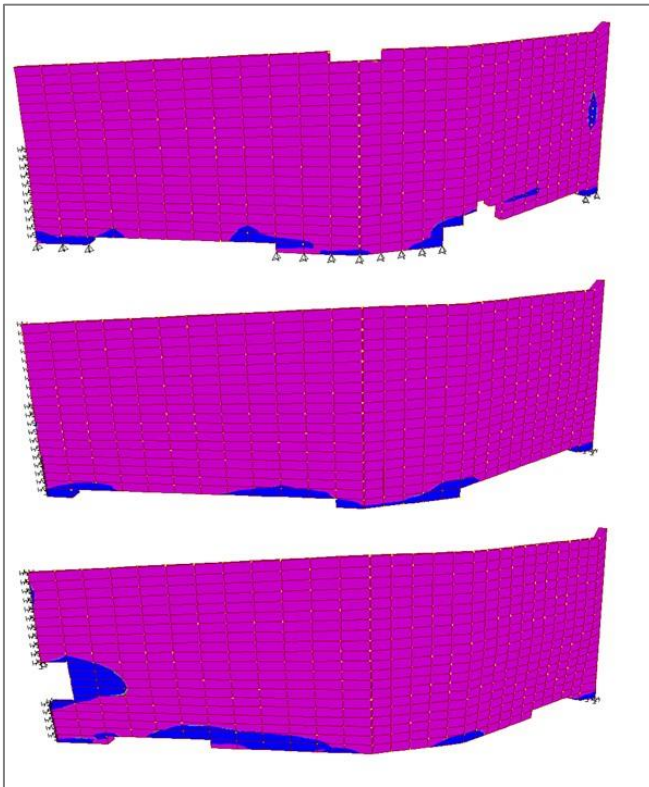
Başlangıç analizi için hazırlanan W1 PCA 00 modelinin yukarıda belirtilen düşey ve yatay yüklere göre gerçekleştirilen hesapları sonucunda sur duvarların temelin büyük bir bölümünde çekme gerilmeleri oluşmuştur. İkinci analiz için hazırlanan W1 PCA 01 modelinde ilk analiz sonucunda temelde meydana gelen çekme gerilmelerine denk gelen düğüm noktalarına T/C ISOLATOR elemanları yerleştirilmiş aynı yükler altında analiz tekrarlanmıştır. Şekil 6.14 de görüldüğü gibi kabul edilen çekme gerilmesi sınır değeri olan $f_m(\text{çekme})=0,15$ MPa değerinden daha büyük çekme gerilmesi oluşan bölgelerdeki SOLID elemanlar modelden çıkarılarak analizlere seri halde devam edilmiştir. Şekil 6.15 ve Şekil 6.19 arasında bu analizler sonucunda çekme gerilmelerinin duvar üzerinde ilerlemesi ve W1 PCA 05 modelin analizi sonunda stabilitenin bozularak devrilmenin (göçmenin) gerçekleştiği geometrik olarak saptanmıştır.



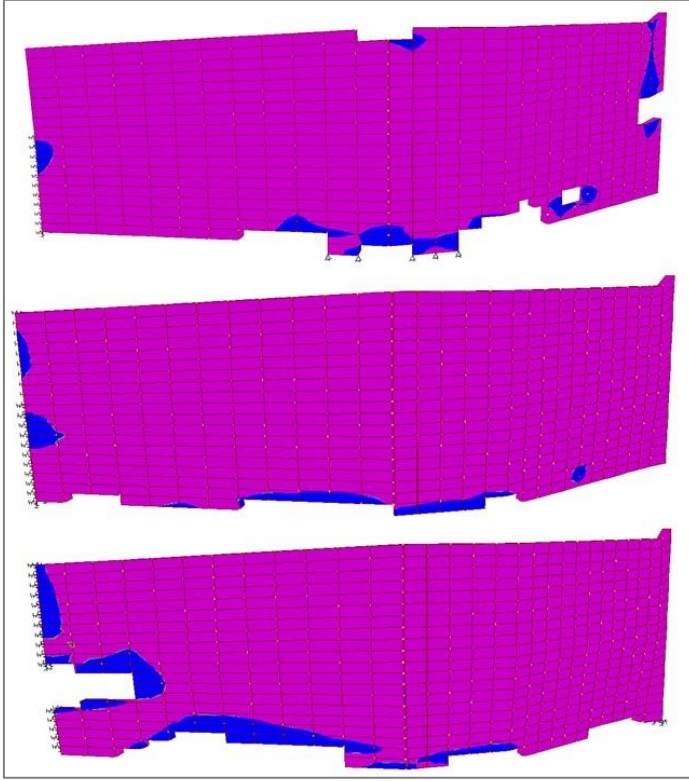
Şekil 6.14. W1 PCA 00 Modeli 1, 2 ve 3. Katman sınır çekme gerilmelerinin aşıldığı bölgeler grafiği



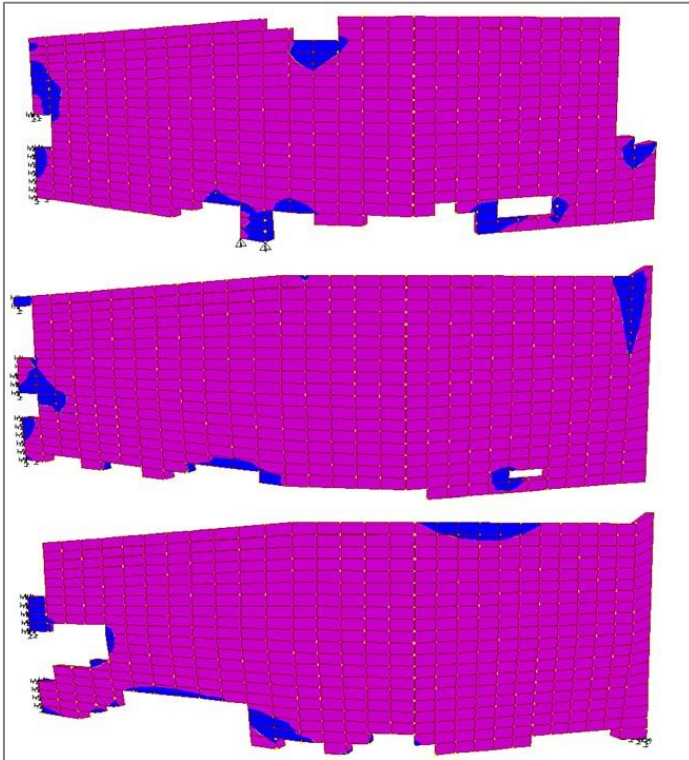
Şekil 6.15. W1 PCA 01 Modeli 1, 2 ve 3. Katman sınır çekme gerilmelerinin aşıldığı bölgeler grafiği



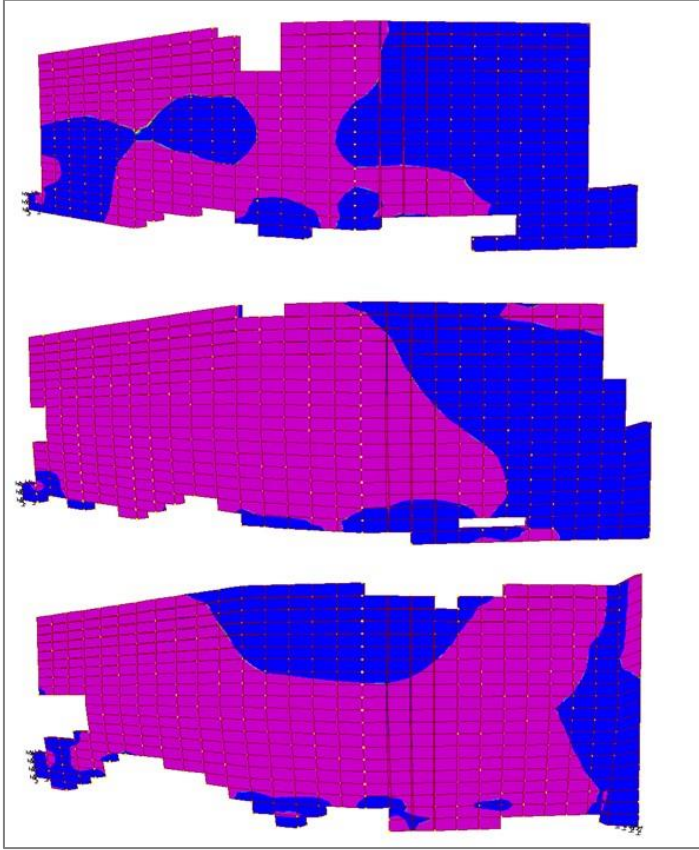
Şekil 6.16. W1 PCA 02 Modeli 1, 2 ve 3. Katman sınır çekme gerilmelerinin aşıldığı bölgeler grafiği



Şekil 6.17. W1 PCA 03 Modeli 1, 2 ve 3. Katman sınır çekme gerilmelerinin aşıldığı bölgeler grafiği



Şekil 6.18. W1 PCA 04 Modeli 1, 2 ve 3. Katman sınır çekme gerilmelerinin aşıldığı bölgeler grafiği



Şekil 6.19. W1 PCA 05 Modeli 1, 2 ve 3. Katman sınır çekme gerilmelerinin aşıldığı bölgeler grafiği

Bu analizler sonucunda, duvarda meydana gelen çekme gerilmelerinin neden olabileceği çatlak, süreksizlik gibi yapının dengesini bozabilecek unsurların tespitinin kontrollü bir şekilde hesaplanarak mühendislik bilgi ve deneyimi ile verilecek kararların sağlanması yapılmıştır. Bu analizler sırasında uygulanacak yükler, mesnet şartları ve diğer mekanik özellikler tamamen mühendislik bilgi ve deneyimine göre belirlenmiştir. Sonuçların ve tahmin edilen davranış biçiminin doğruluğu burada aktarılan ve daha önceki analizle doğrulanan sayısal hesap yöntemlerinin doğru bir şekilde uygulanmasına bağlıdır.

6.2.3. Üçüncü aşama analizleri ve değerlendirmeleri: Kale burcunun “aşamalı yıkılma” analizleri

Tarihi yapıların ve anıtların korunması, onarımı ve restorasyonu birçok meslek alanı ve bilim disiplininin birlikte çalışmasını gerektirir. Bu çalışmalarda mühendislik disiplinlerinin her birinin kendi alanındaki bilgilerin genel hesap ve uygulamalara katkısı çok önemlidir. Örneğin, bu çalışma kapsamındaki seçilmiş örneğe benzeyen tarihi yapıların yapısal analizlerinde, malzeme mühendisliği, zemin mühendisliği, kıyı ve liman mühendisliği gibi

disiplinlerin büyük katkısı olacaktır. Onarım için belirlenmiş bir tarihi yapının hesapları için kabul edilen malzeme özellikleri, zemin koşulları ve uygulan yükler bu disiplinlerden alınacak ayrıntılı veriler ve bilgilerle tam olarak uygulanabilecektir.

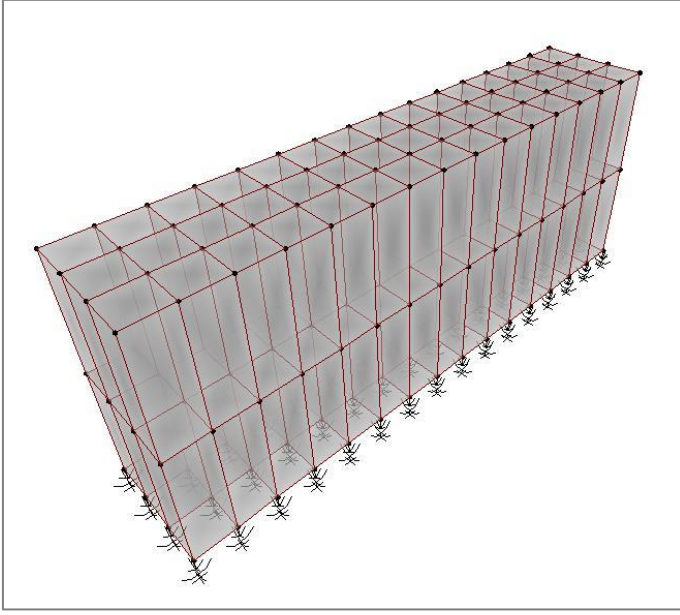
Sur duvarlarının aşamalı yıkılma analizlerinin üçüncü aşamasında, burç veya kule gibi büyük kütleli yapıların taş duvar ve diğer taşıyıcı elemanlarının dağılmadan bir bütün olarak devrilmesinin hesap ve simülasyonları yapılmıştır. Resim 6.21’de Sinop surlarının anlatılan şekilde devrildiği bir örnek gösterilmiştir.



Resim 6.21. Sinop surlarındaki bir burcun dalgaların etkisiyle bütün olarak devrilmesi (Ali İhsan Ünay Arşivinden)

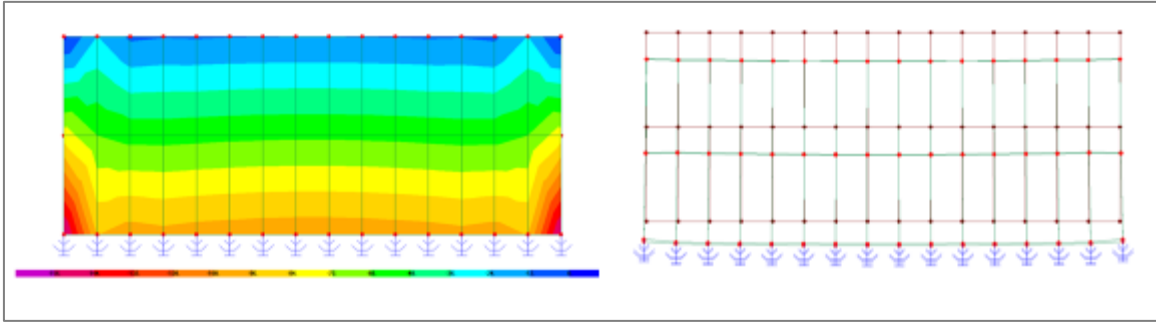
Üçüncü analiz serisi olarak Sinop surlarının daha önce tanıtılan bölümünde bir numaralı burç olarak adlandırılan burç için devrilme analizleri yapılmıştır. Dalgaların burcun temelinde aşınmaya neden oluşu, hazırlanan analitik modelde Winkler yayları ve T/C ISOLATOR (Çekme-Basınç tanımlı düğüm noktası elemanı) elemanları ile tanımlanarak devrilme simülasyonu yapılmıştır.

Seçilen burç için aşamalı yıkılma analizlerinden önce, devrilme analizlerinin sonuçlarını doğru yorumlamak amacıyla, burcun 2 metre yüksekliğindeki bir bölümü için doğrulama hesapları yapılmıştır. Şekil 6.20’de gösterildiği gibi 5 m uzunluğunda, 2 m yüksekliğinde ve 1 m kalınlığında taş duvar bloğu dikkate alınmıştır.



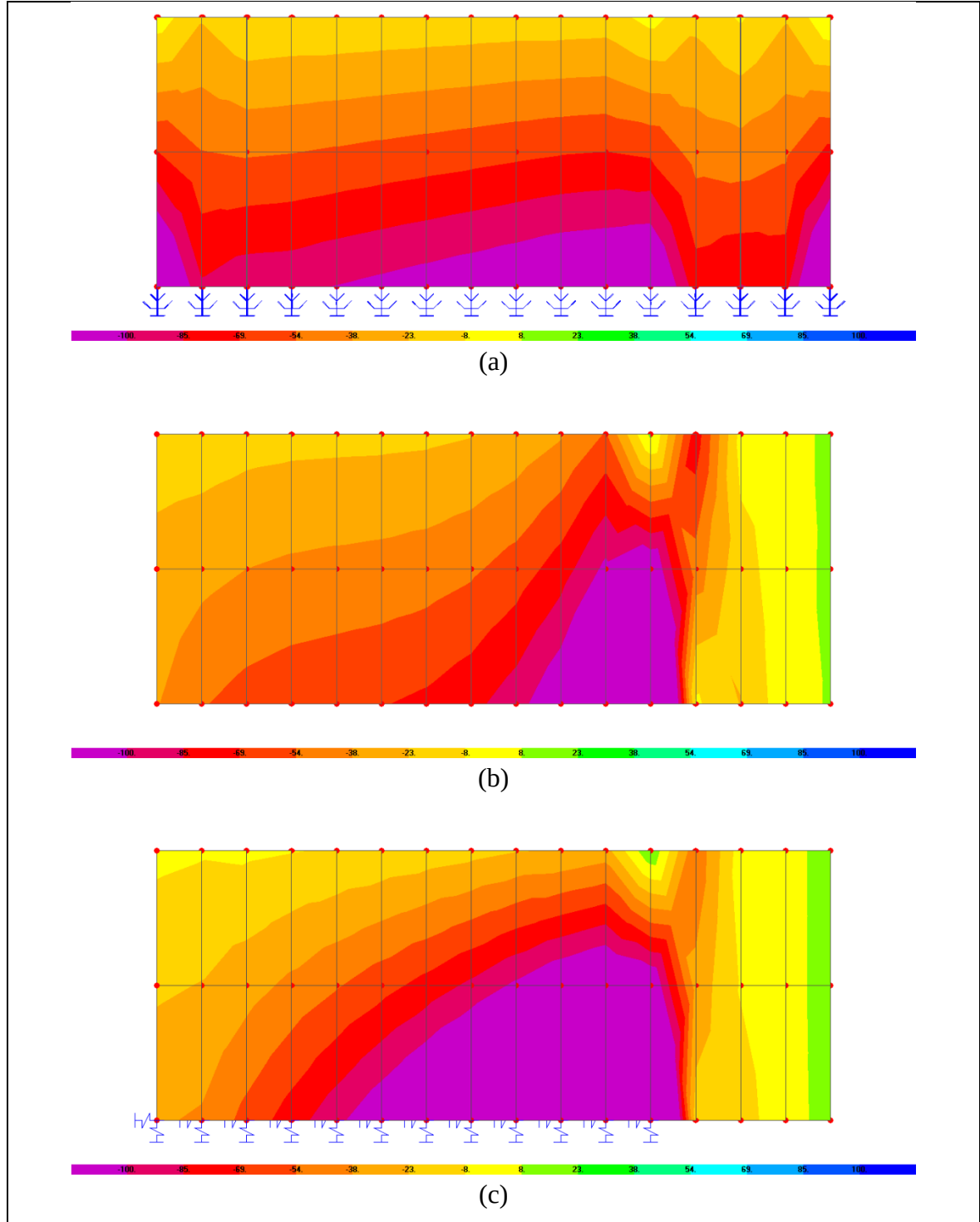
Şekil 6.20. Üçüncü analiz serisi için doğrulama modeli

İlk olarak taş duvarın kendi ağırlığı altında gerçekleştirilen analizde hazırlanan doğrulama modelinin mesnetlerine Winkler yayları ve T/C ISOLATOR elemanları uygulanmıştır. Winkler yaylarının yay katsayısı $k=10000$ kN/m, T/C ISOLATOR elemanının basınç için rijitlik değeri $k_{(\text{basınç})}=10000$ kN/m, çekme için rijitlik değeri ise $k_{(\text{çekme})}=0$ olarak tanımlanmıştır. Statik doğrusal olmayan (nonlinear) hesap ilkelerine göre gerçekleştirilen analiz sonucunda tanımlanan yay katsayıları ve T/C ISOLATOR elemanının çekme-basınç sınır değerleri doğrultusunda beklenen tipik deplasmanlar ve gerilmeler elde edilmiştir. Hesaplanan bu değerler kabul edilen rijitlik tanımları ve malzeme özelliklerine bağlı olup rakamsal değerlerinin bu amaçla yapılan bir analiz için önemi yoktur. Sadece test elemanının davranışının kontrolü için geçerlidir. Şekil 6.21’de bu tipik davranışı gösteren gerilme dağılımı ve deplasmanlar yer almaktadır. Modelin en üst seviyesinden mesnet noktalarına doğru düzenli bir şekilde artan basınç gerilmesi ve ortalama 0,4 mm mertebesinde düşey doğrultudaki yer değiştirmeler bu tipik davranışı doğru bir şekilde yansıtmaktadır.

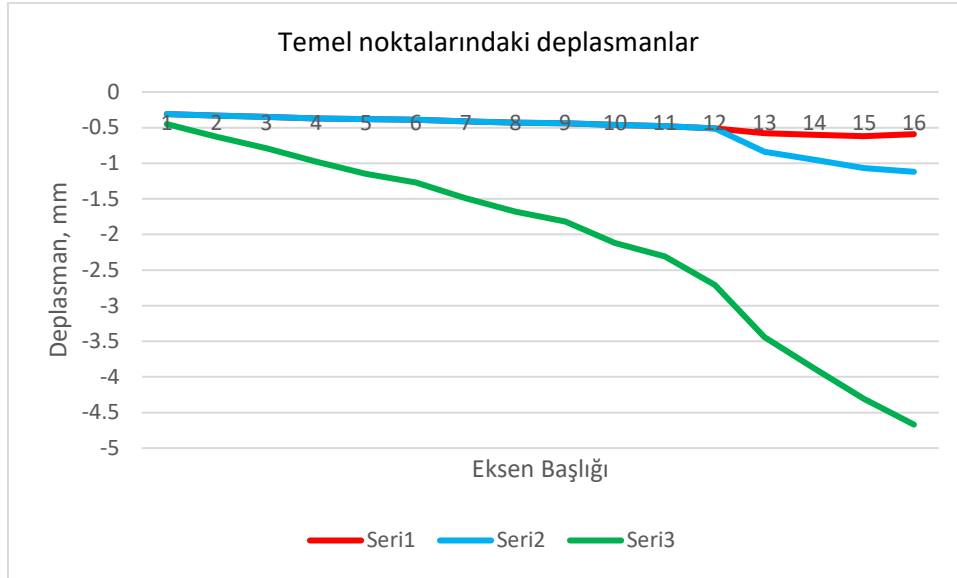


Şekil 6.21. Doğrulama modelinin mesnetlerinin Winkler yayları ve T/C ISOLATOR elemanlarıyla yapılan hesabı sonucunda elde edilen gerilme ve yer değiştirmeler

Doğrulama modelinin dalgaların neden olduğu zemin aşınması nedeniyle oluşan mesnet şartlarına göre davranışını incelemek amacıyla, üç farklı analiz gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, doğrulama modelinin temeldeki uzunluğunun 1/4'üne karşılık gelen 1,25 metrelik bölümde, zemin aşınmasını tanımlamak amacıyla Winkler yayları kaldırılmış, ancak çekme-basınç davranışını kontrol etmek amacıyla T/C ISOLATOR elemanları yerinde bırakılmıştır. İkinci analizde, klasik mekanik problemi gibi, zeminin aşınan yerlerini tanımlayan 1,25 metrelik bölüm dışındaki mesnetler, basit mesnet (mafsal mesnet) olarak tanımlanmıştır. Bu bir bakıma zeminin aşındığı kabul edilen 1,25 metrelik bölümün konsol kiriş gibi davranmasına neden olacaktır. Gelişmiş bilgisayar uygulamalarının kullanılmadığı durumlarda, bu yaklaşım kavramsal olarak çok yanlış görünmüyor olsa da elde edilen gerilme sonuçları gerçek davranışı çoğunlukla yansıtmaz. Üçüncü analizde ise bu kez daha gerçekçi olduğu düşünülerek, zemin aşınmasının olduğu 1,25 metrelik bölüm dışında kalan mesnetler Winkler yayları ile modellenmiştir. Bu modern yapısal analiz problemlerinde zemin-yapı ilişkini doğru tanımlamak için çok sık kullanılan bir yöntemdir. Şekil 6.22 (a,b,c), ve Şekil 6.23'de bu üç analiz sonucunda elde edilen gerilme dağılımları ve yer değiştirmeler gösterilmiştir.



Şekil 6.22. Doğrulama modelinin mesnet koşullarına göre değişen gerilme dağılımları; a) Mesnetlerde Winkler yayları ve T/C ISOLATOR tanımlanan model ile yapılan birinci analiz, b) Basit mesnetlerle konsol davranışı sergileyen model ile yapılan ikinci analiz, c) Mesnetlerde sadece Winkler yayları tanımlanan model ile yapılan üçüncü analiz

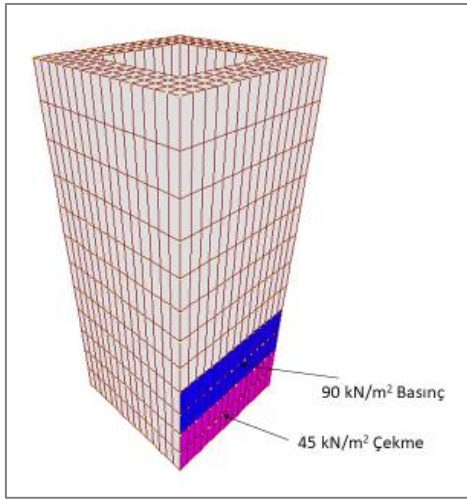


Şekil 6.23. Doğrulama modelinin temel noktalarında mesnet koşullarına göre değişen deplasmanlar

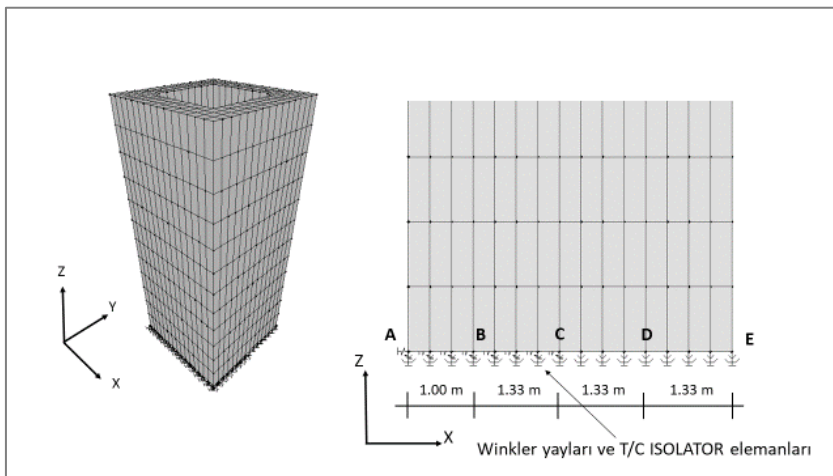
Şekil 6.22 ve Şekil 6.23’de gerilme dağılımı ve yer değiştirmelerde görüldüğü gibi, ikinci ve üçüncü analizler zeminin aşındığı 1,25 metrelik bölümün konsol kiriş gibi davrandığını yansıtmaktadır. Birinci analizde ise gerilme dağılımı ve yer değiştirmeler dengeli bir değişim göstermektedir. Resim 6.21 de Sinop surlarında devrilen burç fotoğrafında da görüldüğü gibi, devrilme sırasında burçların taş duvarlarında aşırı gerilmelerden kaynaklanan bozulma veya parçalanma izine rastlanmamıştır. Bu da deprem, patlama veya benzer çarpma etkisi gibi ani yükler dışında devrilmenin bir stabilite sorunu olarak yavaş yavaş gerçekleştiğini göstermektedir. Winkler yayları ve T/C ISOLATOR elemanlarıyla kontrollü aşamalı yıkım hesap yöntemiyle zemin hareketleri ya da Sinop Kalesi örneğinde dalgaların neden olduğu tahribat ve aşınmaların kale, burç ve benzeri büyük kütleli tarihi yapıların bütün olarak devrilmelerinin nedenleri araştırılabilir.

Üçüncü aşama analizlerinde bir numaralı burç olarak tanımlanan bölüm için mesnetlerine T/C ISOLATOR elemanları yerleştirilerek aşamalı devrilme analizleriyle burcun devrilme simülasyonu yapılmıştır. Şekil 6.24’de görüldüğü gibi 5 m x 5 m x 12 m boyutlarında, 1 metre duvar kalınlığı olan burç, 2496 düğüm noktası, 1728 SOLID ve 192 T/C ISOLATOR elemanı ile modellenmiştir. Şekil 6.24’de gösterildiği gibi, burcun kendi ağırlığı düşey yük, dalgaların neden olduğu basınç ve çekme kuvvetleri ise yatay yük olarak uygulanmıştır.

Gerilme ve deplasmanlar ‘düşey yük + yatay yük’ kombinasyonuna göre değerlendirilmiştir. Analizler statik doğrusal olmayan hesap ilkelerine göre gerçekleştirilmiştir. Burcun duvarlarında ve kütesinin bütünlüğünde bir hasar oluşmadan devrilmesi, analizler sonucunda temel noktalarında aşamalı olarak meydana gelen deplasmanlar ve burcun duvarlarında ortaya çıkan gerilme dağılımıyla izlenmiştir. Şekil 6.25’de gösterildiği gibi burç kütesinin devrilmesi gerçekleştirilen aşamalı analizlerle y eksenini etrafında izlenmiştir. Sonlu elemanlar analiz modeli x-y düzleminde x eksenini boyunca 4 bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgelerde zeminin aşınmasını temsil edecek şekilde Winkler yayları ve T/C ISOLATOR nokta bağlantısı elemanları her analiz aşamasında rijitlik ve boşluk kontrolü açıklıkları basınç ve çekme kuvvetleri dikkate alınarak uygulanmıştır.

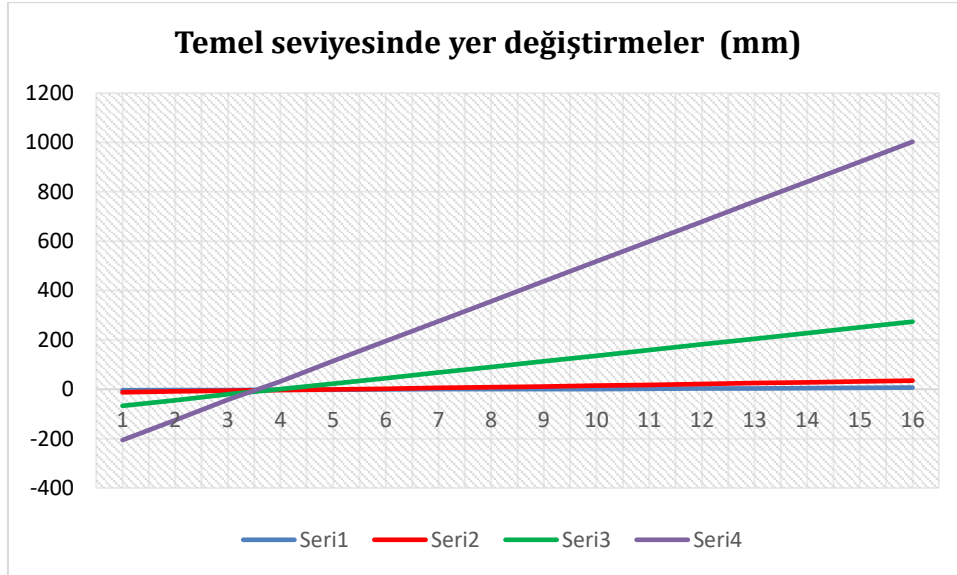


Şekil 6.24. Burçların bütün olarak devrilmesini incelemek amacıyla oluşturulan sonlu elemanlar hesaplarında dalgalarının neden olduğu yatay yükler

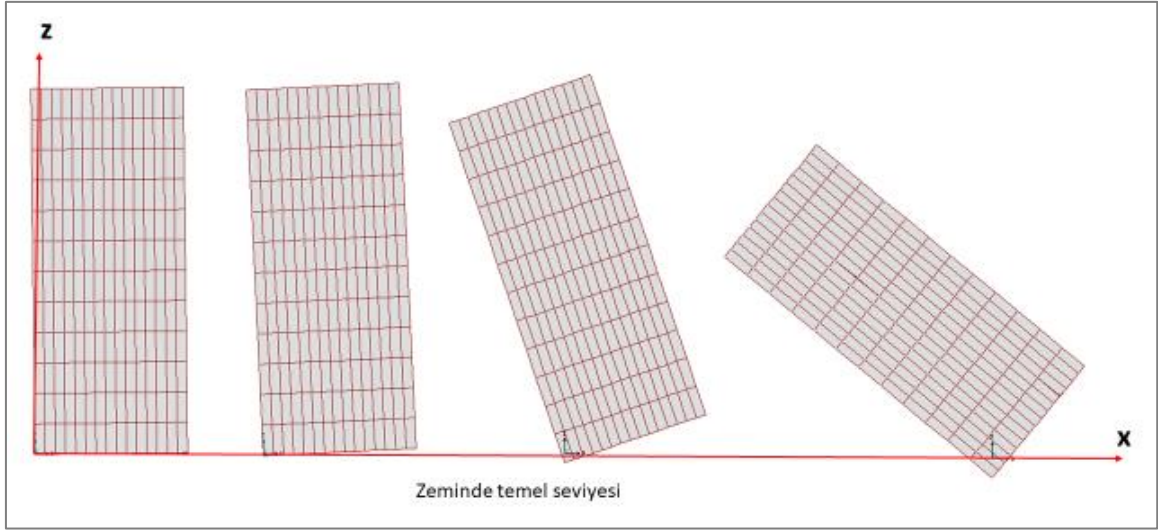


Şekil 6.25. Burçların bütün olarak devrilmesini incelemek amacıyla oluşturulan sonlu elemanlar analiz modeli

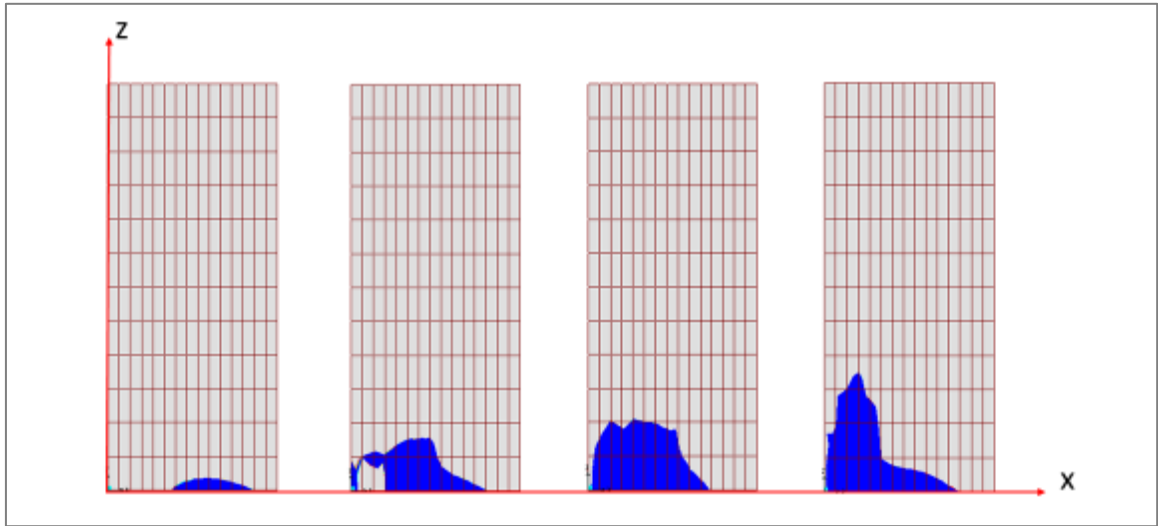
Uygulanan düşey yük ve yatay yükler sonucunda gerçekleştirilen ilk analiz ile D-E noktaları arasında meydana gelen çekme gerilmeleri sonucunda bu bölümdeki zeminin aşıldığı kabul edilmiştir. Önce D-E bölümü, daha sonra her analiz sonucunda çekme gerilmelerinden dolayı zemin özelliklerinin değişmesini temsilen sırasıyla diğer bölümlerdeki (C-D, B-C ve A-B bölümleri) Winkler yayaları ve T/C ISOLATOR elemanlarının basınç ve çekme rijitlik değerleri ile boşluk açıklığı kontrol değerleri değiştirilerek hesaplar tekrar edilmiştir. Yapılan seri analizler sonucunda modelin x-y düzleminde x eksenine doğrultusunda düğüm noktalarında meydana gelen yer değiştirme değerleri Şekil 6.26'da ki grafikte gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 6.27'de seçilen bazı aşamalarda modelin y eksenine paralel eksenler etrafında devrilme simülasyonu gösterilmiştir. Şekil 6.28'de ise seçilen aşamalarda burç kütesinin duvarlarda kabul edilen çekme sınır gerilmesinin dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 6.26. Burcun temelindeki noktalarda aşamalı analizler sonucunda elde edilen yer değiştirmeler



Şekil 6.27. Seri hesaplar sonucunda seçilen burcun devrilme aşamaları



Şekil 6.28. Seçilen burcun devrilme aşamalarında kabul edilen sınır çekme gerilmelerinin dağılımı

- Elde edilen bu sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, deprem, ani toprak kayması, çarpma (gemi çarpması ya da benzer kaza etkileri) gibi ani yükler ya da müdahaleler dışında, yıllara yayılan dalga kuvvetleri, malzeme aşınması sonucu eleman kaybı veya zemin hareketleri gibi yük ve etkiler sonucunda yapının ana taşıyıcı elemanlarında kuvvet ve gerilmeler bağlı hasarların oluşması beklenmez.
- Tarihi yapılardaki bu tür devrilme ve yıkılmanın nedenlerini araştırmak için, genel mühendislik problemleri ve tasarımı için geliştirilmiş paket bilgisayar programlarının, genel bir mühendislik problemi çözülüyormuş gibi kullanılması önerilmez.

Yukarıda bahsedilen özel yük ve çevresel şartlara neticesinde hasar görmüş tarihi yapılarda yıkılmanın ve hasarın nedenleri, inşaat mühendisliğin ilgili tüm alanlarının parametreleri ayrıntılı ve duyarlı bir şekilde incelenerek, yapı mekaniği ve yapısal analizin modelleme ve hesap kuralları doğru bir şekilde uygulanarak araştırılmalıdır.

7. SONUÇLAR

Tarihi yapıların korunması ve servis ömürlerinin uzatılması bilinci giderek yaygınlaşmakta ve bu konuda yapılan çalışmalar hız kazanmaktadır. Tarihi yapıların sürdürülebilirliği, kültürel dokunun gelecek nesillere aktarılması ve önemli gelir kaynaklarından biri olan turizmin gelişmesi açısından önemli boyuttadır. Bu ve buna bağlı birçok nedenden dolayı tarihi yapıların yapısal davranışlarının araştırılmasında uygulanacak olan yöntemler de büyük önem arz etmektedir. Uygulanacak olan yöntem mevcut tarihi yapının gereksinimleri doğrultusunda mühendislik önseziyle karar verilmektedir.

“Hayat boyu öğrenme” kavramı mühendislik uygulamaları için de çok önemlidir. Günümüzün mühendislik uygulamalarında bilim ve teknolojiye meydana gelen gelişmeleri ve yenilikleri takip etmek daha ulaşılabilir ve kolaydır. Mühendislik projelerinde ve hesaplarında kullanılan bilgisayar uygulamaları her geçen gün daha yaygın hale gelmektedir. Bu nedenle sık rastlanan mühendislik problemlerinde bilgisayar uygulamalarının kullanımı için geliştirilen teorik çalışmalara ulaşmak ve kullanmak daha kolaydır. Her biri kendine özgü özellikler gösteren tarihi yapılar için yapılan bilimsel araştırmaların mühendislik uygulamalarına doğrudan katkı verebilecek bir şekilde aktarılması mümkün olmamıştır. Çok karmaşık parametrelerin bir arada kullanılmasını gerektiren bilimsel çalışmaların sonuçlarının ancak yönetmelikler ve özel yapım tekniklerinin gerektiği durumlarda doğrudan yansması mümkün olmaktadır.

Tarihi yapıların ve anıtların kendine özgü malzeme özellikleri ve yapım tekniği vardır. Zamanın ve çeşitli faktörlerin neden olduğu bozulmalardan, hasarlardan ve eklemelerden dolayı özgün yapısal formu değişmiştir. Özellikle hasar görmüş bir tarihi yapının mevcut yapısal kapasitesinin değerlendirilmesi mevcut yönetmelik ve kurallara göre mümkün değildir.

Taş veya tuğla örgü sistemiyle inşa edilmiş tarihi yapılar ve anıtlar çağdaş mühendislik yapılarında karşılaşmadığımız ilginç hasar ve çökme örneği sergiler. Bunun en önemli nedeni taş-tuğla örgü sisteminin malzeme özelliklerinin hiçbir zaman gerçek değerleriyle tanımlanamamasıdır. Bu özellikler dikkate alınmadan yapılan gözlemler çoğunlukla problemlerin günümüzün mühendislik teori ve denklemleriyle açıklanmasını zorlaştırır.

Basit geometrik stabilite ve statik denge denklemleriyle, özellikle taş-tuğla malzeme ile inşa edilmiş tarihi yapıların bütün bir kütle olarak devrilmelerinin nedenleri açıklanabilir.

Yapısal analiz bilgisayar uygulamaları, eğer doğru data ve parametreler tanımlanabildiyse her zaman matematiksel anlamda doğru sonucu verir. Ancak çok fazla parametrenin tanımlanması gereken tarihi yapı hesaplarında dikkate alınmayan ya da gözden kaçan bazı özellikler, bilgisayar yazılımlarına duyulan güvenden dolayı sonuçların yanlış değerlendirilmesine neden olabilir.

Bu çalışmada temel mühendislik bilgileri, deneyimi ve mühendislik önsezisinin kontrolü altında özellikle taş-tuğla tarihi yapılarda büyük kütlelerin bütün olarak devrilmelerinin nedenleri aşamalı yıkılma analizleri ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar temel mühendislik teorisi ve denklemleriyle uyumludur. Elle çözülmesi mümkün olmayan denklemleri bilgisayar yazılımı ile tamamıyla kullanıcının kontrolü altında çözümleyerek, kütsel devrilmelerin nasıl gerçekleştiği mühendislik bilgi deneyimleriyle uyumlu olacak bir şekilde açıklanması mümkündür.

Bu çalışmada gerçekleştirilen analizler sonucunda, tarihi yapılar ve anıtlarda çeşitli yükler ve çevresel etkiler sonucunda iç kuvvetlerin ve gerilmelerinin neden olabileceği çatlak, süreksizlik gibi yapının dengesini bozabilecek unsurların tespitinin kontrollü bir şekilde hesaplanarak mühendislik bilgi ve deneyimi ile verilecek kararların sağlanması yapılmıştır.

Analizler için kabul edilen malzeme özellikleri, mesnet ve diğer sınır şartları, taşıyıcı sistem elemanlarının boyutları, sınır gerilme değerleri ve uygulanacak yükler tamamen mühendislik bilgi ve deneyimine göre belirlenmiştir. Sonuçların ve tahmin edilen davranış biçiminin doğruluğu burada aktarılan ve daha önceki analizle doğrulanan sayısal hesap yöntemlerinin doğru bir şekilde uygulanmasına bağlıdır.

Sinop surlarının yıkılma nedenlerinin araştırılması ve bu tür tarihi yapıların devrilme, yıkılma ve benzer strüktürel sorunlarının araştırılması için yapılacak hesaplara yol göstermek amacıyla, seçilen bölgede bulunan yapılar için çeşitli sayısal analiz modelleri hazırlanmıştır.

İlk analizler daha önce anlatılan bölgedeki sur duvarları ve burçları kapsayan yapıların düşey yükler ve yatay yükler altında klasik sonlu elemanlar hesaplarını içermektedir. Bu analizlerin amacı devrilme ve yıkılma senaryolarının incelendiği, bu tez çalışması sırasında geliştirilen modelleme ve hesapların korelasyonunun sağlanmasıdır. Yapılan hesaplar bilimsel literatürde benzerleri çok sayıda bulunan hesap örnekleriyle uyum sağlamıştır, seçilen yapıların strüktürel davranışı hakkında kapsamlı bilgiler vermiştir.

İkinci analiz grubunda ise dalgaların basınç ve çekme kuvvetine maruz kalan sur duvarlarının, duvarlardaki malzeme kaybının neden olduğu geometrik değişikliklerle sonucunda aşamalı yıkılma simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Üçüncü analiz grubunda seçilen bir burcun zemin aşınması sonucunda aşamalı analizlerle devrilme simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Analizlerde önerilen yöntem; çevresel etkilerin (dalga etkisi, zemin sınır şartları) model üzerindeki sınır şartlarını tanımlayıcısı olarak belirtilebilir. Bu yöntem mekaniğin temel prensipleri ve mühendislik ilkeleri ışığında doğru sonuçlar vermektedir. Bu sonuçlara istinaden bu yöntemin diğer büyük kütleli tarihi yapıların bütüncül bir şekilde devrilmesi/yıkılması senaryosunda uygulanabilir. Zemin mühendisliği, malzeme mühendisliği, kıyı-liman mühendisliği gibi anabilim dallarından alınacak parametreler doğrultusunda simülasyonlar gerçeğe en yakın sonuçları verecektir.

Tarihi yapıların ve anıtların yapısal analizi için gelişmiş bilgisayar programlarının kullanılması kaçınılmaz bir gerçektir. Tarihi yapıların mevcut durumunun belirlenmesi ve değerlendirilmesi için mimarlık, sanat tarihi, arkeoloji, malzeme bilimi ve kimya, restorasyon ve mühendislik disiplinlerinin ilgili bütün alanlarının birlikte çalışması nasıl çok önemliyse, yapısal analiz ve değerlendirme çalışmalarında da yapı mühendisliğinin ve mekanik biliminin bütün alanlarının birlikte çalışması gerekir. Gelişmiş bilgisayar programlarıyla gerçekleştirilen sayısal hesaplar her zaman kabul edilen bazı parametre ve katsayılarla bağlıdır. Tarihi yapıların ve anıtların yapısal analizinde hesapların başlangıcında yapılan bu kabullerin sonuçları ne şekilde değiştirdiği ihmal edilir. Analiz yöntemi, denklemlerin çözümü çoğunlukla daha ön plana çıkar. Kullanılan analiz yönteminin ve bilgisayar yazılımı bilimsel olarak tescil edildiğinden, elde edilen sonuçların doğruluğu konusunda şüphe edilmez. Yorumlar bu sonuçların doğrultusunda yapılır. Modern

mühendislik yapıların analizinde bu sistem çoğunlukla doğru olarak çalışır. Zira modern mühendislik yapıların yapısal elemanların geometrik özellikleri, malzeme özellikleri tartışılmaz bir şekilde kontrolü ve hatasız üretilmiştir.

Ancak söz konusu tarihi yapılar olunca, en önemli faktör malzeme, geometrik özellikler ve zemin koşullarının nasıl bir davranış sergileyeceği hiçbir zaman kesin olarak belirlenemez. Tarihi yapıların yapısal analizinde mühendislik deneyimi ve önsezisi her zaman çok önemli bir rol oynar. Tarihi yapıların ve anıtların yapısal analizinde kontrol gelişmiş bilgisayar yazılımlarında değil her zaman mühendiste olmalıdır. Bilgisayar yazılımlarının hangi bilgi verilirse ona göre çözüm ürettiği unutulmamalıdır.

KAYNAKLAR

1. International Council on Monuments and Sites. (2003). *Principles for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*, Zimbabwe: Victoria Falls, 1-11.
2. Modena, C., da Porto, F., Valluzzi, M.R. and Munari, M. (2013). *Criteria and technologies for the structural repair and strengthening of architectural heritage*. International Conference, Chennai, 13 (August 2015), 51-76.
3. Öztürk, N. (2019). *Ege bölgesinde bulunan müze işlevli kıyı kalelerinin mimari özellikleri ve koruma sorunlarının Bodrum Kalesi örneği üzerinden incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 3-20.
4. Çıtak, M. (2018). *Kale kent*. Çanakkale: Paradigma Akademi, 15-24.
5. Özçetin, S. (2016). *Kale yapılarının arkeoloji müzesi olarak kullanılması; Bodrum, Çeşme ve Marmaris Kaleleri örneği*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 7-31.
6. Reid, S. (2006). *Castles and tower houses of the scottish clans 1450-1650*. New York: Osprey Publishing Limited, 4-12.
7. İnternet: Ramos, R. Castillo De Requenes. URL: <https://www.instagram.com/p/B63u4WWHNZp/>, Son Erişim Tarihi: 23.02.2020
8. Boran, A. (2001). *Anadolu'daki iç kake cami ve mescidleri*. Ankara: Türk Tarih Kurumu Basım Evi, 7-9.
9. Akarca, A. (1998). *Şehir ve savunması*. Ankara: Türk Tarih Kurumu Basım Evi, 10-25.
10. İnternet: Wikipedia. Walton Castle Clevedon, England. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Walton_Castle, Son Erişim Tarihi: 24.02.2020.
11. İnternet: Grand Voyage Italy Castel del Monte. Proud Medieval Castle in Puglia. URL: <http://www.grandvoyageitaly.com/travel/category/accessible-italy>, Son Erişim Tarihi: 24.02.2020.
12. Mesqui, J. (2014). *Savaştan barışa şatolar ve kaleler*. İstanbul: Yapı Kredi Kültür Yayınları, 13.
13. İnternet: Tiago. Live a fairy tale in Segovia. URL: <https://www.edreams.com/blog/fairy-tale-segovia/>, Son Erişim Tarihi: 24.02.2020.
14. İnternet: Billydee. Mont Saint-Michel. URL: <https://www.instagram.com/p/Bu8NtpOhU4z/>, Son Erişim Tarihi: 25.02.2020.

15. İnternet: Anadolu Ajansı. Mersin Mamure Kalesi. URL: <https://www.ntv.com.tr/galeri/seyahat/akdenizin-binlerce-yillik-tanigi-mamure-kalesi-turkiyenin-en-buyuk-kaleleri> a,WTvQlHOiokqBDdtmQ1wIPg/MQc7mqqtqECAhDqxoJWYnA, Son Erişim Tarihi: 25.02.2020.
16. İnternet: Tarkan Açıkalın. Açıkalın Boyabat Kalesi/Sinop. URL: <https://tr.pinterest.com/pin/404620347755356186/?lp=true>, Son Erişim Tarihi: 23.02.2020.
17. Türkmen, M. and Bilgin, H. (2002). *Geleneksel Mimaride kubbeli örtü sistemlerinin yapısal davranışı*. Balıkesir Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi IV. Mühendislik Mimarlık Sempozyumunda Sunuldu, Balıkesir.
18. Gürer, C., Akbulut, H. ve Çetin, S. (2008). *Tek açıklıklı kemer sistemli rize köprülerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi*. 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, Antalya Sempozyumunda Sunuldu, Antalya, 435–445.
19. Casolo, S. and Sanjust, C.A. (2009). Seismic analysis and strengthening design of a masonry monument by a rigid body spring model: The “Maniace Castle” of Syracuse. *Engineering Structures*, 31(7), 1447–1459.
20. Dönmez, C. and Karakan, E. (2009). Köprülerde deneysel modal analiz uygulamaları. *Teknik Dergi*, 20(99), 4851–4863.
21. Roca, P., Cervera, M., Gariup, G., and Pela', L. (2010). Structural analysis of masonry historical constructions. Classical and advanced approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17 (3), 299–325.
22. Ramos, L.F., Marques, L., Lourenço, P.B., De Roeck, G., Campos-Costa, A., and Roque, J. (2010). Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: Two case studies. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24 (5), 1291–1305.
23. Betti, M., Orlando, M., and Vignoli, A. (2011). Static behaviour of an Italian Medieval Castle: Damage assessment by numerical modelling. *Computers & Structures*, 89 (21–22), 1956–1970.
24. Binda, L., Modena, C., Casarin, F., Lorenzoni, F., Cantini, L., and Munda, S. (2011). Emergency actions and investigations on cultural heritage after the L'Aquila earthquake: The case of the Spanish Fortress. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(1), 105–138.
25. Çalık, İ., Demirtaş, B., Bayraktar, A. ve Türker, T. (2012). Yığma taş minarelerin analitik ve deneysel yöntemlerle güvenliğinin belirlenmesi: TRABZON Muhittin Camii Minaresi örneği. *Vakıflar Dergisi*, 38, 121–139.
26. Betti, M. and Galano, L. (2012). Seismic, analysis of historic masonry buildings: The Vicarious Palace in Pescia (Italy). *Buildings*, 2 (2), 63–82.

27. Şeker, B.Ş., Çakır, F., Doğangün, A., and Durmuş, A. (2015). Investigation of structural behaviour of historical erzurum lala pasha mosque using finite element method. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 21(3), 82–87.
28. Korkmaz, K. A., I, Çarhoğlu A.I., Usta P. ve Toker, S. (2013). Tarihi kiliselerin deprem davranışının van akdamar kilisesi örneğinde incelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi International Technologic Science*, 5(2), 22–30.
29. Çavuş, M. ve Dayı, M. (2013). Tarihi niksar kırk kızlar türbesinin sismik davranışı. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 2(2013), 25–34.
30. Betti, M., Galano, L., and Vignoli, A. (2015). Time-history seismic analysis of masonry buildings: A comparison between two non-linear modelling approaches. *Buildings*, 5(2), 597–621.
31. Onat, O. ve Sayın, E. (2015). *Tarihi Tağar köprüsünün doğrusal olmayan sismik analizi giriş*. 5. Tarihi Eserlerin. Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumunda Sunuldu, Erzurum, 301–312.
32. Milani, G. and Valente, M. (2015). Comparative pushover and limit analyses on seven masonry churches damaged by the 2012 Emilia-Romagna (Italy) seismic events: Possibilities of non-linear finite elements compared with pre-assigned failure mechanisms. *Engineering Failure Analysis*, 47(2015), 129–161.
33. Tiberti, S., Acito, M., and Milani, G. (2016). Comprehensive FE numerical insight into Finale Emilia Castle behavior under 2012 Emilia Romagna seismic sequence: Damage causes and seismic vulnerability mitigation hypothesis. *Engineering Structures*, 117397–421.
34. Hacıfendioğlu, K., Demir, G., and Alpaslan, E. (2016, 30-31 Mart). *Determination of modal parameters of historical masonry minarets by using operational modal analysis*. World Congress on Civil, Structural and Environmental Engineering, Çekya/Prag, 1–8.
35. Di Gangi, G. and Monti, G. (2016). Regeneration and structural strengthening of the fortress of Arnara, Latium, Italy. *International Journal of Architectural Heritage*, 10(8), 1041–1054.
36. Pantò, B., Cannizzaro, F., Caddemi, S., and Calì, I. (2016) 3D macro-element modelling approach for seismic assessment of historical masonry churches. *Advances in Engineering Software*, 97, 40–59.
37. Bakeer, T. (2016) Assessment the stability of masonry walls by the transfer-matrix method. *Engineering Structures*, 110, 1–20.
38. Uğurlu, M.A., Günaslan, S.E., ve Karaşin, A. (2017). Dört Ayaklı Minare'nin modellenmesi ve yapısal analizi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(2), 413–422.
39. Genç, N., Turan, M.H., Vardaroğlu, M., ve Aktaş, E. (2017, 2-4 Kasım). *Evaluation of structural strength of two hellenistic towers*. Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumunda sunuldu, Trabzon, 79–90.

40. Kocaman, İ., Okuyucu, D., ve Kazaz, İ. (2017, 2-4 Kasım). *Tarihi yığma yapıların dinamik davranışlarının hesabında gerekli malzeme özelliklerinin tayini : Lala Paşa Cami örneği*. Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumunda sunuldu, Trabzon, 113–122.
41. Kazaz, İ. and Kocaman, İ. (2017, 2-4 Kasım). *Statik itme yönteminin tarihi yığma yapılarda*. Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumunda sunuldu, Trabzon, 299–308.
42. Angelis, D., Tsourlos, P., Tsokas, G., Vargemezis, G., and Zacharopoulou, G. (2017, 28-30 Haziran). *Accessing a historic wall structure using GPR*. The case of Heptapyrgion fortress Thessaloniki Greece. 2017 9th International Workshop Advanced Ground Penetrating Radar, Sempozyumunda sunuldu, Edinburgh / Scotland, 1–6.
43. Alaboz, M., Sesigür, H., ve Feridun, Ç. (2017, 2-4 Kasım). *Seddülbahir Kalesi yapısal analiz çalışmaları ve serbest titreşim altında dinamik tanımlama*. Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumunda sunuldu, Trabzon, 453–462.
44. Ağırlioğlu, N., Altunkaynak, A., Özger, M., ve Abdollahzadeh moradi, Y. (2017, 2-4 Kasım). *Tarihi yapılarda kıyı koruması : Çanakkale Seddülbahir kalesi uygulaması*. Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumunda sunuldu, Trabzon, 463–472.
45. Castellazzi, G., D’Altri, A.M., de Miranda, S. and Ubertini, F. (2017). An innovative numerical modeling strategy for the structural analysis of historical monumental buildings. *Engineering Structures*, 132, 229–248.
46. D’Altri, A.M., Milani, G., de Miranda, S., Castellazzi, G., and Sarhosis, V. (2018). Stability analysis of leaning historic masonry structures. *Automation in Construction*, 92, 199–213.
47. Stavroulaki, M.E., Drosopoulos, G.A., Tavlopoulou, E., Skoutelis, N., and Stavroulakis, G.E. (2018). Investigation of the structural behaviour of a masonry castle by considering the actual damage. *International Journal of Masonry Research and Innovation*, 3(1), 1–33.
48. Olivito, R.S. and Porzio, S. (2019). A new multi-control-point pushover methodology for the seismic assessment of historic masonry buildings. *Journal of Building Engineering*, 26(2019), 100926.
49. Valente, M. and Milani, G. (2019). Earthquake-induced damage assessment and partial failure mechanisms of an Italian Medieval castle. *Engineering Failure Analysis*, 99, 292–309.
50. Ramacciotti, M., Rubio, S., Gallelo, G., Lezzerini, M., Raneri, S., Hernandez, E. (2019). Chemical and mineralogical analyses on stones from Sagunto Castle-Spain. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 24(2018), 931–938.

51. Parracha, J.L., Silva, A.S., Cotrim, M., and Faria, P. (2020). Mineralogical and microstructural characterisation of rammed earth and earthen mortars from 12th century Paderne Castle. *Journal of Cultural Heritage*, 42, 226-239
52. Kujawa, M., Lubowiecka, I., and Szymczak, C. (2020). Finite element modelling of a historic church structure in the context of a masonry damage analysis. *Engineering Failure Analysis*, 107, 104233.
53. Ponce-Antón, G., Zuluaga, M.C., Ortega, L.A., and Mauleon, J.A. (2020). Multi-analytical approach for chemical-mineralogical characterization of reaction rims in the lime mortars from Amaur Castle (Navarre, Spain). *Microchemical Journal*, 152(2019), 104303.
54. Micelli, F. and Cascardi, A. (2020). Structural assessment and seismic analysis of a 14th century masonry tower. *Engineering Failure Analysis*, 107(2019), 104198.
55. Rowland, J. M. (1975). *Developments in structural form*. London: A Devision of Penguin Books, 48-52.
56. Küçükdoğan, B. (2007). An investigation of strengthening of historical masonry constructions by steel skeleton. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 6-10.
57. Ünay, A. İ. (2002). *Tarihi yapıların depreme dayanımı*. Ankara: ODTÜ Mimarlık Fakültesi Basım, 59-87.
58. Çamlıbel, N. (2000). *Yapıların taşıma gücünün iyileştirilmesi*. İstanbul: Birsen Yayınevi, 20-75.
59. Çakır, K. (2010). *Doğal puzolan katkılı kğreç harcı ile toprak karışımının kerpiç yapılarda dış sıva olarak kullanılabilmesi üzerine deneysel bir araştırma*. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 5-12.
60. Duran, S. (2016). *Akşehir’de kerpiç malzemeli yapıların ve binaların taşıyıcı sistem açısından irdelenmesi ve günümüz koşullarında değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 9-20.
61. Baysal Balcı, S. (2013). *Yüksek yapıların taşıyıcı sistemleri ve mimari tasarımıyla olan etkileşimi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 9.
62. İnternet: Sabah Gazetesi. Dünyanın ilk gökdelenleri. URL: <https://www.sabah.com.tr/galeri/dunya/dunyanin-ilk-gokdelenleri>, Son Erişim Tarihi: 14.03.2020.
63. Gürdal, E. ve Koçu, N. (1993). Kerpiç ve kerpişte eskime yenileme sorunları Konya Alaadin Köşkü örneği. *Yapı*, 142, 78–82.
64. Aköz, A. H. (2008). *Deprem etkisi altındaki tarihi yağma yapıların onarım ve güçlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 57.

65. Çavuş, M. (2011). *Tarihi yapılarda üst örtülerin çelik malzeme ile sağlamlaştırılmasının sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi*. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 6-30.
66. Kuban, D. (2018). *Mimarlık kavramları*. İstanbul: Yem Yayın, 44-45.
67. Akman, M. S., Güner, A., and Aksoy, I.H. (1986). The history and properties of khorasan mortar and concrete. Turkish and Islamic Science and Technology in the 16th Century. *İstanbul Teknik Üniversitesi Research Centre of History of Science and Technology*, 1, 101–112.
68. Topçu, İ. B., Canbaz, M. ve Karanfil, H. (2005). *Horasan harç ve betonunun özellikleri*. Yapı Mekanik Seminerinde sunuldu, Eskişehir, 96–103.
69. Güner, Y. (2018). *Mevcut tarihi yığma yapıların performans analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 21-22.
70. Özgen, Ö. (2012). *Horasan harcı üzerine deneysel çalışmalar*. Uzmalık Tezi, Kültür ve Turizm Bakanlığı İstanbul Rölöve ve Anıtlar Müdürlüğü, İstanbul, 61.
71. CEN (2005). *Eurocode 6 - Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures*. Brussels, 33-38.
72. Magenes, G. and Penna, A. (2009). Existing masonry buildings: general code issues and methods of analysis and assessment. *Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint*, 3, 185–198.
73. Aydın, E.Ö., Fahjan, Y.M., and Çömlekçioğlu, R. (2007). *Deprem bölgelerindeki tarihi kagir yapıların güçlendirilmesinde kullanılan yeni teknikler*. International Earthquake Symposium, Kocaeli, 636–644.
74. Ahunbay, Z. (2004). *Tarihi çevre koruma ve restorasyon*. İstanbul: Yapı Yayın, 38-45.
75. İnternet: C. Cangül. Azapkapı, Galata Kırıları ve Perşembe Pazarı. URL: <https://www.istanbulium.net/2011/10/azapkap-galata-kylar-ve-persembe-pazar.html> , Son Erişim Tarihi: 05.11.2016
76. Mungan, İ. (2009). *Erken Ortaçağın Şaheseri Ayasofya'yı örten strüktürün güçlendirilmesi için bir konsept*. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-2, İnşaat Mühendisleri Odası, Diyarbakır, 347–364.
77. Vakıflar Genel Müdürlüğü. (2017). *Tarihi yapılar için deprem risklerinin yönetimi klavuzu*. Ankara; Sözcü Yayıncılık, 67-168.
78. İnternet: Lento Mimarlık. Restorasyon Teknikleri. URL: http://www.lento.com.tr/tm_restorasyon_teknikleri.asp, Son Erişim Tarihi: 25.11.2016.
79. İnternet: Nazan Tuğbay. Beylerbeyi Sarayı. URL: <https://tr.pinterest.com/nazantubay/>, Son Erişim Tarihi: 02.10.2019.

80. İnternet: İstanbul Bia Haber Merkezi. Şile Kalesi Meclis'e Taşındı. URL: <https://m.bianet.org/bianet/toplum/167251-sile-kalesi-meclis-e-tasindi>, Son Erişim Tarihi: 02.03.2017.
81. İnternet: Yusuf Yavuz. İshak Paşa Sarayı'nda 9 milyonluk kıyım. URL: <https://odatv.com/ishak-pasa-sarayinda-9-milyonluk-kiyim-28091818.html>, Son Erişim Tarihi: 02.10.2019.
82. İnternet: Dünya Bülteni Haber Merkezi. Mostar Köprüsü 27 yıl önce bombalanmıştı. URL: <https://www.dunyabulteni.net/tarih-dosyasi/mostar-koprusu-27-yil-once-bombalanmisti-h345513.html>, Son Erişim Tarihi: 22.06.2019.
83. İnternet: Diana Darke. Suriye'nin yok olan tarihi eserleri. URL: https://www.bbc.com/turkce/haberler/2014/07/140710_suriye_tarihi_eserler, Son Erişim Tarihi: 02.10.2019.
84. Kuruşçu, A. (2005). *Yığma yapıların analizi*. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 55-60.
85. Lourenço, P. B. (1996). *Computational strategies for masonry structures*. Doktora Tezi, Porto Üniversitesi, Portekiz, 12-26.
86. Ural, A. (2009). *Yığma yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi*. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 27-36.
87. Can, H. ve Ünay, Ali İ. (2012). Tarihi yapıların deprem davranışını belirlemek için sayısal analiz yöntemleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(1), 211–217.
88. Toker, S. and Ünay, A.İ. (2004). Mathematical modeling and finite element analysis of masonry arch bridges. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 17(2), 129–139.
89. Olmati, P., Gkoumas, K., and Bontempi, F. (2019). Simplified FEM modelling for the collapse assessment of a masonry vault. *Frattura Ed Integrita Strutturale*, 13(47), 141–149.
90. Kamal, O.A., Hamdy, G.A., and El-Salakawy, T.S. (2014). Nonlinear analysis of historic and contemporary vaulted masonry assemblages. *Hawke's Bay Regional Council Journal*, 10(3), 235–246.
91. Kömürcü, S. ve Gedikli, A. (2017, May). *Yığma duvar tasarımında mikro ve makro modelleme tekniklerinin incelenmesi*. 2 International Congress On Engineering Architecture and Design, Muğla, 167–168.
92. Bağcı, M. (2003). *Yatay yükler etkisindeki dolgu betonarme düzlem çerçevelerin malzeme bakımından non-lineer analizi*. Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 25-55.
93. Peker, K. (2003, 26-30 Mayıs). *Tarihi yapıların yapısal analizinde performans tabanlı yaklaşımlar ve bir örnek çalışma*. Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansında sunuldu, İstanbul, 1-7.

94. Zengin, B. (2018). *Yığma duvarların elasto-plastik davranışlarının deneysel ve sayısal olarak araştırılması*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 61-72.
95. Koçak, A. (1999). *Tarihi yapıların statik ve dinamik yükler altında lineer ve nonlineer analizi: Küçük Ayasofya Camii örneği*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 129-134.
96. Tetik, T. (2015). *Tarihi yığma yapıların deprem performansı ve güçlendirme teknikleri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, İstanbul, 68-75.
97. Türker, B. (2010). *Tarihi yığma yapıların yapısal davranışının araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-4.
98. Duman, N. (2012). *2007 deprem yönetmeliğine göre tasarlanan betonarme yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerle deprem performansının belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane, 19-37.
99. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. (2007). *Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik*. Ankara: Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 86-95.
100. Güllü, H. and Murat Karabekmez (2016). Gaziantep Kurtuluş camisinin deprem davranışının incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 7(3), 455–470.
101. Aydın, A. (2012). *Van depreminde hasar gören mevcut betonarme bir binadaki hasarın, DBYBHY 2007'ye göre yapılan performans analiz sonuçları ile karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-3.
102. Lepage, J.D.G.G. (2002). *Castles and fortified cities of medieval europe*. Groningen: McFarland & Company, Inc. Publishers, 1-5.
103. Lourenço, P. B. (2001). Analysis of historical constructions: From thrust-lines to advanced simulations. *Historical Constructions*, 91–116.
104. Lourenço, P. B. (2002). Computations on historic masonry structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3), 301–319.
105. Özcan, S. (2015). *Tanzimat döneminde Sinop şehri*. Sinop: Sinop Belediyesi Kültür Yayınları, 8.
106. İnternet: Türk Hava Kuvvetleri. THK-Sinop. URL: www.sinopthk.com, Son Erişim Tarihi: 02.03.2015.
107. Gümüş, E. (2019). *Eskiçağda Sinop ve çevresi*. Yüksek Lisans Tezi, Sinop Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sinop, 7.
108. Çakmak, A. (2009). *Sinop Kıyı Kenti'nin gelişimi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 24-25.

109. Kalan Mühendislik. (2004). *Sinop Kalesi ve tarihi cezaevi restorasyonu*. Sinop: Yeniden Grup Basımevi, 12-36.
110. İnternet: Hikmet Tosun. Antik Kent Sinop'a Tarihi Bir Yolculuk. URL: <http://www.turizmhaberleri.com/haberayrinti.asp?ID=20764>, Son Erişim Tarihi: 12.02.2020.
111. İnternet: Google Earth. Sinop-Google Earth/2020. URL: https://earth.google.com/web/@42.0141355,35.1299055,-0.18858896a,17272.05806486d,35y,0h,0t,0r/data=CkgaRhJACiUweDQwOGYxMmRlNmI4NjczOGQ6MHhjZmExMmVkZGVmYzY0MGZiGbSR66aUA0VAISh-jLlrk0FAKgVTaW5vcBgCIAE?utm_source=referral&utm_campaign=marketing&utm_term=carm, Son Erişim Tarihi: 20.02.2020.
112. Ulus, İ. (2014). *Açıklamalı Sinop kitabeleri*. Sinop: Sinop Belediyesi Kültür Yayınları, 10.
113. Yılmaz, C. (2009). Tarihi Sinop kalesi cezaevi. *Eastern Geographical Review*, 22, 1–16.
114. İnternet: Arbol De Piedra. Natural Rok Formations. URL: <https://www.touropia.com/natural-rock-formations/>, Son Erişim Tarihi: 10.07.2020.
115. Oliveira, D.V. de C. (2003). *Experimental and numerical analysis of blocky masonry structures under cyclic loading*. Doktora Tezi, Minho Üniversitesi Minho Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Portekiz, 5-67.
116. Lourenço, P.B. (2002). Computations on historic masonry structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3), 301–319.
117. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2018). *Türkiye bina deprem yönetmeliği-2019*. Ankara: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 14-56.
118. Bowles, J.E. (1982). *Foundation analisys and design*. Illinois: Third Mc. Graw-Hill, International Book Company, 322-324.
119. Ergin, A. (2019). *Coastal engineering*. Ankara: Second Edi Metu Press, 50-84.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KILIÇ DEMİRCAN, Rüya
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 31.01.1986, Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : -
 e-mail : ruyakilic86@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Yapı Eğitimi	2012
Lisans	Gazi Üniversitesi / Yapı Eğitimi	2009
Lise	Ankara Gazi Lisesi (YDA)	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2014-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2011-2013	Sinop Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Kılıç Demircan, R., Gültekin, A. B. (2017). Binalarda pasif ve aktif güneş sistemlerinin incelenmesi. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 10(1), 36-51.
2. Pınarlık, M., Öztürk Kardoğan, P. S., Kılıç Demircan, R. (2017). Şev stabilitesine zemin özelliklerinin etkisinin limit denge yöntemi ile irdelenmesi. *Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, 5(3), 675-684.
3. Kaplan, G., Öztürk, A. U., Yıldız, S. A. ve Kılıç Demircan, R. (2017). *Öğütme kolaylaştırıcı ve dayanım artırıcı katkıların kalkersi uçucu kül katkılı çimentolarda kullanımı*. Beton 2017 - THBB Sempozyumunda sunuldu. İstanbul

4. Kılıç Demircan, R., Kaplan, G. (2019). *Microstructure properties of sulfate-effected blast furnace slag reinforced restoration mortars*. 4th International Sustainable Buildings Symposium, ISBS-2019 Sempozyumunda sunuldu. Dallas, 323-333.
5. Kaplan, G., Aruntaş, H. Y., Kılıç Demircan, R., Gültekin, A. B. (2018). *A study on the possible use of industrial waste in rollercompacted concrete pavement*. 3rd International Energy Engineering Congress Kongresinde sunuldu. Gaziantep
6. Gültekin, A. B., Kaplan, G., Kılıç Demircan, R., Aruntas, H. Y. (2018). *A study on the water conservation measures in green buildings*. 3rd International Energy Engineering Congress Kongresinde sunuldu. Gaziantep
7. Kaplan, G., Kılıç Demircan, R., Çakmak, C., Gültekin, A. B. (2018). *Microwave curing effect on internal sulphate damage in nano alumina reinforced white cement*. WMCAUS 2018 Sempozyumunda sunuldu. Prag, 471, 32038.
8. Kılıç Demircan, R., Kaplan, G., Ünay, A. İ. (2018). *Determination of the physical and mechanical properties of the materials used in the northern city walls of historical Sinop castle*. WMCAUS 2018 Sempozyumunda sunuldu. Prag, 471, 82039.
9. Kılıç Demircan, R., Kaplan, G. (2017). *Yüksek fırın cürufu ve bazalt lifi takviyeli restorasyon harçlarının sülfat dayanıklılığının incelenmesi*. Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması Ve Güçlendirilmesi Sempozyumu'nda sunuldu. Trabzon, 123-131.
10. Kılıç Demircan, R., Öztürk Kardoğan, P. S., Pınarlık, M., Aytekin, O. (2017). *Tarihi Sıvı Tbeti Manastırı'nın sonlu elemanlar yöntemi ile analizi*. 2nd International Mediterranean Science and Engineering Congress, IMSEC 2017 Kongresinde sunuldu. Adana, 2049-2057.
11. Kılıç Demircan, R., Öztürk Kardoğan, P. S. (2017). *Studying the historical structure damage due to soil hazards and examination of applied repairment-strengthening techniques*. 3rd International Sustainable Buildings Symposium ISBS-2017 Sempozyumunda sunuldu. Dubai, 550-565.
12. Kılıç Demircan, R., Ünay, A. İ. (2017). *Structural stability analysis of largescale masonry historic city walls*. 3rd International Sustainable Buildings Symposium ISBS-2017 Sempozyumunda sunuldu. Dubai, 384-395.
13. Tugla, R., Kılıç Demircan, R., Kaplan, G. (2017). *A study on the use of advanced nondestructive testing methods on historic structures*. 3rd International Sustainable Buildings Symposium ISBS-2017 Sempozyumunda sunuldu. Dubai, 536-549.
14. Kılıç Demircan, R., Özdemir, A., Pınarlık, M., Öztürk Kardoğan, P. S. (2016). *Tarihi yapıların sürdürülebilirliği kapsamında taşıma yöntemlerinin irdelenmesi*. 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016), Kongresinde sunuldu. Adana, 800-808.
15. Öztürk Kardoğan, P. S., Pınarlık, M., Özdemir, A., Kılıç Demircan, R. (2016). *Sismik yükler altında kazıklı ve blok tipi rıhtım yapısının davranışının irdelenmesi*. 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016), Kongresinde sunuldu. Adana, 759-766.

16. Öztürk Kardoğan, P. S., Kılıç Demircan, R. (2016). *Betonarme perdelerin yapılardaki burulma düzensizliğine etkileri*. 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016), Kongresinde sunuldu. Adana, 720-726.
17. Kılıç Demircan, R., Kaplan, G., Gültekin, A. B. (2016). *Analysis of restoration mortars used for strengthening of historical buildings in the context of sustainability criteria*. International Conference on Sustainable Built Environment SBE 2016, Sempozyumunda sunuldu. İstanbul, 737-746.
18. Kılıç Demircan, R., Gültekin, A. B. (2015). *Binalarda pasif ve aktif güneş sistemlerinin incelenmesi*. 2. Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu ISBS-2015 Sempozyumunda Sunuldu. Ankara
19. Yavasbatmaz, S., Kılıç Demircan, R., Gültekin, A. B., Çavus, M. (2010). *Sürdürülebilirlik kapsamında yüksek yapıların incelenmesi*. 13-15 Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu ISBS-2010 Sempozyumunda sunuldu. Ankara.

Hobiler

Kitap okuma, doğa yürüyüşü



GAZİ GELECEKTİR..