

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİNE MARUZ TARİHİ YIĞMA TAŞ KEMERLERDE DİNAMİK
KARAKTERİSTİK DEĞİŞİMLERİNİN SONLU ELMAN ANALİZLERİ VE LABORATUVAR
TESTLERİYLE BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Muhammed Mustafa ÖZTÜRK

**TEMMUZ 2022
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİNE MARUZ TARİHİ YIĞMA TAŞ KEMERLERDE
DİNAMİK KARAKTERİSTİK DEĞİŞİMLERİNİN SONLU ELMAN ANALİZLERİ VE
LABORATUVAR TESTLERİYLE BELİRLENMESİ**

Muhammed Mustafa ÖZTÜRK

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09 / 06 / 2022

Tezin Savunma Tarihi : 04 / 07 / 2022

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK

Trabzon 2022

ÖNSÖZ

“Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Yığılma Taş Kemerlerde Dinamik Karakteristik Değişimlerinin Sonlu Eleman Analizleri ve Laboratuvar Testleriyle Belirlenmesi” isimli bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu önemli ve güncel tez konusunu bana öneren, yoğun çalışma temposuna rağmen bana zaman ayıran ve çalışmamın her aşamasında gerek bilgi ve tecrübesini gerekse maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen, kıymetli hocam Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’a en içten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Tez çalışmamı başından beri takip eden, değerli bilgi ve görüşlerini benden esirgemeyen, kıymetli hocalarım Prof. Dr. Süleyman ADANUR’a, Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN’a ve özellikle laboratuvar çalışmalarında gerek modellerin üretilmesi gerek test edilmesi aşamasında bilgilerini, tecrübelerini ve emeklerini esirgemeyen değerli hocalarım Arş. Gör. Ali Fuat GENÇ’e ve Arş. Gör. Ali KAYA’ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Akademik hayatım boyunca bana destek olan ve bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan hocam ve arkadaşlarım, Dr. Sefa NAYIR’a, Arş. Gör. Yunus Emrahan AKBULUT’a, Arş. Gör. Olguhan Şevket KARAHASAN’na, Arş. Gör. Fatih Yesevi OKUR’a, Arş. Gör. Taha BOYRAZ’a, Arş. Gör. Erdinç Halis ALAKARA’ya çok teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca bana maddi ve manevi her türlü desteği vermekten kaçınmayan babam Hürrem ÖZTÜRK’e, annem Nursel ÖZTÜRK’e ve ablam Esra ÖZMEN’e müteşekkir olduğumu belirtmek isterim. Ayrıca tüm desteği ile yanımda olan kıymetli eşim Melike Hafsa ÖZTÜRK’e göstermiş olduğu sabırdan dolayı teşekkür ederim. Bu çalışmanın, yeni yapılacak çalışmalara katkı sağlamasını ve Ülkemizin bilimsel anlamda ilerlemesine faydalı olmasını temenni ederim.

Muhammed Mustafa ÖZTÜRK
Trabzon, 2022

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİNE MARUZ YIĞMA TAŞ KEMERLERDE DİNAMİK KARAKTERİSTİK DEĞİŞİMLERİNİN SONLU ELEMAN ANALİZLERİ VE LABORATUVAR TESTLERİYLE BELİRLENMESİ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 04/07/2022

Muhammed Mustafa ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	X
SUMMARY.....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
TABLolar DİZİNİ.....	XVII
SEMBOLLER DİZİNİ	XX
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar.....	2
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği	11
1.4. Yangın ile İlgili Temel Bilgiler	12
1.4.1. Yangın Üçgeni	12
1.4.2. Yangının Gelişim Aşamaları.....	13
1.4.2.1. Genel Tutuşma Öncesi.....	13
1.4.2.2. Genel Tutuşma.....	15
1.4.2.3. Genel Tutuşma Sonrası.....	15
1.5. Yangına Tepki ve Yangına Dayanım	16
1.6. Tarihi Yığma Yapılar ve Yangın	17
1.6.1. Tarihi Yığma Yapı Elemanları	18
1.6.1.1. Kemerler	19
1.6.1.2. Sütun ve Ayaklar	22
1.6.1.3. Duvarlar	23
1.6.1.4. TonoZlar.....	23
1.6.1.5. Kubbeler	24
1.6.1.6. Temeller.....	24
1.6.1.7. Döşemeler	24
1.6.2. Yığma Yapılarda Kullanılan Malzemeler.....	25
1.6.2.1. Doğal Taşlar.....	25

1.6.2.2.	Tuğla ve Kerpiç	26
1.6.2.3.	Harç.....	27
1.6.3.	Yığma Yapılarda Yangın.....	27
1.7.	Yangın Performansının Belirlenmesi	30
1.7.1.	Yangın Performansının Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler.....	30
1.7.1.1.	DeneySEL Yöntemler	31
1.7.1.2.	Talimata dayalı Yöntemler	31
1.7.1.3.	Performansa Dayalı Yöntemler	32
1.7.2.	Değerlendirme Yöntemleri	32
1.7.2.1.	Yapının Tamamının Analizi	33
1.7.2.2.	Yapının Bir Bölümünün Analizi.....	33
1.7.2.3.	Eleman Analizi	33
1.8.	Yığma Yapılarda Yangın Tasarımı.....	33
1.8.1.	Yangına Dayanım	33
1.8.2.	Yapısal Yangın Tasarım Stratejileri	35
1.8.2.1.	Yangın Senaryosunun Seçilmesi	35
1.8.2.2.	Tasarım Yangınının Belirlenmesi.....	35
1.8.2.3.	Sıcaklık Profilinin Belirlenmesi	35
1.8.2.4.	Mekanik Davranışının Hesaplanması.....	36
1.8.2.5.	Yangın Dayanımının Belirlenmesi	36
1.8.3.	Sıcaklık Analizi İçin Isıl Etkiler	36
1.8.3.1.	Temsili Sıcaklık-Zaman Eğrileri	37
1.8.3.2.	Doğal Yangın Modelleri	38
1.8.3.2.1.	Basitleştirilmiş Yangın Modelleri.....	39
1.8.3.2.2.	Gelişmiş Yangın Modelleri.....	40
1.8.4.	Yapısal Analiz İçin Mekanik Etkiler	40
1.8.5.	Yapısal Dayanımı Değerlendirilmesi	41
1.8.5.1.	Tablolaştırılmış Verilerin Kullanımı	41
1.8.5.2.	Basitleştirilmiş Hesaplama Yöntemleri	41
1.8.5.3.	Gelişmiş Hesaplama Yöntemleri	42
1.9.	Yığma Duvar Özelliklerinin Yüksek Sıcaklıkla Değişimi	43
1.9.1.	Özgöl Ağırlığın Sıcaklıkla Değişimi	43

1.9.2.	Isıl İletkenlik Katsayısının Sıcaklıkla Değişimi	43
1.9.3.	Özgül Isı Katsayısının Sıcaklıkla Değişimi	46
1.9.4.	Gerilme-Şekildeğiştirme Diyagramının Sıcaklıkla Değişimi	47
1.9.5.	Basınç Dayanımlarının Sıcaklıkla Değişimi	50
1.9.6.	Elastisite Modülünün Sıcaklıkla Değişimi	51
1.10.	Isıl Çözümleme	52
1.10.1.	Isı Transferi	52
1.10.1.1.	İletim Yolu ile Isı Transferi	52
1.10.1.2.	Taşınım Yolu ile Isı Transferi	53
1.10.1.3.	Işınım Yolu ile Isı Transferi	54
1.10.2.	Isıl Çözümleme Yöntemleri	54
1.10.2.1.	Tasarım Grafikleri Yöntemi	54
1.10.2.2.	Analitik Yöntemler	55
1.10.2.3.	Sayısal Yöntemler	56
1.11.	Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi	57
1.11.1.	Analitik Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi	57
1.11.2.	Sayısal Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi	60
1.11.3.	Deneyisel Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi	61
1.11.3.1.	DMA Yönteminde Kullanılan Ölçüm Sistemi	61
1.11.3.1.1.	Titreştiriciler	61
1.11.3.1.2.	İvmeölçerler	62
1.11.3.1.3.	Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme	63
1.11.4.	Deneyisel Modal Analiz Yöntemine Ait Formülasyonlar	66
1.11.4.1.	Çevresel Titreşim Yöntemi	66
1.11.4.2.	Zorlanmış Titreşim Yöntemi	69
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR	71
2.1.	Giriş	71
2.2.	Deneyisel Çalışmalar	72
2.2.1.	Yığma Taş Kemer Modellerinin Geometrik Özellikleri	72
2.2.2.	Yığma Kemer Modellerinin İnşasında Kullanılan Malzeme Özellikleri	73
2.2.3.	Yığma Kemer Modellerinin İnşası	74
2.2.4.	Yığma Kemer Modellerinin Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi	78
2.2.4.1.	Temel Beton Özellikleri	78

2.2.4.2.	Taşın Özellikleri	80
2.2.4.3.	Harcın Özellikleri	82
2.2.4.4.	Yığma Duvarların Özellikleri	84
2.2.5.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Sıcaklık Testi Öncesi Kemer Modellerinin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	87
2.2.5.1.	Model-R'nin Sıcaklık Testi Öncesi Dinamik Karakteristikleri	89
2.2.5.2.	Model-1'in Sıcaklık Testi Öncesi Dinamik Karakteristikleri.....	90
2.2.5.3.	Model-2'nin Sıcaklık Testi Öncesi Dinamik Karakteristikleri.....	91
2.2.5.4.	Model-3'ün Sıcaklık Testi Öncesi Dinamik Karakteristikleri.....	91
2.2.5.5.	Model-4'ün Sıcaklık Testi Öncesi Dinamik Karakteristikleri.....	92
2.2.6.	Kemer Modellerin Yüksek Sıcaklık Testi	94
2.2.7.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Sıcaklık Testi Sonrası Kemer Modellerinin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	95
2.2.7.1.	Model-R'nin Sıcaklık Testi Sonrası Dinamik Karakteristikleri	97
2.2.7.2.	Model-1'nin Sıcaklık Testi Sonrası Dinamik Karakteristikleri.....	98
2.2.7.3.	Model-2'nin Sıcaklık Testi Sonrası Dinamik Karakteristikleri.....	100
2.2.7.4.	Model-3'ün Sıcaklık Testi Sonrası Dinamik Karakteristikleri.....	101
2.2.7.5.	Model-4'ün Sıcaklık Testi Sonrası Dinamik Karakteristikleri.....	103
2.3.	Sayısal Çalışmalar	105
2.3.1.	Kemer Modellerinin Sıcaklık Öncesi Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması.....	105
2.3.1.1.	Model-R'nin Sıcaklık Öncesi Başlangıç Sonlu Eleman Modeli	107
2.3.1.2.	Model-1'in Sıcaklık Öncesi Başlangıç Sonlu Eleman Modeli	108
2.3.1.3.	Model-2'nin Sıcaklık Öncesi Başlangıç Sonlu Eleman Modeli.....	110
2.3.1.4.	Model-3'ün Sıcaklık Öncesi Başlangıç Sonlu Eleman Modeli	112
2.3.1.5.	Model-4'ün Sıcaklık Öncesi Başlangıç Sonlu Eleman Modeli	113
2.3.2.	Kemer Modellerinin Sıcaklık Öncesi Sonlu Eleman Modellerinin İyileştirilmesi	115
2.3.3.	Kemer Modellerinin Sıcaklık Sonrası Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması ve İyileştirilmesi.....	118
2.3.4.	Kemer Modellerin Sıcaklık Öncesi ve Sonrası Durum İçin Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması.....	122
2.4.	Kemer Elemanlar Üzerinde Gerçekleştirilen Çoklu Analizler	124
2.4.1.	Dikkate Alınan Değişken Parametreler	125

2.4.1.1.	Kemer Boyutları	125
2.4.1.2.	Sıcaklık Geçmişi.....	126
2.4.2.	Kemer Elemanlarının Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	127
2.4.2.1.	Kemerler Elemanların Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması.....	128
2.4.2.2.	Kemer Elemanlar Üzerinde Gerçekleştirilen Isı Transferi ve Serbest Titreşim Analizleri	132
2.4.3.	Dikkate Alının Değişken Parametrelerin Dinamik Karakteristikler Üzerindeki Etkisi.....	136
2.4.4.	Formülasyonun Geliştirilmesi ve Grafik/Abakların Oluşturulması	139
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	155
4.	KAYNAKLAR	161
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİNE MARUZ YIĞMA TAŞ KEMERLERDE DİNAMİK KARAKTERİSTİK DEĞİŞİMLERİNİN SONLU ELEMAN ANALİZLERİ VE LABORATUVAR TESTLERİYLE BELİRLENMESİ

Muhammed Mustafa ÖZTÜRK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK
2022, 166 Sayfa

Bu tez çalışmasında, yüksek sıcaklık etkisine maruz yığma taş kemerlerin dinamik davranışlarında meydana gelen değişimler deneysel ve sayısal yöntemler kullanılarak elde edilmiştir. Bu amaçla, laboratuvar şartlarında inşa edilen kemer modelleri üzerinde sıcaklık öncesi ve sonrası durumlar için deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sunulan tez çalışması üç bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde; konu ile ilgili genel bilgiler ve daha önceden yapılmış çalışmalar, ısı transferi analizleri, dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde kullanılan deneysel ve sayısal yöntemler yer almaktadır. İkinci bölümde, yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular sunulmuştur. İkinci bölümde yapılan çalışmalar üç kısma ayrılmıştır. Birinci kısımda; laboratuvar şartlarında imal edilen kemer modellerin dinamik karakteristikleri sıcaklık öncesi ve sonrası durumlar için deneysel yöntemlerle elde edilmiştir. İkinci kısımda; kemerin sıcaklık öncesi ve sonrası durumlar için üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturularak dinamik karakteristikleri sayısal yöntemlerle elde edilmiş ve kemerlerin sonlu eleman modelleri deneysel verilere göre iyileştirilmiştir. Son kısımda ise; iyileştirilmiş sonlu eleman modellerinden faydalanılarak farklı açıklığa, yüksekliğe, genişliğe ve kalınlığa sahip kemer modellerinin farklı sıcaklık geçmişi durumları için dinamik karakteristikleri elde edilmiş ve bu sonuçlara bağlı formülasyon ve grafik/abaklara yer verilmiştir. Üçüncü bölümde ise; bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler sunulmaktadır. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

Anahtar Kelimeler: Yığma Taş Kemer, Yüksek Sıcaklık, Yangın, Isı Transferi, Dinamik Karakteristikler, Deneysel Modal Analiz, Sonlu Eleman Analizi

Master Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF DYNAMIC CHARACTERISTIC CHANGES IN MASONRY STONE ARCHES EXPOSED TO HIGH TEMPERATURE BY FINITE ELEMENT ANALYSIS AND LABORATORY TESTS

Muhammed Mustafa ÖZTÜRK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK
2022, 166 Sayfa

In this thesis, changes in the dynamic behavior of masonry arches exposed to high temperature were obtained using experimental and numerical methods. For this purpose, experimental and numerical studies were carried out on arch models built under laboratory conditions for pre- and post-temperature conditions. The presented thesis consists of three sections. In the first section; general information on the subject and previous studies, heat transfer analysis, experimental and numerical methods used in the determination of dynamic characteristics were presented. In the second section, the studies carried out and the findings obtained from these studies were given. The study in this section was divided into three subsections. In the first subsection; the dynamic characteristics of arch models built under laboratory conditions were obtained by experimental methods for pre- and post-temperature conditions. In the second subsection; finite element models of the arch were created for the pre- and post-temperature conditions. Later, the dynamic characteristics of the arches were determined by numerical methods, and the finite element models were improved according to the experimental data. In the last subsection; dynamic characteristics of arch models with different spans, heights, widths and thicknesses were obtained for different temperature history situations using improved finite element models, and formulations and graphs / charts based on these results were included. In the third part; the conclusions achieved from the study and recommendations were presented.

Key Words: Masonry Stone Arch, High Temperature, Fire, Heat Transfer, Dynamic Characteristics, Experimental Modal Analysis, Finite Element Analysis

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Yangın üçgeni.....	13
Şekil 1.2. Tam gelişmiş bir yangının aşamaları (Purkiss, 2007).	13
Şekil 1.3. Oda yangınının başlangıç aşaması (Buchanan ve Abu, 2017).	14
Şekil 1.4. Doğal ve standart yangın eğrisinin karşılaştırılması (De Wit, 2011).	15
Şekil 1.5. Tarihi yapıların sınıflandırılması	17
Şekil 1.6. Yığma taş yapıların yapım tekniğine göre basit bir sınıflandırması (Lourenço, 1998).	18
Şekil 1.7. Yığma yapılarda kullanılan bazı örgü teknikleri (Lourenço, 1998).	18
Şekil 1.8. Kemerli sistemlerin kullanıldığı bazı tarihi yapılar	19
Şekil 1.9. Taş kemer bölümleri	20
Şekil 1.10. Kemer elemanlarda yük aktarım şeması.....	21
Şekil 1.11. Yığma yapılarda kullanılan baz kemer tipleri	21
Şekil 1.12. Tarihi yapılarda sütun (a) ve ayak (b) kullanımı	22
Şekil 1.13. Tonoz çeşitleri (Çılı ve Sesigür, 2007).....	23
Şekil 1.14. Kubbelerde kullanılan geçit elemanları	24
Şekil 1.15. Yığma yapılarda kullanılan sürekli temeller.....	25
Şekil 1.16. Yığma yapılarda kullanılan bazı doğal taşlar	26
Şekil 1.17. Tarihi yığma yapılarda kullanılan tuğla (a) ve kerpiç (b).....	27
Şekil 1.18. Yangına maruz kalmış bazı tarihi yapılar	29
Şekil 1.19. Doğrulama analizleri	32
Şekil 1.20. Yapı elemanlarının yangına dayanım performansı.....	34
Şekil 1.21. Literatürde yer alan bazı temsili sıcaklık-zaman eğrileri (EN 1991-1-2, 2002).	38
Şekil 1.22. Bölme yangını ve lokal yangının kullanıldığı aşamalar	39
Şekil 1.23. Yığma elemanlarda etkin ve etkin olmayan bölgeler (EN 1996-1-2, 2005).....	42
Şekil 1.24. Farklı duvar birimleri için sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerinin hesaplanması (EN 1996-1-2, 2005)	44

Şekil 1.25. Normal dayanımlı beton malzemenin sıcaklıkla değişen termal iletkenlik değeri (Naser, 2019).	46
Şekil 1.26. Beton malzemesinin sıcaklıkla değişen özgül ısı değerleri (Naser, 2019.).....	47
Şekil 1.27. Farklı yoğunluk ve basınç dayanımına sahip yığma birimlerinin sıcaklıkla değişen gerilme-şekildeğiştirme grafikleri.....	48
Şekil 1.28. Yüksek sıcaklıklarda duvarın basınç dayanımında azalma (Daware ve Naser, 2021).	50
Şekil 1.29. Yüksek sıcaklıklarda duvarın elastisite modülünde azalma (Daware ve Naser, 2021).	51
Şekil 1.30. İletim yoluyla ısı transferinin yayılımı (Karadağ, 2021).	53
Şekil 1.31. Taşınım yoluyla ısı transferinin yayılımı (Karadağ, 2021).	53
Şekil 1.32. Işınım yoluyla ısı transferinin yayılımı (Karadağ, 2021).	54
Şekil 1.33. Yoğunluğu 1500-2000 kg/m ³ olan kalsiyum silikat duvarın, sıcaklık dağılımı ve etkisiz olduğu sıcaklık (EN 1995-1-2, 2005). 55	
Şekil 1.34. Çeşitli boyutlardaki (bir, iki ve üç) sonlu eleman örnekleri	60
Şekil 1.35. B&K 8210 tipi darbe çekici.....	62
Şekil 1.36. Piezoelektrik ivmeölçerin iç yapısı (URL-2, 2016).....	62
Şekil 1.37. B&K 4506 ve B&K4507 tipi ivme ölçerlere ait görsel ve bazı özellikler	63
Şekil 1.38. Deneyisel ölçümlerde kullanılan B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi.....	64
Şekil 1.39. Çevresel Titreşim Yöntemine dayalı dinamik karakteristiklerin belirlmesine ait bazı yöntemler	67
Şekil 1.40. Çevresel Titreşim Yöntemlerine göre yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi	67
Şekil 1.41. ZTY'nin a) basit şematik gösterimi b) Frekans davranış fonksiyonunun (FDF) belirlenmesi (Schwarz ve Richardson, 1999; Günaydın, 2016).	69
Şekil 2.1. Yapılan çalışmalara ait akış şeması.	71
Şekil 2.2. Kemer modellerinin temel kalıp planı	72
Şekil 2.3. Kemer modellerinin temel üzerindeki yerleşim planı	73
Şekil 2.4. Kemer modellerin temel kalıp montajı.....	74
Şekil 2.5. Kemer modellerin temel donatı montajı.....	74
Şekil 2.6. Kemer modellerin temel beton dökümü	75

Şekil 2.7. Kemer ayaklarının inşası	76
Şekil 2.8. Kemer elemanlara ait kalıp ölçüleri.....	76
Şekil 2.9. Yığma kemerlerin inşasına ait bazı fotoğraflar	77
Şekil 2.10. İnşası tamamlanan kemer modelleri	78
Şekil 2.11. Numunelerin hazırlanmasına ait bazı fotoğraflar	79
Şekil 2.12. Numunelerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan testlere ait bazı fotoğraflar	79
Şekil 2.13. Andezit taşlarının farklı sıcaklığa maruz kalmadan önceki (a) ve sonraki (b) görüntüsü.....	81
Şekil 2.14. Numunelerin ısıtılmasında dikkate alınan sıcaklık-zaman eğrisi	81
Şekil 2.15. Farklı sıcaklığa maruz bırakılan andezit taşının (a) basınç dayanımı testine (b) ait bazı fotoğraflar.....	82
Şekil 2.16. Harç numunelerinin farklı sıcaklıklara maruz kalmadan önceki (a) ve sonraki (b) görüntüsü.....	83
Şekil 2.17. Harç numunelerinin hazırlanması (a) ve yüksek sıcaklığa maruz bırakılması (b).....	84
Şekil 2.18. Hazırlanan duvar numunelerine ait bazı fotoğraflar.....	85
Şekil 2.19. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan duvar numuneleri.....	85
Şekil 2.20. Duvar numunelerinin i TS-EN 1051-1 (a) ve ASTM (b) standartlarına göre basınç dayanımlarının belirlenmesi	86
Şekil 2.21. Deneysel ölçümler için ivmeölçer bağlantı noktalarının hazırlanması.....	87
Şekil 2.22. Deneysel ölçümlerde kullanılan ivmeölçer yönleri ve yerleşim planı	88
Şekil 2.23. Model-R için elde edilen spektral yoğunluk matrisi.....	89
Şekil 2.24. Model-R için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri.....	89
Şekil 2.25. Model-1 için elde edilen spektral yoğunluk matrisi	90
Şekil 2.26. Model-1 için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri	90
Şekil 2.27. Model-3 için elde edilen spektral yoğunluk matrisi	92
Şekil 2.28. Model-3 için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri	92
Şekil 2.29. Model-4 için elde edilen spektral yoğunluk matrisi	93
Şekil 2.30. Model-4 için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri	93
Şekil 2.31. Kemer modellerinin yüksek sıcaklık test fırınına taşınması.....	94
Şekil 2.32. Kemer modellerin sıcaklık testi öncesine (a) ve sonrasına (b) ait bazı fotoğraflar	95

Şekil 2.33. Sıcaklık testi sonrası gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri	96
Şekil 2.34. Model-R için elde edilen spektral yoğunluk matrisi.....	97
Şekil 2.35. Model-R için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri.....	97
Şekil 2.36. Model-1 için elde edilen spektral yoğunluk matrisi	99
Şekil 2.37. Model-1 için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri	99
Şekil 2.38. Model-2 için elde edilen spektral yoğunluk matrisi	100
Şekil 2.39. Model-2 için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri	101
Şekil 2.40. Model-3 için elde edilen spektral yoğunluk matrisi	102
Şekil 2.41. Model-3 için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri	102
Şekil 2.42. Model-4 için elde edilen spektral yoğunluk matrisi	103
Şekil 2.43. Model-4 için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri	104
Şekil 2.44. Sonlu eleman analizlerinde kullanılan eleman modeli	106
Şekil 2.45. Model-R'nin sonlu eleman modeli.....	107
Şekil 2.46. Model-R'nin sıcaklık öncesi sayısal mod şekilleri.....	108
Şekil 2.47. Model-1'in sonlu eleman modeli	109
Şekil 2.48. Model-1'in sıcaklık öncesi sayısal mod şekilleri	110
Şekil 2.49. Model-2'nin sonlu eleman modeli	111
Şekil 2.50. Model-2'nin sıcaklık öncesi sayısal mod şekilleri	111
Şekil 2.51. Model-3'ün sonlu eleman modeli.....	112
Şekil 2.52. Model-3'ün sıcaklık öncesi sayısal mod şekilleri	113
Şekil 2.53. Model-4'ün sonlu eleman modeli.....	114
Şekil 2.54. Model-4'ün sıcaklık öncesi sayısal mod şekilleri	115
Şekil 2.55. Sonlu eleman modeli iyileştirme akış şeması.....	116
Şekil 2.56. Gerçekleştirilen çoklu analizlere ait akış diyagramı.....	125
Şekil 2.57. 1-0.4-0.5-0.2 kemerine ait katı model	128
Şekil 2.58. 1-0.4-0.5-0.2 kemerinin sonlu eleman modeli.....	130
Şekil 2.59. Yüksek sıcaklığa maruz kalan 1-0.4-0.5-0.2 kemer modelinin enkesiti içerisinde meydana gelen sıcaklık dağılımları	133
Şekil 2.60. Sıcaklığa maruz kalmayan 1-0.4-0.5-0.2 kemer modeline ait mod şekilleri	135
Şekil 2.61. Yüksek sıcaklığa maruz kalan 1-0.4-0.5-0.2 kemer modeline ait mod şekilleri	136

Şekil 2.62. Farklı boyutlara sahip kemerlerin sıcaklık geçmişine bağlı 1. doğal frekans değerlerindeki maksimum ve minimum azalma oranları.....	137
Şekil 2.63. 1 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı	140
Şekil 2.64. 2 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı	141
Şekil 2.65. 3 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı	142
Şekil 2.66. 4 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı	143
Şekil 2.67. 5 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı	144
Şekil 2.68. 6 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı	145
Şekil 2.69. 7 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı	146
Şekil 2.70. 8 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı	147
Şekil 2.71. 9 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı	148
Şekil 2.72. 10 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı	149
Şekil 2.73. 11 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı	150
Şekil 2.74. 12 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı	151
Şekil 2.75. 13 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı	152
Şekil 2.76. 14 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı	153
Şekil 2.77. 15 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı	154

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Yangın dayanımının değerlendirilmesinde kullanılan yöntemler (EN 1996-1-2, 2005).....	41
Tablo 2.1. Kemer modellerinin Boyutları.....	73
Tablo 2.2. Küp numunelerden elde edilen özellikler.....	80
Tablo 2.3. Silindir numunelerden elde edilen özellikler.....	80
Tablo 2.4. Andezit taşının farklı sıcaklıklara ait ortalama basınç dayanımı.....	82
Tablo 2.5. Harç numunelerinin farklı sıcaklıklara ait ortalama birim hacim ağırlığı ve basınç dayanımları.....	84
Tablo 2.6. Duvar numunelerinin farklı sıcaklıklara ait ortalama birim hacim ağırlığı ve TS-EN 1051-1'e göre basınç dayanımları.....	86
Tablo 2.7. Duvar numunelerinin farklı sıcaklıklara ait ortalama birim hacim ağırlığı ve ASTM'ye göre basınç dayanımları	86
Tablo 2.8. Model-R için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler	90
Tablo 2.9. Model-1 için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler	91
Tablo 2.10. Model-3 için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler	92
Tablo 2.11. Model-4 için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler	93
Tablo 2.12. Sıcaklık testi sonrası Model-R için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler	98
Tablo 2.13. Model-R'ye ait sıcaklık testi öncesi ve sonrası durumlar için deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması	98
Tablo 2.14. Sıcaklık testi sonrası Model-1 için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler	99
Tablo 2.15. Model-1'e ait sıcaklık testi öncesi ve sonrası durumlar için deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması	100
Tablo 2.16. Sıcaklık testi sonrası Model-2 için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler	101
Tablo 2.17. Sıcaklık testi sonrası Model-3 için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler	102

Tablo 2.18. Model-3'e ait sıcaklık testi öncesi ve sonrası durumlar için deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması	103
Tablo 2.19. Sıcaklık testi sonrası Model-3 için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler	104
Tablo 2.20. Model-4'e ait sıcaklık testi öncesi ve sonrası durumlar için deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması	104
Tablo 2.21. Kemer Modellerinin başlangıç sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri.....	107
Tablo 2.22. Model-R'nin sıcaklık öncesi elde edilen deneysel ve sayısal dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması	108
Tablo 2.23. Model-1'in sıcaklık öncesi durumu için elde edilen deneysel ve sayısal dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması	110
Tablo 2.24. Model-2'nin sıcaklık öncesi durumu için elde edilen sayısal dinamik karakteristikler	112
Tablo 2.25. Model-3'üne sıcaklık öncesi durumu için elde edilen deneysel ve sayısal dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması	113
Tablo 2.26. Model-4'ün sıcaklık öncesi durumu için elde edilen deneysel ve sayısal dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması	115
Tablo 2.27. Kemer Modellerinin iyileştirilmiş sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri.....	117
Tablo 2.28. Kemer modellerinin sıcaklık öncesi deneysel ve sayısal dinamik karakteristikleri	118
Tablo 2.29. Kemer Modellerinin başlangıç sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri.....	119
Tablo 2.30. Kemer modellerinin sıcaklık sonrası deneysel ve sayısal dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması	120
Tablo 2.31. Kemer Modellerinin sıcaklık sonrası iyileştirilmiş sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri.....	121
Tablo 2.32. Kemer modellerinin sıcaklık sonrası durum için elde edilen deneysel ve sayısal dinamik karakteristikleri	122
Tablo 2.33. Kemer modellerinin sıcaklık öncesi ve sonrası durum için dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması	123
Tablo 2.34. Çoklu analizlerde dikkate alınan kemer boyutları	126
Tablo 2.35. Kemer modellerinin ısı transfer analizleri için sonlu eleman modelinde kullanılacak termal malzeme özellikleri	129
Tablo 2.36. Serbest titreşim analizi gerçekleştirilecek kemerlerin sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri	132

Tablo 2.37.1-0.4-0.5-0.2 kemer modelinin ilk üç modu için sıcaklık
geçmişine ait farklı durumlar dikkate alınarak elde edilen doğal
frekans değerleri 135

Tablo 2.38.1., ve 2. grupta yer alan kemerlerden kalınlık ve genişlik
parametresinden kaynaklı 1. mod şekli boyuna olan kemerler..... 138



SEMBOLLER DİZİNİ

a_0, a_n, b_n	Fourier serisi katsayıları
C	Sönüm matrisi
c	Özgül ısı katsayısı
ÇTY	Çevresel Titreşim Yöntemi
E	Bütünlük kriteri, Elastisite Modülü
$E_{d,fi}$	Yangın etkisi altında uygulanan yük
f_n	n. moda ait frekans değeri
$f_{küp}$	Küp numune basınç dayanımı
f_{sil}	Silindir numune basınç dayanımı
GFTAA	Gelişmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma
GFOA	Gelişmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma
GSY	Güç Spektral Yoğunluğu
$G_{xx}(j\omega)$	Etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu
$G_{yy}(j\omega)$	Tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu
g	Yerçekimi ivmesi
$\dot{h}_{net}$	Eleman yüzeyindeki net ısı akısı
$\dot{h}_{net,c}$	Taşınımla gerçekleşen net ısı akısı
$\dot{h}_{net,r}$	Işınım ile gerçekleşen net ısı akısı
$H(j\omega)$	Frekans davranış fonksiyonu
$H_{ik}(i\omega)$	Transfer matrisi
I	Yalıtım kriteri
K	Sistemin rijitlik matrisi
M	Sistemin kütle matrisi
Q	Isı salınım miktarı
R	Zamana bağlı sistem dış yük vektörü, yük taşıma kriteri

$R_{d,t,fi}$	Yangın için yük taşıma kapasitesi
SEY	Sonlu Eleman Yöntemi
T	Periyot
t	Zaman
U	Zamana bağlı yerdeğiştirme vektörü
$\dot{U}$	Zamana bağlı hız vektörü
$\ddot{U}$	Zamana bağlı ivme vektörü
α	Faz açısı
a	Isı yayılım katsayısı
a_c	Konvektif gerçekleşen ısı transferi katsayısı
ε_f	Isı yayıcılık katsayısı
ε_m	Malzeme yüzeyinin ısı yayıcılık katsayısı
θ	Sıcaklık
θ_g	Gaz sıcaklığı
θ_m	Yüzey sıcaklığı
θ_r	Ortamdaki radyoaktif sıcaklık
λ	Özdeğer
λ	Isıl iletkenlik katsayısı
ρ	Özgül ağırlık
σ^{sb}	Stephan Boltzmann sabiti
φ	Düzenleme faktörü
ϕ	Hareket genlik vektörü
ω_n	n. açısal frekans
$[K]$	Isıl iletkenlik matrisi
$\{\theta\}$	Sıcaklık vektörü
$\{\dot{\theta}\}$	Sıcaklık zamana göre birinci türev vektörü
$\{Q\}$	Dış ısı akış vektörü
$[C]$	Kapasite matrisi

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Geçmiş ve bugün arasında güçlü bir bağ oluşturmada önemli rol oynayan tarihi yapılar kültürel mirasın ve kimliğin önemli bir göstergesidir. Bir medeniyet dönemini anlamak ve yorumlamak ancak o dönemde inşa edilmiş yapıların irdelenmesiyle mümkündür. (Ural vd., 2008). Antik çağlardan günümüze miras kalan bu tarihi yapıların inşasında yığma yapı tekniğinden sıklıkla faydalanılmıştır.

Yığma yapılar, üzerine gelen yükleri doğal yollardan elde edilmiş veya yapay olarak üretilmiş malzemelerden oluşan taşıyıcı elemanlarla karşılayan yapılardır. Bu yapılar, yığma birimi olarak kullanılan çeşitli malzemelerin (ahşap, doğal taş, kâgir, tuğla, vb.) harç kullanılarak ya da kullanılmayarak üst üste konulup örülmesi ile elde edilen elemanlardan oluşmaktadır. Tarihi yığma yapıların taşıyıcı sisteminin oluşturulmasında yaygın olarak kullanılan elemanlar; sütunlar ve ayaklar, kemerler, tonozlar, kubbeler, döşemeler ve temellerdir. (Kara, 2009). Antik çağlardan günümüze kadar varlığını sürdürmüş olan tarihi yapıların çoğunda büyük açıklıkların geçilebilmesi için kemerli sistemlerin kullanıldığı görülmektedir. Taşıyıcı sistemi genellikle kemer elemanlarla oluşturulmuş yapılara köprü, su yolu, cami, han, hamam, kilise gibi yapılar örnek teşkil etmektedir.

Kemer elemanlar kullanılarak yapılan yığma yapılar tarih boyunca ayakta kalabilmiş ve günümüze kadar gelebilmiştir. Ancak bu yapıların birçoğu zaman içerisinde deprem, yangın vb. afetlere maruz kalarak veya savaşlar ve çevresel etkiler nedeniyle zarar görmüş ya da yıkılmıştır. Meydana gelebilecek afetler can kaybına yol açmanın yanı sıra tarihi yapılara ve çevreye, çoğu kalıcı olacak şekilde çeşitli zararlar vermektedir. Taşınmaz kültürel mirasımızın önemli bir kısmını oluşturan tarihi yapılar, tüm dünyada meydana gelen afetler karşısında diğer yapıları çevre elemanlarına göre daha kırılgan ve daha kolay zarar görebilir durumdadır (Tulunay, 2019).

Günümüzde mühendislik yapılarının doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı olarak adlandırılan dinamik karakteristiklerine bağlı olarak dinamik yapısal davranışı belirlenmektedir. Yapının geometrisi, malzeme özellikleri ve sınır şartları göz önünde bulundurularak tasarlanan sonlu eleman modellerinin modal analizlerinin gerçekleştirilmesiyle dinamik karakteristikler sayısal olarak elde edilmektedir. Fakat elde

edilen dinamik karakteristikler, sonlu eleman modellerinde kullanılan parametrelerin işçilik hataları, farklı yüklemeler sonucunda yapıda oluşan çatlamlar, yorulmalar, sıcaklık etkileri gibi nedenlerden dolayı değişime uğradığı için yapının mevcut durumunu tam olarak yansıtmayabilir. Bu yüzden, sayısal olarak belirlenen dinamik karakteristiklerin, doğrudan yapı üzerine uygulanan deneysel yöntemler kullanılarak da belirlenmesi gerekmektedir.

Deneysel yöntemler kullanılarak elde edilen dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde, “Deneysel Modal Analiz Yöntemi” kullanılmaktadır. Bu yöntemde, sayısal yöntemlerle belirlenen yapının modal hareket noktalarına hassas ivmeölçerler yerleştirilmekte ve ivmeölçerlerden gelen titreşim sinyalleri veri toplama biriminde depolanmaktadır. Akabinde bu sinyaller, güncel yazılımlar vasıtasıyla işlenerek yapının dinamik karakteristikleri elde edilmektedir.

Gerek sayısal gerek deneysel yöntemlerle elde edilen dinamik karakteristikler birbiriyle karşılaştırıldığında, sayısal çözümler aşamasında dikkate alınan doğruluğu kesin olmayan değişkenlerden (malzeme özellikleri, kesit özellikleri, mesnet koşulları, vb.) dolayı farklılıklar oluşmaktadır. Bu durumda, deneysel yöntemler sonucunda bulunan veriler yapının halihazırdaki durumunu temsil ettiğinden ötürü, tespit edilen farklılıkları minimum düzeye indirmek için sonlu eleman modelindeki belirsiz parametrelerde iyileştirme yapılması gerekmektedir. Yapılan bu işleme “Sonlu Eleman Model İyileştirme” adı verilmektedir.

1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Askegaard ve Mossing (1988), mühendislik yapılarında çevresel sıcaklık değişimi ile yapıların dinamik karakteristiklerde meydana gelen değişimi incelemek amacıyla üç açıklıklı betonarme bir yaya köprüsü üzerinde çalışmışlardır. Üç yıl devam eden çalışmalar sonucunda köprüde %10'luk mevsimsel frekans değişimi gözlenmiştir.

Chakrabarti vd. (1996), BRE (Building Research Establishment) tarafından yürütülen doğal taşın bina yangınları üzerindeki etkileriyle ilgili çalışma sonuçlarını ve yangının taş duvar üzerindeki etkisiyle ilgili literatürde yapılan çalışmaları incelemiştir. Yapılan çalışmalarda, yüksek sıcaklıklarda (600 °C–800 °C) çoğu taşın dayanımının ciddi şekilde etkileneceği ve termal şok meydana gelmesi durumunda ise taşın parçalanabileceği görülmüştür. Daha düşük sıcaklıklarda ise (200 °C–300 °C) hasarın genellikle renk değişikliği ile sınırlı olduğu ancak bu değişikliğin geri döndürülemez olduğu görülmüştür.

Bu nedenle, düşük sıcaklıklarda meydana gelen hasarların bile önemli etkilerinin olduğu görülmüştür.

Nadjai vd. (2003, 2006), yüksek sıcaklıklara maruz kalan yığma duvarların yapısal davranışını tahmin edebilen MasSET (Masonry Subject to Elevated Temperatures) adında bir sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Bu modeli kullanarak elde ettikleri verileri daha önceki deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırarak doğrulamışlardır. Daha sonra incelik oranının, yük eksantrikliğinin ve sınır koşullarının etkilerini araştıran parametrik bir çalışma yapmak için bu modeli kullanmışlardır. Ayrıca, çeşitli yangın senaryoları altında betonarme bir döşemeyi destekleyen yığma duvarların davranışını araştırmak için MasSET adı verilen sonlu elemanlar programını kullanarak bir dizi sayısal çalışma yapmışlardır.

Koca vd. (2006), tarihi bir okul binasında meydana gelen yangın sonrasında yoğun ısıya maruz kalan iki mermer sütunun yük taşıma kapasitesini ve genel durumunu değerlendirmek için kapsamlı bir saha ve laboratuvar çalışması yapmışlardır. Çalışma kapsamında, sağlam mermer numuneleri kullanılarak gözeneklilik ve sıcaklık arasında bir ampirik ilişki kurulmuştur. Daha sonra gerçekleştirdikleri saha çalışmalarında, yangın alevlerine maruz kalan mermer kolonlarının yüzey sıcaklığının, bu ampirik ilişki kullanılarak 500 °C civarında olduğu tahmin edilmiştir. Ayrıca yapılan mekanik testler sonucunda, yangın sonrasında %23'lük mukavemet kaybına rağmen mermer kolonların hala önemli bir yük taşıma kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Desjardins vd. (2006), çevresel sıcaklık değişimi etkisinde önerilmeli beton teknolojisi kullanılarak yapılan Konfederasyon Köprüsü'nün doğal frekans değişimlerini altı aylık bir zaman zarfında incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda, köprü betonunun ortalama sıcaklığı 45°C değişim gösterdiğinde, köprü'nün doğal frekanslarında yaklaşık %4'lük bir azalma tespit edilmiştir.

Xia vd. (2006), laboratuvar dışına inşa ettikleri betonarme döşeme üzerinde iki yıl boyunca yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda; döşemenin ilk dört modunun frekanslarında sıcaklık ve nem içeriği ile güçlü bir negatif ilişkiye sahip olduğunu, sönüm oranlarında ise sıcaklık ile pozitif ilişkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun yanı sıra, mod şekillerinin sıcaklık ve nem değişimi ile net bir ilişkisi olmadığı görülmüştür.

Al Nahhas vd. (2007), yığma duvarların termo-mekanik davranışını hem deneysel hem de teorik bakış açısıyla incelenmişlerdir. 20 ile 1200 °C arasında değişen sıcaklıklara ve 13 ton/m düşey yüke maruz kalan yığma duvarın termo-mekanik direncini değerlendirmek için yangın testleri yapılmıştır. Sonuç olarak, duvar içindeki sıcaklık değişimi ölçülmüş ve 6

saatlik ısıtma sırasında bu duvarın düşey ve yanal yer değiştirmeleri değerlendirilmiştir. Daha sonra duvar içindeki konveksiyon, iletim ve radyasyon fenomenlerini hesaba katan deneysel sonuçları tanımlamak için teorik bir model geliştirmiştir.

Nguyen vd. (2008), yangına maruz kalmış kil esaslı tuğla duvarların davranışını incelemek için bir termo-mekanik model kullanmışlardır. Daha sonra yapmış oldukları deneysel çalışmalar sonucunda doğruladıkları bu termal modeli, üç boyutlu sonlu eleman analizi kullanarak incelemiştir. Bu analizlerle, yangına maruz kalmış ince yığma duvarların genel davranışını elde ederek sıcaklığa bağlı mekanik parametrelere sahip olan tuğla ve harcın doğrusal olmayan elastik davranışının yeterli olduğunu göstermişlerdir.

Bayraktar vd. (2008), tarihi bir kâgir minarenin sonlu eleman modellemesini, modal testini ve sonlu eleman model iyileştirmesini yapmışlardır. Sayısal frekansları ve mod şekillerini elde etmek için minarenin 3 boyutlu sonlu eleman modeli üzerinden modal analiz yapılmıştır. Trafik yükleri ve rüzgâr gibi çevresel uyarılar altında, minare üzerinde çevresel titreşim testleri yapılmıştır. Daha sonra doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları gibi dinamik özellikler belirlenmiştir. Minarenin sonlu eleman modeli, malzeme özellikleri ve sınır koşulları gibi bazı belirsiz modelleme parametreleri değiştirilerek sayısal ve deneysel olarak tahmin edilen modal özellikler arasındaki farklılıkları en aza indirecek şekilde kalibre edilmiştir. Çalışmanın sonunda, doğal frekanslardaki maksimum farklar ortalama %27'den %5'e düşürülmüştür. Model iyileştirilmesinden sonra sayısal ve deneysel doğal frekanslar ve mod şekilleri arasında da iyi bir uyuşma olmuştur.

Ramos vd. (2010), titreşim ölçümleriyle yığma yapılarıdaki hasarı erken bir aşamada tespit etmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla dinamik hasar tespit yöntemlerine dayalı bir yaklaşım sunulmuştur. Yaklaşımı değerlendirmek için laboratuvarında tek kemerli bir model oluşturulmuştur. Daha sonra, kemerde kademeli hasar verilmiş ve dinamik davranış ile iç çatlak büyümesi arasında yeterli uyumu bulmayı amaçlayan her hasar aşamasında sıralı modal analiz yapılmıştır. Yığma yapılarda hasarı tespit etmek amacıyla hangi yöntemin daha yeterli olduğunu değerlendirmek için farklı teknikler arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Dinamik tabanlı yöntemler kullanılarak numunelerdeki hasarı ve bölgesini tespit etmişlerdir.

Andreini ve Sassu (2011), bir tarafta hareket eden nominal bir yangının varlığında, birleşik basınç ve eğilme gerilmesi altında tam birim duvar panellerinin mekanik direncini tahmin etmek için sayısal bir model sunmuşlardır. Sundukları modelin uygulanabilirliğini sayısal bir örnek ile göstermişlerdir. Ayrıca modelin sonuçlarını, yığma duvarların üzerinde

yaptıkları bir dizi deneysel çalışmaların verileri ile karşılaştırarak modelin verimliliği gösterilmiştir.

Nguyen ve Meftah (2011), kil esaslı tuğla kullanılarak örülen duvarların yangın davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada, yüksek sıcaklık nedeniyle tuğlalarda meydana gelen yerel kavlamaların, taşıyıcı yığma duvarların yangın performansını etkileyen önemli bir faktör olduğunu kabul etmişlerdir.

Russo ve Sciarretta (2011), yüksek sıcaklığa maruz bırakılan kil tuğla duvarın mekanik özellikleri üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Faydalı ve uygulanabilir sonuçlar elde etmek için hem yeni hem de eski yük taşıyıcı duvarları temsil eden duvar modelleri kullanmışlardır. 300 °C ve 600 °C'ye maruz kalan duvar numuneleri üzerinde tek eksenli ve diyagonal basınç testleri yapılmıştır. Ayrıca duvarı oluşturan harç ve tuğla birimlerinin de basınç dayanımlarını ve elastik modüllerini ölçmüşlerdir. Son olarak, yüksek sıcaklık uygulamasından sonra duvar, tuğla ve harcın mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir.

Brotons vd. (2013), bir kalkarenitin (San Julian taşı) fiziksel ve mekanik özelliklerinde yüksek sıcaklıkların etkisini incelemek için gerçekleştirilen testlerin sonuçlarını tartışmışlardır. 105 °C ile 600 °C arasında ısıtılan numuneler üzerinde tahribatsız testler (porozite ve ultrasonik dalga yayılımı) ve tahribatlı testler (tek eksenli basınç dayanımı ve suya dayanıklılık testi) yapılmıştır. Ayrıca, yangın söndürme yönteminin etkisini incelemek için ısıtılan numuneler farklı koşullar altında (hava soğutmalı ve su soğutmalı) soğutulmuştur. Test edilen sıcaklık aralığı için sıcaklık arttıkça tek eksenli basınç dayanımı ve elastik parametrelerin (yani elastik modülü ve Poisson oranı) azaldığı görülmüştür. Numuneler 600 °C'ye ısıtıldığında, tek eksenli basınç dayanımında hava soğutmalı ve su soğutmalı numunelerde sırasıyla %35 ve %50'ye varan bir azalma gözlemlenmiştir. Elastisite modülünde, hava soğutmalı ve su soğutmalı numunelerde sırasıyla %75 ve %78'in üzerinde bir düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca poisson oranında hava soğutmalı ve su soğutmalı numunelerde sırasıyla %44 ve %68'e kadar düşüş olmuştur. Suya dayanıklılık indeksi de sıcaklıkla bir azalma sergilemiştir. Taşın mekanik özellikleriyle yakından ilgili olan diğer fiziksel özelliklerden ultrasonik dalgaların yayılma hızında da azalma olmuştur.

Al-Sibahy ve Edwards (2013), ısıya maruz kalma ile birlikte eksenel sıkıştırma yükü altında hafif betonlardan yapılmış bloklar kullanılarak inşa edilen duvar numunelerinin termo-mekanik davranışını incelemişlerdir. 20 °C ile 400 °C arasında değişen sıcaklık seviyelerinde ve iki farklı tipte duvar numunesi üzerinde kapsamlı bir deneysel araştırma

yapılmıştır. Duvar numunelerinin düşey deformasyon, yük taşıma kapasitesi ve arıza modları deneysel olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, her iki hafif betonun çeşitli sıcaklıklara maruz kaldıklarında dayanımlarında ortam sıcaklığına oranla %30'luk bir düşüş gözlenmiştir. Ayrıca duvar numunelerinin elastiklik modülü değerinde önemli bir azalma gözlemlenmiştir.

Emberley (2013), yangın koşullarındaki betonarme kolonların yapısal davranışlarını ve yangın performansını değerlendirmek amacıyla sayısal bir model oluşturmuştur. Yapılan çalışmada, değişen zaman-sıcaklık eğrileri ve yangın koşulları altında kolon performansını belirlemek için Microsoft Excel'de oluşturulan sayısal modelin sonuçları ile ANSYS sonlu eleman programı kullanılarak elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve oluşturulan sayısal modelin kabul edilebilir sonuçlar verdiği görülmüştür.

Özgüven ve Özçelik (2013), yaygın olarak kullanılan doğal yapı taşlarından kireçtaşı ve mermerin bazı özellikleri üzerinde yangın ve yüksek sıcaklıkların etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada farklı köken ve doku özelliklerine sahip sekiz doğal taş (dört kalker ve dört mermer) 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C ve 1000 °C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Farklı sıcaklıklara maruz bıraktıkları her taşın özelliklerini belirlemişler ve taşların oda sıcaklığındaki özellikleriyle karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmada renk değişimi, parlaklık değişimi, fiziksel özelliklerindeki değişimi, soğutma çözeltisinin pH ve sıcaklığındaki değişimini dikkate almışlardır. Bu çalışma sonucunda farklı sıcaklıklara maruz kalan doğal taşlarda meydana gelen değişikliklerin olumlu ve olumsuz yönleri tartışılmıştır.

Andreini vd. (2014), yangına maruz kalmış ana duvarlar malzemelerinin mekanik özelliklerinin sıcaklık ile değişimini belirlemek için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Duvarların düzlem dışı mekanik davranışını farklı tipteki yangınları dikkate alarak gerilme-şekil değiştirme-sıcaklık arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir.

Özgüven ve Özçelik (2014), oda sıcaklığında ve 1000 °C'ye kadar farklı sıcaklıklara maruz bırakılan kireçtaşı ve mermer gibi doğal yapı malzemelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin değişimini araştırmışlardır. Bu amaçla numuneler 200 °C'den başlayarak kademeli olarak 400, 600, 800 ve 1000 °C'ye kadar ayrı ayrı ısıya maruz bırakılmış ve daha sonra numuneler oda sıcaklığına kadar soğutulularak mekanik özellikleri belirlenmiştir. Yapmış oldukları çalışmada, sıcaklık artışının yapı taşları üzerine olumlu veya olumsuz etkisini ve ısıya maruz kalan yapı taşının yeniden kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda yangına maruz kalan doğal taşların kullanım alanları ve kullanım alanlarındaki güvenilebilirliği hakkında önemli sonuçlar elde edilmiştir.

Altunışık vd. (2015), sırasıyla 0,52 cm ve 0,69 cm kalınlığında iki kemere sahip Godenti tarihi yığma kemer köprüsünün yapısal davranışına kemer kalınlığının etkisini araştırmışlardır. ANSYS yazılımı ile köprünün sonlu eleman modeli, röleve çizimleri kullanılarak mevcut durumu yansıtacak şekilde oluşturulmuştur. Daha sonra sırasıyla artan ve azalan kemer kalınlıkları değiştirilmiş ve sonlu eleman modelleri yeniden oluşturulmuştur. Köprünün yapısal tepkileri, sabit yük ve hareketli yük altındaki tüm kemer kalınlıkları için elde edilmiştir. Kemer kalınlığı etkisini belirlemek için maksimum yer değiştirmeler, maksimum-minimum asal gerilmeler ve maksimum-minimum elastik şekil değiştirmeler kontur diyagramları kullanılarak ayrıntılı olarak verilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda kemer kalınlığının artmasıyla maksimum yer değiştirmelerin ve çekme gerilmelerinin azalma eğiliminde olduğu, ancak basınç gerilmesinin artış eğiliminde olduğu görülmüştür.

Liu ve Xu (2015), hidrolik basınç test makinesi kullanarak, yüksek sıcaklıklara maruz kalan granit ve kumtaşı numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Granit numuneleri 600 °C'nin üzerinde kademeli olarak boz renginden griye, kumtaşı numuneleri ise 400 °C'nin üzerinde kademeli olarak griden kahverengimsi-kırmızıya dönüşmeye başlamıştır. 600 °C ve 800 °C, sırasıyla granit ve kumtaşı gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin gevrek-sünek geçiş kritik sıcaklığı olmuştur. Taş yoğunluğu genellikle sıcaklık artışı ile kademeli bir azalma eğilimi göstermiştir. Granit numunesinin basınç dayanımı genellikle artan sıcaklıkla azalırken, kumtaşı numunesinin basınç dayanımı oda sıcaklığı ile 800 °C arasında belirgin bir değişiklik göstermemiştir. Ancak 800 °C'nin üzerinde hızla düşmeye başlamıştır. Elastik modül artan sıcaklıkla azalmış ve granitin düşüş hızı kumtaşından çok daha fazla olmuştur.

Russo ve Sciarretta (2015), sonlu eleman modellemesi yoluyla yangın ayırıcı duvarların mekanik yük taşıma performansının belirlenmesinde sayısal bir yaklaşım önermektedirler. Önerdikleri modelin özelliği hem termal hem de mekanik gerilme altında çatlama davranışını yakalamaya yöneliktir.

Çakır vd. (2016), nanoparçacık takviyeli prepreg kompozitlerle güçlendirilmiş yığma kemerlerin dinamik karakteristiklerini incelemiştir. Yığma kemerlerin dış ve iç kısımlarında dört farklı güçlendirme alternatifi yapılmıştır. Daha sonra, güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş kemerlerin mod şekilleri ve mod frekansları gibi dinamik karakteristikleri deneysel modal analiz ve sayısal analiz yoluyla belirlenmiştir. Yığma kemerler güçlendirildiğinde, güçlendirilmemiş kemere göre frekans değerleri artmıştır.

Pachta vd. (2018), 200°C ila 1000°C arasında değişen yüksek sıcaklıklara maruz kalan bir dizi restorasyon çalışmaları için tasarlanmış kireç bazlı harcın fiziko-mekanik özelliklerini, ağırlık kaybını, hacim değişikliğini, porozitesini, özgül ağırlığını, dinamik elastisite modülünü, eğilme ve basınç dayanımını test etmişlerdir. Porozitesi 400 °C'ye kadar yoğun bir şekilde artmış, 600 °C'de azalmaya başlamış ve 800 °C'de daha da azalmış fakat başlangıç değerine göre daha yüksek kalmıştır. Ses hızı ve dinamik elastisite modülü 400 °C'de önemli ölçüde azalmış olup (11–18 GPa'dan 2.5–3.8 GPa'ya) 600 °C'de daha da azalmıştır. Eğilme mukavemeti 200 °C'de artmış ve 800 °C'ye kadar kademeli olarak düşmüştür. Basınç dayanımı ise 600 °C'ye kadar önemli ölçüde artmış, 800 °C'de düşmüş ve 1000 °C'de en düşük değer ölçülmüştür.

Zhang vd. (2018), delikli tuğladan yapılmış yığma duvarın sismik performansını, yangına maruz kalan altı duvar ve yangına maruz kalmayan bir duvar ile düşük ters çevrimli yüklemeye tabi tutarak araştırmışlardır. Yangına maruz kalan iki duvar karbon fiber bez ve çelik hasır çimento harcı ile güçlendirilmiştir. Yangın süresinin, yangın koşulunun, soğutma rejiminin ve güçlendirme yönteminin numunelerin hasar özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda, (i) aynı konum için harcın sıcaklığının tuğladan daha yüksek olduğunu ve (ii) duvarların çatlama yükünün ve nihai yükünün artan yangın süresi ile kademeli olarak azaldığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca, karbon fiber bez ve çelik hasır çimento harcı ile güçlendirilmiş duvarın nihai taşıma kapasitesi, aynı yangın süresine maruz kalan diğer duvarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Akbulut (2018), betonarme kolonların yüksek sıcaklık etkisi altındaki dinamik karakteristik değişimlerini sayısal yöntemler kullanarak incelemiştir. Yapmış olduğu parametrik çalışmada; en kesit boyutlarını, beton sınıfını ve sıcaklık geçmişi değişken parametre olarak dikkate almıştır. Gerçekleştirdiği sayısal çözümlemelerde kolonların tüm yan yüzeylerinden yangına maruz kaldığı bir senaryo kullanmıştır. Çalışma sonucunda, mod şekilleri için kuralcı bir yaklaşım elde edilememiştir. Sıcaklık geçmişiindeki artış ile birlikte doğal frekans değerlerinde azalmaların meydana geldiği ve bu azalmaların önemli seviyelerde olduğu gözlenmiştir.

Naser (2019), yapı malzemeleri üzerindeki sıcaklığa bağlı etkilerin karmaşık yapısını anlamak için yapay zekâ kullanmış ve sıcaklığa bağlı malzeme modelleri türetmiştir. Yapılan çalışmada yapay sinir ağı ve genetik programlama kullanılarak, normal dayanımlı beton, yığma duvar, yapısal çelik, paslanmaz çelik, soğukta şekillendirilmiş çelik ve ahşap gibi yaygın kullanılan yapı malzemeleri için belirli sıcaklığa bağlı termal ve mekanik

malzeme modelleri önerilmiştir. Önerilen malzeme modelleri, yangın gibi aşırı yüklenme koşulları altında yapısal tasarımı düzenleme ve modernize etme potansiyeline sahip olduğu savunulmaktadır.

Biro vd. (2019), Macaristan'da fayans taşı olarak yaygın kullanılan granit, mermer, traverten ve labradorit taşlarının sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra özelliklerinde meydana gelen değişimi incelemişlerdir. Laboratuvar testlerinde eğilme dayanımının yanı sıra tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı testleri yapılmıştır. Ayrıca taşlar optik mikroskop ve derivatograf ile de incelenmiştir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda traverteni karo taşı ve yük taşıyan yapı elamanı olarak labrodoriti ise yük taşıyan yapı elamanı olarak önermişlerdir.

Li vd. (2019), termal çatlakların andezitin fiziksel özellikleri ve kırılma süreçleri üzerindeki etkilerini, oda sıcaklığında üç eksenli gerilme altında incelemişlerdir. Çalışmada, 500 °C ile 1100 °C arasında değişen sıcaklıklarda ısıtılma uygulanmış andezit taşlarının P-dalga hızları ve içyapıları araştırılmıştır. Daha sonra, 930 °C'de ısıtılma gören andezit numunelerinin mekanik özellikleri, 0 ile 30 MPa arasında değişen çevre basınçları kullanılarak üç eksenli gerilme altında incelenmiştir. Benzer üç eksenli deneyler, ısıtılma görmemiş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada; (I) 500 °C'nin altındaki sıcaklıklarda ısıtılma işlemleri için fiziksel özelliklerde önemli bir değişiklik gözlemlenmediği; (II) 500–1100 °C sıcaklık aralığındaki ısıtılma işlemlerde çatlak yoğunluğunun arttığı ve (III) termal çatlamanın genleşme başlangıcı üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı fakat 500 °C'nin üzerindeki ısıtılma işlemlerde, ısıtılma görmemiş andezitte küçük bir kil fraksiyonunun (%3) erimesi ile uzun çatlakların kapanması sonucunda numunelerin mukavemetinin arttığı gözlemlenmiştir.

Ersoy vd. (2019), 200 °C ile 1000 °C arasında değişen sıcaklıklara maruz kalan kayaçların mühendislik davranışlarını araştırmışlar, jeomekanik özelliklerindeki değişimler ve buna bağlı mineralojik değişimleri incelemişlerdir. Numunelerin mukavemeti artan sıcaklıkla kademeli olarak 128 MPa'dan 25 MPa'ya düşmüştür. Havada soğutulan numunelerde mukavemet değeri yaklaşık %70, suda soğutulduğunda ise yaklaşık %80 oranında azalmıştır. Ani soğutma sırasında oluşan yeni mikro çatlaklar ve cam malzeme nedeniyle su soğutmalı numunelerde dayanım düşüşü daha fazla olmuştur. Farklı sıcaklık derecelerinin kaya numuneleri üzerindeki etkisi ayrı ayrı değerlendirilmiş ve toplam dayanım azalmasının yaklaşık %80'i 600-700 °C aralığında meydana gelmiştir. Ayrıca, bu sıcaklıklarda yapısal özellikleri önemli ölçüde değişmesine rağmen, yeni mineral oluşumu

ve mevcut minerallerin erimesi gözlenmemiştir. 800 °C ve üzerinde, bazı ikincil mineraller (örneğin, melilit ve ojit) oluşmuştur. 1000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kısmi erime görülmüştür. Çalışmada ayrıca, kayalardaki termal hasarın belirlenmesi için bir tahmin modeli de önerilmiştir. Tasarlanan sıcaklık için tek eksenli basınç dayanımını tahmin etmek için, termal hasar eğrilerine dayalı olarak %96'lık bir korelasyon katsayısı ile karakterize edilen bazı denklemler önerildi.

Bosnjak vd. (2020), yüksek sıcaklığın ısınma sonrası duvar davranışına etkisini deneysel ve sayısal çalışmalar ile incelemişlerdir. Araştırmalarında kil ve kalsiyum silikat esaslı tuğlalar olmak üzere iki farklı tip tuğla kullanmışlardır. Bu testleri; münferit tuğla birimleri, harç ve yığma prizmaları (tuğla ve harç) üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra bu numunelerin sayısal modellemesini tuğla + harç için temel yasa olan sıcaklığa bağlı mikropolan modelini kullanarak yapmışlardır. Çalışmada kullanılan sayısal modelleme yaklaşımı doğrulanmış ve bu yaklaşımın yığma birimlerinin yüksek sıcaklık sonrası davranışını gerçekçi bir şekilde simüle edebileceği gösterilmiştir.

Pachta vd. (2021), kireç (L), kireç : doğal puzolan (ağırlıkça LP-1:1) ve kireç : doğal puzolan: tuğla tozu (LPB-1:0.8:0.2) esaslı ürettikleri harçların 28 ve 90 günlük fiziko-mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Daha sonra 28 ve 90 günlük harçlar 200°C, 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C gibi yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Tuğla kalıntılarının kireç esaslı harçların davranışları üzerindeki etkisini belirlemek için yangın sonrası özellikleri (fiziko-mekanik, mikro yapısal) incelenmiş, ezilmiş tuğla ve tuğla tozunun yüksek sıcaklıklarda yapısal bütünlüğü arttırdığı iddia edilmiştir.

Oliveira vd. (2021), yangına maruz kalan üç hücreli içi boş beton yığma duvarların yapısal yangın davranışı üzerine deneysel ve sayısal çalışmalar yapmışlardır. İlk olarak, davranışlarını, kritik sürelerini, arıza modlarını ve sıcaklık dağılımını değerlendirmek için yüksek sıcaklıklarda çeşitli yük taşıma kapasitesi testleri ve duvarlarda yangına dayanıklılık testleri yapmışlardır. Numuneler, üç hücreli beton bloklar ve M10 harcı ile inşa edilerek teste tabi tutulmuştur. Daha sonra sıcaklıkları, yükleri ve yer değiştirmeleri ölçülmüştür. İkinci olarak, sonlu eleman modelleri geliştirilmiş ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

Akbulut vd. (2021), özel sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak sayısal yöntemlerle birlikte ısı transferi ve modal analizler yapmışlardır. Betonarme kolon ve çerçevelerin yangın performans değerlendirmesi için doğru yapısal değerlendirme verileri üretmişlerdir. Bu çalışmada, doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları olarak adlandırılan dinamik özellikler üzerinde kapsamlı ve ayrıntılı bir performans değerlendirmesi yapılırken, yapı

elemanlarının yangın yükü altındaki performansı değerlendirilmiştir. Ayrıca, betonarme elemanların değişen kesit boyutları, beton sınıfları, maruziyet süreleri ve farklı maruziyet senaryolarının etkileri parametrik analizler kullanılarak hassas bir şekilde değerlendirilmiş ve elde edilen veriler formüller, nomograflar ve tablolar olarak sunulmuştur. Sonuç olarak, sıcaklıktaki artış, doğal frekans değerlerinde önemli bir düşüğe neden olmuştur. Ancak, ortaya çıkan mod şekillerindeki değişiklikler için belirli bir model gözlemlenmemiştir.

1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Yapılan literatür araştırması sonucunda, yangın gibi yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerinin elde edilmesine yönelik çok az sayıda çalışmanın olduğu, mevcut çalışmalarda tek bir yapı veya yapı elemanının dinamik karakteristiklerde meydana gelen değişimlerinin irdelendiği görülmüştür. Ayrıca literatürde yer alan bu kapsamdaki çalışmalarda daha çok betonarme ve çelik yapılar üzerinde yoğunlaşıldığı, yığma yapılar için gerçekleştirilen çalışmaların oldukça az sayıda olduğu dikkat çekmiştir. Dolayısıyla, tez kapsamında gerçekleştirilecek çalışmaların özgün bir değere sahip olduğu ve çalışma sonucunda elde edilen veri havuzundan yararlanılarak geliştirilecek formülasyonlar, sunulacak grafik/abaklar ve tabloların benzer çalışma veya değerlendirmeler yapmak isteyen kişiler için kullanım kolaylığı sağlayacağı düşünülmektedir.

Literatüre katkı sağlayacağı düşünülen bu tez çalışmasında; yüksek sıcaklıklara maruz kalan yığma taş kemerlerin dinamik karakteristiklerindeki değişimlerin, farklı boyutlar ve sıcaklık geçmişi gibi değişken parametreler dikkate alınarak sayısal yöntemlerle elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, yığma yapıların taşıyıcı sisteminde sıklıkla kullanılan ve yığma yapıların en önemli elemanlarından biri olan kemerler dikkate alınmıştır. Kemerlerde, yangın gibi yüksek sıcaklık etkilerinden kaynaklı oluşacak dinamik karakteristik değişimlerinin hızlı bir şekilde belirlenmesi, rijitlik değişimlerine bağlı kullanım durumunun tespit edilmesi ve hasar tahminlerinin yapılması için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Tez kapsamında gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinde ABAQUS (2016) sonlu eleman paket programı kullanılmıştır. Değişken parametrelere göre gerçekleştirilen çoklu analiz sonuçlarına bağlı olarak, yaklaşık formülasyonlar geliştirilmiş ve grafik/abaklar sunulmuştur. Yüksek sıcaklık etkisi altında “Yapı Sağlığı İzleme” konusunda yapılan çalışmaların genişletilmesi, yapılacak çalışmaların sonuçlarından

faydalanarak geliştirilen formülasyon ve abakların ilgili yangın yönetmelikleri için veri oluşturması ve yeni çalışmalara örnek teşkil etmesi çalışmanın hedefleri arasında yer almaktadır. Tüm bunlar dikkate alınarak hazırlanan bu tez çalışması üç bölümden oluşmaktadır.

İlk bölümde; konu ile ilgili genel bilgiler ve daha önceden yapılmış çalışmalar, mühendislik yapıların yangın performansının belirlenmesi, ısı transferi analizleri, dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde kullanılan hem deneysel hem de sayısal yöntemler ve bu yöntemler ait formülasyonlar yer almaktadır.

İkinci bölümde, yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgulara yer verilmektedir. İkinci bölümde yapılan çalışmalar üç kısma ayrılmıştır. Birinci kısımda; laboratuvar şartlarında imalatı gerçekleştirilen kemer modellerin dinamik karakteristikleri sıcaklık öncesi ve sonrası durumlar için deneysel yöntemlerle elde edilmiştir. İkinci kısımda; kemerin sıcaklık öncesi ve sonrası durumlar için üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturularak dinamik karakteristikleri sayısal yöntemlerle elde edilmiş ve kemerlerin sonlu eleman modelleri deneysel verilere göre iyileştirilmiştir. Son kısımda ise; iyileştirilmiş sonlu eleman modellerinden faydalanılarak farklı açıklığa, yüksekliğe, genişliğe ve kalınlığa sahip kemer modellerinin farklı sıcaklık geçmişi durumları için dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Ayrıca bu kapsamda gerçekleştirilen çoklu analiz sonuçlarına bağlı formülasyon ve grafik/abaklara yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde ise; bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler sunulmaktadır. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

1.4. Yangın ile İlgili Temel Bilgiler

1.4.1. Yangın Üçgeni

Yangın, yanıcı maddelerin ısı ve oksijen ile birleşmesi sonucunda oluşan yanma reaksiyonları sonucu meydana gelen doğal afettir. Oksijen ve yanıcı madde tutuşma sıcaklığına ulaştığında yanma işlemi başlamaktadır. Yanmanın devam edebilmesi için yanıcı madde, ısı kaynağı ve oksijenin aynı anda ortamda bulunması gerekmektedir. Bu üç unsur Şekil 1.1’de verilen yangın üçgenini oluşturmaktadır.



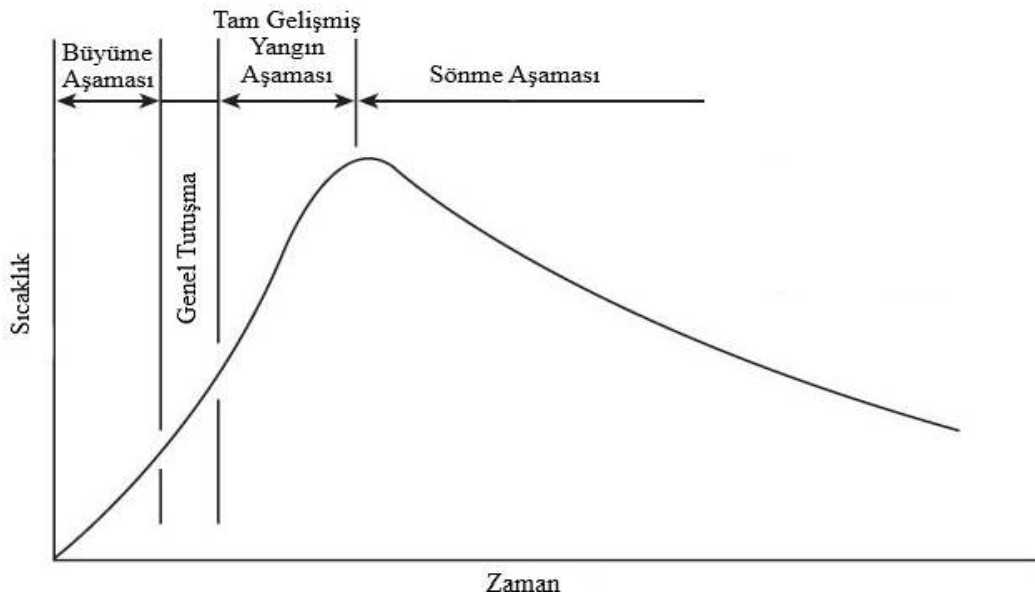
Şekil 1.1. Yangın üçgeni

1.4.2. Yangının Gelişim Aşamaları

Yangının gelişimine bakıldığında (Şekil 1.2); büyüme, genel tutuşma, tam gelişmiş yangın ve sönmeye aşamalarından meydana geldiği görülmektedir. Yangın davranışının her aşamada farklı olmasına rağmen, ayırım genel tutuşmanın öncesi ve sonrası olarak yapılmaktadır.

1.4.2.1. Genel Tutuşma Öncesi

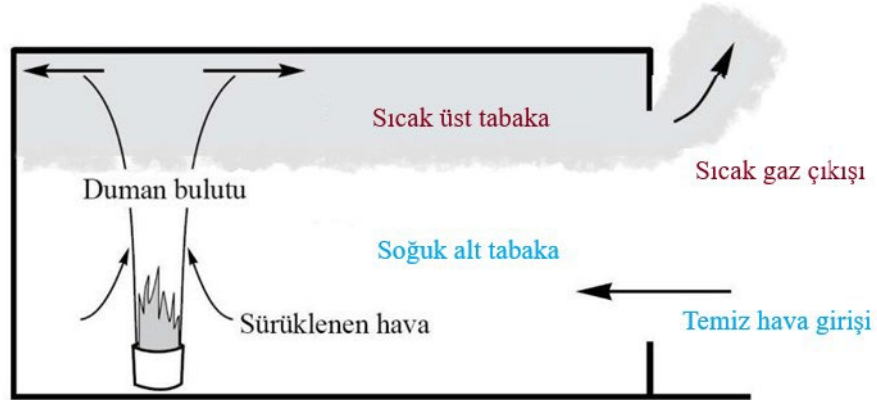
Genel tutuşma öncesi dönemde yanma, bölmenin küçük alanlarıyla sınırlıdır; bu nedenle, sıcaklıkta yalnızca lokalize bir artış meydana gelir. Çok sayıda yeni başlayan yangın, yangının bu aşamanın ötesine geçmesine izin vermek için yeterli yangın yükü veya hava beslemesi (havalandırma) olmadığı için ön parlama aşamasının ötesine geçemez.



Şekil 1.2. Tam gelişmiş bir yangının aşamaları (Purkiss, 2007).

Yanmaya başlayan malzemelerden öncelikle gaz ve duman ortaya çıkar. Artan duman bulutu yanma ürünlerini oda tavanına taşır. Oda içerisindeki havada bulunan oksijen, yanma işleminin başlamasıyla tükenir. Daha sonra kapı, pencere, havalandırma ve baca boşluğu gibi açıklıklardan içeriye hava akışı olur. Yangın tarafından salınan enerji, bir pompa gibi hareket ederek soğuk havayı odadaki yangın dumanına çeker ve yanma ürünlerini açıklığın tepesinden dışarı iter. Yangın dumanı, yanma ürünlerinin tavana kadar yüzer şekilde konvektif olarak taşınmasını sağlar. Duman, yanma ürünlerini soğutan ve seyrelten büyük miktarda soğuk havayı sürükler. Seyreltilmiş yanma ürünleri, oda içinde sıcak bir üst tabaka oluşturur. Yangının büyümesi bu tabakanın kalınlığını ve sıcaklığını artırır. Sıcak üst tabakadaki karışım ve radyasyon, temiz havadan oluşan soğuk alt tabakayı yavaşça ısıtır. Bu iki tabaka Şekil 1.3'te verilmiştir. Soğuk alt tabaka, can güvenliği için gerekli olan güvenli tahliyeye olanak sağlar. Duman tavana ulaştığında, tavan jeti adı verilen tavanın alt tarafı boyunca radyal olarak dışa doğru bir sıcak gaz akışı olur. Tavan jetinin yönü ve formu, tavanın şekline bağlıdır. Örneğin, düz bir yatay tavan için akış her radyal yönde aynı olacaktır.

Yangının şiddeti, süresi, açıklıkların boyutu ve konumu üst tabakanın kalınlığını belirler. Yangın ilerledikçe sıcak üst tabaka büyür ve katmanlar arasındaki yüzeyin yüksekliği azalır. Bunun sonucu olarak da sıcak gazlar mevcut açıklıklardan dışarıya doğru çıkabilmektedir. Açıklıkların çok küçük olması halinde, yangına yeterli temiz hava girişi olmaz ve yangın oksijen yetersizliğinden söner.



Şekil 1.3. Oda yangınının başlangıç aşaması (Buchanan ve Abu, 2017).

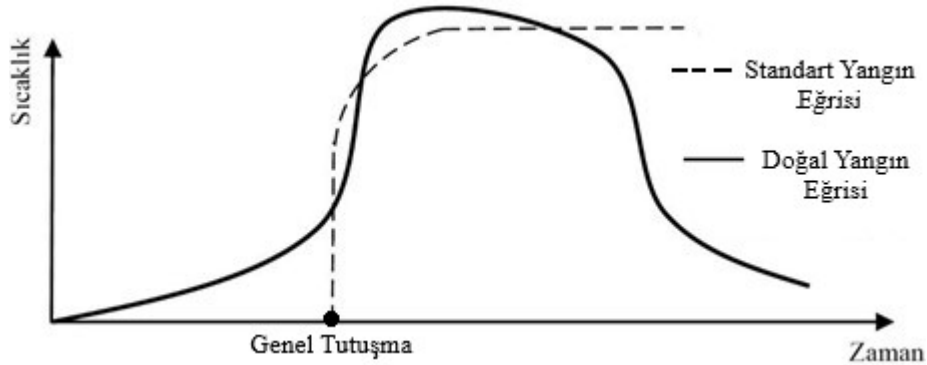
Yukarıda söz edilen yangında, oda içerisinde sadece bir nesnenin yandığı varsayılmaktadır. Fakat odanın tavanında, duvarlarında ve zemininde bulunan yanıcı maddeler alevlerin yayılmasını hızlandırmasından dolayı yangının gelişimini önemli ölçüde

etkileyebilmektedir. Isıyı daha az absorbe eden elemanlardan oluşan izolasyonlu bir odada yangın olması durumunda sıcaklıkların daha yüksek olacaktır. Buna bağlı olarak izolasyonlu bir odada meydana gelen yangın önemli ölçüde daha hızlı büyüyecektir.

1.4.2.2. Genel Tutuşma

Mevcut yangına müdahale edilmeden büyümesine izin verilirse ve oda içerisinde yanan parçada yeterli yakıt olduğu varsayılırsa, sıcak üst katmandaki sıcaklıklar yükselecek ve odadaki diğer tüm nesnelere radyan ısı akışı seviyesi yükselecektir. Kritik bir ısı akışı seviyesinde (yaklaşık 600°C), odadaki açıkta kalan tüm yanıcı maddeler yanmaya başlayacak ve bu da hem ısı yayılım hızında hem de sıcaklıklarda hızlı bir artışa yol açacaktır. Bu geçişe ani parlama (genel tutuşma) denir. Genel tutuşmanın kapalı olmayan bir alanda gerçekleşmesi mümkün değildir, çünkü tanım gereği genel tutuşma lokal bir yangından odadaki tüm yanıcı yüzeylerin yanmasına geçiş olarak tanımlanmaktadır.

Uygulamada kolaylık sağlaması için, genellikle doğal yangın eğrisindeki büyüme aşaması göz ardı edilir ve genel tutuşma anında sıcaklığın aniden arttığı varsayılır. Bu durum, Şekil 1.4’te verilmektedir.



Şekil 1.4. Doğal ve standart yangın eğrisinin karşılaştırılması (De Wit, 2011).

1.4.2.3. Genel Tutuşma Sonrası

Yangının davranışı, genel tutuşmadan sonra önemli ölçüde değişir. Genel tutuşma sonrasında, alt ve üst tabaka ortadan kalkarak hava ve yanıcı gaz akışlarının yüksek türbülansla olduğu büyük bir bölge oluşmaktadır. Genel tutuşma sonrası yangınlardaki sıcaklıklar genellikle yaklaşık 1000°C civarındadır. Odadaki çok yüksek sıcaklıklar ve

radıan ısı akışları, açıkta kalan tüm yanıcı yüzeylerde ısı ayrışmaya neden olur ve ortamda yeterli oksijenin bulunması durumunda büyük miktarlarda yanıcı gazlar üretir.

Ortamdaki oksijen miktarı, yangının havalandırma kontrollü mü yoksa yakıt kontrollü mü olması durumunu belirler. Tipik bir odada genel tutuşma sonrası yangın havalandırma kontrollüdür. Bu nedenle yanma hızı havalandırma açıklıklarının boyutuna ve şekline bağlıdır. Genellikle, parlama anında sıcaklıktaki hızlı yükselme nedeniyle tüm pencere camlarının (kablolu cam veya yangına dayanıklı cam dışındaki) kırılacağı ve düşeceği varsayılır. Havalandırma kontrollü yangınlarda oda içerisinde yanıcı gazların tamamını yakabilecek hava yoktur. Bu nedenle alevler pencerelerden dışarı uzanır ve yanmamış sıcak gaz yakıtların dışarıdaki havayla karşılaştığı yerlerde ek yanma olur. Diğer taraftan, yakıt kontrollü yangınlarda ise yanıcı yüzey alanı sınırlı ve iyi havalandırılmış odalarda yanma hızı yakıtın yüzey alanı ile kontrol edilebilir. Yakıt kontrollü yangın açık havadaki bir yangına çok benzemektedir. Fakat, yakıt kontrollü yangın sıcak üst bölgedeki gazların veya sıcak tavan ve duvar yüzeylerinin radyal geri beslemelerini de içermektedir. Sönme aşamasındaki yangınların çoğu yakıt kontrollü hale dönüşmektedir.

Bir yapının yapısal yangın güvenliğine göre tasarımı için genel tutuşma sonrası yangın sıcaklığının elde edilmesi oldukça önemlidir. Buna rağmen bu sıcaklık hesaplamaları tam olarak yapılamamaktadır. Genel tutuşma sonrası yangının en yaygın gösterimi; sıcaklık dağılımının üniform olduğu varsayılan ve odadaki gaz sıcaklığının gelişimini zamanın bir fonksiyonu olarak veren temsili yangın eğrileridir. Yaygın olarak kullanılan temsili yangın eğrileri, standart sıcaklık-zaman eğrileridir.

1.5. Yangına Tepki ve Yangına Dayanım

Yapı malzemelerinin yangına karşı koyabilmesinde en önemli iki etken, malzemelerin yangına tepki ve yangına dayanım performansıdır. Söz konusu bu terimler arasındaki anlam farkına dikkat edilmelidir. Malzemelerin tutuşma eğilimi, alevleri yayma potansiyeli gibi özelliklerle karakterize edilen yangına tepki, malzemenin yangına nasıl tepki verdiğinin ölçüsüdür. Yangına dayanım ise, yapı elamanlarının yangın boyunca yapısal işlevlerini koruyabilme kabiliyetinin bir ölçüsüdür.

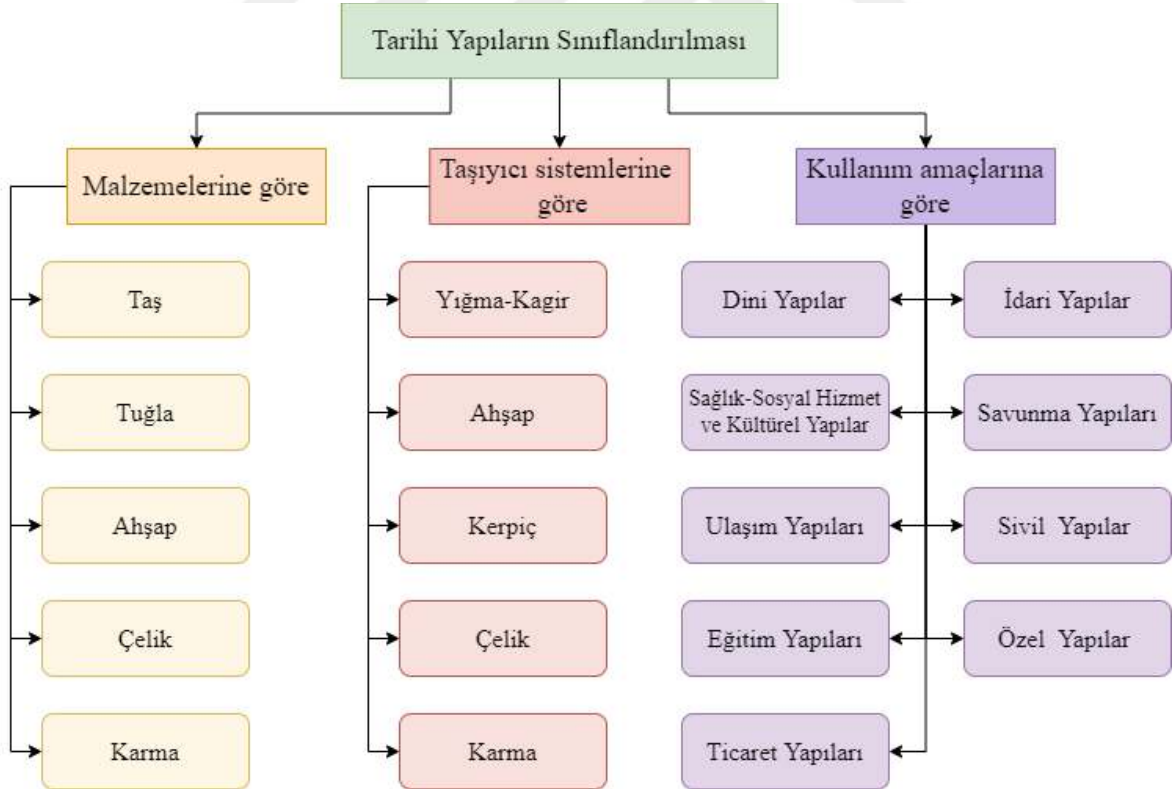
Aleve maruz kalan bir malzemenin yangına tepki özellikleri, yangın çıkmasının ilk aşamalarında ve gelişim sürecinde önemli bir rol oynarken, yangına dayanım özellikleri ise yangın büyüdüğünde önemli bir rol oynar. Örneğin, çelik yanıcı bir malzeme olmadığı için

yangına tepkisi güçlüdür. Fakat ısı yükselmesi ile çelik malzemelerin mukavemetinde azalma meydana geldiği için çelik kolon ve kirişler yangına karşı iyi direnç gösteremezler. Ahşap için bu durumun tam tersi geçerlidir. Ahşap malzemelerin yangın tepkisi zayıf, yangına karşı direnci güçlüdür.

Eurocode’de yapısal davranışa dikkat edilerek yangın tasarımı yapılmaktadır. Bu sebeple yangın tasarımında sadece yangın dayanımının karşılanması amaçlanmaktadır. Yangına dayanım yapı elemanları için geçerlidir. Fakat, malzeme özellikleri de yapı elemanının performansını etkileyeceğinden dolayı malzemelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışı önemlidir.

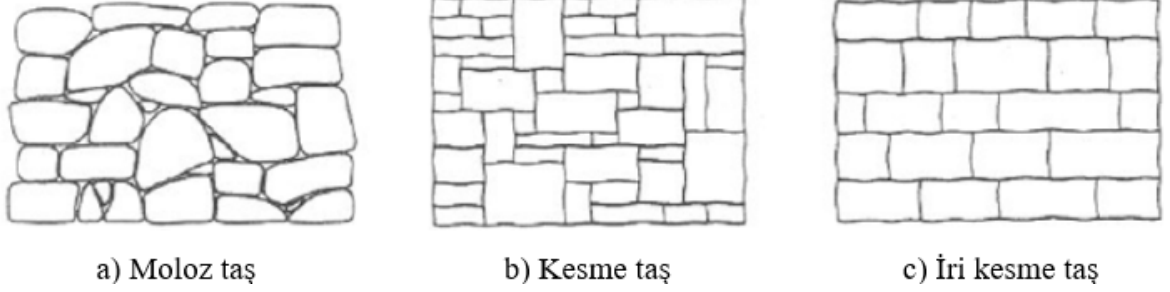
1.6. Tarihi Yığma Yapılar ve Yangın

Tarihi yapılar; malzemelerine, taşıyıcı sistemlerine ve kullanım amaçlarına göre sınıflandırılabilir (Şekil 1.5).



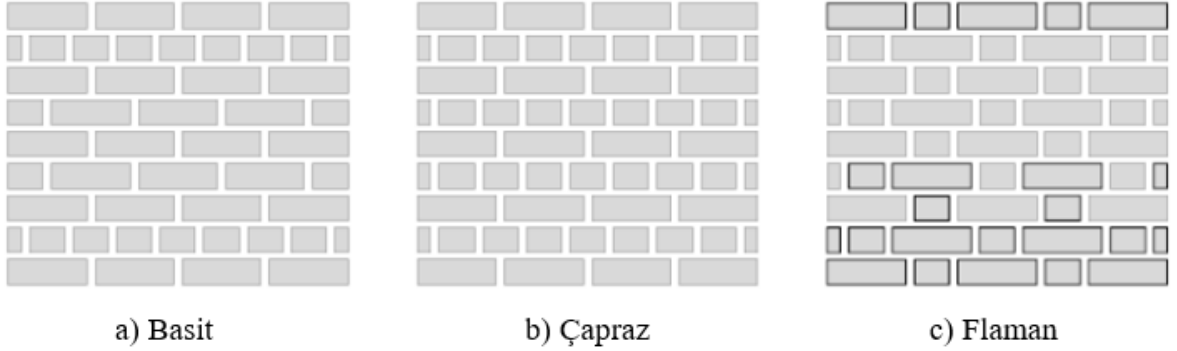
Şekil 1.5. Tarihi yapıların sınıflandırılması

Yığma yapılar, üzerine gelen yükleri doğal yollardan elde edilmiş veya yapay olarak üretilmiş malzemelerden oluşan taşıyıcı elemanlarla karşılayan yapılardır. Yığma yapıların yapım tekniğine göre basit bir sınıflandırılması Şekil 1.6’te verilmektedir.



Şekil 1.6. Yığma taş yapıların yapım tekniğine göre basit bir sınıflandırması (Lourenço, 1998).

Yığma yapılar; doğal taş, tuğla, ahşap, vb. malzeme özelliklerine sahip elemanların harç kullanılarak veya harç kullanılmadan üst üste konulup örülmesi ile oluşturulur. Farklı yapı malzemelerinden oluşan yığma yapılarda, yığma birim ve bağlayıcıya bağlı olarak farklı geometrik örgü teknikleri geliştirilmiştir. Yığma yapılarda kullanılan bazı örgü teknikleri Şekil 1.7’de verilmektedir.



Şekil 1.7. Yığma yapılarda kullanılan bazı örgü teknikleri (Lourenço, 1998).

1.6.1. Tarihi Yığma Yapı Elemanları

Tarihi yığma yapıların taşıyıcı sisteminin oluşturulmasında yaygın olarak kullanılan elemanlar; sütunlar ve ayaklar, kemerler, tonozlar, kubbeler, döşemeler ve temeller olarak sıralanabilir (Kara, 2009).

1.6.1.1. Kemerler

Tarihi yapıların taşıyıcı sistemi incelendiğinde düz kirişlerin yerini eğri formdaki kirişlere bıraktığı önemli bir gelişme olarak görülmektedir. Eğri forma sahip bu kirişler taşıyıcı elemanı olduğu tarihi yapıların önemli bir parçası olan kemerlerdir. Yığma yapıların taşıyıcı sisteminde kullanılan bu kemerler, hem küçük hacimlerin daha geniş bir forma dönüşmesinde hem de büyük açıklıkların geçilmesinde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra günümüze kadar gelen tarihi yapıların sonraki dönemlere aktarılması hususunda kemerler önemli bir paya sahiptir. Mühendislik biliminde kemerler, üzerine gelen yükleri taşıyıcı düşey elemanlara aktaran bu elemanlar arasındaki açıklıkların geçilmesini sağlayan eğri forma sahip taşıyıcı elemanlardır (Morgan 1970).

İnşa edildiği dönemden günümüze kadar varlığını sürdürmüş olan köprü, su yolu, cami, han, hamam, kilise gibi tarihi yapıların çoğunda, büyük açıklıkların geçilebilmesi ve hacimlerin genişletilmesinde kemerli sistemlerin kullanıldığı görülmektedir. Kemerli sistemlerin kullanıldığı bazı tarihi yapı örnekleri Şekil 1.8’de verilmiştir.



a) Mikron Köprüsü



b) Mağlova Su Kemerli



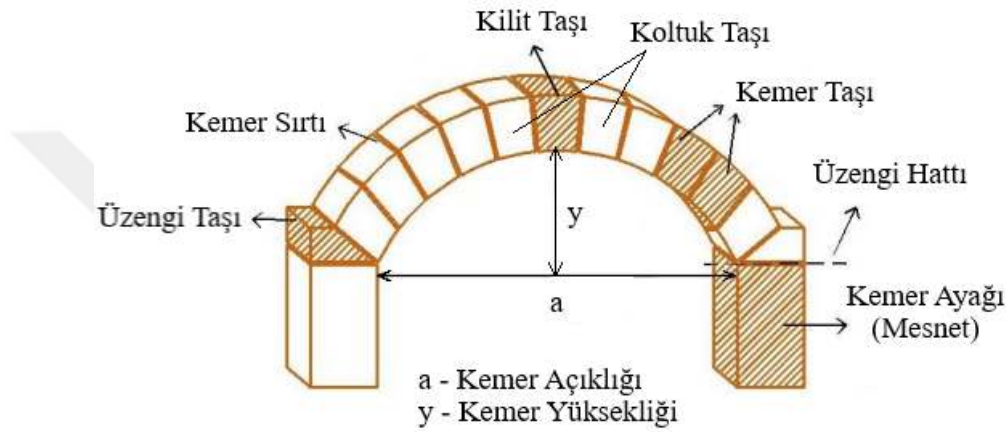
c) Sultan Ahmet Camii



d) Cinci Hanı

Şekil 1.8. Kemerli sistemlerin kullanıldığı bazı tarihi yapılar

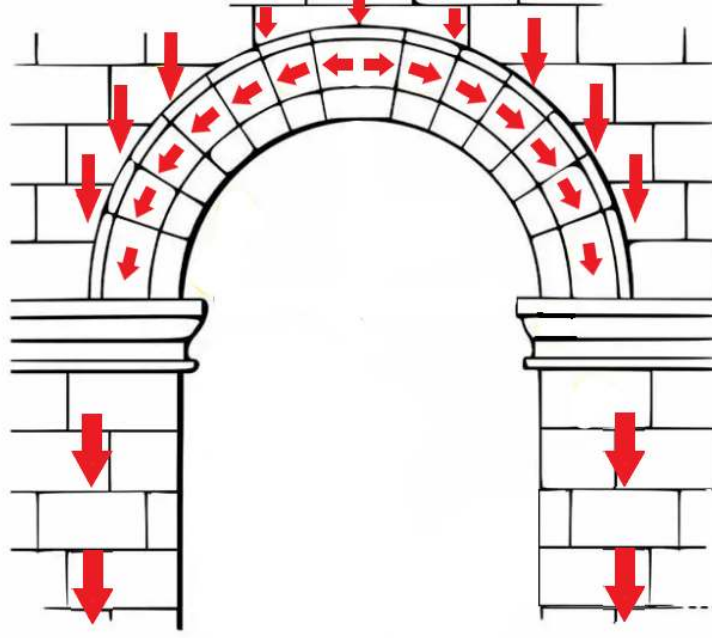
Kemerler, taş ya da tuğla gibi malzemelerden inşa edilebilir. Taş kemerler, moloz, kaba yonu, ince yonu veya kesme taştan yapılır. Bir kemer, kemer örgü taşı olarak üzengi, kilit taşı ve kemer taşları olmak üzere üç bölümden oluşur. Şekil 1.9’da tarihi yapılarda bulunan taş kemer oluşturan kısımlar gösterilmektedir. Kemer yapımına üzengi taşı ile başlanır, kemer ekseninde bulunan kemer taşlarını birbirine kenetleyen kilit taşı ile bitirilir. Kemerlerin oluşturulmasında kullanılan ve kilit taşı ile üzengi taşları arasında yer alan taşlara kemer taşı adı verilmektedir (Armağan, 2012).



Şekil 1.9. Taş kemer bölümleri

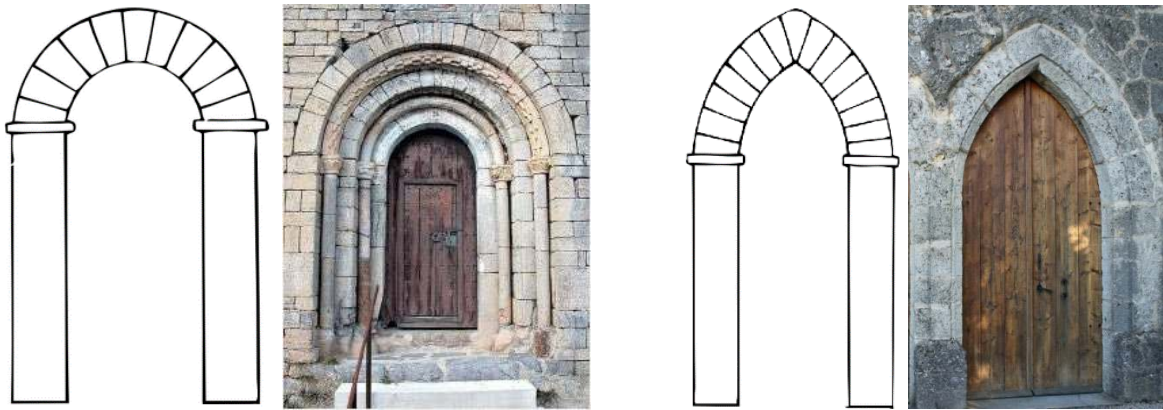
M.Ö. 3000 yılında Mezopotamya’da ilk olarak pencere ve kapı açıklıklarını geçmek için taş ya da tuğla malzemeden yapılmış yığma kemerler kullanılmıştır (Çakır, 2011). İlk olarak önceki dönemlerde kullanılan ve üçgen kemer olarak isimlendirilen küçük sivri kemer formları, büyük tek parça taşların “^” şeklinde üst üste gelecek şekilde yerleştirilmesiyle elde edilmiştir. Sümerler zamanında bu şekilde oluşturulan kemerler formları çoğunlukla türbe kubbelerini taşımak için kullanılmıştır. Tüm bunlara rağmen, kemerler formlarındaki en önemli gelişimler Roma zamanında olmuştur (Morgan, 1970). Günümüzde kullanılan kemer formları Roma zamanında şekillenmiş ve o dönemlerde uzun açıklıkların geçilmesi amacıyla köprü ve su yapılarında kullanılmıştır (Ural vd., 2008).

Kemerler, düşey ve yatay yükleri kemer ayaklarına yönlendiren ve aktaran elemanlardır. Kemer elemanlar genelde basınca çalışıp açıklıklarda kirişler gibi yük taşırlar (Bayraktar, 2005). Kemer elemanlarındaki yük aktarımı Şekil 1.10’da gösterilmiştir. Kemerlerin yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesinde kemer geometrisi (kemer açıklığı, kemer yüksekliği, kemer kalınlığı, kemer genişliği) ve kemeri oluşturan malzemelerin özellikleri önemli rol oynamaktadır.



Şekil 1.10.Kemer elemanlarda yük aktarım şeması

Uygulama alanına, yapım malzemesine ve tekniğine bağlı olarak değişen çeşitli kemer formlarına günümüzdeki tarihi yapılarda çok sık rastlanılmaktadır. Bu kemer formlarına örnek olarak dairesel, sivri, basık, at nalı kemerler verilebilir. Fakat gerek günümüzde yapılan yığma yapıların gerekse eski dönemlerden günümüze kalan tarihi yapıların taşıyıcı sisteminde genellikle dairesel kemer formu kullanılmıştır (Özer, 2004). Yığma yapılarda kullanılan bazı kemer tipleri Şekil 1.11’de verilmektedir.

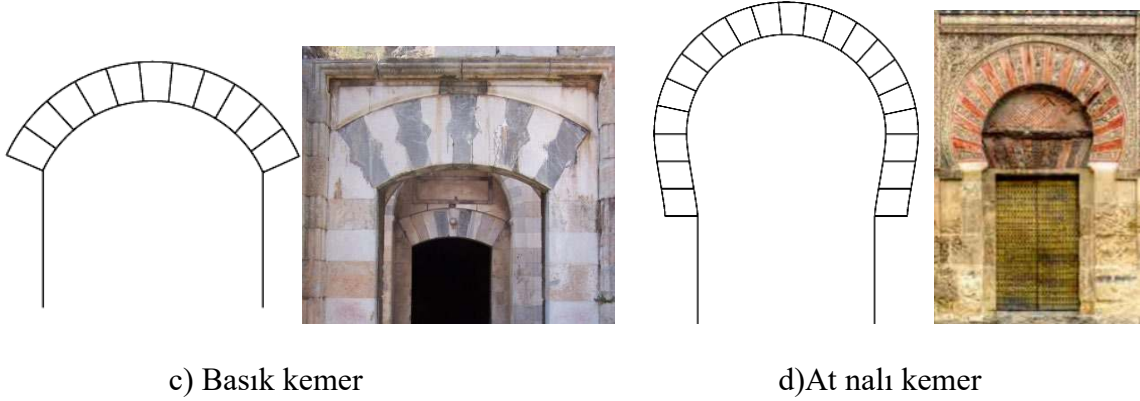


a) Yuvarlak (daire) kemer

b) Sivri kemer

Şekil 1.11. Yığma yapılarda kullanılan baz kemer tipleri

Şekil 1.11'in devamı



1.6.1.2. Sütun ve Ayaklar

Yığma yapılarda düşey yükleri tekil noktalardan temellere aktaran ayaklar ve sütunlar bulunmaktadır. Sütunlar, form olarak daire kesitli tek bir malzemeden yekpare veya birkaç blok taşın üst üste konması ile oluşturulmuş düşey yapı elemanıdır. Sütunlar, kaide, gövde ve başlık olmak üzere üç kısımdan oluşur.

Ayaklar ise, sütunlardan daha büyük örülerek yapılan düşey taşıyıcı elemanlardır. Tarihi yapılarda sütun ve ayak kullanımına ait bazı örnekler Şekil 1.12'de verilmektedir.



a) Efes Celsus Kütüphanesi



b) Zafer Takı (Metius Modestus)

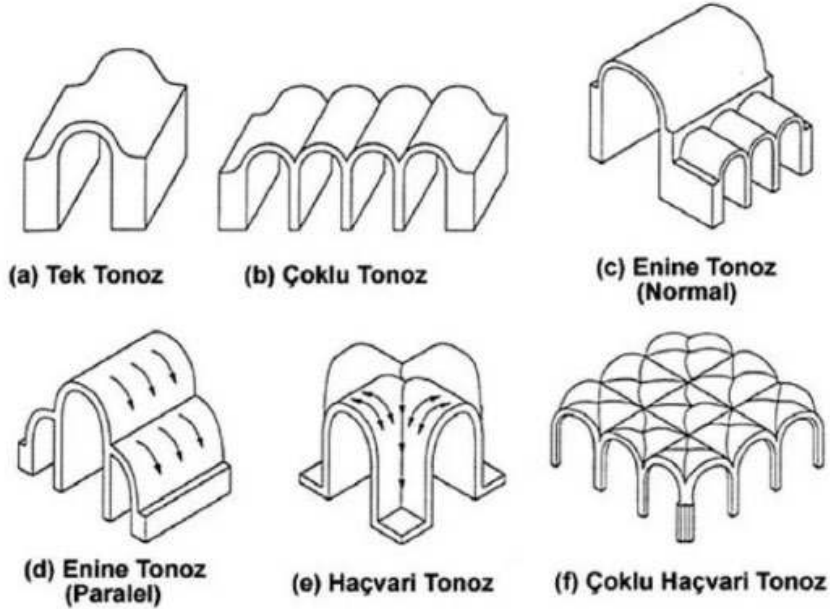
Şekil 1.12. Tarihi yapılarda sütun (a) ve ayak (b) kullanımı

1.6.1.3. Duvarlar

Yığma yapılarda taşıyıcı duvarlar, düşey ve yatay yükleri temellere aktaran yapı elemanlarıdır. Düşey düzlemsel eleman olan duvarlar basınç ve kayma gerilmesi etkisinde olup çekme gerilmesi taşımamaktadırlar. Duvarlarda çekme gerilmesi oluşması durumunda bu gerilmelerin çekme elemanları (demir kenet, ahşap kasnak) tarafından karşılanması gerekmektedir.

1.6.1.4. Tonozlar

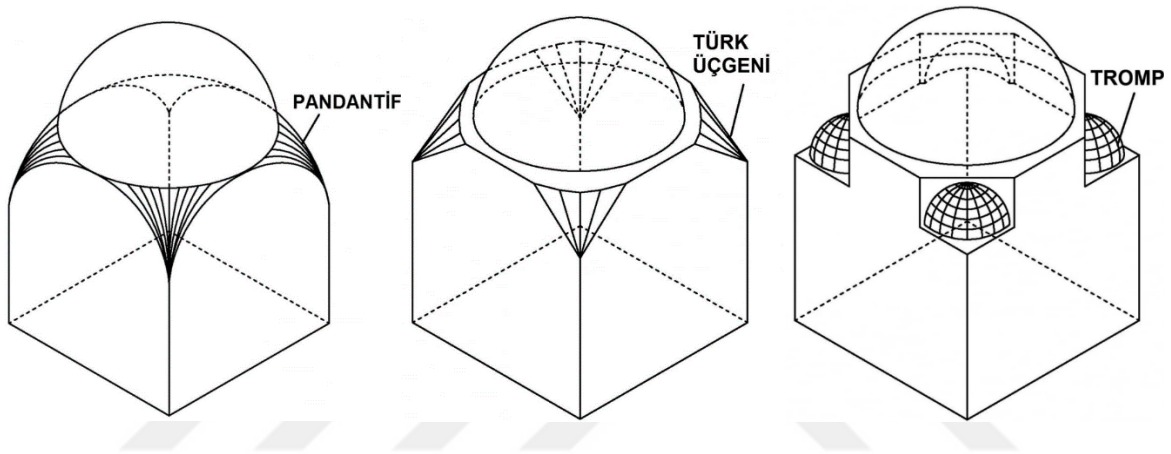
Kemer elemanların kendi düzlemine dik doğrultuda ötelenmesiyle oluşan tonozlar; kemerlere benzer yük taşıma özelliğine sahip olup kabuk özelliği gösteren yapı elemanlarıdır (Öztürk ve Mahberel, 2006). Genellikle yığma yapılarda koridorların ya da belirli hacimlerin örtülmesinde kullanılırlar. Şekil 1.13'te yığma yapılarda kullanılan bazı tonoz çeşitleri gösterilmektedir.



Şekil 1.13. Tonoz çeşitleri (Çılı ve Sesigür, 2007)

1.6.1.5. Kubbeler

Kemerlerin simetri eksenini etrafında dönmesiyle oluşan kubbeler, üzerlerine gelen yükleri çift eğrilikli yüzeylerle geçit elemanlarına aktaran kabuk elemanlardır. Kubbelerin yapısı gereği dairesel bir mesnede oturması gerekmektedir. Bu sebeple, dairesel plana sahip kubbelerdeki yükün kare plana sahip düz duvarlara iletilmesi, daireden kareye geçit elemanları olan pandantif, tromp ve Türk üçgeni ile sağlanmaktadır (Kara, 2009). Şekil 1.14'te kubbelerle sıklıkla kullanılan geçit elemanları gösterilmektedir.



Şekil 1.14. Kubbelerde kullanılan geçit elemanları

Tarihi yapılarda kullanılan kubbeler, mekânın örtülmesinde tek olarak veya yarım kubbelerin çeşitli kombinasyonlarıyla beraber kullanılırlar.

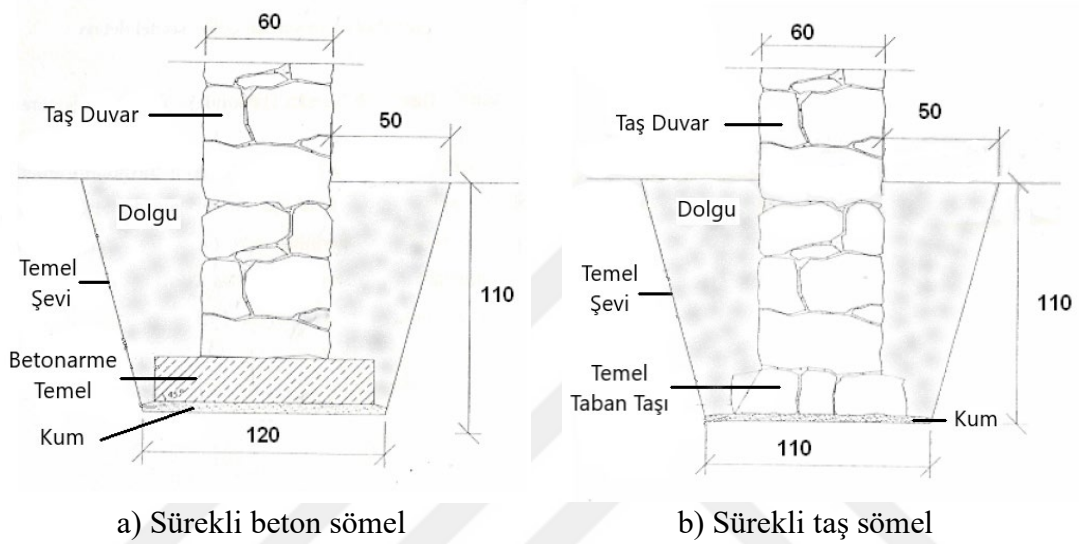
1.6.1.6. Temeller

Tarihi yığma yapılarda temeller yapının en önemli elemanlarıdır. Yığma yapılarda temeller düşey ve yatay yükleri zemine aktaran taşıyıcı elemanlardır. Yığma yapılarda kullanılan yüzeysel temeller tekil (sütun ve ayakların altında) ve sürekli (duvar altında) temellerden oluşmaktadır (Şekil 1.15).

1.6.1.7. Döşemeler

Döşemeler, düşey ve yatay yükleri direk taşıyıcı duvarlara veya önce çelik, ahşap gibi malzemelerden yapılan kirişlere sonra taşıyıcı duvarlara aktaran yapı elemanlarıdır.

Yapılarda döşemeler, etrafı kapalı ya da açık alanların üstünü örtmekte ve yapının katlarını birbirinden ayırmada kullanılırlar. Tarihi yapılarda genellikle kubbe ve tonoz gibi yapı elemanlarıyla oluşturulan döşemeler kullanılmaktadır. Ayrıca, tarihi yapıların döşemeleri kâgir, çelik ve ahşap malzeme özelliğine sahip elemanlar kullanılarak da oluşturulmaktadır. Bu yapılarda kullanılan en alt kat döşemesi ise zemin veya temel duvarlarının üstünde düzenlenen bir tabaka ile oluşturulmaktadır (Kara, 2009).



Şekil 1.15. Yığma yapılarda kullanılan sürekli temeller

1.6.2. Yığma Yapılarda Kullanılan Malzemeler

Yığma yapılarda doğal taş, tuğla, kerpiç, ahşap gibi çeşitli tiplerde malzemeler kullanılmakla birlikte en sık kullanılan malzemeler doğal taş ve tuğladır. Önceki dönemlerden günümüze kadar, doğadaki taşta farklı şekiller verilmiş ve bu taşların bir araya getirilip örülmesiyle çeşitli geometrik özelliklere sahip yapılar oluşturulmuştur. Genellikle basınçta çalışan yığma yapı elemanları, basınç dayanımı yüksek çekme dayanımı düşük malzemelerden oluşmaktadır. Yığma yapı elemanlarında kullanılan yığma birimlerinin bir araya getirilmesinde, harç vb. bağlayıcı malzeme kullanılır (Kara, 2009)

1.6.2.1. Doğal Taşlar

Geniş bir coğrafyaya sahip Ülkemizin hemen hemen her bölgesinde kolaylıkla bulunabilen doğal taş, yığma yapı malzemesi olarak çok sık kullanılmaktadır. Yapı

malzemesi olarak kullanımı yaygın, basınç dayanımı yüksek ve dış etkenlerden çok fazla etkilenmeyen doğal taşlardan; magmatik kayalara (andezit, bazalt, granit vb.) ve tortul kayalara (traverten, kalker (kireç taşı), kum taşı, kil taşı vb.) ait bazı örnekler Şekil 1.16'da verilmiştir.

Eski dönemlerden beri duvar malzemesi olarak kullanılan taşların dayanıklılığı yüksektir. Fakat taşların çekme dayanımı zayıftır. Bu sebeple, kemer, tonoz ve kubbe gibi yığma yapı elamanları basınca çalışacak şekilde kullanılmıştır.



Şekil 1.16. Yığma yapılarda kullanılan bazı doğal taşlar

1.6.2.2. Tuğla ve Kerpiç

Harman tuğlası; kil, killi toprak ve balçığın ya ayrı ayrı ya da birlikte yoğrulup gerekli olması durumunda su, öğütülmüş tuğla, kum, kiremit tozu gibi malzemelerin eklenmesiyle karıştırılarak şekillendirilen ve kurutulduktan sonra ocaklarda pişirilmesi yolu ile elde edilen ve genellikle yığma yapılarda kullanılan bir yapı malzemesidir (TSE, 1979).

Kerpiç; killi toprak, su ve saman çöpü vb. organik malzemelerin karıştırılarak kalıplara dökülmesinden sonra sırasıyla gölgede ve güneşte kurutulması sonucu elde edilen pişmemiş tuğladır. Kerpiç tarihi yığma yapılarda oldukça çok kullanılmaktadır. Bunun sebebi, ucuz ve kolay elde edilebilir olmasıdır.



Şekil 1.17. Tarihi yığma yapılarda kullanılan tuğla (a) ve kerpiç (b)

1.6.2.3. Harç

Harç, mineral esaslı bağlayıcı, dolgu malzemesi ve suyun karışımı ile elde edilen, katılaşma özelliğine sahip hamura denilmektedir. Harçlar içeriğinde yer alan bağlayıcının niteliğine göre sınıflandırılırlar. Tarihi yapılarda iki tür harç bulunmaktadır; kireç harcı ve sıvaları, horasan harcı ve sıvalarıdır (Kara, 2009).

Kireç harcı, bağlayıcı olarak kirecin ve dolgu olarak agregaların suyla karıştırılması sonucu elde edilen hamurdur. Önceki dönemlerde çimentonun ortaya çıkana kadar tarihi yığma yapılarda bağlayıcı olarak kireç harcı kullanılmıştır.

Horasan harcı; pişirilmiş kil esaslı tuğla, kiremit, çömlek gibi malzemelerin öğütülmesi sonucu oluşan parçacıkların belirli oranlarda su ve kireçle karıştırılması sonucu elde edilen hamurdur.

Hidrolik kökenli bir harç olan horasan harcının mukavemeti, içeriğinde puzolanik katkı malzemeleri bulunan diğer kireç harçlarından daha yüksektir. geç sertleşen bir malzeme olan horasan harcının nihai dayanımına ulaşması uzun sürmekte olup dayanımını içeriğindeki kirecin kalitesi ve katkı malzemelerinin büyüklükleri belirlemektedir (Kara, 2009).

1.6.3. Yığma Yapılarda Yangın

Taş malzemesinin kullanıldığı yığma yapılar tarih boyunca ayakta kalabilmiş ve günümüze kadar gelebilmiştir. Fakat bu yapıların birçoğu zaman içerisinde deprem, yangın vb. afetlere maruz kalarak veya savaşlar ve çevresel etkiler nedeniyle zarar görmüş ya da yıkılmıştır. Meydana gelebilecek afetler can kaybına yol açmanın yanı sıra tarihi yapılara ve çevreye, çoğu kalıcı olacak şekilde çeşitli zararlar vermektedir. Taşınmaz kültürel

mirasımızın önemli bir kısmını oluşturan tarihi yapılar tüm dünyada meydana gelen afetler karşısında diğer yapıları çevre elemanlarına göre daha kırılgan, daha kolay zarar görebilir durumdadır (Tulunay, 2019). Yangına maruz kalmış ve zarar görmüş bazı tarihi yapı örnekleri Şekil 1.18’de verilmektedir.

Eski dönemlerden beri yapı malzemesi olarak kullanılan doğal taşlar ile yapılan yapıların restorasyonu ve korunması günümüzün önemli konuları arasında yer almaktadır. Bu yapılar yangın gibi doğal afetler nedeniyle çok fazla zarar görebilmekte ve taşıyıcı elemanlarda meydana gelen aşırı hasarlar sonucu yıkılabilmektedir (Ünal vd., 2007). Doğal taşlar yönetmelikte A1 sınıfı yanmaz malzeme olarak verilmektedir (Demirel vd., 2006). Fakat yüksek sıcaklığa maruz kalan doğal taşların dış yüzeylerinde sıcaklığa bağlı genleşmeler meydana gelirken iç yüzeyleri daha soğuk kalmakta ve taşta iç gerilmeler oluşmaktadır (Küçükaya, 2004). Bu gerilmeler karbondioksit ve su moleküllerinin sıcaklığa bağlı hacminin genleşmesi sonucu oluşur ve taşta patlamalara, parçalanmalara ya da dökülmelere neden olmaktadır. (Akıncıtürk, 2000; Eriç, 2002; Küçükaya, 2004). Yüksek sıcaklıklarda (600 °C – 800 °C) çoğu taşın dayanımı ciddi şekilde etkilenmekte ve termal şok meydana gelmesi durumunda taş parçalanabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda (200 °C – 300 °C) ise hasar genellikle renk değişimleriyle (demir içeren taşların kızarması gibi) sınırlı kalmaktadır. Ancak bu değişiklik geri dönüşü olmadığı için önemlidir (Chakrabarti vd., 1996).

Doğal taşlar için sıcaklık değişiklikleri basınç dayanımı değerlerini etkilemektedir. Taşların çekme dayanımı da sıcaklık arttıkça azalmaktadır (Özgüven ve Özçelik, 2014). Biro vd. (2019), çeşitli doğal taşları, özelliklerindeki değişiklikler ve uygulanabilirlik sınırları hakkında bilgi edinmek için sıcaklık yüküne maruz bıraktıktan sonra test etmişlerdir. Test sonuçlarında yüksek sıcaklıklarda taşların basınç ve eğilme dayanımlarında azalma olduğu gözlenmiştir.



a) Tarihi Mason County Adliye Sarayı



b) Tarihi Haydarpaşa Garı



c) Kurşunlu Cami



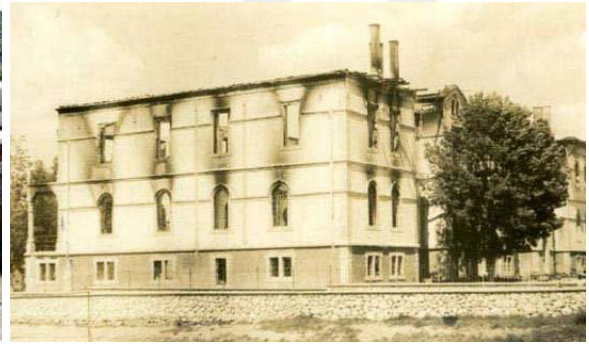
d) Notre Dame Katedrali



e) Cape Town Üniversitesi



f) Kosova Prizren Köprüsü



g) Çorum Müzesi

Şekil 1.18. Yangına maruz kalmış bazı tarihi yapılar

Gelişmiş ülkelerde deprem yönetmeliklerine benzer yangın yönetmelikleri kullanılmakta ve yangın dayanımı güncel bu yönetmelikler kullanılarak elde edilebilmektedir (Hacıemiroğlu, 2014). 2007 yılında yayımlanan ve son halini 2018 yılı içerisinde alan “Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (BYKHY)”, ülkemizde kullanılan yangın yönetmeliğidir. Yapılan değerlendirmeler, bu yönetmelikteki yangın güvenliği yaklaşımlarının, gelişmiş ülkelerde kullanılan yönetmeliklerle karşılaştırıldığında eksik kaldığını göstermektedir. Yapıların tasarımında sıcaklık etkilerinin

genellikle ihmal edildiği Ülkemizde, yangın mühendisliği yöntemlerine dikkat edilmemekte olup bu durum özellikle can güvenliği açısından önemli bir tehlike teşkil etmektedir (Akbulut, 2018). Yangın tasarımına yönelik modern mühendislik yaklaşımı, yangını ve yığma yapıların yangından sonraki davranışını daha iyi anlamayı gerektirir. Yığma yapıların yangın kazalarından sonra kalan dayanımını tahmin etmek için özel yönergelere ihtiyaç vardır.

1.7. Yangın Performansının Belirlenmesi

Yangın yüküne göre mühendislik yapılarının tasarımı, yapı elemanının yangına karşı dayanım ve dayanıklılığın bir ölçüsü olan yangın performansı (başarımı) kavramına göre yapılmalıdır. Yapı ya da yapı elemanlarının yangın performansı belirlenirken genelde yük taşıma kapasitesi kullanılmakta ve yangın boyunca uygulanan yüklerle bu kapasite karşılaştırılmaktadır. Bu sebeple yangın performansı, yangına maruz kalan yapı ya da yapı elemanının taşıma gücü sınır durumuna gelene kadar geçen süre olarak tanımlanabilir. Talimata ve performansa bağlı yöntemlere ek olarak deneysel çalışmalarla da yangın performansı belirlenebilmektedir (Akbulut, 2018).

Mühendislik yapılarında; deneysel, analitik ve sayısal yöntemler kullanılarak, eleman kesitleri içerisindeki sıcaklık dağılımları elde edildikten sonra yangın performansı belirlenir. Ayrıca bu yapıları oluşturan malzemelerin özelliklerinin bilinmesi, yapıların yangın etkisi altındaki davranışının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Normal sıcaklıklarda yapılan tasarımlarda malzeme özelliklerinin oda sıcaklığındaki değerleri dikkate alınır, fakat; yangın tasarımında malzemelerin farklı sıcaklıklardaki özellikleri dikkate alınmalıdır. Bu yüzden, yangın anında artan ortam sıcaklığının malzeme özellikleri üzerinde meydana getirdiği değişim, eleman kesiti içindeki sıcaklık dağılımını ve yapısal davranışı büyük ölçüde etkilemektedir.

1.7.1. Yangın Performansının Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler

Yangın performansı genelde deneysel yöntemlerle, talimata ve performansa dayalı yöntemlerle ve doğrulama yöntemleriyle belirlenmekte olup bu yöntemler alt başlıklarda ayrıntılı bir şekilde verilmektedir.

1.7.1.1. Deneysel Yöntemler

Deneysel yöntem yangın performansının belirlenmesinde kullanılan en gerçekçi yöntem olup, deneyler doğal veya temsili yangın etkisindeki ölçekli yapı örneği veya yapı elemanları üzerinde gerçekleştirilir. Fakat yangın etkisi altındaki yapı veya yapı elemanının yangın performansının deneyle belirlenmesinin bazı dezavantajları vardır. Örneğin, deneysel çalışmalar için yapılan hazırlıkların uzun zaman alması ve deneysel çalışma için yapılacak kurulum ve uygulama masraflarının çok yüksek olması bu dezavantajlardan bazılarıdır (Akbulut, 2018).

Deneysel yöntemin bir diğer dezavantajı ise deney fırınında birleşik elemanların mesnetlenme koşulunun zor sağlanmasıdır. Bu nedenle deneysel yöntemde genellikle tekil yapı elemanları kullanılmaktadır.

Önceki dönemlerde yapıların yangın performansı sadece deneysel çalışmalarla belirlenmekteyken, günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte hazırlanan bilgisayar programları ile yangın performansının belirlenmesinde farklı yöntemler ortaya çıkmıştır.

1.7.1.2. Talimata Dayalı Yöntemler

Talimata dayalı yöntemlerde yapı elemanlarının yangın performansı, standartlarda ve yönetmeliklerde yer alan tablolastırılmış veriler kullanılarak belirlenir. Standart yangına maruz yapı elemanlarının 30, 60, 90, 120, 180 ve 240 dakika içinde göçmeyecek şekilde tasarlanmasında kullanılan talimata dayalı yöntemler, yangın mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem birçok bakımdan katı ve sınırlayıcı olup, bu yöntemde mühendislik önsezisi dikkate alınmamaktadır (Akbulut, 2018).

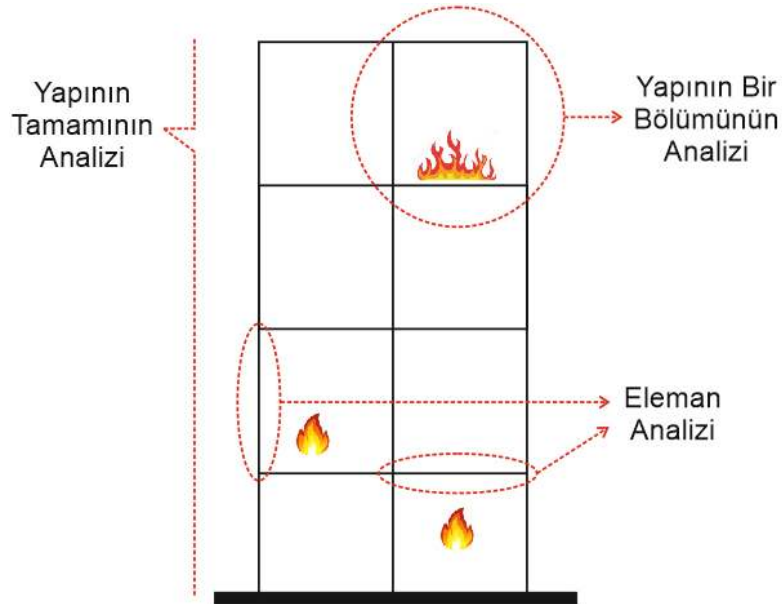
Talimata dayalı yöntemlerde çoğu durumda güvenli tarafta kalınıyor olmasına rağmen bazı durumlarda güvensiz olabilmesinden dolayı bu yöntem yangın performansının belirlenmesinde diğer yöntemlere göre doğruluk oranı en az olandır. Ayrıca bu yöntemde elde edilen sonuçların güvenlik seviyeleri oldukça fazla değişim göstermektedir. Tüm bu sebeplerden dolayı yangın performansının belirlenmesinde kullanılan performansa dayalı yöntemler geliştirilmiş ve tasarımcıyı performansa dayalı yöntemleri kullanmaya yöneltmiştir.

1.7.1.3. Performansa Dayalı Yöntemler

Yangın performansının belirlenmesinde talimata dayalı yöntemlere göre daha etkili ve esnek değerlendirme sağlayan performansa dayalı yöntemlerde, bilgisayar programları kullanılarak oluşturulması zor yapı koşulları modellenerek yangın deneylerinin oluşturulmasına olanak sağlar. Performansa dayalı yöntemlerde, yapısal analizlerin bir parçası olarak ısı transferi analizi yapılmakta ve dikkate alınan problem farklı geometriler, yangın senaryoları, malzeme özellikleri, yükleme ve mesnet şartlarına bağlı olarak irdelenebilmektedir. Tüm bunlara ek olarak bu yöntemlerde, sönme evresi de dahil yangının tüm evreleri dikkate alınabilmekte ve yangın esnasındaki yapısal davranış kısa bir sürede belirlenebilmektedir (Akbulut, 2018).

1.7.2. Değerlendirme Yöntemleri

Eurocode yönetmeliklerine göre, yangın etkisi altındaki yapıdan istenen performansı değerlendirmek için analiz yöntemi vardır (EN 1996-1-2, 2005). Bu analiz yöntemleri alt başlıklar halinde aşağıda verilmiştir (Şekil 1.19).



Şekil 1.19. Doğrulama analizleri

1.7.2.1. Yapının Tamamının Analizi

Yapı elemanları arasındaki tüm etkileşimler, ısı genleşmeler ve deformasyon etkileri dikkate alınarak modellenen bu analizde, yapının tamamı dikkate alınmaktadır (Şekil 1.19). Bu analizlerde sıcaklıkla değişen malzeme özellikleri ve eleman rijitlikleri ile birlikte yangın esnasındaki yapının göçme mekanizması dikkate alınmaktadır. Bu analizlerin karmaşık olmasına rağmen gerçeğe yakın yaklaşımlar sergilediği görülmektedir.

1.7.2.2. Yapının Bir Bölümünün Analizi

Yapının bir bölümünün analizinde, yapı bölümlere ayrılmakta ve ayrılan her bölüm ayrı ayrı modellenmektedir. Bu analizde, analizi yapılacak bölümün yangın süresince diğer bölümlerle etkileşime girmediği varsayılmaktadır. Bu analizde de seçilen yapı bölümünün sıcaklıkla değişen malzeme özellikleri ve eleman rijitlikleri ile birlikte yangın esnasındaki yapının göçme mekanizması dikkate alınmaktadır. Yapının tamamının analizine kıyasla daha az karmaşık olan yapının seçilen bir kısmının analizinde, yapının seçilen bölümündeki elemanların birbiriyle etkileşimi hesaba katılmaktadır.

1.7.2.3. Eleman Analizi

Birçok sadeleştirme yapılan eleman analizlerinde, yapıdaki farklı elemanlar arasındaki etkileşim ihmal edilmektedir. Eleman analizlerinde, sadece eleman kesitindeki ısı değişimlerinden dolayı meydana gelen şekil değiştirmelere bağlı etkiler dikkate alınması yeterli olmaktadır.

1.8. Yığma Yapılarda Yangın Tasarımı

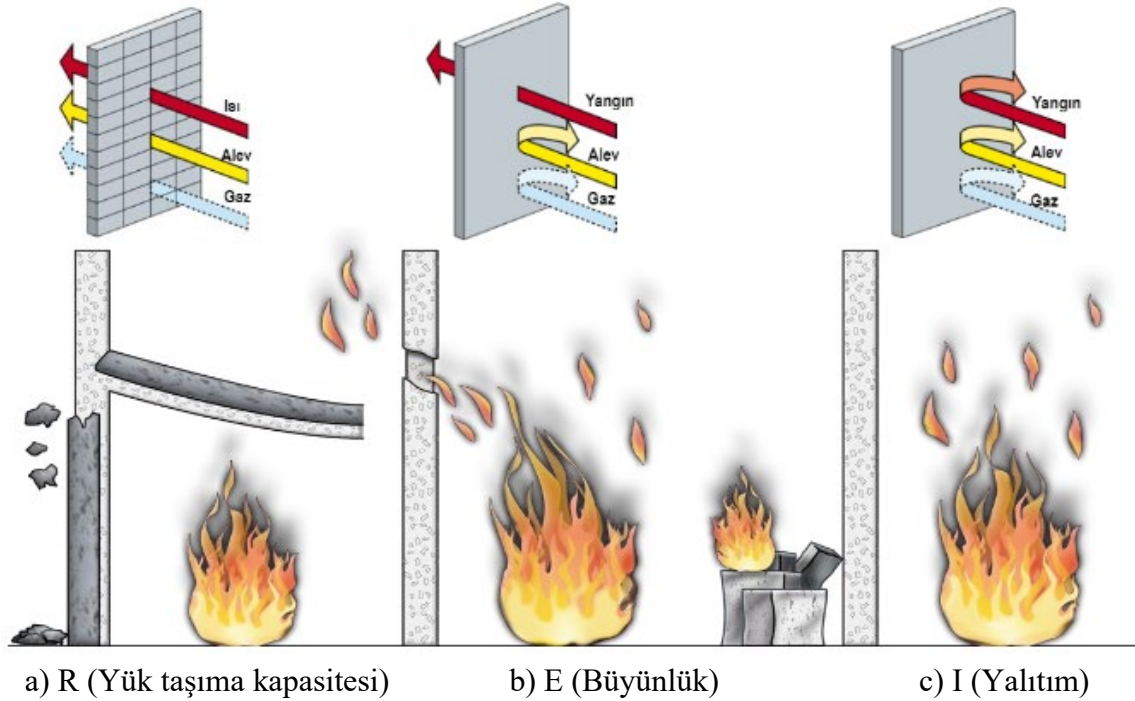
1.8.1. Yangına Dayanım

Yangına dayanım, yangın esnasında bir yapı elemanının yük taşıma, ayırma veya her iki işlevini belirli bir süre devam ettirebilme kabiliyetidir. Bir yapıda kolan ve kirişler yük taşıma, duvar ve döşemeler ise hem taşıma hem ayırma işlevine sahiptir. EN 1991-1-2'ye

(2002) göre bir yapı elemanının yangına dayanım performansının tanımlanabilmesi için kullanılan kriterler şunlardır: (Şekil 1.20)

- ✓ R (Yük taşıma kapasitesi): Tanımlanan ölçütlere göre bir yapının veya bir yapı elemanının yangın süresi boyunca belirli işlevleri devam ettirebilme kabiliyetidir.
- ✓ E (Bütünlük): Bir bölümü yangına maruz kalmış yapıda ayırıcı bir elemanın, yangına maruz kalmayan bölüme alevlerin ve sıcak gazların geçişini engelleme yeteneğidir.
- ✓ I (Yalıtım): Bir bölümü yangına maruz kalmış yapıda ayırıcı bir elemanın, yangına maruz kalmayan bölümdeki sıcaklık artışını belirlenen seviyenin altında tutma yeteneğidir.

Bu performans kriterlerinden R yük taşıma işlevinin gerektiği durumlarda, E ve/veya I kriteri ise ayırma işlevini gerektiği durumlarda uygulanmalıdır. Tasarım için kullanılan yangınla ilişkili olan bu kriterler yangın süresince karşılanmalıdır. Söz edilen kriterlerin karşılanması elemanın hasar görmediği anlamına gelmez, elemanın tasarım yangınına dayanabileceği anlamına gelmektedir.



Şekil 1.20. Yapı elemanlarının yangına dayanım performansı

Yapı elemanlarının yangına dayanım dereceleri, belirli kriterleri temsil eden R, E, I harfleriyle ve elemanların yangına dayanım süresi (t) ile tanımlanır. Bu şekilde tanımlanan kodlar aşağıdaki gibidir:

- ✓ Yük taşıyan elemanlar için R t , RE t ve REI t 'dir
- ✓ Taşıyıcı olmayan elemanlar için E t ve EI t 'dir.

Örneğin; yangın koşullarında bir buçuk saat boyunca alev almayan bir döşeme EI90, iki saat boyunca stabilitesini koruyan kiriş ise R120 olarak sınıflandırılmaktadır.

1.8.2. Yapısal Yangın Tasarım Stratejileri

1.8.2.1. Yangın Senaryosunun Seçilmesi

EN 1991-1-2'de (2002) yangın senaryosu, yangını karakterize eden ve onu diğer olası yangınlardan ayıran önemli olayları tanımlayan yangın seyrinin niteliksel açıklaması olarak tanımlanmaktadır. Yangın senaryosu, yangının tutuşma, büyüme, gelişme ve sönme aşamalarının seyrini etkileyecek yapı ortamı ve sistemleri dikkate alınarak seçilmelidir.

1.8.2.2. Tasarım Yangınının Belirlenmesi

Tasarım yangını; tasarım amaçlarına bağlı olarak yangının davranışını belirten bir model olarak EN 1991-1-2'de (2002) tanımlanmaktadır. Yangın modeli doğal ve temsili yangın modeli olmak üzere ikiye ayrılır. Yangın esnasında bir bölmedeki gazların sıcaklığının zamanla değişimini dikkate alan temsili yangın modeli, karşılaştırma ve sınıflandırma için uygundur. Bu yangın modelinde, yapının yangın yükü ile havalandırma koşulu ve bölme yüzeyindeki malzemelerin ısı özellikleri gibi özel karakteristikler arasında herhangi bir ilişki yoktur. Buna karşılık, doğal yangın modelinde belirli bir yapıya ait bu özel karakteristikler dikkate alınarak modelleme yapılmaktadır. Aksi belirtilmediği sürece seçilen tasarım yangını yapının tümüne değil, yalnız bir bölümüne uygulanmalıdır.

1.8.2.3. Sıcaklık Profilinin Belirlenmesi

Eleman kesitlerindeki sıcaklık profillerinin belirlenmesinde, yapısal elemanların ve koruyucu yüzlerin ısı malzeme özellikleriyle birlikte net ısı akısı sıcaklık analizlerinde

kullanılır. Işınım ve taşınım ile gerçekleşen ısı transferlerinin birleşmesi ile sıcaklık analizleri yapılmaktadır.

1.8.2.4. Mekanik Davranışının Hesaplanması

Mekanik davranışın hesaplanması sürecinde, yangın şartlarındaki tüm mekanik eylemler ve bu eylemlerin farklı birleşimleri ile oluşan etkiler belirlenmektedir. EN 1991-1-2'de (2002) hesaba katılacak etkiler, EN 1990'da (2002) ise kombine edilen etkiler açıkça belirtilmiştir.

1.8.2.5. Yangın Dayanımının Belirlenmesi

Yangına dayanım; bölüm 1.8.1'de ayrıntılı olarak açıklanan R (yük taşıma kapasitesi), E (bütünlük), I (yalıtım) gibi bazı kriterlerin karşılanması ile sağlanmaktadır. Dayanım parametresi bir yapının tamamının, bir bölümünün veya bir yapı elemanının yük taşıma kapasitesini doğrulamak için kullanılabilir. Yani, bir yapıya yangına maruz kalma süresi (t) boyunca etki eden yüklerin, yük taşıma kapasitesinden daha küçük olması gerekmektedir.

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi} \quad (1.1)$$

1.8.3. Sıcaklık Analizi İçin Isıl Etkiler

Işınım ve taşınım ile gerçekleşen ısı transferlerinin birleşmesi ile ısı etkiler oluşur ve ilgili yapı elemanı yüzeyin de net ısı akısı $\dot{h}_{net}$ (W/m²) ifade edilir.

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,r} + \dot{h}_{net,c} \quad (1.2)$$

Işınım ile meydana gelen ışımsal net ısı akısı $\dot{h}_{net,r}$ (W/m²) olarak adlandırılır ve aşağıdaki denklemle belirlenir.

$$\dot{h}_{net,r} = \varphi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma^{sb} \cdot [(\theta_r - 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (1.3)$$

Düzetme faktörü olan $\varphi = 1$ olarak alınır, ancak muhtemel konum ve gölge etkilerine bağlı olarak 1’de küçük bir değer de kullanılabilir. Malzemenin yüzey ısı yayıcılığı ε_m , kullanılan malzemeye göre ilgili EN standartlarından alınabileceği gibi, $\varepsilon_m = 0.8$ değeri de kullanılabilir. Yangının ısı yayıcılığı ise genellikle $\varepsilon_f = 1$ olarak kullanılmaktadır. Stephan Boltzman sabitinin değeri ise $\sigma^{sb} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ’dir Tamamı yangına maruz kalan elemanın ışıınım sıcaklığı θ_r , yangın etkisi altındaki elemanın etrafındaki gaz sıcaklığı θ_m ile ifade edilmektedir.

Taşınım ile meydana gelen konvektif net ısı akısı ise $\dot{h}_{net,c}$ (W/m²) olarak adlandırılır ve aşağıdaki denklem ile belirlenir.

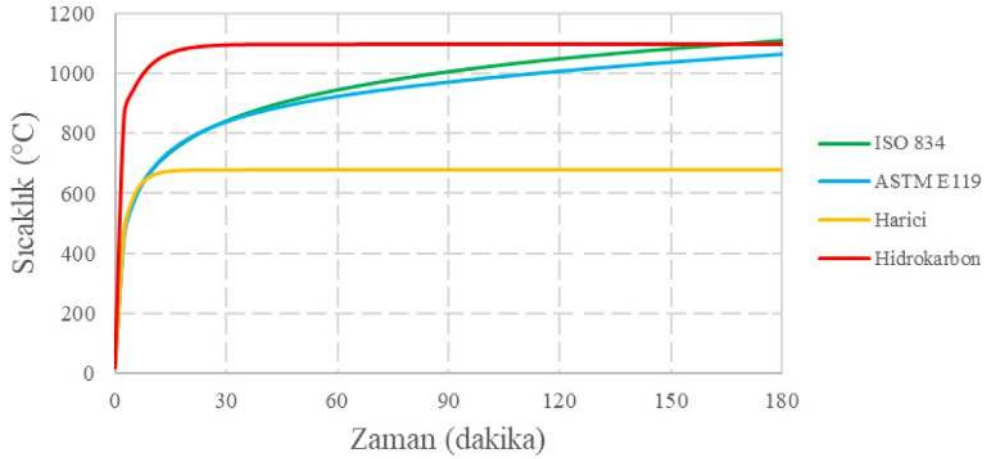
$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad (1.4)$$

Konvektif ısı transferi katsayısı α_c , harici ve standart yangın eğrileri için 25 W/m²K olarak dikkate alınırken hidrokarbon eğrisi için bu katsayı 50 W/m²K olarak dikkate alınır (EN 1991-1-2, 2002). Yangına etkisi altındaki yapısal eleman etrafındaki gaz sıcaklığı θ_g , kullanılacak yangın eğrisine ait denklem ile hesaplanır. Elemanın yüzey sıcaklığı θ_m , dikkate alınan tasarım yangınına bağlı olarak hesaplanan θ_g kullanılarak yapılan sıcaklık analizi ile belirlenir.

1.8.3.1. Temsili Sıcaklık-Zaman Eğrileri

Gaz sıcaklığının zamanın bir fonksiyonu olarak verildiği sıcaklık zaman eğrileri, yangını temsil eden analitik fonksiyonlardır. Bu eğrilerde, gaz sıcaklığının tüm bölmeye eşit yayıldığı varsayımı yapılmaktadır. Temsili sıcaklık zaman eğrilerinde gerçek bir yangının tam olarak temsil edildiği söylenemez. Bunun sebebi, bu eğrilerin tamamında yangının sönme aşaması ihmal edilmektedir. Fakat, gerçek yangınlardan elde edilen sıcaklık değerleri ile kullanılan sıcaklık zaman eğrilerindeki sıcaklık değerlerinin büyüklükleri benzerdir.

Bu çalışma kapsamında sadece ASTM E119 (2007) standart sıcaklık-zaman eğrisi ve EN 1991-1-2’de (2002) verilen üç adet temsili sıcaklık-zaman eğrisi dikkate alınmıştır (şekil1.21).



Şekil 1.21. Literatürde yer alan bazı temsili sıcaklık-zaman eğrileri (EN 1991-1-2, 2002).

Eurocode-1-2'de (2002) verilen üç adet temsili sıcaklık-zaman eğrisi aşağıda verilmektedir.

- ✓ Standart sıcaklık-zaman eğrileri: Yakıt kaynağı ahşap, karton, pamuk vb. malzemeler olan selülozik yangınları temsil eden standart sıcaklık -zaman eğrileri, bir yapıdaki tam gelişmiş bir yangını temsil etmek ve yangın testlerinde taşıyıcı ya da taşıyıcı olmayan yapı elemanlarının yangın performansını belirlemek için kullanılır. En çok tercih edilen sıcaklık -zaman eğrileri ISO 834 (1975) ve ASTM E119'dur.
- ✓ Harici yangın eğrisi: Bir yapıdaki pencere vb. boşluklardan çıkan alevlere ya da dışarda yanan bağımsız bir yangına maruz kalan taşıyıcı olmayan elemanların dış yüzeyleri için kullanılır.
- ✓ Hidrokarbon eğrisi: Yakıt kaynağı petrol malzemeleri olan, petrol kuyusu gibi yapılarıdaki yangınları temsil etmek için kullanılır.

Bu çalışma kapsamında sadece ASTM E119 (2007) standart sıcaklık-zaman eğrisi ve EN 1991-1-2'de (2002) verilen üç adet temsili sıcaklık-zaman eğrisi dikkate alınmıştır.

1.8.3.2. Doğal Yangın Modelleri

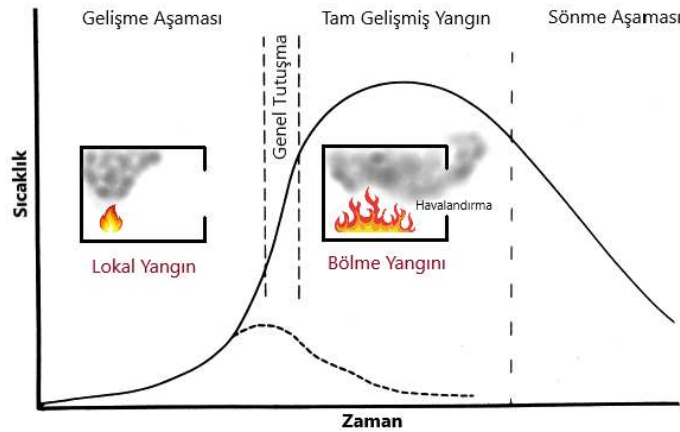
Doğal yangın modellerinde yangın, seçilen bir yapıya ait fiziksel parametrelere bağlı hesaplama yöntemleriyle temsil edilmektedir. Doğal yangın modellerinde, temsili sıcaklık zaman eğrilerinden farklı olarak yangının sönme aşaması da dikkate alınmaktadır. Bu sebeple, bu modellerin kullanılmasıyla daha gerçekçi bir yangın davranışı elde edilmektedir.

1.8.3.2.1. Basitleştirilmiş Yangın Modelleri

Basitleştirilmiş yangın modelleri, belirli bir alandaki; yakıt kaynağı ve miktarı, havalandırma boşlukları gibi fiziksel parametrelerin farklı kombinasyonları için sıcaklık-zaman ilişkisi üretmektedir. EN 1991-1-2’de (2002), bölme ve lokal yangın modeli olmak üzere iki adet basitleştirilmiş yangın modeli vardır ve bu modellere ait bazı bilgiler aşağıda verilmektedir.

- ✓ Bölme yangın modeli (Parametrik sıcaklık-zaman eğrileri): Sıcaklığın zamanla üniform olarak dağıldığı kabulü yapılan bir bölme yangınında, en az yangın yükü ve havalandırma durumu parametrelerini dikkate alınarak EN 1991-1-2’ye göre (2002) oluşturulan parametrik sıcaklık-zaman eğrileri kullanılır. Yangının sadece genel tutuşma sonrası aşaması dikkate alan parametrik sıcaklık-zaman eğrileri, bölmedeki gaz sıcaklığının elde edilmesinde hızlı ve kolay bir yaklaşım sağlamaktadır.
- ✓ Lokal yangın modeli: Genellikle yapılarda yangın lokal olarak başlar ve yangında genel tutuşma gerçekleşene kadar lokal yangının ısı etkileri dikkate alınır. Lokal yangın modelinde, bölme yangın modelinin aksine homojen olmayan bir sıcaklık dağılımı olduğu varsayılır. Lokal yangın durumunda sıcaklık hesaplama yöntemlerine ait ayrıntılı bilgi EN 1991-1-2’de (2002) yer almaktadır.

Bölme yangın modelinde, genel tutuşma sonrası yangının ısı etkileri dikkate alınırken; lokal yangın modelinde ise, genel tutuşma gerçekleşene kadarki yangının ısı etkileri dikkate alınır (Şekil 1.22).



Şekil 1.22. Bölme yangını ve lokal yangının kullanıldığı aşamalar

1.8.3.2.2. Gelişmiş Yangın Modelleri

Gelişmiş yangın modelleri, gaz özelliklerine, kütle ve enerji korunumu yasalarına bağlı tasarım yangınlarıdır. EN 1991-1-2'de (2002), bölge modelleri ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modelleri olmak üzere iki gelişmiş yangın modeli vardır ve bu modellere ait bazı bilgiler aşağıda verilmektedir.

- ✓ Bölge modelleri: Bir bölmedeki yangın sıcaklığını zamana bağlı olarak hesaplamada, kütle ve enerji dengesini temsil eden diferansiyel denklemler kullanılmaktadır. En çok kullanılan bölge modelleri, genel tutuşma sonrası bir durumun temsil edildiği tek bölgeli modeller ve genel tutuşma öncesi bir durumun temsil edildiği iki bölgeli modellerdir. Her iki bölge modelinde gaz sıcaklığının uniform olarak dağıldığı kabulü yapılmaktadır.
- ✓ HAD modelleri: Yangın bölmesinin kütle, enerji ve momentumun korunumu ilkelerinden türetilmiş Navier-Stokes denklemleriyle çözülmesi ve hücrelere bölünmesine dayanmaktadır. Analitik olarak çözülmesi çok zor olan Navier-Stokes denklemleri, gelişmiş bilgisayar programlarında sayısal ayrıklaştırma yöntemleri kullanılarak çözülebilmektedir.

1.8.4. Yapısal Analiz İçin Mekanik Etkiler

Yangın durumu için yapılan tasarımda, normal sıcaklık için yapılan tasarıma ek olarak; sıcaklıktan dolayı yapıda meydana gelen genleşmelerin ve deformasyonların neden olduğu kuvvet ve moment gibi dolaylı etkilerde dikkate alınmalıdır.

Yangın etkisi altında bir yapının mekanik davranışı,

- ✓ Mekanik eylemlerin doğrudan etkisine,
- ✓ Dolaylı mekanik etkilere (sıcaklık nedeniyle yapı elemanlarında meydana gelen ısı genleşmeler ve iç gerilmeler),
- ✓ Isıl etkiden kaynaklı malzeme özelliklerindeki değişime bağlıdır.

EN 1991-1-2'de (2002) yangın etkisi altındaki bir yapının mekanik davranışını etkileyen dolaylı etkilerin değerlendirilmesinde dikkat edilmesi gereken konular, EN 1990'da (2002) ise yukarıda verilen etkilerin nasıl birleştirileceği hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

1.8.5. Yapısal Dayanımı Değerlendirilmesi

Yangın durumunda tasarım için benimsenen yapısal sistem modeli, yangın durumunda yapının beklenen performansını yansıtmalıdır. Daha önce belirtildiği gibi, EN 1996-1-2 (2005) denklem (1.1)'i sağlamak için üç tasarım yönteminin kullanımına izin vermektedir. Yapıların yangın dayanımının değerlendirilmesinde kullanılan bu yöntemler Tablo 1.1'de gösterilmektedir.

Tablo 1.1. Yangın dayanımının değerlendirilmesinde kullanılan yöntemler (EN 1996-1-2, 2005)

	Tablolaştırılmış Verilerin Kullanımı	Basitleştirilmiş Hesaplama Yöntemler	Gelişmiş Hesaplama Yöntemleri
Yapı Elamanı	✓	✓	✓
Yapının Bir Bölümü	X	✓	✓
Yapının Tamamı	X	X	✓

1.8.5.1. Tablolaştırılmış Verilerin Kullanımı

Tablolaştırılmış veriler, yapılan deneysel çalışma sonuçlarının teorik olarak değerlendirildiği test verilerine dayanmaktadır. Bu yöntem; sadece standart sıcaklık-zaman eğrisinin kullanıldığı yangına maruz kalan elemanların analizinde kullanılabilir. Bir yığma duvarın yangına dayanıklılık süresi (30, 60, 90, 120, 240) için gerekli kalınlığı, ilgili duvarın malzeme özellikleri, yükleme durumu bağlı EN 1996-1-2 (2005) Ek B'de yer alan tablolarında verilmektedir.

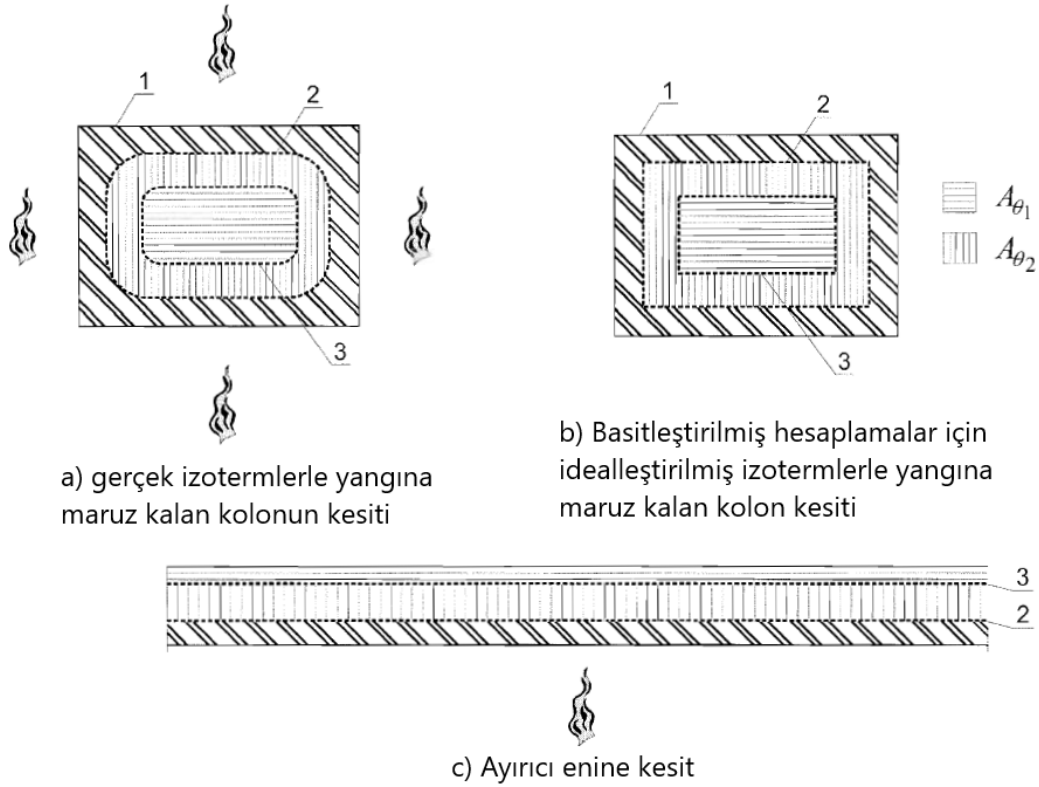
Uygulama alanı sınırlı olan bu yöntemde, tablolardaki veriler sadece eleman analizlerinde kullanılmaktadır. Tüm bunlara karşı çok fazla denetim gerektirmeyen bu yöntemde tablolaştırılmış veriler sayesinde kolay tasarım yapılmaktadır.

1.8.5.2. Basitleştirilmiş Hesaplama Yöntemleri

Basitleştirilmiş hesaplama yönteminde, yük taşıma kapasitesi, normal sıcaklıkta yük kullanılarak belirtilen yangına maruz kalma süreleri için duvarın kalan en kesitindeki sınır koşulları ile belirlenir. Basitleştirilmiş yöntem, EN 1996-1-2'de (2005) verilen yığma birim

ve harç kombinasyonları ile inşa edilmiş standart yangına maruz kalan duvar ve kolonlar için geçerlidir. Tablolaştırılmış verilerin kullanımı yöntemine göre fazla çalışma gerektiren bu yöntemde, hesaplamaların büyük bir kısmı elle yapılabilmektedir.

Bu hesaplama yönteminde öncelikle, kesitin etkin ve etkin olmayan bölümleri belirlenir (Şekil 1.23), daha sonra etkin olan bölüm ile nihai sınır durumdaki yük taşıma kapasitesi belirlenir. Yangın durumu için sınır durumda, bir duvar veya kolona uygulanan düşey yükün tasarım değeri, duvar veya kolonun düşey direncinin tasarım değerinden küçük veya eşit olmalıdır. Bu yöntemde, bir duvar kesiti boyunca sıcaklık dağılımı ve yangına maruz kalma süresinin bir fonksiyonu olarak duvarın etkisiz hale geldiği sıcaklık, yapılan testler sonucunda elde edilir. EN 1996-1-2 (2005) Ek C’de çeşitli varsayımlar yapılarak elde edilmiş sıcaklık profilleri verilmektedir.



Şekil 1.23. Yığma elemanlarda etkin ve etkin olmayan bölgeler (EN 1996-1-2, 2005)

1.8.5.3. Gelişmiş Hesaplama Yöntemleri

Gelişmiş hesaplama yöntemleri, yangın etkisi altındaki yapısal elemanların beklenen davranışının güvenilir bir şekilde tahmin edilmesini sağlayan temel fiziksel davranışı temel

alır. Gelişmiş hesaplama yöntemleri, aşağıdaki hesap modellerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

- ✓ Termal tepki modeli: Sıcaklığın yapısal elemanlar içindeki gelişiminin ve dağılımının belirlenmesinde kullanılan hesap modelidir. Isı transfer teorisinin kabul edilen ilkelerine ve varsayımlarına dayanan bu modelde, EN 1991-1-2'de (2004) belirtilen ilgili ısı etkileri ve sıcaklığa bağlı termal malzeme özellikleri dikkate alınmaktadır.
- ✓ Mekanik tepki modeli: Yapının tamamının veya bir bölümünün mekanik davranışının belirlenmesinde kullanılan hesap modelidir. Mekanik özelliklerin sıcaklıkla değişimlerini hesaba katan ve yapısal mekanik teorisinin kabul edilmiş ilkelerine ve varsayımlarına dayanan bu yöntemde hem sıcaklık artışından hem de sıcaklık farklılıklarından kaynaklanan termal gerilme ve şekil değiştirmelerin etkileri dikkate alınmaktadır.

Gelişmiş hesaplama yöntemleri, malzeme özelliklerinin ilgili sıcaklık aralığı ve ilgili ısıtma hızı için bilinmesi koşuluyla, herhangi bir ısıtma eğrisi ile birlikte kullanılabilir.

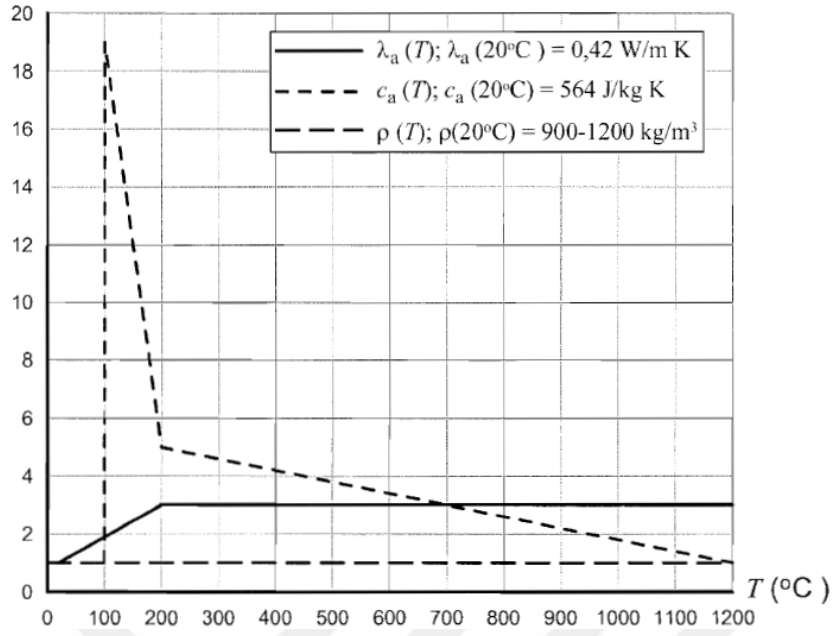
1.9. Yığma Duvar Özelliklerinin Yüksek Sıcaklıkla Değişimi

1.9.1. Özgül Ağırlığın Sıcaklıkla Değişimi

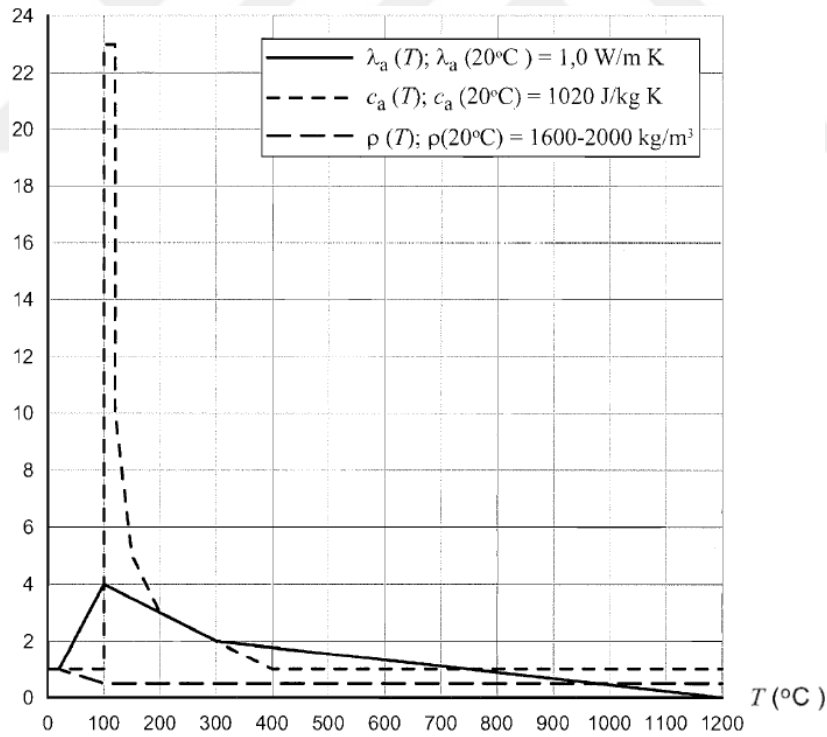
Yığma duvarların özgül ağırlığının sıcaklıkla değişimi, yığma duvar birimlerinde kullanılan malzeme türlerine ve yoğunluklarına bağlı olarak EN 1996-1-2 (2005) Ek D'de grafiklerle verilmektedir (Şekil 1.24). İlgili grafiklerde yatay eksen sıcaklığı, dikey eksen ise T sıcaklığındaki değerin 20°C'deki değere oranını göstermektedir.

1.9.2. Isıl İletkenlik Katsayısının Sıcaklıkla Değişimi

Isıl iletkenlik λ_c , birbirlerinden farklı malzemelerin ısıyı iletme yeteneğini ifade eder. Çeşitli yığma duvar birimlerinin ısı iletkenlik değerinin sıcaklığa bağlı değişimi, kullanılan malzeme türlerine ve yoğunluklarına bağlı olarak EN 1996-1-2 (2005) Ek D'de grafiklerle verilmektedir (Şekil 1.24).



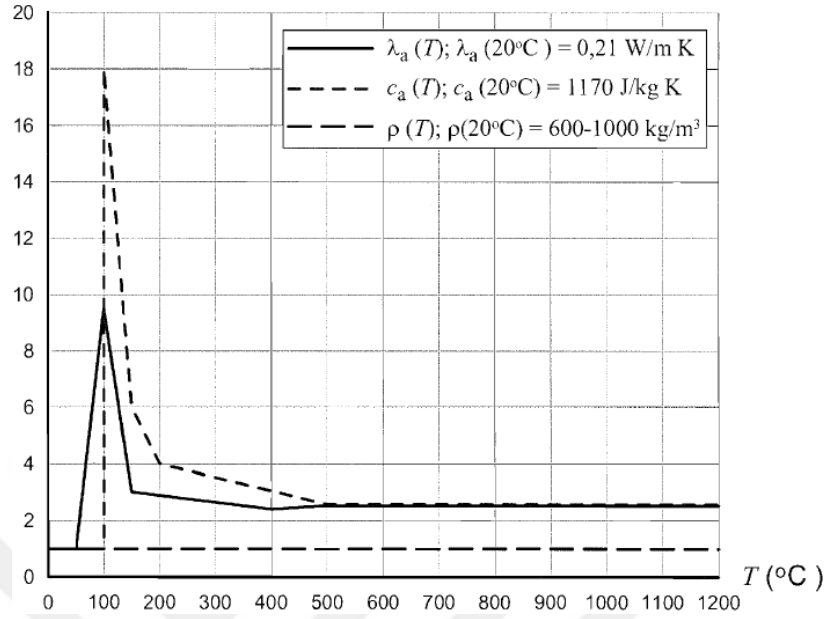
a) Yoğunluğu 900 - 1200 kg/m³ olan kil birimler



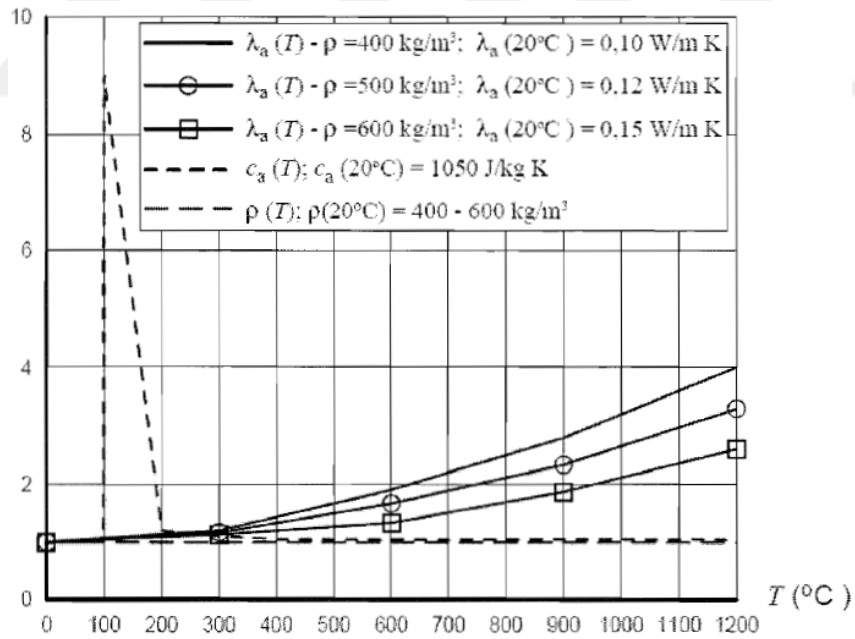
b) Yoğunluğu 1600 – 2000 kg/m³ olan kalsiyum silikat birimler

Şekil 1.24. Farklı duvar birimleri için sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerinin hesaplanması (EN 1996-1-2, 2005)

Şekil 1.24'ün devamı,



c) Yoğunluğu 600 – 1000 kg/m³ olan hafif agregalı beton birimler

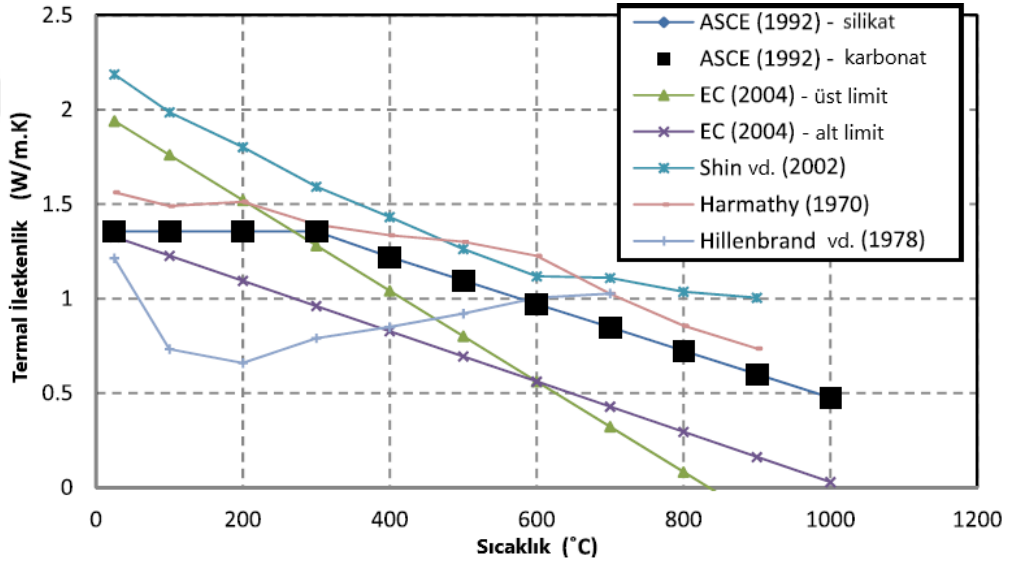


d) Yoğunluğu 400 - 600 kg/m³ olan gazbeton birimler

Duvar malzemelerinin termal özelliklerine ilişkin deneysel veriler sınırlı ve eksik olmasından dolayı, yapı malzemeleri arasındaki benzerlikler göz önünde bulundurulduğunda duvar ve betonun karşılaştırılabilir termal özelliklere sahip olduğu

yaygın olarak kabul edilmektedir (Al Nahhas vd. 2007; Kodur ve Harmathy, 2016; Daware ve Naser, 2021).

Genelde beton ve duvarın oda sıcaklığındaki ısı iletkenliği nispeten düşüktür ve sırasıyla 1,4 ile 3,6 W/m.K ve 0,9-1,1 W/m.K arasında değişir. Bu malzemelerin ısı iletkenliğinin, nem kaybı, artan geçirgenlik ve gözeneklilik gibi bir dizi faktörden dolayı sıcaklık artışı ile azaldığı genel olarak kabul edilmektedir Termal iletkenlik değerinin sıcaklıkla değişimi ile ilgili yapılmış çalışmalara ait veriler Şekil 1.25'te verilmektedir (Naser, 2019).



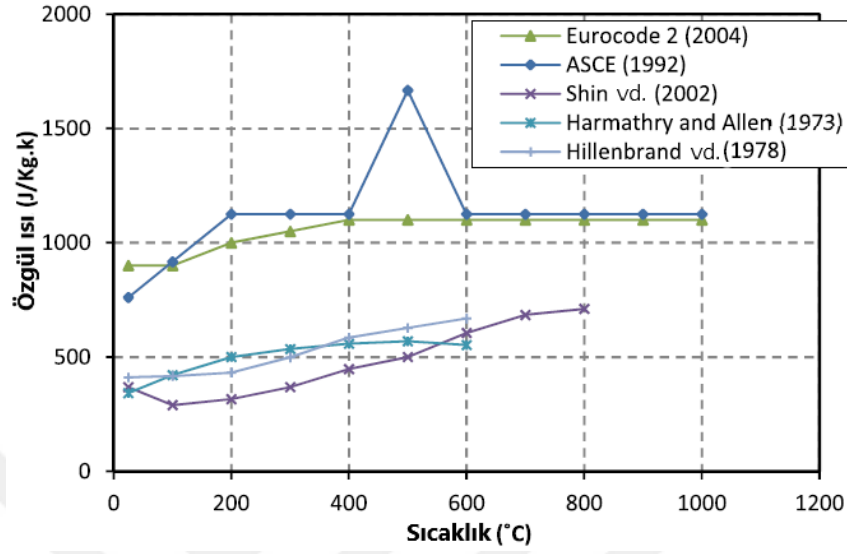
Şekil 1.25. Normal dayanımlı beton malzemenin sıcaklıkla değişen termal iletkenlik değeri (Naser, 2019).

1.9.3. Özgül Isı Katsayısının Sıcaklıkla Değişimi

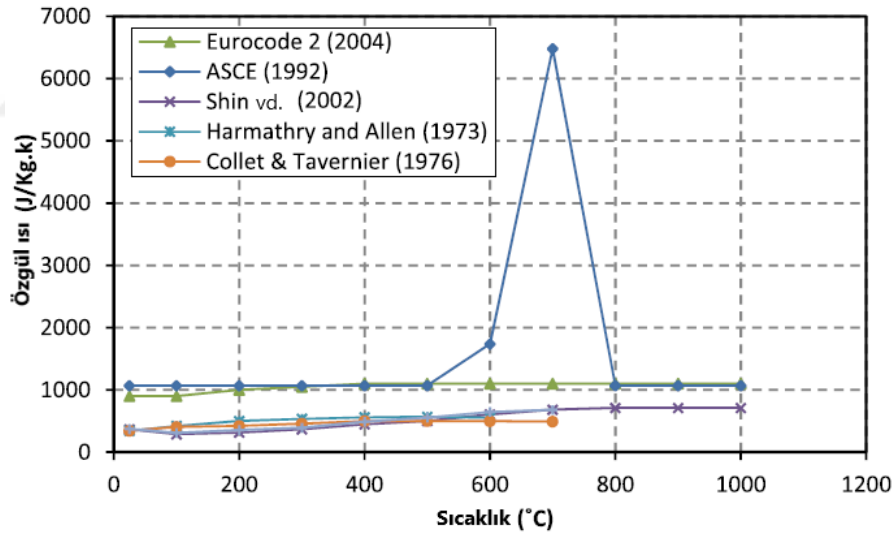
Özgül ısı C_c , birbirlerinden farklı malzemelerin sıcaklığını bir birim arttırmak için gerekli olan ısı miktarını ifade eder. Yığma yapılarda özgül ısı katsayısının sıcaklıkla değişiminde kullanılan malzeme türü ve nem içeriği etkili bir rol oynamaktadır. Çeşitli yığma duvar birimlerinin özgül ısı değerinin sıcaklığa bağlı değişimi, kullanılan malzeme türlerine ve yoğunluklarına bağlı olarak EN 1996-1-2 (2005) Ek D'de grafiklerle verilmektedir (Şekil 1.24).

Özgül ısı yangın koşulları altında meydana gelebilecek fiziko-kimyasal değişikliklerin oluşumuna karşı hassastır. Beton ve yığma duvar için ortam sıcaklığında özgül ısı, 840

J/kg.K ile 1800 J/kg.K gibi geniş bir aralıkta değişebilir. Özgül ısı değerinin sıcaklıkla değişimi ile ilgili yapılmış çalışmalara ait veriler Şekil 1.25'te verilmektedir (Naser, 2019).



a) Silikat esaslı beton



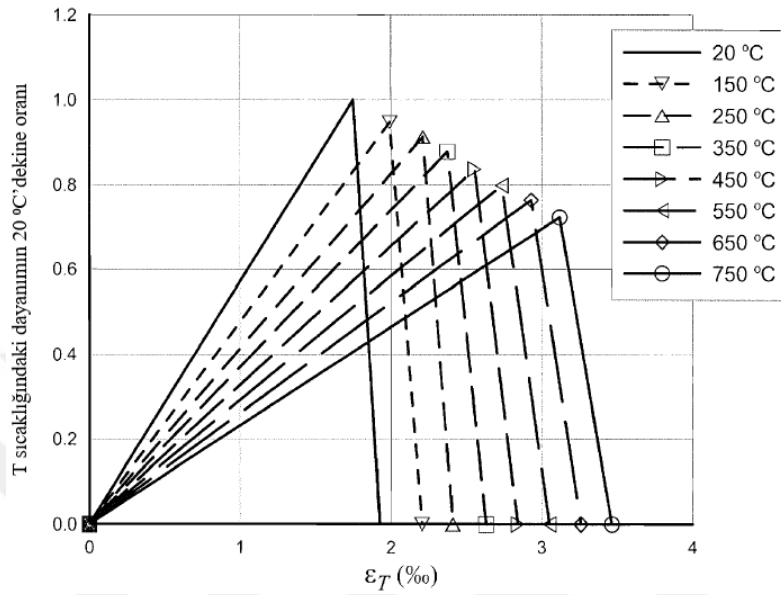
b) Karbonat esaslı beton

Şekil 1.26. Beton malzemesinin sıcaklıkla değişen özgül ısı değerleri (Naser, 2019.)

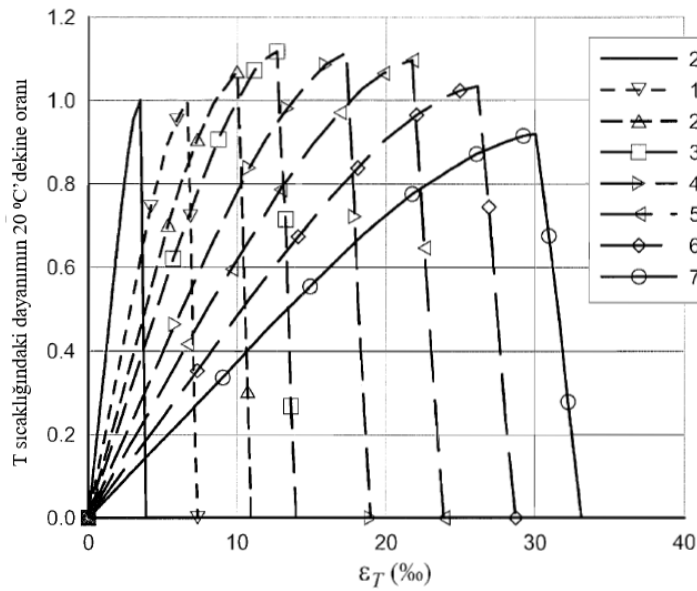
1.9.4. Gerilme-Şekildeğiştirme Diyagramının Sıcaklıkla Değişimi

Yangın etkisi altındaki bir yapının yapısal davranışı ve taşıma gücünün belirlenmesi için, ilgili malzemenin gerilme-şekildeğiştirme diyagramının sıcaklığa bağlı değişiminin

bilinmesi gerekmektedir. EN 1996-1-2 (2005) Ek D’de farklı sıcaklıklar için, farklı normleştirilmiş basınç dayanımına ve yoğunluğa sahip yığma birimleri için elde edilmiş gerilme-şekildeğiştirme değerlerinin hesaplandığı grafikler Şekil 1.27’de verilmektedir.



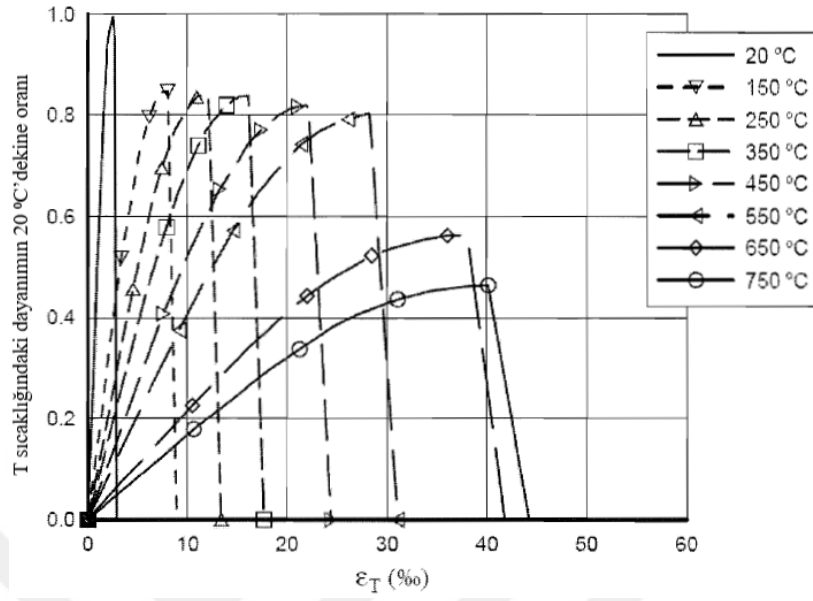
a) Normleştirilmiş basınç dayanımı 12-20 N/mm² ve yoğunluğu 900-1200 kg/m³ olan kil birimler



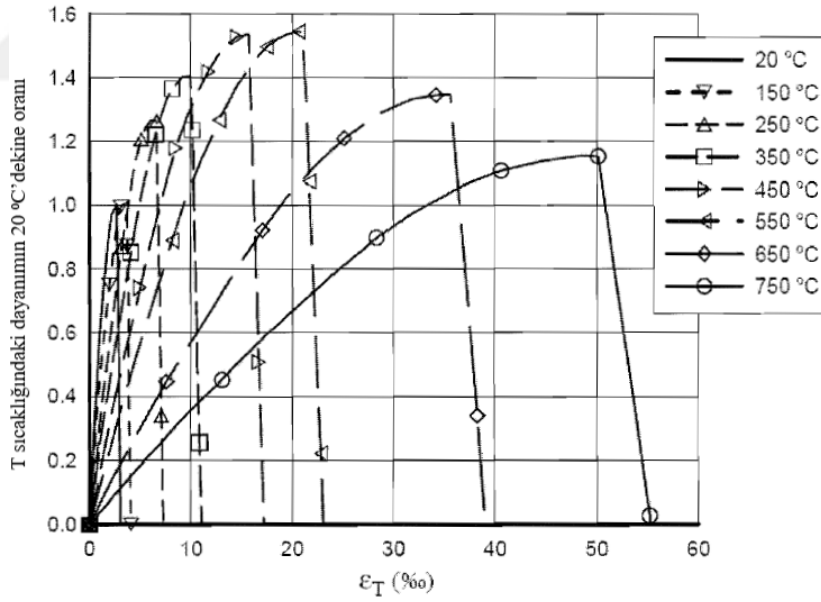
b) Normleştirilmiş basınç dayanımı 12-20 N/mm² ve yoğunluğu 1600-2000 kg/m³ olan kalsiyum silikat birimler

Şekil 1.27. Farklı yoğunluk ve basınç dayanımına sahip yığma birimlerinin sıcaklıkla değişen gerilme-şekildeğiştirme grafikleri

Şekil 1.27'nin devamı



c) Normalleştirilmiş basıç dayanımı 4-6 N/mm² ve yoğunluğu 600-1000 kg/m³ olan hafif agregalı beton birimler

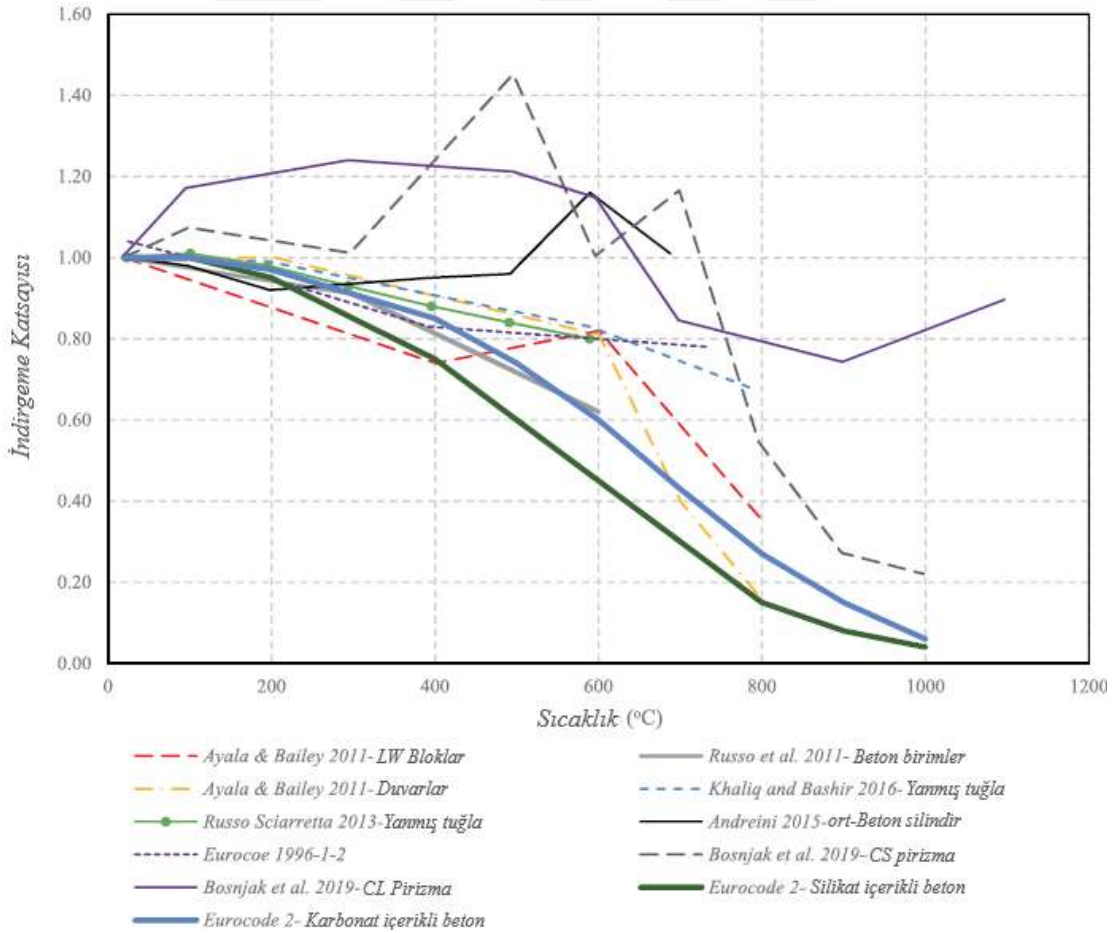


d) Normalleştirilmiş basıç dayanımı 4-6 N/mm² ve yoğunluğu 400-600 kg/m³ olan gazbeton birimler

1.9.5. Basınç Dayanımlarının Sıcaklıkla Değişimi

Yığma yapı elemanları genellikle basınca çalışan elemanlardır. Bu sebeple, yüksek sıcaklık etkisindeki yığma yapı elemanlarının basınç dayanımlarının bilinmesi, yapının yangın performansının doğru bir şekilde belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, sıcaklık etkisi altındaki yük taşıyan yığma duvarların basınç dayanımları, genellikle küçük boyutlu numunelerin küçük ölçekli deneylerle test edilmesiyle belirlenir ve daha sonra bir indirgeme faktörüne dönüştürülür. Bu indirgeme faktörleri, bir hedef sıcaklıktaki özelliğin, ortam sıcaklığındaki özelliğe oranını ifade etmektedir. Standart test prosedürlerinin olmaması nedeniyle, çeşitli araştırmacılar tarafından çeşitli test yöntemleri ve numune boyutları kullanılmıştır. Şekil 1.28’de basınç dayanımı azaltma faktörlerinde sıcaklığa bağlı azalmayı gösteren mevcut eğilimlerin bir derlemesini verilmektedir (Daware ve Naser, 2021).



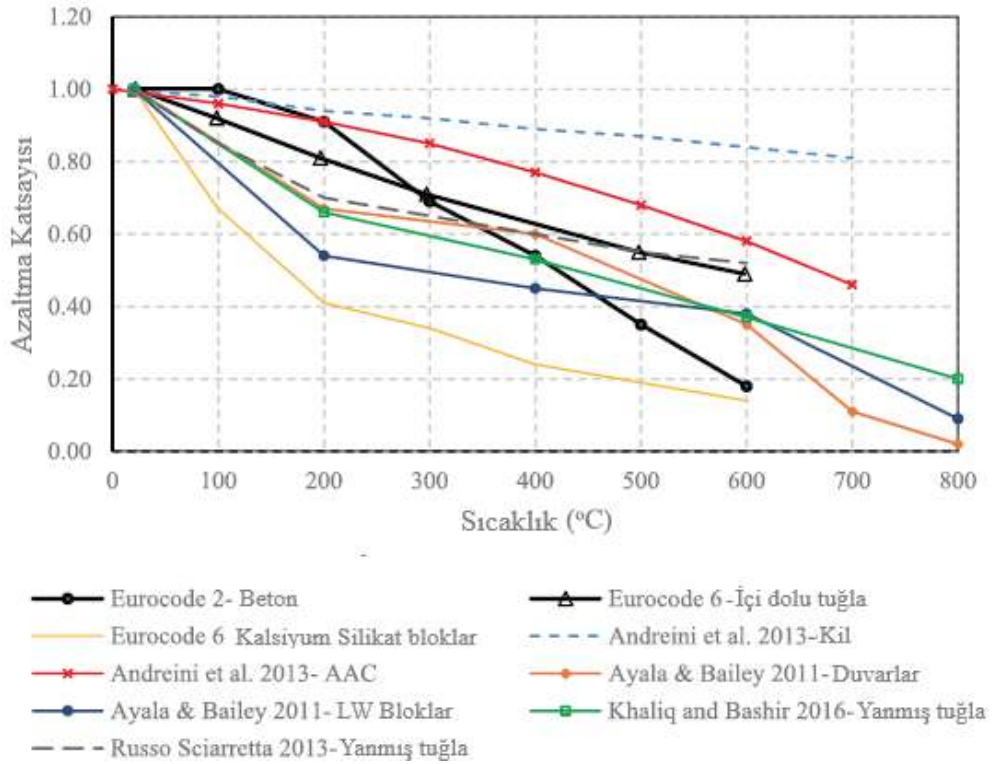
Şekil 1.28. Yüksek sıcaklıklarda duvarın basınç dayanımında azalma (Daware ve Naser, 2021).

Şekil 1.28 incelendiğinde yüksek sıcaklık etkisindeki yığma duvarlarda görülen üç genel özellik:

- ✓ Basınç dayanımı artan sıcaklıkla birlikte azalmaya devam eder.
- ✓ Bu azalma 600 °C'den sonraki sıcaklıklarda hızlı gerçekleşir.
- ✓ Bu azalma duvarlarda betona göre daha yavaştır.

1.9.6. Elastisite Modülünün Sıcaklıkla Değişimi

Elastisite modülü E, bir malzemenin deformasyona direnme kabiliyetini (rijitliğini) ifade eder. Elastisite modülündeki azalma, artan sıcaklıkların bir fonksiyonu olarak fizyokimyasal değişiklikler, mikro-çatlama, gerilme vb. gibi duvarda ortaya çıkan sıcaklığa bağlı hasarları yansıtır. Genel olarak, elastisite modülü, yüksek sıcaklıklardaki gerilme-şekildeğiştirme eğrilerinden elde edilir. Şekil 1.29'da sıcaklıktaki artışla birlikte genel bir düşüş eğilimi gösteren elastisite modülünün çeşitli araştırmacılar tarafından toplanan azalma katsayıları gösterilmektedir. Aynı şekil üzerinde, betonun elastisite modülünün azalması da göstermektedir (Daware ve Naser, 2021)



Şekil 1.29. Yüksek sıcaklıklarda duvarın elastisite modülünde azalma (Daware ve Naser, 2021).

1.10. Isıl Çözümleme

Yüksek sıcaklığa maruz kalan yapısal elemanların kesitlerinde oluşan sıcaklık dağılımları ısı transferi analizleriyle elde edilir. Elde edilen sıcaklık dağılımları yüksek sıcaklık etkisindeki yapıların davranışının belirlenmesinde önemli bir etkiye sahiptir.

1.10.1. Isı Transferi

Isı transferi, sıcaklık farkından kaynaklanan ve maddeler arasındaki sıcaklık dengesini sağlayan enerji akışı olarak tanımlanabilir. Ortamlar arasında sıcaklık farkının olması durumunda, ısı transferi her zaman yüksek sıcaklıktaki ortamdan düşük sıcaklıktaki ortama doğru gerçekleşmektedir. Ortamlar arasındaki sıcaklık farkı eşit olana kadar devam eden ısı transferi, ortamlar arasındaki sıcaklık farkının eşit olması durumunda sonlanır.

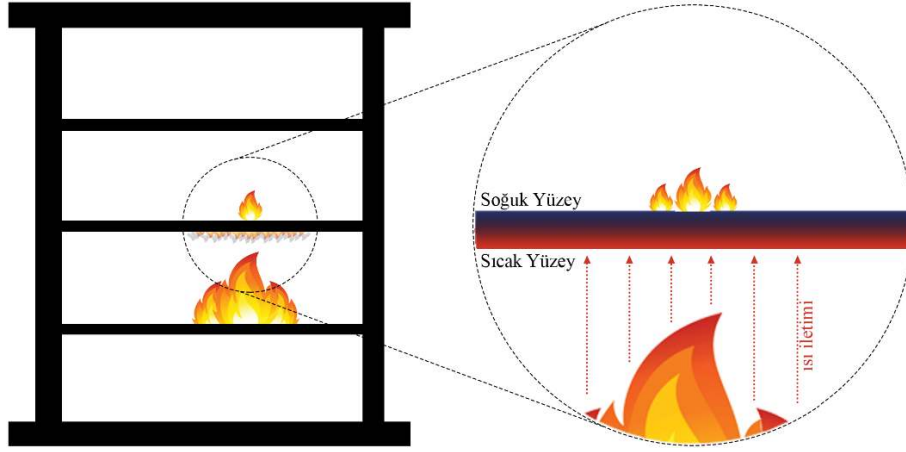
Isı, kondüksiyon (iletim), konveksiyon (taşınım) ve radyasyon (ışınım) olmak üzere üç farklı yolla aktarılır. Isı transferi, bu aktarım yollarının biri, ikisi veya hepsi ile gerçekleşebilir. Mühendislik yapılarının yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışlarının değerlendirilmesinde, bu üç ısı aktarım türünün iyi bilinmesi gerekmektedir.

Yangına maruz kalan bir taşıyıcı duvarın, ilk olarak taşınım ve ışınım yoluyla yüzeyi ısınır. Sıcaklığın artması ile ısı enerjisi sıcak duvar yüzeyinden, duvarın soğuk iç kesimlerine doğru iletim yoluyla aktarılır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen sıcaklık analizlerinde de yukarıda belirtilen ısı geçiş türlerinin tamamı hesaba katılmıştır.

1.10.1.1. İletim Yolu ile Isı Transferi

İletim, cismin bitişik kısımları arasındaki sıcaklık farkından dolayı madde üzerinden direk ısıl geçişi sağlayan işlem olarak tanımlanabilir. Sıcaklığın artması bir madde de bulunan moleküllerin şiddetli titreşimine neden olur. Titreşen bu moleküller çevredeki moleküllerle çarpışarak onları da titreştirir ve termal enerjinin nesnenin komşu kısmına taşınmasını sağlar (Surbhi 2018).

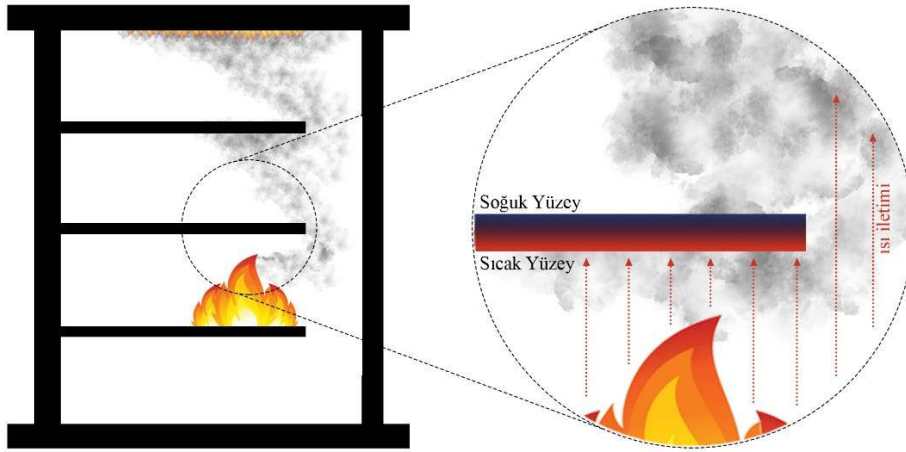
Yüksek sıcaklık etkisindeki yapı elemanlarının enkesiti boyunca ısı aktarımı iletim yoluyla gerçekleşmektedir. Şekil 1.30'da iletimle ısı transferinin yayılımı gösterilmiştir.



Şekil 1.30. İletim yoluyla ısı transferinin yayılımı (Karadağ, 2021).

1.10.1.2. Taşınım Yolu ile Isı Transferi

Taşınım, sadece sıvı ve gaz gibi akışkanlarda gerçekleşen maddenin kendi hareketiyle ısı geçiş biçimini ifade eder (Surbi 2018). Bu ısı geçişi, katı bir yüzey ile o yüzeye temas eden sıvı ya da gaz gibi akışkan bir ortam arasında olabilir. Mühendislik yapılarında yangın yayılımını etkileyen yöntemlerden biride, ısının taşınım yoluyla yapının diğer bölümlerine iletilmesidir (Şekil 1.31).

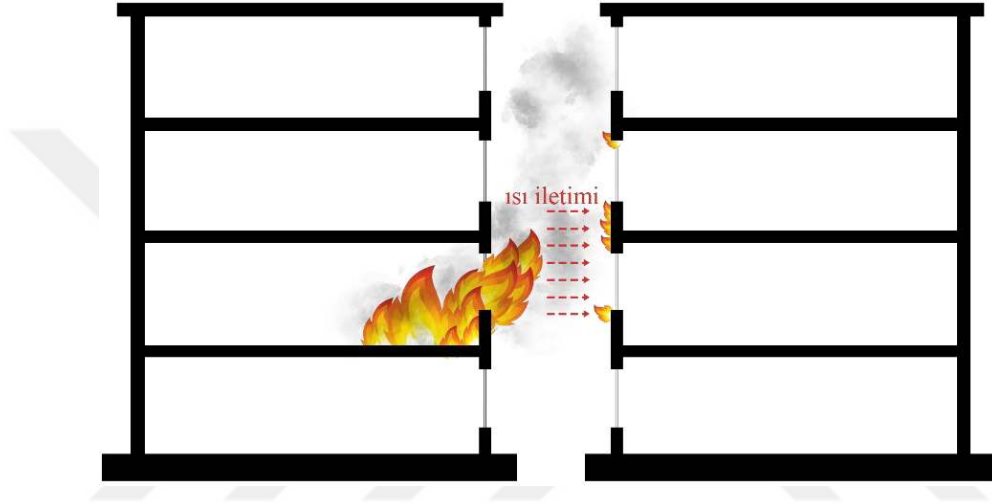


Şekil 1.31. Taşınım yoluyla ısı transferinin yayılımı (Karadağ, 2021).

Şekil 1.31’de de görüldüğü üzere yangın durumunda sıcak gazlar taşınım yolu ile yapı boşluklarından (merdiven, asansör, shaft boşluğu gibi) yapının üst kısımlarına ulaşır.

1.10.1.3. Işınım Yolu ile Isı Transferi

Ortam gerektirmeyen ısı transfer mekanizmasına radyasyon (ışınım) denir. Isının dalgalar halinde hareketini ifade eden ışınmada, ısı iletimi için moleküllere ihtiyaç duyulmaz. Ayrıca bu ısı transfer yönteminde, ısı geçişi için nesnelerin birbiriyle doğrudan temas halinde olması gerek yoktur. (Surbi 2018). Işınım yolu ile ısıнын arada hiçbir iletken olmadan çevre binalara yayılması Şekil 1.32’de verilmektedir.



Şekil 1.32. Işınım yoluyla ısı transferinin yayılımı (Karadağ, 2021).

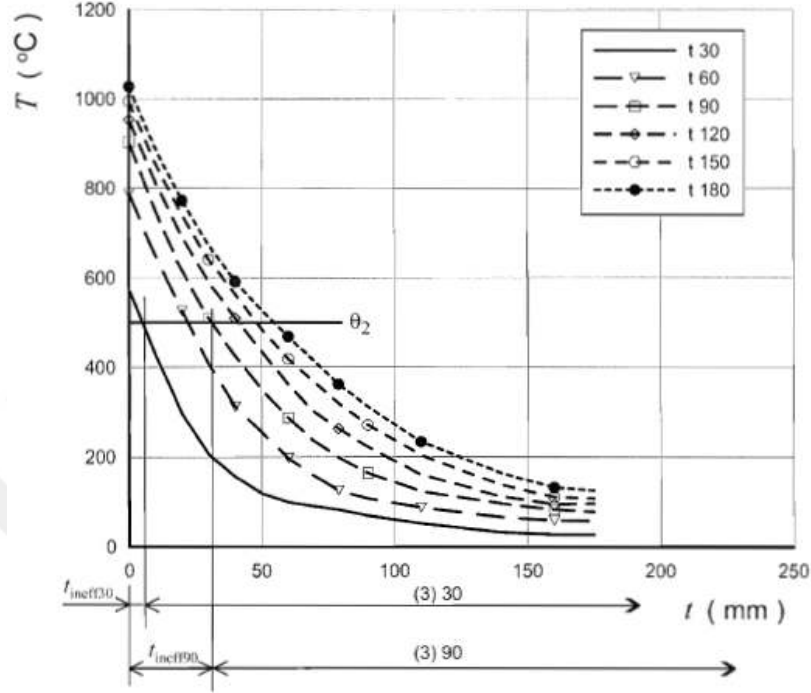
1.10.2. Isıl Çözümleme Yöntemleri

1.10.2.1. Tasarım Grafikleri Yöntemi

Tasarım grafikleri yöntemi, yüksek sıcaklık etkisindeki yapısal elemanların enine kesiti boyunca sıcaklık profillerinin belirlenmesinde kullanılan en basit yöntemdir. Bu yöntemde kullanılan grafikler çoğunlukla standart yangın etkisi altındaki yapı elemanlarının testlere tabi tutulması sonrası elde edilen deneysel verilerle oluşturulmuştur. Bu grafikler standartlarda ve tasarım kılavuzlarında yer almaktadır (Akbulut, 2018).

Farklı malzeme özelliklerine sahip (yoğunlukları sırasıyla 1000-2000, 1500-2000, 600-1000, 1500-2000 ve 400- 600 kg/m³ olan; kil, kalsiyum silikat, hafif agregalı beton, yoğun agregalı beton ve gazbeton duvarlar) duvarların, kesiti boyunca sıcaklık dağılımını ve yapısal olarak etkisiz olduğu sıcaklığı veren grafikler EN 1995-1-2 (2005) Ek C’de verilmektedir. Bu grafiklere örnek olması açısından aralarından, yoğunluğu 1500-2000

kg/m³ olan kalsiyum silikat duvara ait sıcaklık dağılımı ve etkisiz olduğu sıcaklığı veren grafik Şekil 1.33'te verilmektedir.



- $t_{ineff 30}$ - 30 dakikada etkisiz olan duvar kalınlığı
- $t_{ineff 90}$ - 90 dakikada etkisiz olan duvar kalınlığı
- θ_2 - Duvarın yapısal olarak etkisiz olduğu sıcaklık
- (3) - Dakika cinsinden kalan duvar kalınlığı

Şekil 1.33. Yoğunluğu 1500-2000 kg/m³ olan kalsiyum silikat duvarın, sıcaklık dağılımı ve etkisiz olduğu sıcaklık (EN 1995-1-2, 2005).

1.10.2.2. Analitik Yöntemler

Analitik analiz önemli bir teorik yöntemdir. Analitik yöntemlerle, makul varsayımlar ve denklem basitleştirmesi yoluyla akışkanlar mekaniğinin temel ilkelerine ve ısı transferine dayalı olarak çözümler türetilir. Bu yöntemler çoğunlukla yangın deneylerinden veya bilgisayar destekli ısı transferi analizlerinde elde edilen verilerden eğri uyurma tekniklerine bağlıdır.

1.10.2.3.Sayısal Yöntemler

Yangın etkisindeki yapısal elemanların içindeki sıcaklık dağılımları sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ya da sonlu farklar yöntemi (SFY) kullanılarak elde edilebilir. Bu tez kapsamında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sıcaklık analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sıcaklık analizleri için ABAQUS sonlu eleman programı kullanılmıştır.

Sıcaklık analizi, iki boyutlu (2B) ya da üç boyutlu (3B) herhangi bir model oluşturularak yapılabilmektedir. Kartezyen koordinat sisteminde ısı aktarımı probleminin çözülebilmesi için sonsuz küçük bir modelin diferansiyel denklemler yardımıyla kontrol hacmi $\partial x \cdot \partial y \cdot \partial z$ şeklinde belirlenmekte ve enerjinin korunumuna dayanan Fourier denklemi kullanılmaktadır. Isı transferi analizinde yapısal elemanın en kesiti içindeki sıcaklık dağılımı belirlenirken, en kesit boyunca ısı iletimini tanımlamak için kullanılan en genel kısmi diferansiyel denklem,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1.5)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu denklemde; Q sistemde üretilen ısı miktarını, λ ısı iletkenliği, c özgül ısıyı, t zamanı ve ρ birim hacim ağırlığı ifade etmektedir.

Denklem 1.5'te verilen kısmi diferansiyel denklemin çözümü oldukça zordur. Bu sebeple çözümün yaklaşık olarak tahmin edilmesi için sayısal bir yöntem kullanılmalıdır. Kısmi diferansiyel denklemi, sayısal yöntemlerden bir olan sonlu elemanlar yöntemini kullanan gelişmiş bilgisayar programları sayesinde çözümlenebilmektedir. Gelişmiş bilgisayar programları sayesinde birçok farklı parametre hesaba katılabiliyor ve bu parametreler kolaylıkla değiştirilebiliyor. Sonlu elemanlar yönteminde, sonlu elemanlara ayrılan modeldeki her bir eleman için diferansiyel denklem ayrı ayrı çözümlenir ve modelin davranışı belirlenir. Herhangi bir zamanda yapıdaki ısı akılarının dengesini, her bir sonlu elemanın katkıları hesaba katılarak tanımlayan matris formülasyonu,

$$[K]\{\theta\} + [C]\{\dot{\theta}\} = \{Q\} \quad (1.6)$$

olarak ifade edilmektedir. Bu formülasyonda; $\{Q\}$ dış ısı akış vektörünü, $\{\dot{\theta}\}$ sıcaklığın zamana bağlı birinci türev vektörünü, $[C]$ kapasite matrisini, $\{\theta\}$ sıcaklık vektörünü ve $[K]$ ısı iletkenlik matrisini ifade etmektedir.

Isıl iletim probleminin çözümü, yapısal elemanların sınırlarını oluşturan yüzeylerdeki termal şartlara bağlıdır. Bu problemin matematik terimleri kullanılarak tam bir şekilde ifade edilebilmesi için ısı transferinin gerçekleşeceği her boyut için iki tane sınır şartına ihtiyaç vardır. Eğer problem geçici rejim durumunda (zamana bağlı) ise yukardaki şartlara ek olarak başlangıç şartına da ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılan çalışmalarda en sık karşılaşılan sınır şartları; yüzeyde sabit ısı akısı, yüzeyde sabit sıcaklık, konveksiyon ve radyasyon sınır şartlarıdır.

Yangın etkisi altındaki yapısal elemanların içindeki sıcaklık dağılımlarının belirlenmesi için çözümlenecek ısı iletim probleminde zamana bağlı durum dikkate alınmaktadır. Diğer bir deyişle geçici rejim durumuna göre model hacmindeki sıcaklık zamana bağlı olarak artmakta veya azalmaktadır. Sıcaklık dağılımlarının belirlenmesinde kullanılan gelişmiş bilgisayar programları sayesinde, sıcaklıkla değişim gösteren malzeme özellikleri ve zamanla değişim gösteren sınır şartları dikkate alınabilmektedir.

1.11. Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi

Kullanım ömürleri boyunca farklı dinamik etkilere (deprem, rüzgâr, yangın, patlama, trafik yükü vb.) maruz kalabilen mühendislik yapıları, ciddi hasar alabilmekte hatta göçebilmektedir. Yapılarda dinamik etkiler sonucunda meydana gelen yapısal hasarlar, yapının dinamik davranışında veya rijitliğinde meydana gelen değişim incelenerek belirlenebilmektedir. Dinamik etkiler altındaki mühendislik yapılarının davranışı dinamik karakteristiklere (doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı) bağlı olarak elde edilmektedir. (Altunışık, 2010). Dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde deneysel, analitik ve sayısal yöntemler kullanılabilmektedir.

1.11.1. Analitik Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi

Yapı sisteminin dinamik davranışlarının hesaplanmasında kullanılan hareket denklemi,

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = R \quad (1.7)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. M , C ve K sistemin sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini; U , $\dot{U}$ ve $\ddot{U}$ ise rölatif yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini temsil etmektedir. R ise sisteme etkiyen dış yük vektörüdür.

Herhangi bir yapı sistemine ait doğal frekanslar ve mod şekli gibi dinamik karakteristikler, o sisteme ait sönümsüz serbest titreşim hareket denkleminin çözümü ile belirlenmektedir. Bu durumda denklem (1.7)'de sönüm ve dış kuvvetin olmadığı kabul edilirse, sistemin zamana bağlı sönümsüz modal (serbest titreşim) hareket denklemi,

$$M\ddot{U} + KU = 0 \quad (1.8)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Chopra, 2006).

Harmonik bir hareket olan serbest titreşim hareketinde yer değiştirmeler denklem (1.9) kullanılarak belirlenir.

$$U = X \cos(\omega_n t) + Y \sin(\omega_n t) \quad (1.9)$$

Bu denklemde X ve Y başlangıç koşullarından belirlenir. Bununla birlikte, α ϕ faz açısı, ω_n doğal açısal frekans ve ϕ hareketin genlik vektörü olmak üzere, sönümsüz bir sistemin serbest titreşimi için çözüm,

$$U = \phi \cos(\omega_n t - \alpha) \quad (1.10)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (1.10)'dan,

$$\ddot{U} = -\omega_n^2 \phi \cos(\omega_n t - \alpha) \quad (1.11)$$

elde edilir. (1.10) ve (1.11) denklemleri (1.8) denkleminde yerine yazılır ve düzenlenirse,

$$(K - \omega_n^2 M)\phi = 0 \quad (1.12)$$

bir özdeğer denklemi elde edilir. Elde edilen bu denklem kullanılarak titreşim elde edilebilmesi için ϕ 'nin sıfırdan farklı olması gerekmektedir. Sıfırdan farklı bir matris ile bir vektörün çarpımlarının sıfır olmasının tek yolu, matrisin tersinin bulunamaması yani bunun tekil bir matris olmasıdır. Bir matrisin tekil olabilmesinin tek yolu ise determinantının sıfır olmasıdır. Bu durumda;

$$|K - \omega_n^2 M| = 0 \quad (1.13)$$

olmalıdır. Burada $\omega_n^2 = \lambda$ olarak ifade edilirse (1.13) denklemi,

$$|K - \lambda M| = 0 \quad (1.14)$$

denklemine dönüşür ve bu denklemde “Frekans Denklemi” ya da “Özdeğer Denklemi” olarak isimlendirilir. Bu denklemdeki determinant hesaplanırsa λ 'ya bağlı n. dereceden,

$$A_n \lambda^n + A_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + A_1 \lambda^1 + A_0 = 0 \quad (1.15)$$

polinomu elde edilir. (1.15) denkleminde n sistemin serbestlik derecesini ifade etmektedir.

Bu polinomun çözümünden ω_n^2 'ye tekabül eden n tane λ ,

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \omega_1^2 \\ \lambda_2 &= \omega_2^2 \\ &\vdots \\ \lambda_n &= \omega_n^2 \end{aligned}$$

elde edilir. Elde edilen bu değerlere “Özdeğer”, “Normal Değer” veya “Karakteristik Değer” denir. Buradan yola çıkılarak n serbestlik dereceli bir sistemin n tane doğal titreşim frekansına ($\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$) karşılık gelen n tane bağımsız ϕ vektörünün olduğu görülebilir. “Doğal Titreşim Modları” veya “Doğal Titreşim Mod Şekilleri” olarak

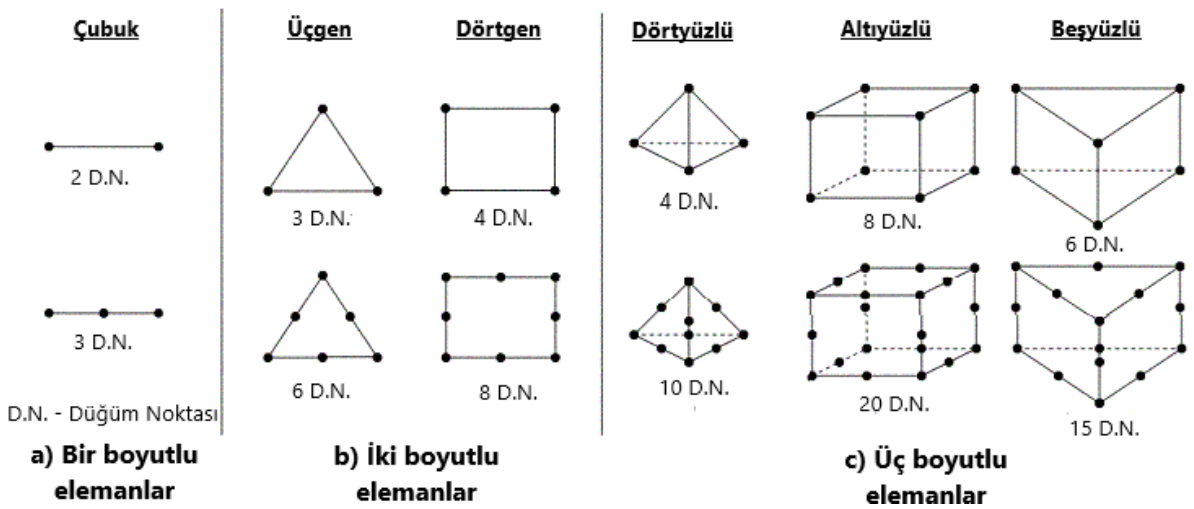
adlandırılan bu vektörler, ayrıca “Öz Vektörler”, “Karakteristik Vektörler” veya “Normal Modlar” olarak da ifade edilebilmektedir.

(1.15) denkleminin kökleri gerçek pozitifdir. Çözümlemesi yapılan sistemin en küçük doğal frekansı “Temel Frekans” olarak isimlendirilirken bu frekansa karşılık gelen mod şekli “Temel Mod Şekli” olarak isimlendirilir.

1.11.2. Sayısal Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi

Analitik yöntemler kullanılarak mühendislik yapılarının dinamik etkiler altındaki davranışını elde etmek oldukça zordur. Bu sebeple yapıların davranışı kabul edilebilir seviyede yaklaşık çözüm veren sayısal yöntemler kullanılarak belirlenebilir. Yapısal davranışın belirlenmesinde kullanılacak olan bu sayısal yöntemlerin başında, sonlu elemanlar yöntemi gelmektedir.

Farklı geometrilere sahip mühendislik yapılarının çözümünde kullanılan sonlu eleman yönteminde, yapı çok küçük parçalara bölünür ve her bir parça kendi içerisinde çözülerek yapının kabul edilebilir genel davranışı yaklaşık olarak elde edilmektedir. Yani sonlu elemanlar yöntemi sayesinde karmaşık problemler basite indirgeyerek çözülebilmektedir. Karmaşık geometriye, farklı ve karmaşık malzeme özelliklerine ve farklı mesnetlenme durumuna sahip yapılarda kolaylıkla kullanılabilen bu yöntemde, yapı küçük ve birbirine bağlı elemanlara bölünür. Sonlu eleman adı verilen ve birbirlerine düğüm noktaları ile bağlanan bu elemanlar bir, iki ve üç boyutlu olabilirler (Şekil 1.34).



Şekil 1.34. Çeşitli boyutlardaki (bir, iki ve üç) sonlu eleman örnekleri

Gelişen bilgisayar teknolojisiyle beraber günümüzde özel ve genel mühendislik problemlerinin çözümüne olanak sağlayan ABAQUS, ANSYS, SAP2000 gibi literatürde kullanımı kabul görmüş sonlu eleman paket programları kullanılmaktadır. Bu programlar sayesinde mühendislik yapılarının davranışları (statik, dinamik, modal, doğrusal ve doğrusal olmayan) kolaylıkla sayısal olarak elde edilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında yığma kemer elemanların modal davranışları ABAQUS sonlu eleman paket programı kullanılarak elde edilmiştir.

1.11.3. Deneysel Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi

Mühendislik yapılarının dinamik davranışları ayrıca deneysel çalışmalar ile hesaplanan doğal frekans ve mod şekilleri gibi dinamik karakteristikler ile elde edilebilmektedir. Bu dinamik özelliklerin deneysel olarak elde edilmesinde kullanılan yöntemle “Deneysel Modal Analiz” (DMA) yöntemi adı verilmektedir. Yapıdaki titreşimleri dikkate alan bu yöntem, titreşim kaynağının tipine bağlı olarak Çevresel Titreşim Yöntemi (ÇTY) ve Zorlanmış Titreşim Yöntemi (ZTY) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

1.11.3.1.DMA Yönteminde Kullanılan Ölçüm Sistemi

1.11.3.1.1. Titreştiriciler

Yapılardaki titreşimlerden yararlanılan Deneysel Modal Analiz yönteminde, yapı doğal ya da çevresel etki (rüzgâr, deprem, trafik vb.) ile titreşmekte ya da özel sarsıcılar ve darbe çekiçleri ile yapay olarak titreştirilmektedir. Genellikle yapıların titreştirilmesinde, yapay titreştiricilerin kullanılmadığı büyük ve rijit yapılarda çevresel etkilerden; laboratuvar modellerinde veya orta ölçekli mühendislik yapılarında ise yapay titreştiricilerden faydalanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, gerçekleştirilecek deneysel ölçümlerde B&K (Brüel&Kjaer) 8210 tipi darbe çekici kullanılmıştır. Kullanılan bu darbe çekicine ait görsel ve bazı özellikler (URL-1, 2022) Şekil 1.35’te verilmiştir.

Model	B&K 8210
Hassasiyet	0.225 mV/N
Maksimum Kuvvet	22240 N
Çalışma Sıcaklığı	-73 ile 121 °C arasında
Toplam Uzunluk	0.9 m
Toplam Kütle	5.448 kg

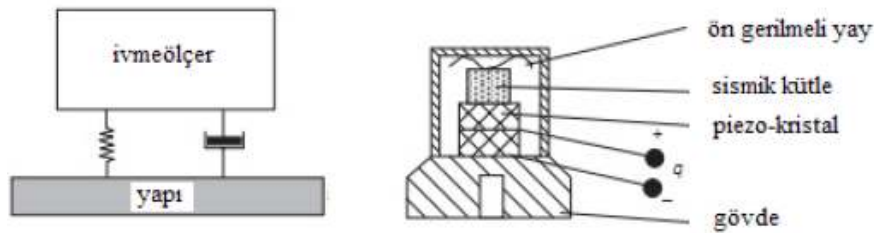


Şekil 1.35. B&K 8210 tipi darbe çekici

1.11.3.1.2. İvmeölçerler

İvmeölçerler DMA yönteminin kullanıldığı deneysel çalışmalarda, yapılardaki titreşimleri ölçmede kullanılmaktadır. Çeşitli özelliklere sahip ivmeölçerler mevcut olup, yapısal titreşimlerin ölçümünde genellikle piezoelektrik ivmeölçerler kullanılmaktadır. Yay, kütle ve sönümleyici sisteminden oluşan piezoelektrik ivmeölçerlerin (Ramos, 2007), aktif kısmı ise seramik ya da kuartz kristallerinden oluşmaktadır (Şekil 1.36). Seramik veya kuartz kristaller herhangi bir kuvvete maruz kalmaları durumunda elektrik yükü üretmektedirler ve ürettikleri bu yük picocoulomb ($2.778E-16$ Amper saat) seviyesindedir. Yer çekimi ivmesinin değişimi ile elektrik yükünün kristal üzerindeki değişimi doğru orantılıdır. İvmeölçerlerde ivme etkisine maruz kalan sismik kütlede bir atalet kuvveti oluşmakta ve bu kuvvet piezoelektrik kristale etki etmektedir. Daha sonra bu ivmeölçerlerde etki eden ivme ile doğru orantılı bir elektrik sinyali meydana gelmektedir. İçerisinde sinyali taşınabilir voltaj sinyaline çeviren bir sinyal koşullayıcı devre bulunan bu ivmeölçerlerde oluşan sinyaller veri toplama birimine aktarılmaktadır (Altunışık, 2010; Sevim, 2010).

Deneysel ölçümlerde kullanılan ivmeölçerlerin türleri, ivme ölçerlerin hassasiyetine, çalışma sıcaklığına, ölçebileceği frekans aralığına ve maksimum ivme değerine göre farklılık göstermektedir. Bu nedenle kullanılacak ivmeölçer tipi seçimi, titreşim verilerini doğru bir şekilde elde edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 1.36. Piezoelektrik ivmeölçerin iç yapısı (URL-2, 2016).

Bu çalışma kapsamında, tek eksenli B&K 4507 B 005 tipi ivmeölçer ve üç eksenli B&K 4506 B 003 tipi ivmeölçer kullanılmıştır. Kullanılan ivmeölçerlere ait görsel ve bazı özellikler Şekil 1.37’de verilmiştir.

		
Model	B&K 4506 B 003	B&K 4507 B 005
Hassasiyet	0.5 V/g	1 V/g
Frekans Aralığı	0.3-2000 Hz	0.4-6000 Hz
Maksimum İvme	± 14 g	± 7 g
Çalışma Sıcaklığı	-54 ile +100 °C arası	-54 ile +100 °C arası
Boyutlar	17 x 17 x 17 mm	10 x 10 x 10 mm
Toplam Kütle	18 gram	4.6 gram

Şekil 1.37. B&K 4506 ve B&K4507 tipi ivme ölçerlere ait görsel ve bazı özellikler

1.11.3.1.3. Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme

Veri toplama sistemi, ivme ölçerlerden gelene sinyalleri toplayarak ilgili bilgisayar programına aktaran veri toplama ünitesinden ve sinyallerin işlenmesinde gerekli arayüzü sağlayan bilgisayar programından oluşmaktadır.

İvmeölçerler yapı titreşimi ve ortamdaki gürültülerden oluşan ham sinyalleri veri toplama ünitesine aktarırlar. Aktarılan bu ham sinyallerin kullanılmasıyla yapının dinamik karakteristiklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi zorlaşmaktadır. Bu sebeple ham sinyaller, veri toplama sisteminde sinyal koşullamayla istenen özelliklere getirilmektedir. Sinyal koşullama işlemi çoğunlukla,

- ✓ Seviyesi düşük bir sinyalin kalitesini artırmak,
- ✓ Sinyallerdeki gürültü etkisini azaltmak,
- ✓ İstenmeyen sinyalleri filtrelemek,

✓ Gerekli durumlarda ivmeölçerlerdeki elektrik gücünü ayarlamak için veri toplama ünitesi içerisinde yer alan sinyal koşullandırıcılar sayesinde gerçekleştirilmektedir. Bu işlemlerden en önemli olanı belirlenen frekans ölçüm aralığı dışında kalan yüksek frekanslı istenmeyen sinyallerin filtrelenmesidir. Bu sebeple deneysel ölçümler esnasında istenen

frekans aralığının belirlenmesi önemli bir yer teşkil etmektedir. Ramos'un (2007) ve Heylen vd.'nin (2007) çalışmaları incelenerek bu konu hakkında daha ayrıntılı bilgiye ulaşılabilir.

Bu tez kapsamında yapılan deneysel ölçümlerde kullanılan B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi Şekil 1.38'de verilmektedir. Kullanılan bu veri toplama ünitesi, mevcut ivmeölçerler kullanılarak aynı ölçüm içerisinde daha fazla noktadan ölçüm yapmaya (referanslı ölçüm) izin vermektedir.



Şekil 1.38. Deneysel ölçümlerde kullanılan B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi

İvme ölçerlerden alınan sinyaller veri toplama ünitesinde koşullama yapıldıktan sonra bilgisayar ortamına aktarılır. Yapıların dinamik karakteristiklerinin elde edilebilmesi için aktarılan bu sinyallerin işlenmesi gerekmektedir (sinyal işleme). Sinyal işleme, bilgisayar ortamında geliştirilen özel yazılımlardan faydalanılarak gerçekleştirilmektedir. Sinyaller zaman tanım alanında aktarılır. Ancak hesaplama gereksinimleri ve pratik sebeplerden dolayı frekans tanım alanı tercih edilmektedir. Sinyallerin zaman ortamından frekans ortamına aktarılmasında Fourier serilerinden faydalanılmaktadır (Sevim, 2010; Altunışık, 2010; Günaydın, 2016). Ramos, (2007), $x(t)$ ile temsil edilen periyodik bir sinyali sonsuz Fourier serisine açıldığında (1.16) denklemini elde etmiştir.

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \right] \quad (1.16)$$

Burada a_0 , a_n ve b_n sırasıyla,

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \end{aligned} \right\} \quad (1.17)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Sonsuz Fourier serisine açılan sinyal, t_k ($k = 1, 2, 3, \dots, N$) gibi sonlu bir zamana karşılık gelmektedir. Bu sebeple sonlu sinyal Fourier serisine açıldığında,

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) \right], k = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1.18)$$

olarak ifade edilmektedir. Bu denklemde a_0 , a_n ve b_n ifadeleri sırasıyla aşağıdaki gibidir:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x_k \\ a_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \cos\left(\frac{2\pi nk}{T}\right) \\ b_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \sin\left(\frac{2\pi nk}{T}\right) \end{aligned} \right\} \quad (1.19)$$

Sinyale işleme aşamasında bazı sorunlarla karşılaşilmektedir. Bunlardan en önemli olanı, sinyallerin periyodik olmamasından kaynaklanan sızıntı hatasıdır. Bu hata ölçüm süresi uzatılarak azaltılabilmekte ya da pencereleme yöntemiyle sinyal periyodu tam katlı hale getirilerek ortadan kaldırılabilir (Heylen vd., 2007; Ramos, 2007; Şahin, 2009; Altunışık, 2010; Sevim, 2010; Günaydın, 2016).

Bu tez çalışması kapsamında,

- ✓ İvmeölçerlerin veri toplama ünitesine tanıtılmasında,
- ✓ İvmeölçerlerden alınan sinyallerin veri toplama ünitesinde depolanmasında,
- ✓ Depolanan sinyallerin sinyal işleme programına aktarılmasında B&K (Brüel&Kjaer) Firması tarafından geliştirilen PULSE (2006) yazılımı kullanılmıştır.

Deneysel ölçümlerde PULSE (2006) yazılımıyla toplanan sinyaller, Operational Modal Analysis (OMA, 2006) yazılımı kullanılarak işlenmiş ve yapının dinamik karakteristikleri belirlenmiştir.

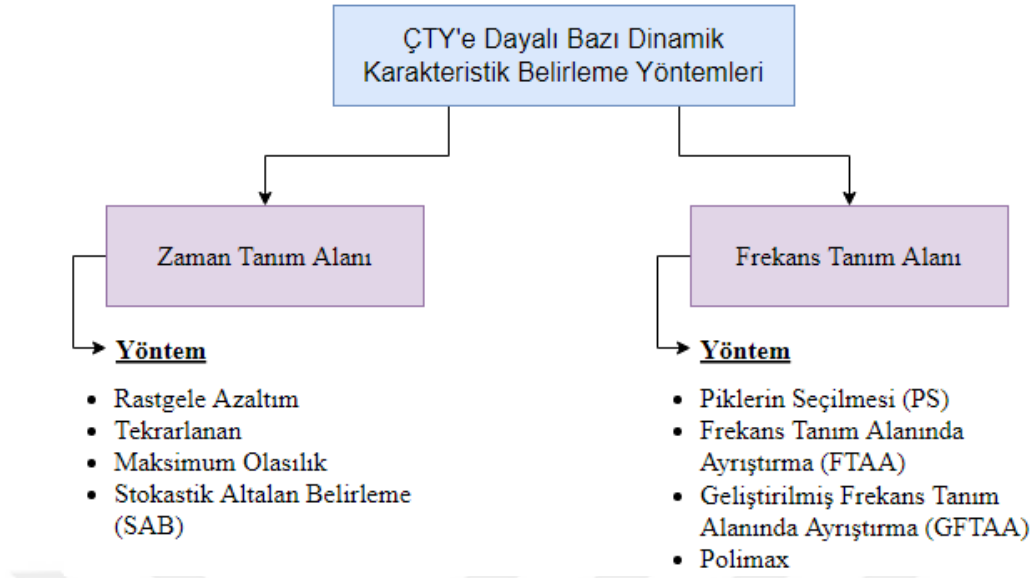
1.11.4. Deneysel Modal Analiz Yöntemine Ait Formülasyonlar

1.11.4.1. Çevresel Titreşim Yöntemi

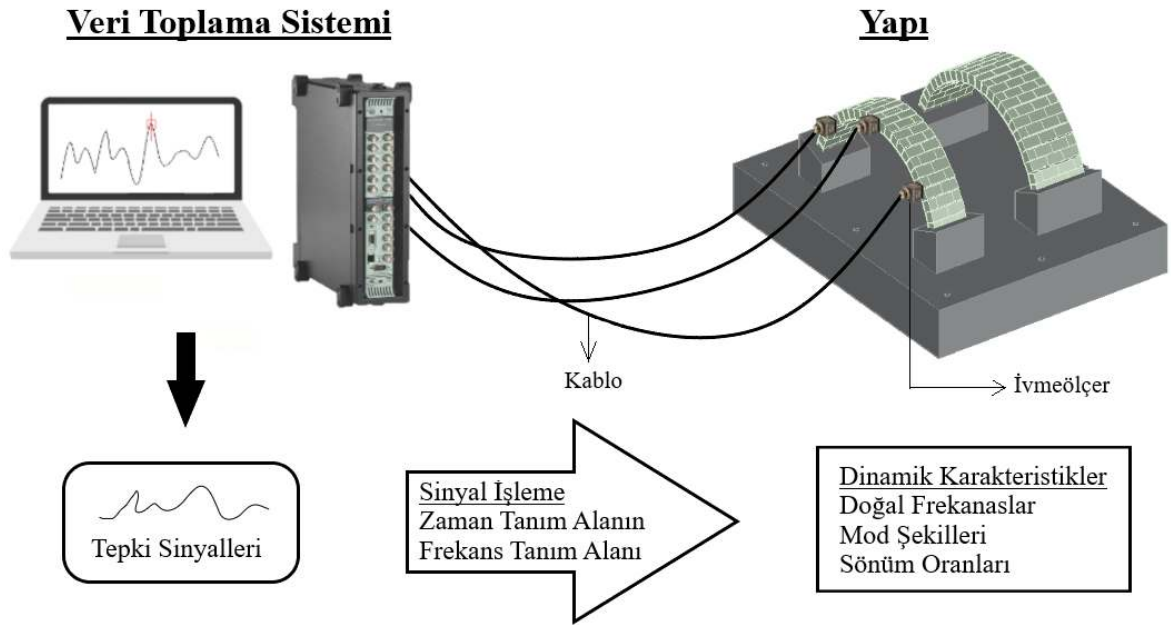
Çevresel Titreşim Yöntemi (ÇTY), yapıların çevresel etki kuvvetiyle titreştiğini dikkate alarak yapıların mod şekli, doğal frekansı ve sönüm oranı gibi dinamik özelliklerinin elde edilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde etki kuvveti ölçülemediğinden dolayı “Etki Davranış Fonksiyonu” (EDF) belirlenememektedir. Bu sebeple ÇTY literatürde “Operasyonel Modal Analiz” veya “Sadece Tepki Modal Analizi” gibi isimlerle de adlandırılmaktadır (Zhang vd., 2002; Brincker vd., 2003; Günaydın, 2016). Çevresel Titreşim Yönteminde yapıya etkiyen titreşimlerin zamanla değişimi ve genliği bilinmediği için yapının dinamik karakteristiklerinin elde edilmesinde frekans ve zaman tanım alanında algoritmalar kullanılmaktadır. Zaman veya frekans alanında gerçekleştirilecek işlemlerin birbirine göre üstünlüğü bulunmayıp literatürde zaman veya frekans alanına dayalı çok sayıda yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden birkaçı Şekil 1.39’da verilmektedir. Çevresel Titreşim Yöntemi kullanılarak yapıların dinamik karakteristiklerinin nasıl elde edildiğini özetleyen akış şeması Şekil 1.40’te verilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, kemer modellerinin deneysel dinamik karakteristiklerinin elde edilmesinde OMA (2006) yazılımında yer alan ve literatürde sıklıkla tercih edilen yöntemlerden biri olan, Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemi kullanılmıştır.

Dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde kullanılan Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (FTAA) yönteminin genişletilmiş hali Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemidir. Bu yöntemde, sinyal işleme sonrasında elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonundan tekil değer ayırıştırma grafiklerindeki piklerin seçilmesiyle bir yapıya ait dinamik karakteristikler belirlenmektedir. (Jacobsen vd., 2006; Altunışık, 2010; Sevim, 2010).



Şekil 1.39. Çevresel Titreşim Yöntemine dayalı dinamik karakteristiklerin belirlenmesine ait bazı yöntemler



Şekil 1.40. Çevresel Titreşim Yöntemlerine göre yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi

Doğal frekanslar zamana değişen sıfır geçiş sayısının belirlenmesiyle elde edilirken sönüm ise tek serbestlik dereceli normalize edilmiş oto korelasyon fonksiyonunun logaritmik azalışıyla elde edilmektedir (Jacobsen vd., 2006; Altunışık, 2010; Günaydın, 2016). GFTAA yönteminde ölçülen davranış fonksiyonu ve ölçülmeyen etki kuvveti arasındaki bağıntı;

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega)^{\otimes} G_{xx}(j\omega) H(j\omega)^T \quad (1.18)$$

şeklinde gösterilmektedir (Bendat ve Piersol, 2004; Altunışık, 2010; Günaydın, 2016). Bu denklemde; etki ve tepki sinyallerinin Güç Spektral Yoğunluk (GSY) fonksiyonunu sırasıyla $G_{xx}(j\omega)$ ve $G_{yy}(j\omega)$ ile temsil edilirken frekans davranış fonksiyonunu $H(j\omega)$ ile temsil edilmektedir. Denklem (1.18)'deki T ve $\otimes$ sırasıyla ifadelerin transpozisini ve kompleks eşleniğini göstermektedir. Tepki sinyalinin GSY fonksiyonu matematiksel düzenlemelerle,

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^{\otimes}}{j\omega - \lambda_k^{\otimes}} \quad (1.19)$$

formunda tepki tek kutuplu artık değer fonksiyonu olarak elde edilmektedir. Burada λ_k ve R_k sırasıyla kutup ve atık değer fonksiyonunu temsil ederken n mod sayısını temsil etmektedir. Bazı matematiksel düzenlemeler yapıldıktan sonra (1.19) denklemi

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[\frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^{\otimes}}{j\omega - \lambda_k^{\otimes}} \right] G_{xx}(j\omega) \left[\frac{R_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{R_s^{\otimes}}{j\omega - \lambda_s^{\otimes}} \right]^{\bar{H}} \quad (1.20)$$

şeklinde elde edilmektedir (Brinker vd., 2000). Bu denklemde, $\bar{H}$ kompleks eşleniği ve transpozeyi, s tekil değerleri temsil etmektedir. (2.20)'deki tepki sinyaline ait GSY fonksiyonundaki matematiksel ifadeler düzenlendiğinde,

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{A_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{B_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{B_k^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.21)$$

şeklinde tek kutuplu artık değer fonksiyonu elde edilmektedir (Brinker vd., 2000; Altunışık, 2010; Günaydın, 2016). Denklem (1.21)'de, A_k tepki sinyalinin GSY fonksiyonuna ait k. artık değer matrisi A_k ile temsil edilmektedir. GFTAA yöntemine GSY matrisinin elde edilmesi başlanmaktadır. Ayrık frekanslarda tepki sinyalinin GSY'sinin tahmini $\omega = \omega_i$

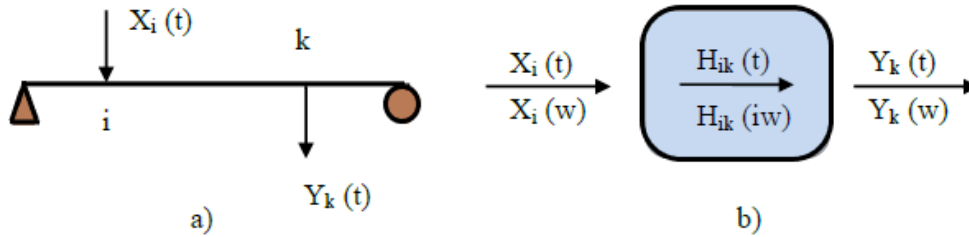
olarak bilinmekte ve tekil değer ayrışım matrisi alınarak ayrıştırılmaktadır (Brincker vd., 2000; Altunışık, 2010; Günaydın, 2016). Tüm bunlara göre (1.21) denklemi,

$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^H \quad (1.22)$$

olarak elde edilmektedir. Bu denklemde; $U_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]$ matrisi u_{ij} ile ifade edilen tekil vektörleri içeren bütün matrisi, $S_i = [s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im}]$ matrisi ise s_{ij} ile ifade edilen skaler tekil değerleri içeren diyagonal matrisi temsil etmektedir. Ayrıca bu denklemde verilen GSY fonksiyonunda; doğal frekanslar pik değer yapan noktalara karşılık gelirken, doğal mod şekilleri ise bu pik noktaları oluşturan tekil vektörlere karşılık gelmektedir.

1.11.4.2. Zorlanmış Titreşim Yöntemi

Zorlanmış Titreşim Yöntemi (ZTY), mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerini elde etmek için kullanılan bir diğer deneysel yöntemdir. Bu yöntemde yapı yapay bir kuvvet olan $X_i(t)$ ile i noktasından titreştirilmekte ve yapının bu etkiye verdiği tepki $Y_k(t)$, yapay kuvvet sinyali $X_i(t)$ ile beraber ölçülmektedir (Şekil 1.41a). Genellikle sarsıcılar veya darbe çekiçleri kullanılarak üretilen yapay titreşim verileri, ivmeölçerler aracılığı ile toplanmaktadır. Ölçülen titreşim sinyalleri zaman tanım alanında olup Fourier serileri kullanılarak frekans tanım alanına dönüştürülmektedir. Burada etki-tepki zaman sinyalleri arasındaki ilişkiyi temsil eden FDF- H_{ik} , Transfer Matrisi- $H_{ik}(i\omega)$ olarak isimlendirilen FDF matrisine dönüştür (Şekil 1.7b) (Schwarz ve Richardson, 1999; Günaydın, 2016).



Şekil 1.41. ZTY'nin a) basit şematik gösterimi b) frekans davranış fonksiyonunun (FDF) belirlenmesi (Schwarz ve Richardson, 1999; Günaydın, 2016).

ZTY’de, etki-tepki sinyalleri arasındaki ilişki gösteren frekans tanım alanındaki etki ve tepki fonksiyonunun sırasıyla $X_k(w)$ ve $Y_k(w)$, Frekans Davranış Fonksiyonu’nun ise $H_{ik}(iw)$ olarak ifade edildiği denklem ile,

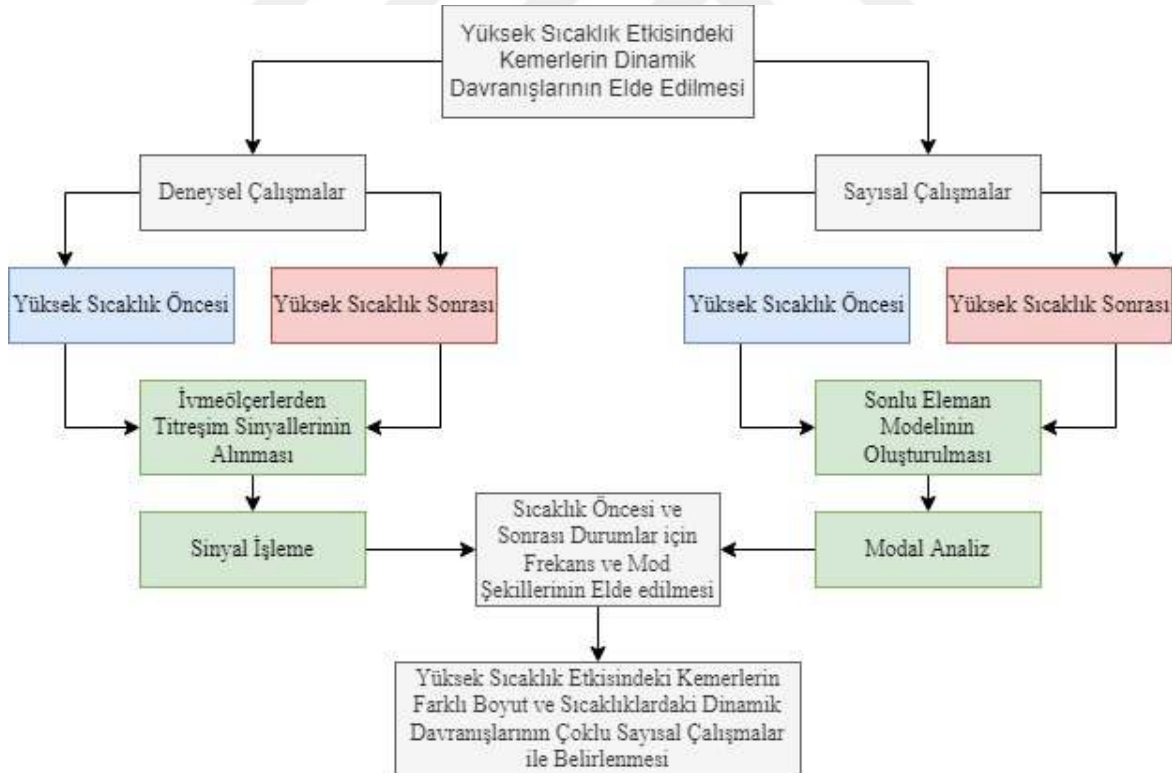
$$H_{ik}(iw) = \frac{Y_k(w)}{X_k(w)} \quad (1.23)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, çeşitli sayısal teknikler kullanılarak $H_{ik}(iw)$ fonksiyonu ayrıştırılmakta ve yapıya ait mod şekli, doğal frekans değerleri gibi dinamik karakteristikler belirlenmektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

2.1. Giriş

Bu çalışma kapsamında; yangın ve/veya benzeri yüksek sıcaklık etkisindeki yığma taş kemerlerin dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişimlerin farklı kemer boyutları (açıklık, yükseklik, genişlik ve kalınlık) ve sıcaklık geçmişi göz önünde bulundurularak sayısal olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Uygulama olarak, farklı kemer boyutları dikkate alınarak biri referans model olmak üzere beş model laboratuvar ortamında inşa edilmiş olup, modeller üzerinde deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan sayısal çalışmalarda ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Bu bakımdan yapılan çalışmalar iki kısımda incelenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalara ait akış şeması Şekil 2.1’de verilmiştir.



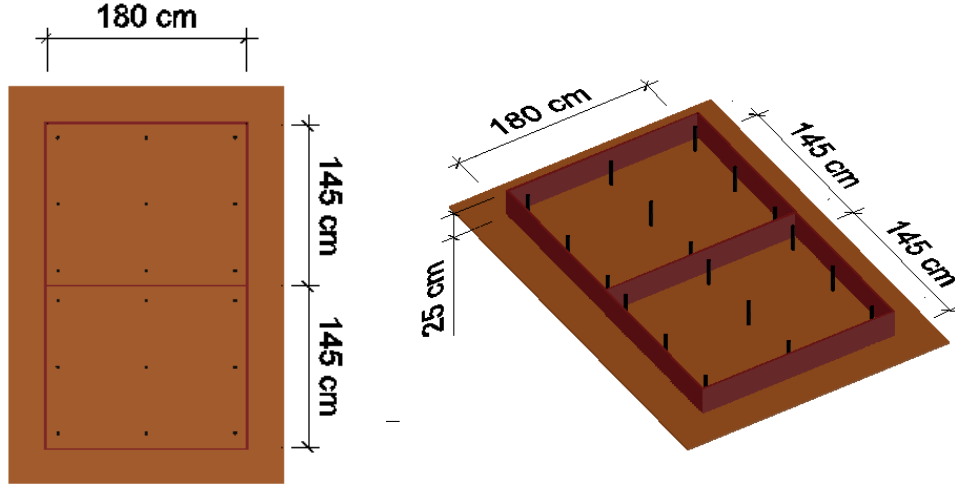
Şekil 2.1.Yapılan çalışmalara ait akış şeması.

2.2. Deneysel Çalışmalar

Tez çalışması kapsamında, beş adet yığma taş kemer modeli laboratuvar ortamında inşa edilmiştir. Modeller, kemerlerin yapısal davranışında etkili olan kemer açıklığı, yüksekliği, genişliği ve kalınlığı gibi parametreler dikkate alınarak oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerin dinamik davranışları deneysel yöntemler kullanılarak elde edilmiştir. Daha sonra modeller yüksek sıcaklık fırınında 600 °C sıcaklığa maruz bırakılmış ve laboratuvar ortamında soğutulan bu modellerin sıcaklık sonrası dinamik davranışları deneysel yöntemler kullanılarak elde edilmiştir. Sıcaklık öncesi ve sonrası durumlar için elde edilen sonuçlar birbiriyle kıyaslanmıştır.

2.2.1. Yığma Taş Kemer Modellerinin Geometrik Özellikleri

Çalışma kapsamında; öncelikle kemerlerin yere tam bağlanabilmesini sağlayabilmek Şekil 2.1’de ölçüleri verilen 2 adet betonarme radye temel inşa edilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalacak kemerlerin temel boyutları, kullanılacak yüksek sıcaklık fırınının ölçüleri dikkate alınarak belirlenmiştir.

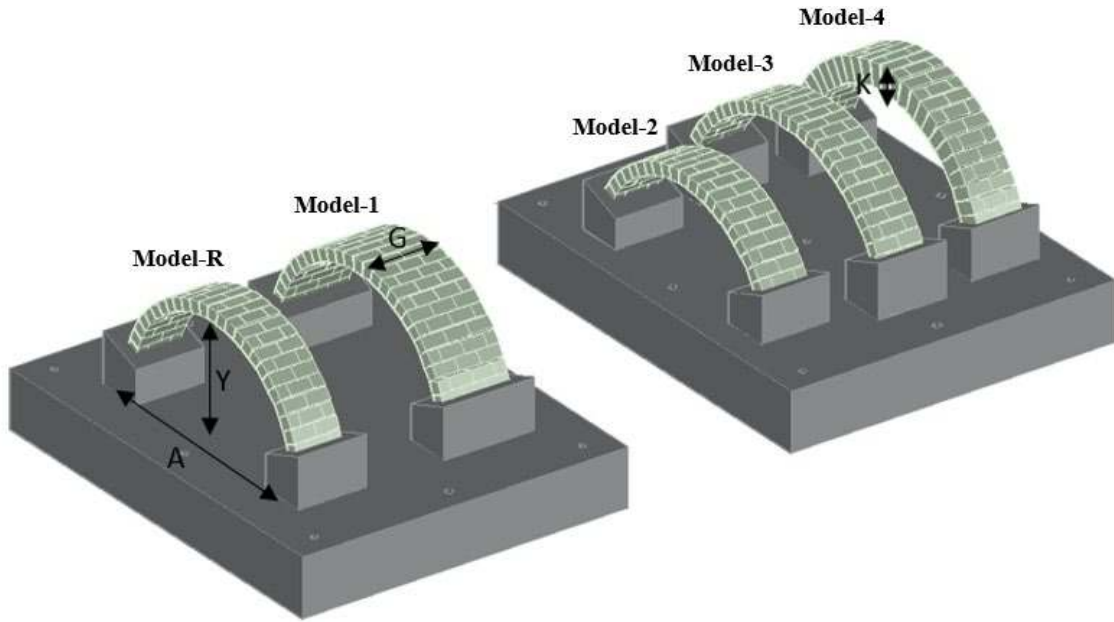


Şekil 2.2. Kemer modellerinin temel kalıp planı

İmalatı tamamlanan temellerin üzerine ölçüleri Tablo2.1 de verilen 5 adet yığma taş kemer modeli laboratuvar ortamında inşa edilmiştir. Şekil 2.3’de inşa edilen kemerlerin temel üzerindeki yerleşim planı verilmiştir.

Tablo 2.1. Kemer modellerinin Boyutları

Model Adı	Kemer Model Boyutları (cm)			
	Açıklık (A)	Yükseklik (Y)	Genişlik (G)	Kalınlık (K)
Model-R	100	50	20	5
Model-1	100	50	30	5
Model-2	100	40	20	5
Model-3	120	50	20	5
Model-4	100	50	20	10



Şekil 2.3. Kemer modellerinin temel üzerindeki yerleşim planı

2.2.2. Yığma Kemer Modellerinin İnşasında Kullanılan Malzeme Özellikleri

Kemer modelleri betonarme temel üzerine kesme andezit taşından inşa edilen kemerden oluşmaktadır. Kemer modelleri yüksek sıcaklık fırınında 600 °C sıcaklığa maruz bırakılacağından dolayı temellerde yüksek dayanımlı beton kullanılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda, temellerin inşasında C 45/55 sınıfı beton hazır beton santralinden temin edilmiştir. Temellerde donatı olarak $\phi 10$ boyutunda S420 çeliği kullanılmıştır. Kemer elemanlarda ise Trabzon bölgesinden temin edilen kesme andezit taşı ile hidrolik kireç esaslı harç kullanılmıştır.

2.2.3. Yığma Kemer Modellerinin İnşası

Çalışmada iki ayrı temel üzerine farklı boyutlarda toplamda beş adet kemer inşası laboratuvar ortamında başlamıştır. Modelin temel inşasında ve kemer elemanların inşasında plywood ve ahşap kalıplar kullanılmıştır.

Kemer modellerinin temelleri 180x145 cm boyutlarında ve 25 cm yüksekliğinde (Şekil 2.2), alt ve üst tarafta donatılı olacak radyal formda inşa edilmiştir. Öncelikle temellerin yere temas eden yüzeyinin düz olabilmesi için 3 adet 1.8x125x250 cm boyutunda plywood birbirine sabitlenmiş ve 2 adet 3x25x350 cm boyutunda ahşap kalıp ile 3 adet 1.8x25x180 cm boyutunda plywood kalıp üzerine sabitlenmiştir. Temel kalıp imalatı tamamlandıktan sonra, temelin sarsma tablasına montajı için bırakılacak boşlukların yerleri belirlenmiştir (Şekil 2.4). Kalıp içerisine Şekil 2.5’de de görüldüğü gibi boyuna ve enine doğrultuda $\phi 10/25$ temel donatısı alt ve üst ızgara şeklinde yerleştirilmiştir.



Şekil 2.4. Kemer modellerin temel kalıp montajı



Şekil 2.5. Kemer modellerin temel donatı montajı

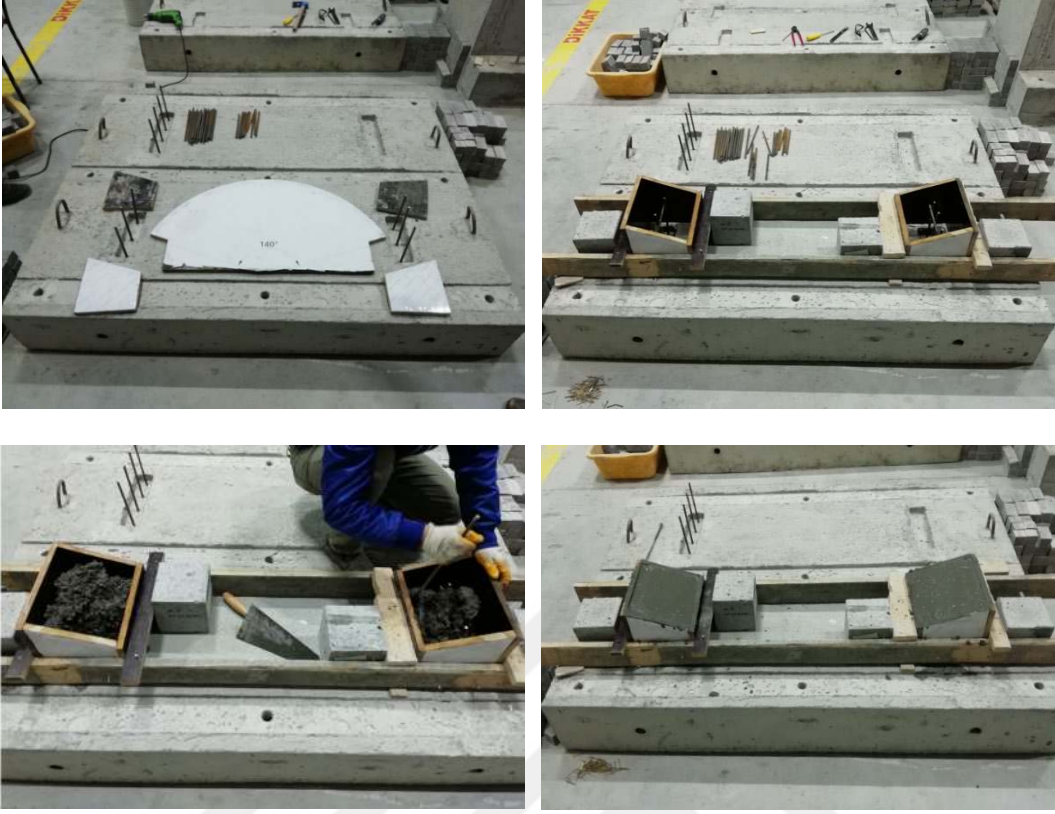
Temel kalıplarına yerleri önceden belirlenen sarsma tablası ankraj boşlukları için 3 cm çapında pvc borular sabitlenmiştir. Kalıp içerisinde 2.5 cm'lik pas payı dikkate alınarak donatı kafesinin oluşturulmasından sonra beton döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Temellerin beton dökümüne ait bazı fotoğraflar Şekil 2.6'da verilmektedir.



Şekil 2.6. Kemer modellerin temel beton dökümü

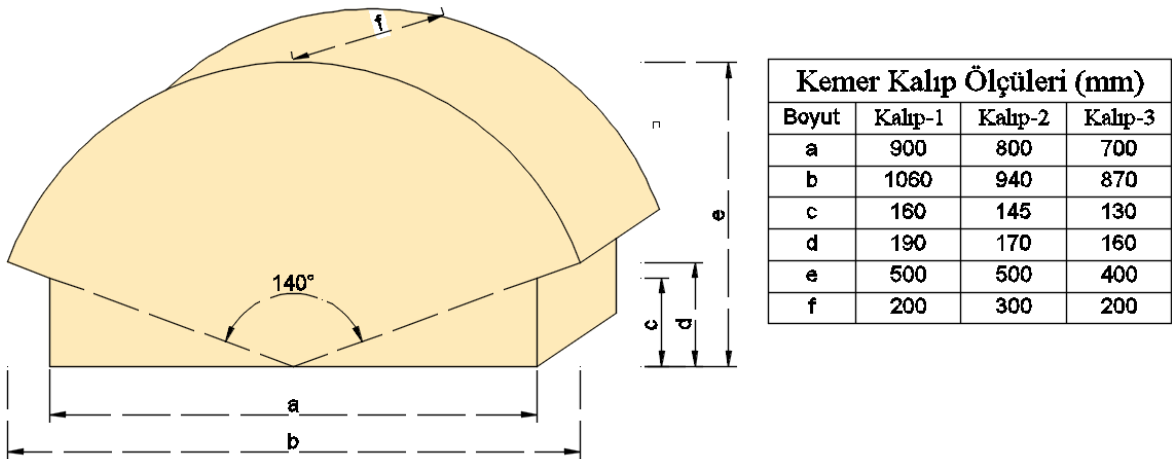
Betonun kalıba ve donatıların arasına boşluksuz yerleştirilmesi vibratör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Beton dökümünde 1.5 m³ beton kullanılmıştır. Beton dökümünden 2 gün sonra kalıplardan çıkarılan temeller laboratuvar ortamında 28 gün boyunca sulanarak küre tabi tutulmuştur.

Kemer modellerinin temel imalatı tamamlandıktan sonra kemer ayaklarının inşasına başlanmıştır. Açılı olarak inşa edilecek olan kemer ayakları için, kemer açıklık/yükseklik oranı dikkate alınarak 3 ayrı kalıp hazırlanmıştır. Kemer ayak donatısı ($\phi 10$) temele delinerek bağlanmış ve kalıp montajı yapılmıştır. Montajı tamamlanan kalıp yağlandıktan sonra beton dökümü gerçekleştirilmiştir. Dökülen betonun kalıba yerleştirilmesinde vibratör kullanılmayıp, şişleme yöntemi kullanılmıştır. Daha sonra beton yüzeyi düzlenerek priz alması beklenmiştir. Kemer ayaklarının imalatına ait bazı fotoğraflar Şekil 2.7'de verilmiştir.



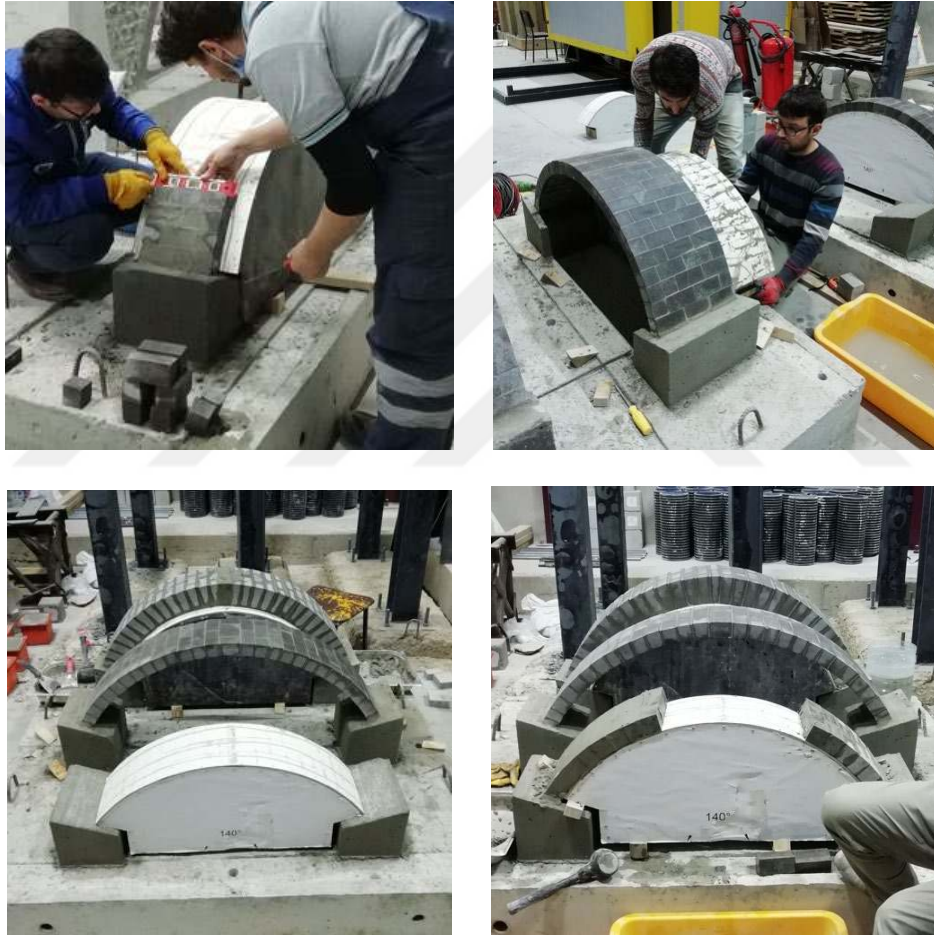
Şekil 2.7. Kemer ayaklarının inşası

Kemer ayak imalatına paralel kemer kalıp imalatına da başlanmıştır. Modellerin açıklık/yükseklik oranlarına göre ölçüleri Şekil 2.8’de verilen 3 adet plywood kalıp yapılmıştır. Kemer kalıpları, imalatı devam eden kemer ayaklarının arasına tam yerleşecek şekilde boyutlandırılmıştır.



Şekil 2.8. Kemer elemanlara ait kalıp ölçüleri

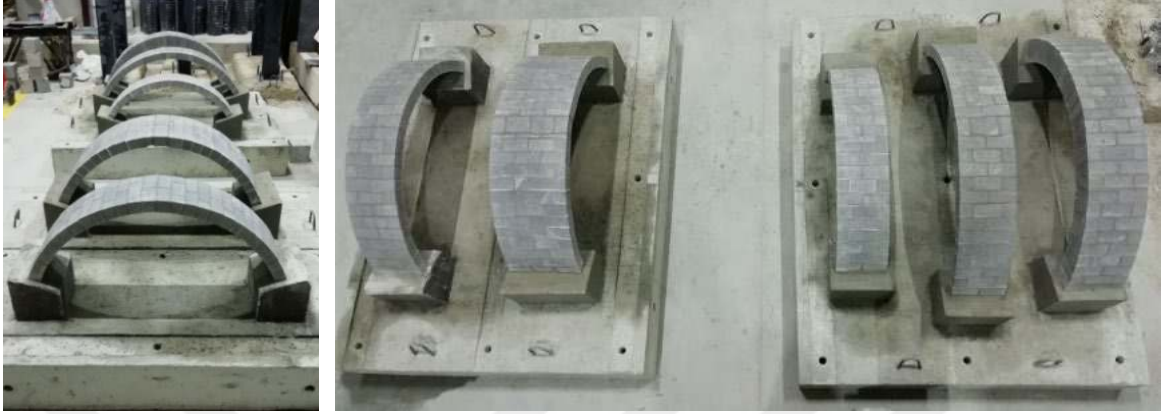
Kemer kalıplarının ve ayaklarının imalatı tamamlandıktan sonra kemer elemanların inşasına başlanmıştır. Ölçüleri Tablo 2.1’de verilen Model-R, Model-1, Model-2 ve Model-3’ün inşasında 5x5x5 cm ve 5x5x10 cm boyutlarında; Model-4’ün inşasında ise 5x5x10 cm ve 5x10x10 cm boyutlarında kesme andezit taşı kullanılmıştır. Ayrıca kullanılacak kesme andezit taşlarına spiral ile kama şekli verilmiştir. Modeller, kemer ayakları üzerine yerleştirilen kemer kalıpları üzerinde kesme andezit taşlarının hidrolik kireç harcıyla birbirlerine şaşırtmalı olarak bağlanması ile inşa edilmiştir. Kemer imalatına ait bazı fotoğraflar Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9. Yığma kemerlerin inşasına ait bazı fotoğraflar

Her iki tarafından şaşırtmalı olarak örülen kemerin tepe noktasına kilit taşı yerleştirilerek inşası tamamlanmıştır. Kemer elemanların yüzeylerinde kalan harç kalıntıları ıslak bir süngerle temizlenmiştir. Daha sonra kemer elemanların kalıpları dikkatli bir şekilde sökülmüş ve 7 gün süreyle sulanarak kür uygulanmıştır. Kemer elemanların inşasının

tamamlanmasıyla imalatı tamamlanan kemer modelleri 28 gün laboratuvar ortamında bekletilmiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. İnşası tamamlanan kemer modelleri

2.2.4. Yığma Kemer Modellerinin Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Yığma taş kemer modellerin inşasında kullanılan beton, taş ve harcın mekanik özelliklerini tayin etmek amacıyla yapılan deneyler, ilgili standartlara uygun olarak Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Yapı ve Malzeme laboratuvarında yapılmıştır. Yığma taş kemer modellerin temel inşasında kullanılan betona basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı testleri yapılmıştır. Kemer elemanların inşasında kullanılan andezit taşının ve hidrolik kireç harcının ise oda sıcaklığındaki ve farklı sıcaklıklara (200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C) maruz kaldıktan sonraki durumları için basınç dayanımı ve birim hacim ağırlığı tayini yapılmıştır.

2.2.4.1. Temel Beton Özellikleri

Kemer model temelleri yüksek sıcaklık fırınında 600 °C sıcaklığa maruz bırakılacağından dolayı yüksek dayanımlı beton kullanılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda, temellerin inşasında C 45/55 sınıfı beton Aşkale Trabzon Hazır Beton Tesislerinde üretilmiştir. Hazır beton tesisinden gelen betonun mekanik özelliklerini belirleyebilmek için beton dökümünde taze betondan küp ve silindir numune örnekleri alınmıştır. Dökümü esnasında 12 adet standart küp numune örneği (15x15x15 cm), ve 6 adet standart silindir

numune örneği (10x20 cm) alınmıştır. Numunelerin alınması ve hazırlanmasına ait bazı fotoğraflar Şekil 2.11’de verilmektedir.



Şekil 2.11. Numunelerin hazırlanmasına ait bazı fotoğraflar

Taze betondan alınan küp ve silindir numuneleri, 7-28 gün 21 ± 2 °C sıcaklıktaki kür havuzunda bekletildikten sonra basınç dayanım testi, yarmada çekme dayanımı testi ve birim hacim ağırlık testi yapılmıştır. Küp ve silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilen testlerden elde edilen sonuçlar sırasıyla Tablo 2.2 ve Tablo 2.3’te verilmektedir. Numunelerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan testlere ait bazı fotoğraflar Şekil 2.12’de verilmektedir.



Şekil 2.12. Numunelerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan testlere ait bazı fotoğraflar

Tablo 2.2. Küp numunelerden elde edilen özellikler

Numune	Alan (cm ²)	Hacim (cm ³)	Kütle (kg)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)	Kırılma Yükü (kN)	Dayanım (f _{küp}) MPa
1	225	3375	8.214	2434	1310	58.22
2	225	3375	8.108	2402	1209	53.74
3	225	3375	8.261	2448	1172	52.12
4	225	3375	7.494	2369	1333	59.26
5	225	3375	8.122	2406	1156	51.40
6	225	3375	8.060	2388	1300	57.78

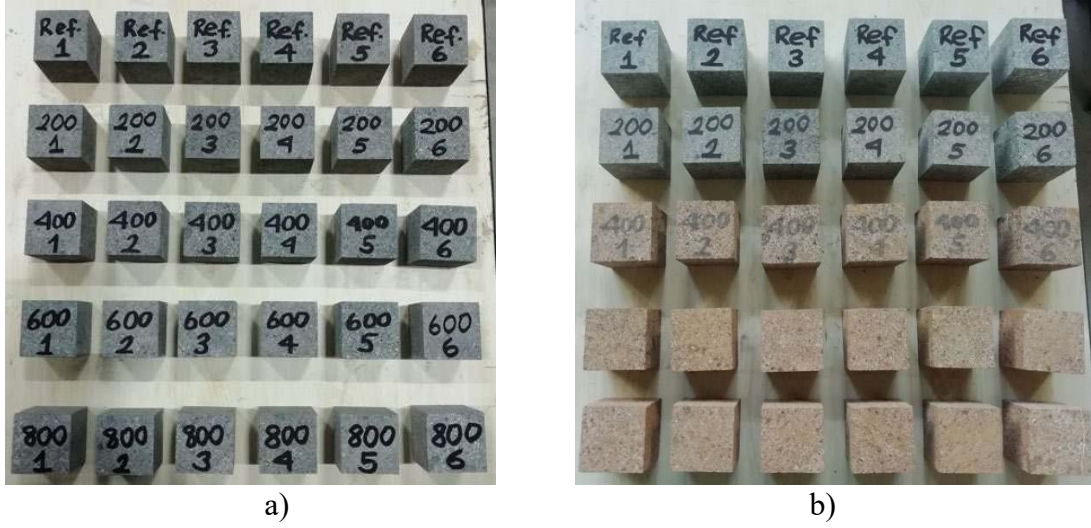
Tablo 2.3. Silindir numunelerden elde edilen özellikler

Numune	Çap (cm)	Yükseklik (cm)	Kırılma Yükü (kN)	Kırılmada Çekme Mukavemeti (f _{sil}) MPa
1	15	30	101	3.21
2	15	30	132	4.20
3	15	30	133	4.23
4	15	30	103	3,28

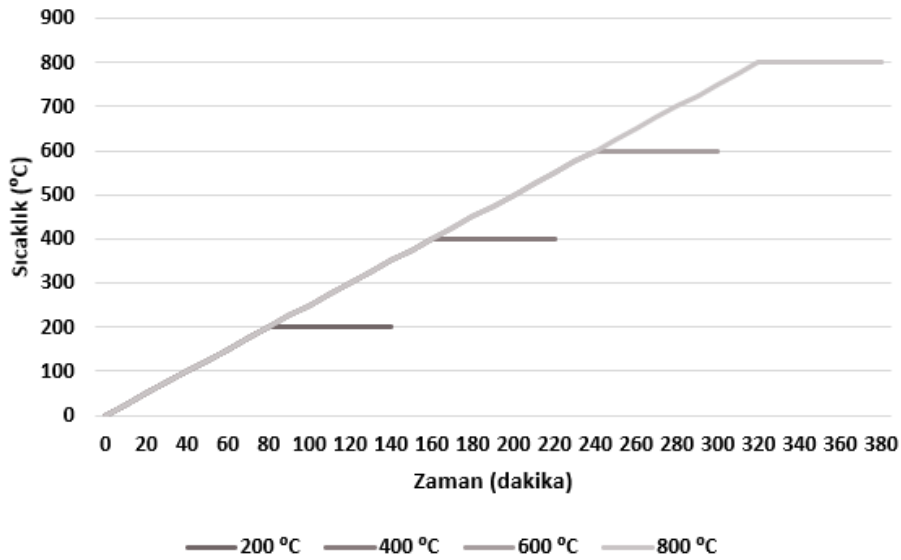
Tablo 2.2’de verilen küp numuneleri 51.40-59,26 MPa arasında değişen ortalama 55.42 MPa basınç mukavemetine, 2369-2448 kg/m³ arasında değişen ortalama 2408 kg/m³ kütle yoğunluğuna sahiptir. Ayrıca Tablo 2.3’ de silindir numunelerin kırılmada çekme mukavemeti 3.21-4.23 MPa arasında değişen ortalama 3.73 MPa olduğu görülmektedir. Tüm bu sonuçlar göstermiştir ki yüksek sıcaklığa maruz kalacak temel betonu için hedeflenen beton dayanımı elde edilmiştir.

2.2.4.2. Taşın Özellikleri

Yığma kemer elemanların inşasında Trabzon bölgesinde bulunan ve tarihi yığma yapılarda kullanılan andezit taşı kullanılmıştır. Kullanılan andezit taşının oda sıcaklığındaki ve farklı sıcaklıklara (200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C) maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımı ve birim hacim ağırlığı belirlenmiştir. Bu özelliklerin belirlenmesin de 75x75x75 mm boyutlarında kesilen 30 adet andezit taşı kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler Şekil 2.13a’da verilmiştir.



Şekil 2.13. Andezit taşlarının farklı sıcaklığa maruz kalmadan önceki (a) ve sonraki (b) görüntüsü



Şekil 2.14. Numunelerin ısıtılmasında dikkate alınan sıcaklık-zaman eğrisi

Yüksek sıcaklığın andezit taşının dayanımı üzerindeki etkisini belirlemek için, andezit taşları Şekil 2.14'te verilen sıcaklık-zaman eğrisi dikkate alınarak sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Her sıcaklık değeri için 6 adet andezit taşı Persan RS200 yüksek sıcaklık fırınında 2.5 °C/dk hızında ısıtılmış (Şekil 2.15a), hedef sıcaklık değerine ulaşan taşlar bu sıcaklıkta 60 dakika bekletildikten sonra laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmıştır. Sıcaklık sonrası numunelerde renk değişimleri olmuş, bu değişim Şekil 2.13b'de gösterilmiştir. Daha sonra numuneler TS EN 772-1'ye göre basınç dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı testlerine ait bazı fotoğraflar Şekil 2.15b'te gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Farklı sıcaklığa maruz bırakılan andezit taşının (a) basınç dayanımı testine (b) ait bazı fotoğraflar

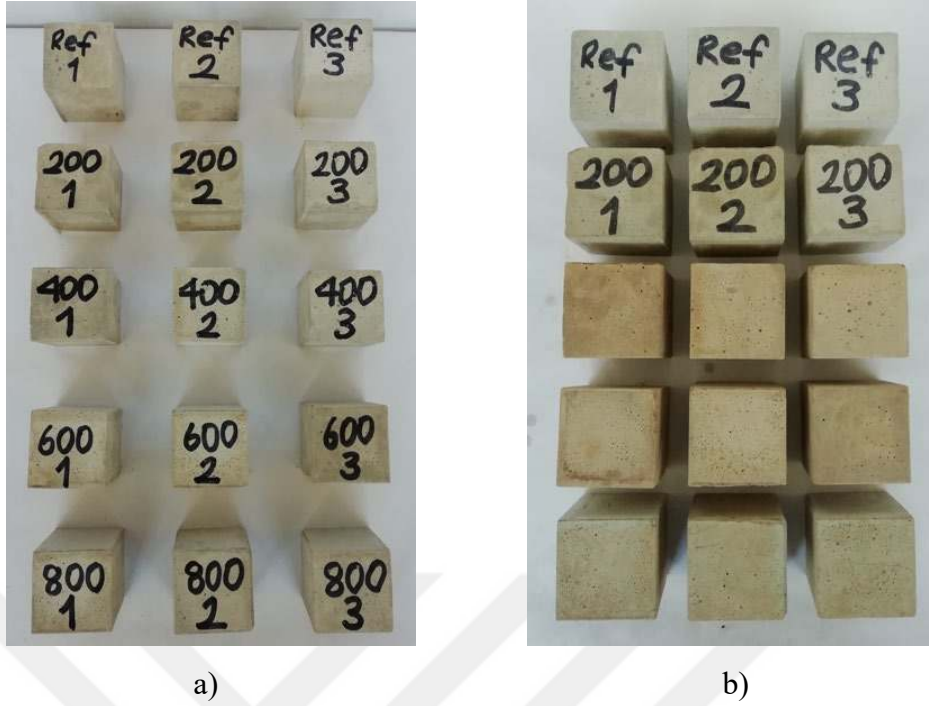
Andezit taşlarının yük altındaki davranışlarını belirlemek için yapılan basınç dayanım test sonuçları Tablo 2.4'te verilmektedir. Numunelerin basınç dayanımı, kırılma yükünün yük uygulanan alana bölünmesiyle hesaplanmıştır. Taşların farklı sıcaklıklardaki ortalama basınç dayanımı, tek numune dayanımlarının aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 2.4. Andezit taşının farklı sıcaklıklara ait ortalama basınç dayanımı

Sıcaklık (°C)	Alan (cm ²)	Hacim (cm ³)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)	Kırılma Yükü (kN)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
20	56.25	421.875	2328	172.01	30.58
200	56.25	421.875	2237	203.90	36.25
400	56.25	421.875	2144	191.64	34.07
600	56.25	421.875	2095	148.27	26.36
800	56.25	421.875	2051	100.35	17.84

2.2.4.3. Harcın Özellikleri

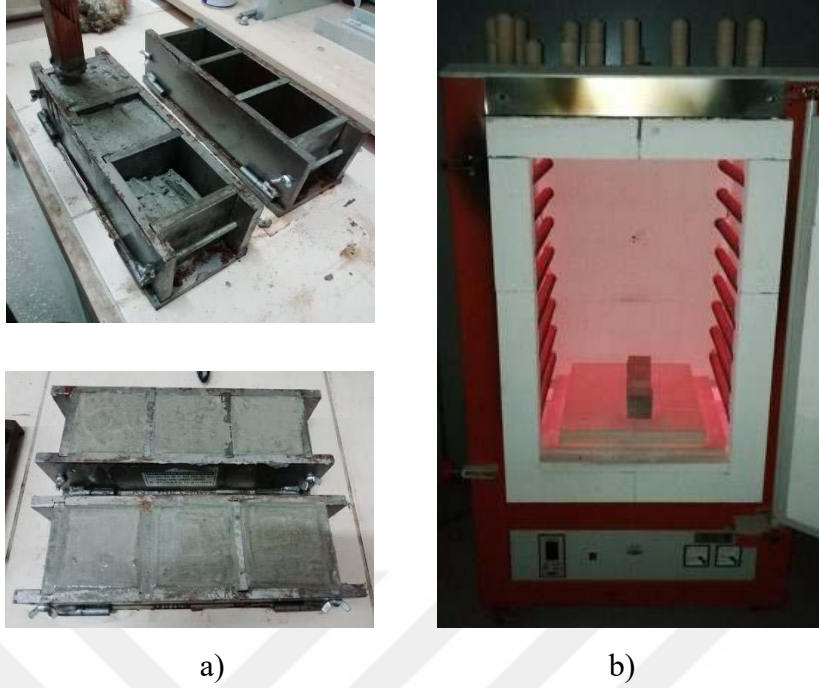
Yığma kemer elemanlardaki taş birimler arasında aderansı sağlamak için hidrolik kireç esaslı harç kullanılmıştır. Kullanılan harcın oda sıcaklığındaki ve farklı sıcaklıklara (200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C) maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımı ve birim hacim ağırlığı belirlenmiştir. Bu özelliklerin belirlenmesin de 71x71x71 mm³ boyutlarında 15 adet harç numunesi kullanılmıştır. Kullanılan numuneler Şekil 2.16a'da verilmiştir.



Şekil 2.16. Harç numunelerinin farklı sıcaklıklara maruz kalmadan önceki (a) ve sonraki (b) görüntüsü

Kullanılan harç karışımı hacimsel olarak; 2/3 taş tozu, 1/3 hidrolik kireç ve harcın kıvamına göre eklenen sudan oluşmaktadır. Şekil 2.9a’da görüldüğü gibi hazırlanan taze harç karışımı yukarıda ölçüleri verilen çelik kalıplara yerleştirilmiştir. Prizini alan harç numuneleri 28 günlük kür süresi sonrası Şekil 2.14’te verilen sıcaklık-zaman eğrisi dikkate alınarak yüksek sıcaklık fırınında 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Sıcaklık sonrası harç numunelerinde renk değişimi meydana gelmiştir. Ayrıca 800 °C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde renk değişimi dışında, kavlanma ve dağılmalar da meydana gelmiştir. Sıcaklık sonrası harç numunelerinin görüntüsü Şekil 2.16b’da verilmiştir.

Sıcaklığa maruz kalan harç numuneleri laboratuvar ortamında soğutulduktan sonra ağırlıklarına bakılmıştır. Daha sonra numuneler basınç dayanım testine tabi tutulmuştur. 800 °C sıcaklığa maruz kalan harç numunelerinden ölçüm alınamamış olup diğer numunelerin ortalama birim hacim ağırlığı ve basınç dayanımı Tablo 2.5’de verilmiştir. Numunelerin basınç dayanımı, kırılma yükünün yük uygulanan alana bölünmesiyle; ortalama basınç dayanımı, tek numune dayanımlarının aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.17. Harç numunelerinin hazırlanması (a) ve yüksek sıcaklığa maruz bırakılması (b)

Tablo 2.5. Harç numunelerinin farklı sıcaklıklara ait ortalama birim hacim ağırlığı ve basınç dayanımları

Sıcaklık (°C)	Alan (cm ²)	Hacim (cm ³)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)	Kırılma Yükü (kN)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
20	50.41	357.911	1785	10.38	2.06
200	50.41	357.911	1624	9.93	1.97
400	50.41	357.911	1589	8.47	1.68
600	50.41	357.911	1553	7.26	1.44
800	50.41	357.911	1464	-	-

2.2.4.4. Yığma Duvarların Özellikleri

Yığma yapı tekniği ile inşa edilen kemer elemanlarının farklı sıcaklıklardaki ortalama basınç dayanımını ve birim hacim ağırlığını tespit edebilmek için standartlara uygun duvar numuneleri hazırlanmıştır. Duvar numuneleri TS-EN 1051-1'e göre 5x5x10 cm³ ve 5x5x5 cm³ boyutlarındaki yığma birimlerin şaşırtmalı örülmesiyle ve ASTM' ye göre 5x5x10 cm³ yığma birimlerin üst üste 3 sıra yerleştirilmesiyle üretilmiştir. Hazırlanan duvar numuneleri Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.18. Hazırlanan duvar numunelerine ait bazı fotoğraflar

Düz ve yatay bir yüzeyde inşa edilen numuneler, kür için 3 gün süreyle polietilen örtüyle kaplandı ve süre sonunda numuneler korumasız olarak laboratuvar ortamında 25 gün bekletildi. Süre sonunda duvar numuneler Şekil 2.14’te verilen sıcaklık-zaman eğrisi dikkate alınarak yüksek sıcaklık fırınında 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Sıcaklık sonrası numuneler soğumaları için laboratuvar ortamında bekletilmiştir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan duvar numuneleri

Laboratuvar ortamında bekletilen duvar numunelerinin ortalama birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra duvar numuneleri Şekil 2.20’de de görüldüğü gibi TS-

EN 1051-1 ve ASTM standartlarına uygun basınç dayanım testine tabi tutulmuştur. Numunelerin ortalama birim hacim ağırlığı ve basınç dayanımı Tablo 2.6 ve Tablo 2.7’ de verilmiştir.



Şekil 2.20. Duvar numunelerinin i TS-EN 1051-1 (a) ve ASTM (b) standartlarına göre basınç dayanımlarının belirlenmesi

Tablo 2.6. Duvar numunelerinin farklı sıcaklıklara ait ortalama birim hacim ağırlığı ve TS-EN 1051-1’e göre basınç dayanımları

Sıcaklık (°C)	Alan (cm ²)	Hacim (cm ³)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)	Kırılma Yüğü (kN)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
20	100	2500	2300	285.1	28.51
200	100	2500	2235	281.2	28.12
400	100	2500	2124	208.3	20.83
600	100	2500	2099	103.7	10.37
800	100	2500	2038	80.20	8.020

Tablo 2.7. Duvar numunelerinin farklı sıcaklıklara ait ortalama birim hacim ağırlığı ve ASTM’ye göre basınç dayanımları

Sıcaklık (°C)	Alan (cm ²)	Hacim (cm ³)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)	Kırılma Yüğü (kN)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
20	50	750	2305	160.7	32.14
200	50	750	2246	165.3	33.06
400	50	750	2119	94.20	18.84
600	50	750	2075	59.85	11.97
800	50	750	2031	35.30	7.060

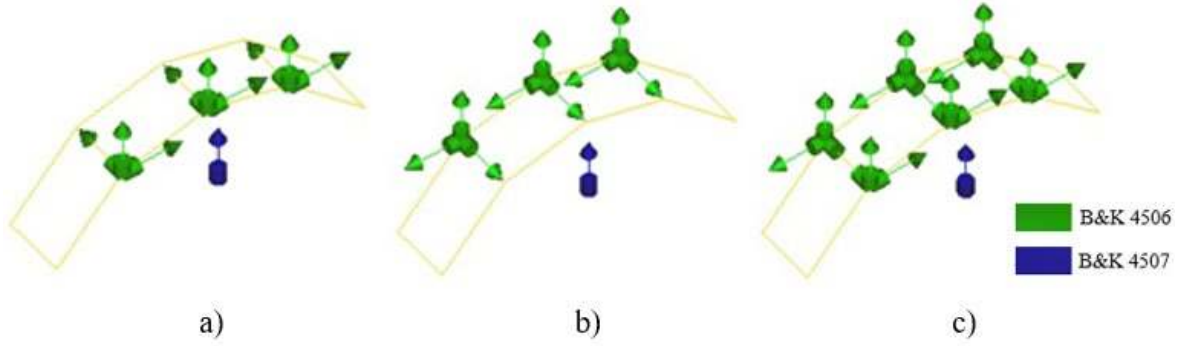
2.2.5. Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Sıcaklık Testi Öncesi Kemer Modellerinin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Laboratuvar ortamında oluşturulan kemer modellerinin sıcaklık testi öncesi dinamik karakteristikleri çevresel titreşim testleri uygulanarak elde edilmiştir. Kemer modellerinin çevresel titreşim testlerinde kullanılan; tek eksenli ve üç eksenli ivmeölçerler sırasıyla B&K 4507 ve B&K 4506, veri toplama ünitesi B&K 3560, yazılımlar PULSE ve Operational Modal Analysis (OMA)'dır. Laboratuvar şartlarında gerçekleştirilen deneysel ölçümlerde, kemer modeline etkiyen rüzgâr, taşıt, makine gibi çevresel etkiler bulunmadığından modelleri titreştirmek için darbe çekici (B&K 8210 tipi) yararlanılmıştır. Uygulamada zorlanmış titreşim testi için kullanılan bu darbe çekici veri toplama ünitesine tanıtılmamış, be sebeple modele verdiği etki ölçülemeyen doğal bir etki gibi kabul edilmiştir. Titreşimler sonucunda ivmeölçerlerden alınan sinyaller B&K 3560 tipi veri toplama ünitesinde birleştirilmiş ve PULSE yazılımına aktarılmıştır. Daha sonra bu sinyaller OMA yazılımına aktararak işlenmiş ve kemer modellerinin doğal frekansları ve mod şekilleri belirlenmiştir.



Şekil 2.21. Deneysel ölçümler için ivmeölçer bağlantı noktalarının hazırlanması

Deneysel olarak dinamik karakterlerin doğru olarak belirlenmesinde yapı üzerine yerleştirilecek ivmeölçerlerin yeri oldukça önemlidir. Bu nedenle kemerler modellerinin muhtemel hareket noktaları ABAQUS sonlu elemanlar programında yapılan modal analizle belirlenmiştir. Buna göre kemer alnının her iki taraftaki üst ve orta noktalarına toplam altı adet üç eksenli ivmeölçer bağlanmasına karar verilmiştir. Referanslı ölçüm alınacağından dolayı model temeline de bir adet referans ivmeölçeri yerleştirilmiştir. Yığma kemer modelleri üzerinde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine dair bazı fotoğraflar Şekil 2.21’de verilmiştir. Şekil 2.22’de PULSE yazılımı kullanılarak her bir kemer modeli için oluşturulan temsili model ve ivmeölçer yerleşim düzeni gösterilmektedir.



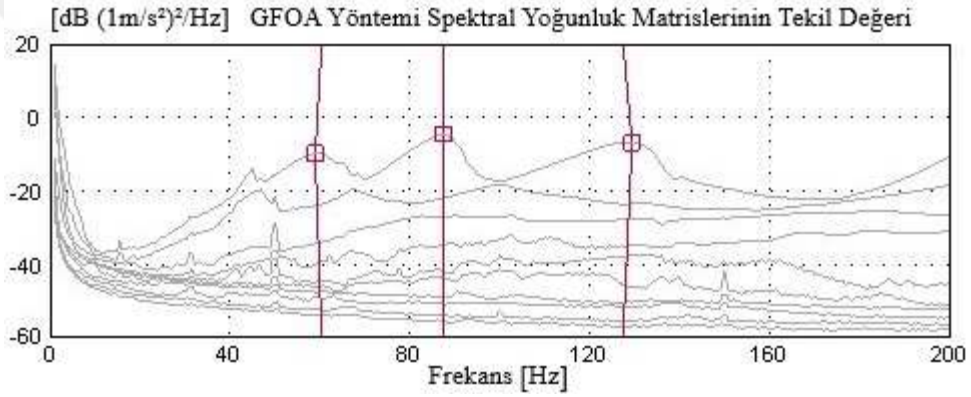
Şekil 2.22. Deneysel ölçümlerde kullanılan ivmeölçer yönleri ve yerleşim planı

Çevresel titreşim testlerinde, ivmeölçerlerden alınan veri üç eksenli sinyal kabloları ile veri toplama ünitesine aktarılmıştır., veri toplama ünitesine aktarılan ham sinyaller, veri toplama ünitesi ile bilgisayar arasında bağlantı kablosu kullanılarak bilgisayar ortamına gönderilmiştir. Bilgisayarda PULSE (2006) yazılımı ile işlenebilir hale getirilmiş ham sinyaller OMA (2006) yazılımı kullanılarak işlenmiştir. İşlenen sinyaller Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) Yöntemi ’ne göre ayırıştırılarak kemer modellerinin doğal frekansları ve mod şekilleri belirlenmiş, her bir modele ait alt başlıkta verilmiştir. Bu yöntemde dinamik karakteristikler OMA yazılımında elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerlerindeki piklerin seçilmesiyle elde edilmiştir.

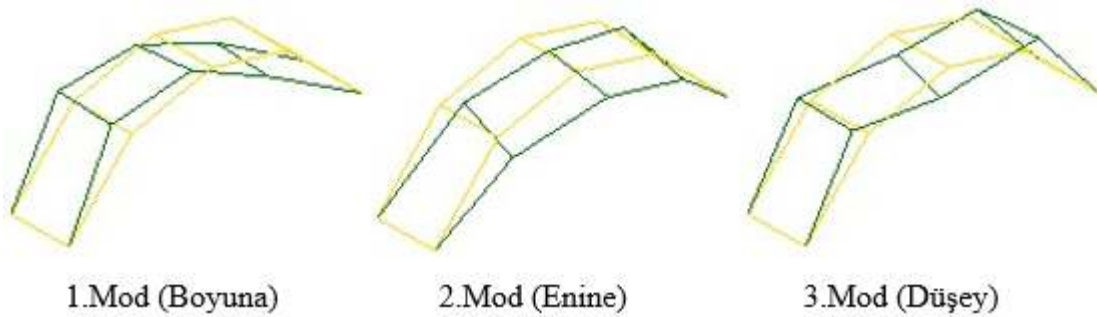
Çevresel titreşim testleri tüm kemer modeller için aynı koşullarda ve aynı ekipmanlar kullanılarak imalatlarından 30 gün sonra gerçekleştirilmiştir. Çevresel titreşim testlerinde ölçüm süresi 10 dk alınmış ve frekans aralığı sonlu eleman modelleri kullanılarak belirlenen doğal frekanslara göre 0-300 Hz aralığında seçilmiştir.

2.2.5.1. Model-R'nin Sıcaklık Testi Öncesi Dinamik Karakteristikleri

Deneysel olarak dinamik karakteristikleri elde edilmek istenen Model-R (açıklığı 100 cm, yüksekliği 50 cm, genişliği 20 cm ve kalınlığı 5 cm olan kemer modeli) üzerinde çevresel titreşim testi yapılmıştır. Ölçümlerde elde edilen sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri belirlenmiş ve Şekil 2.23'de verilmiştir. Şekil 2.23'de görülen piklerin seçilmesiyle kemer modelinin doğal frekansları hesaplanır. Seçilen piklerin her biri yapısal moda karşılık gelmektedir. Çalışmada dinamik karakteristikler ilk üç mod için elde edilmiştir. Model-R için çevresel titreşim testlerinden elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.24'de verilmektedir.



Şekil 2.23. Model-R için elde edilen spektral yoğunluk matrisi



Şekil 2.24. Model-R için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

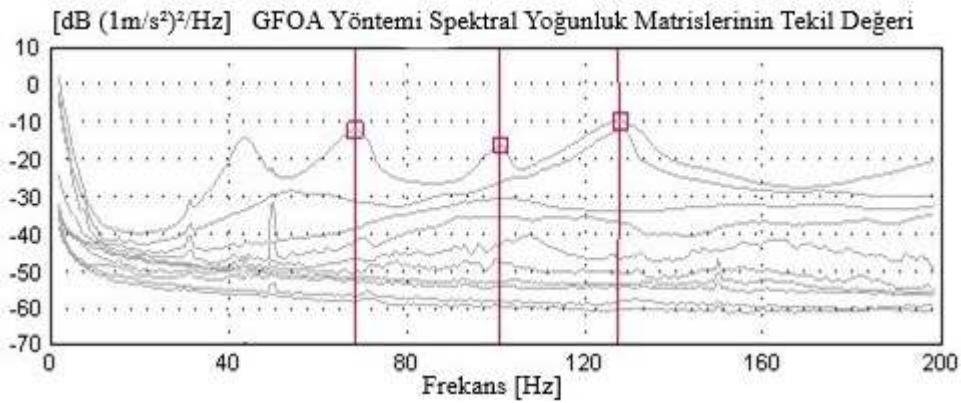
Model-R için GFOA yöntemine göre ilk üç doğal frekans 60.46-127.5 Hz arasında elde edilmiş olup değerleri Tablo 2.8'da verilmektedir.

Tablo 2.8. Model-R için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

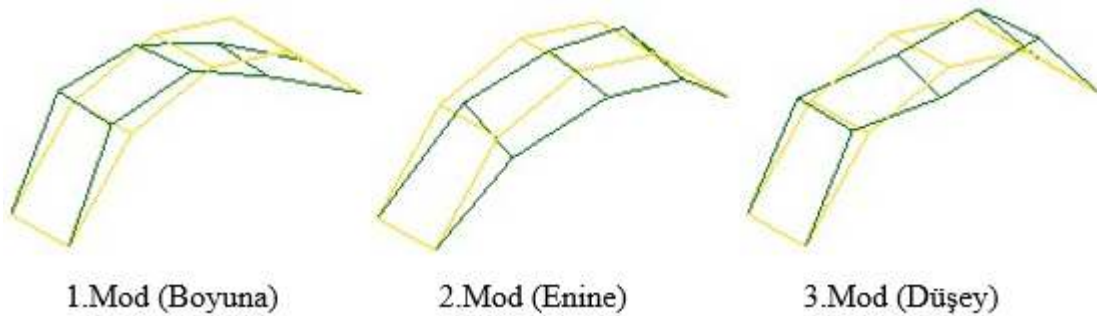
Mod	Frekans (Hz)	Mod Şekli
1	60,46	Boyuna
2	87,40	Enine
2	127,5	Düşey

2.2.5.2. Model-1'in Sıcaklık Testi Öncesi Dinamik Karakteristikleri

Deneysel olarak dinamik karakteristikleri elde edilmek istenen Model-1 (açıklığı 100 cm, yüksekliği 50 cm, genişliği 30 cm ve kalınlığı 5 cm olan kemer modeli) üzerinde çevresel titreşim testi yapılmıştır. Ölçümlerde toplanan sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri Şekil 2.25'de verilmektedir. Şekil 2.25'de görülen piklerin seçilmesiyle kemer modelinin doğal frekansları hesaplanır. Seçilen piklerin her biri yapısal moda karşılık gelmektedir. Çalışmada dinamik karakteristikler ilk üç mod için elde edilmiştir. Model-1 için çevresel titreşim testlerinden elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.26'de verilmektedir.



Şekil 2.25. Model-1 için elde edilen spektral yoğunluk matrisi



Şekil 2.26. Model-1 için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Model-1 için GFOA yöntemine göre ilk üç doğal frekans 68.4-127.3 Hz arasında elde edilmiş olup değerleri Tablo 2.9’da verilmektedir.

Tablo 2.9. Model-1 için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

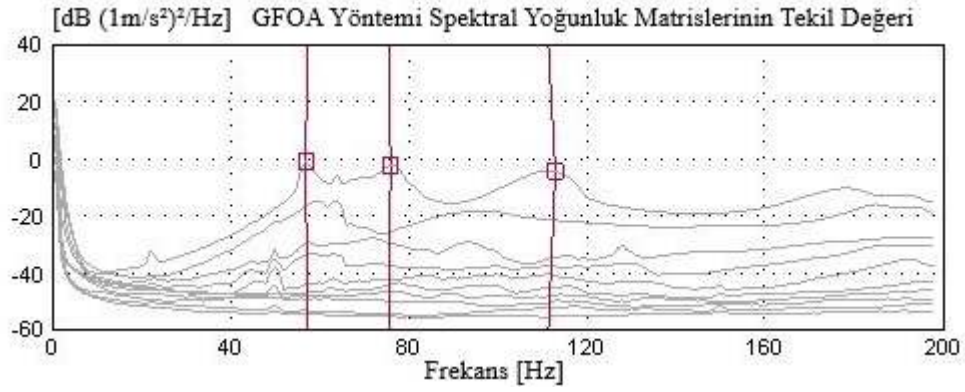
Mod	Frekans (Hz)	Mod Şekli
1	68.40	Boyuna
2	100.7	Enine
2	127.3	Düşey

2.2.5.3. Model-2’nin Sıcaklık Testi Öncesi Dinamik Karakteristikleri

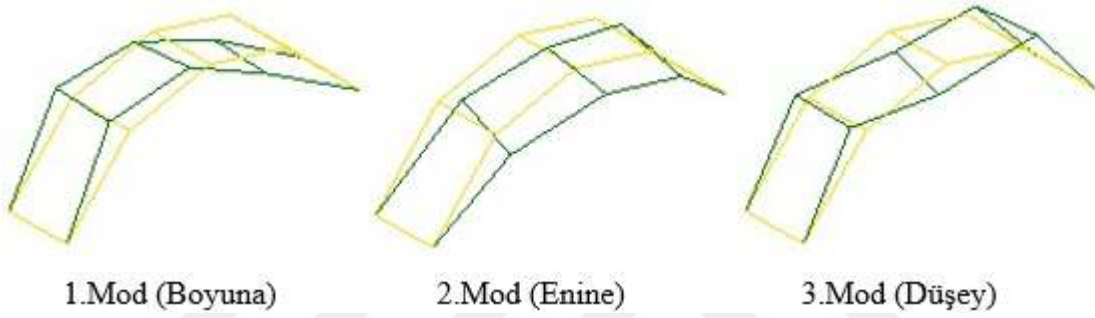
Deneysel olarak dinamik karakteristikleri elde edilmek istenen Model-2 (açıklığı 100 cm, yüksekliği 40 cm, genişliği 20 cm ve kalınlığı 5 cm olan kemer modeli) üzerinde çevresel titreşim testi yapılmış, ölçüm alınamamıştır.

2.2.5.4. Model-3’ün Sıcaklık Testi Öncesi Dinamik Karakteristikleri

Deneysel olarak dinamik karakteristikleri elde edilmek istenen Model-3 (açıklığı 120 cm, yüksekliği 50 cm, genişliği 20 cm ve kalınlığı 5 cm olan kemer modeli) üzerinde çevresel titreşim testi yapılmıştır. Ölçümlerde toplanan sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri Şekil 2.27’de verilmektedir. Şekil 2.27’de görülen piklerin seçilmesiyle kemer modellinin doğal frekansları hesaplanır. Seçilen piklerin her biri yapısal moda karşılık gelmektedir. Çalışmada dinamik karakteristikler ilk üç mod için elde edilmiştir. Model-3 için çevresel titreşim testlerinden elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.28’de verilmektedir.



Şekil 2.27. Model-3 için elde edilen spektral yoğunluk matrisi



Şekil 2.28. Model-3 için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Model-3 için GFOA yöntemine göre ilk üç doğal frekans 57.22-111.4 Hz arasında elde edilmiş olup değerleri Tablo 2.10’da verilmektedir.

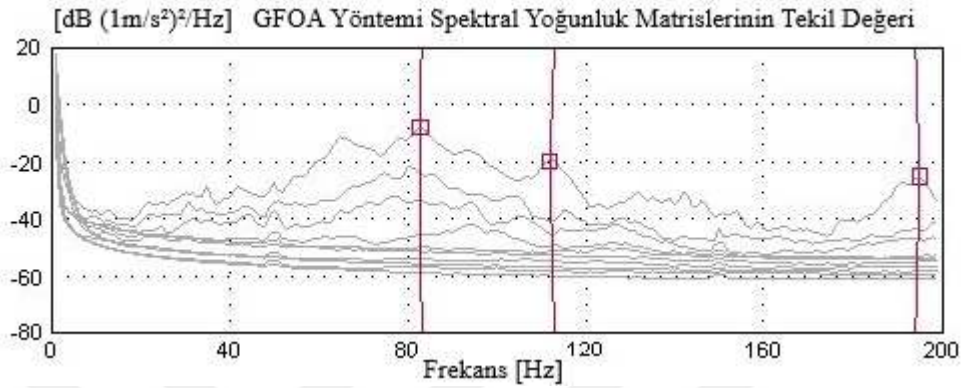
Tablo 2.10. Model-3 için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Mod Şekli
1	57.22	Boyuna
2	75.72	Enine
2	111.4	Düşey

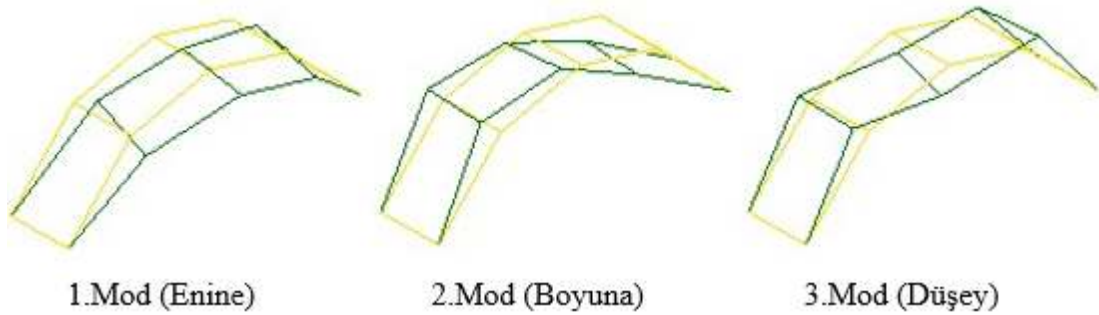
2.2.5.5. Model-4’ün Sıcaklık Testi Öncesi Dinamik Karakteristikleri

Deneysel olarak dinamik karakteristikleri elde edilmek istenen Model-4 (açıklığı 100 cm, yüksekliği 50 cm, genişliği 20 cm ve kalınlığı 10 cm olan kemer modeli) üzerinde çevresel titreşim testi yapılmıştır. Ölçümlerde toplanan sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri Şekil 2.29’de

verilmektedir. Şekil 2.29’de görülen piklerin seçilmesiyle kemer modelinin doğal frekansları hesaplanır. Seçilen piklerin her biri yapısal moda karşılık gelmektedir. Çalışmada dinamik karakteristikler ilk üç mod için elde edilmiştir. Model-4 için çevresel titreşim testlerinden elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.30’de verilmektedir.



Şekil 2.29. Model-4 için elde edilen spektral yoğunluk matrisi



Şekil 2.30. Model-4 için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Model-4 için GFOA yöntemine göre ilk üç doğal frekans 83.17-194.1 Hz arasında elde edilmiş olup değerleri Tablo 2.11’de verilmektedir.

Tablo 2.11. Model-4 için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Mod Şekli
1	83.17	Enine
2	113.0	Boyuna
2	194.1	Düşey

2.2.6. Kemer Modellerin Yüksek Sıcaklık Testi

Laboratuvar ortamında imalatı tamamlanan kemer modelleri üzerinde gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri sonucunda her bir modele ait frekans ve mod şekilleri belirlenmiştir. Yüksek sıcaklığın kemer modellerin dinamik karakteristikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, kemer modelleri yüksek sıcaklık test fırınında ısıtılma tabi tutulmuştur. Sıcaklığa maruz kalan kemer modeller üzerinde tekrar çevresel titreşim testleri gerçekleştirilmiş ve yüksek sıcaklık testi sonrasındaki frekans ve mod şekilleri deneysel olarak belirlenmiştir.

Yüksek sıcaklık testi için kemer modelleri inşa edildiği yerden kren vinç yardımıyla kaldırılmış fırın dışına çıkartılan araba tabanı üzerine yerleştirilmiştir. Araba tabanı üzerine yerleştirilen modeller test fırını içerisine dikkatli bir şekilde yerleştirilmiştir. Modellerin test fırınına taşınması ve yerleştirilmesine ait bazı fotoğraflar Şekil 2.31’de verilmektedir.

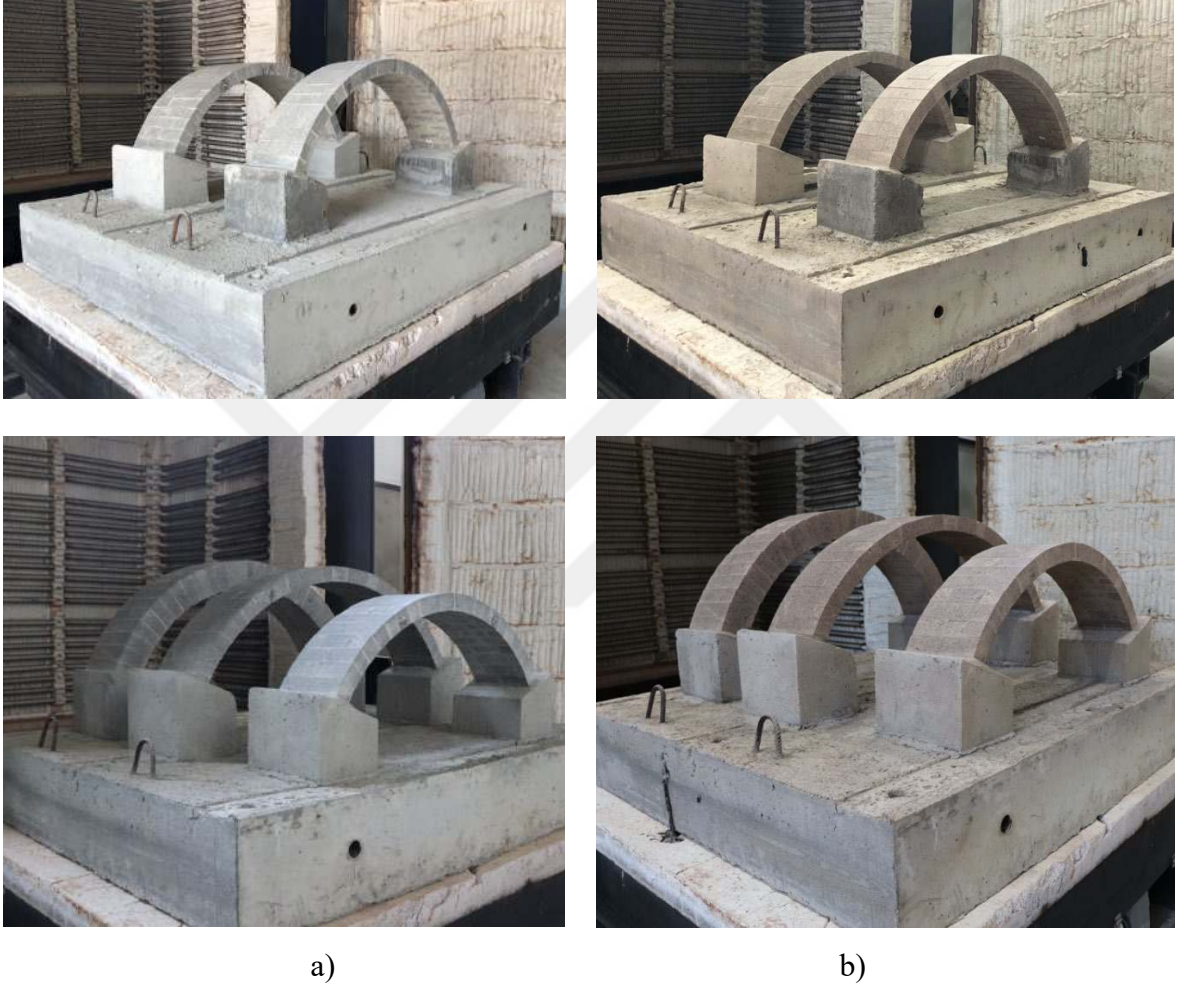


Şekil 2.31. Kemer modellerinin yüksek sıcaklık test fırınına taşınması

Fırın kapağının kapatılması işleminin ardından test için hazır hale gelen kemer modelleri, test fırınının kontrol paneline sıcaklık-zaman ilişkisi tanımlanmasıyla 600 °C sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Kemer modelleri 2.5 °C/dk sıcaklık artış hızıyla 4 saat boyunca ısıtılma tabi tutulmuştur. Fırın iç sıcaklıkları testler süresince fırın panosu üzerinde bulunan termostat üzerinden takip edilmiştir.

4 saat süren ısıtılma işlemin ardından fırın kapağı kademeli olarak dikkatli bir şekilde yavaş yavaş açılmış ve pirometre yardımıyla modellerin testler sonrasındaki dış yüzey sıcaklıkları

tespit edilmiştir. Daha sonra kemer modelleri araba tabanı vasıtasıyla fırın dışına çıkarılmış ve araba tabanı üzerinde soğumaya bırakılmıştır. Şekil 2.32b’de sıcaklık sonrası soğumaya bırakılan kemer modelleri gösterilmiştir. Güvenli bir bölge oluşturmak için çalışma alanı etrafına şerit çekilmiş ve sıcaklıklar tehlike seviyesinin altına düşene kadar çalışma alanında beklenmiştir.

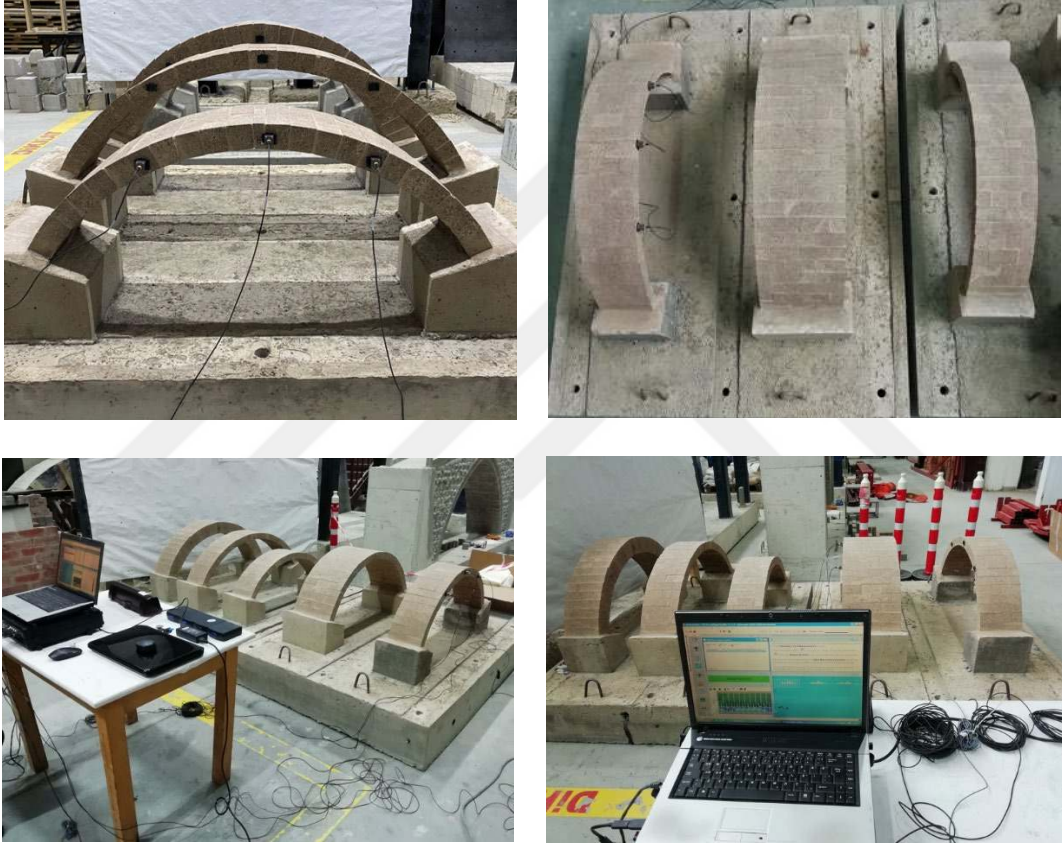


Şekil 2.32. Kemer modellerin sıcaklık testi öncesine (a) ve sonrasına (b) ait bazı fotoğraflar

2.2.7. Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Sıcaklık Testi Sonrası Kemer Modellerinin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Bu tez kapsamında imalatı gerçekleştirilen kemer modellerinin yüksek sıcaklık testleri öncesindeki hasarsız durumları için gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri sonucunda her bir modelin laboratuvar koşullarındaki dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Daha sonra tüm kemer modelleri yüksek sıcaklık test fırını içerisinde ısıtılma tabi tutularak 600 °C sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Soğumaları beklenen kemer modelleri üzerinde

Çevresel titreşim testleri yapılmıştır. Tüm kemer modellerinin sıcaklık testi sonrası çevresel titreşim testleri Bölüm 2.2.5’de tarif edildiği gibi gerçekleştirilmiştir. Çevresel titreşim yöntemi kullanılarak her bir modelin sıcaklık testi sonrası durumuna ait dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Sıcaklık testi sonrası durum için gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait görseller şekil 2.33’de verilmiştir. Sıcaklık testleri öncesinde ve sonrasında yapılan ölçümler sırasında modeller üzerine yerleştirilen ivmeölçerlerin konum ve yönleri aynı düzendedir (şekil 2.22).



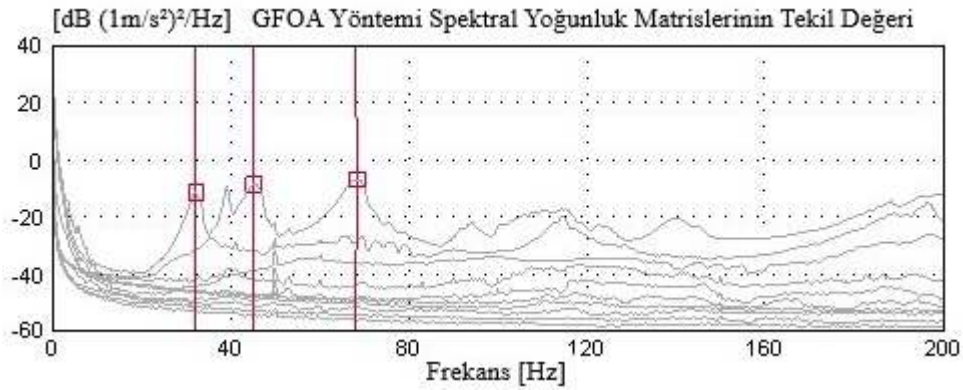
şekil 2.33. Sıcaklık testi sonrası gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri

Sıcaklık testleri sonrasında hasar gören tüm laboratuvar modelleri için gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerinden toplanan sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri her bir modele ait alt başlıklarda sunulmaktadır. Her biri yapısal bir moda karşılık gelen sinyallerin pik değerleri seçilerek hasarlı tüm modellerin elde edilen ilk üç mod şekline ait doğal frekanslar ilgili modele ait alt başlıklarda sunulmuştur.

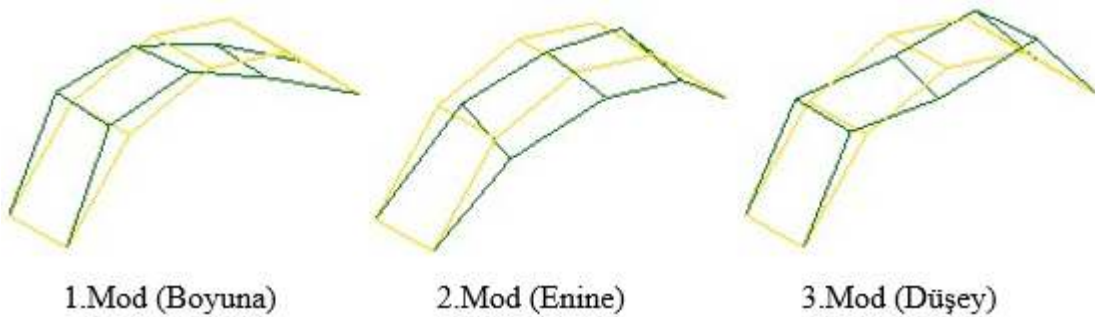
Sıcaklık testi öncesi durumlar için gerçekleştirilen ölçümlere benzer şekilde sıcaklık sonrası durumlar için gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri esnasında da ölçüm aralıkları 0-200 Hz, ölçüm süreleri ise 10 dakikadır

2.2.7.1. Model-R'nin Sıcaklık Testi Sonrası Dinamik Karakteristikleri

Sıcaklık testi sonrası Model-R'nin (açıklığı 100 cm, yüksekliği 50 cm, genişliği 20 cm ve kalınlığı 5 cm olan kemer modeli) dinamik karakteristiklerini elde etmek için çevresel titreşim testi yapılmıştır. Ölçümlerde toplanan sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri Şekil 2.34'te verilmektedir. Şekil 2.34'te görülen piklerin seçilmesiyle kemer modelinin doğal frekansları hesaplanır. Seçilen piklerin her biri yapısal moda karşılık gelmektedir. Model-R'nin sıcaklık testi sonrası dinamik karakteristikleri ilk üç mod için elde edilmiştir. Model-R için çevresel titreşim testlerinden elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.35'de verilmektedir.



Şekil 2.34. Model-R için elde edilen spektral yoğunluk matrisi



Şekil 2.35. Model-R için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Model-R için GFOA yöntemine göre ilk üç doğal frekans 33.26-68.10 Hz arasında elde edilmiş olup değerleri Tablo 2.12’de verilmektedir.

Tablo 2.12. Sıcaklık testi sonrası Model-R için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Mod Şekli
1	33.26	Boyuna
2	45.25	Enine
2	68.10	Düşey

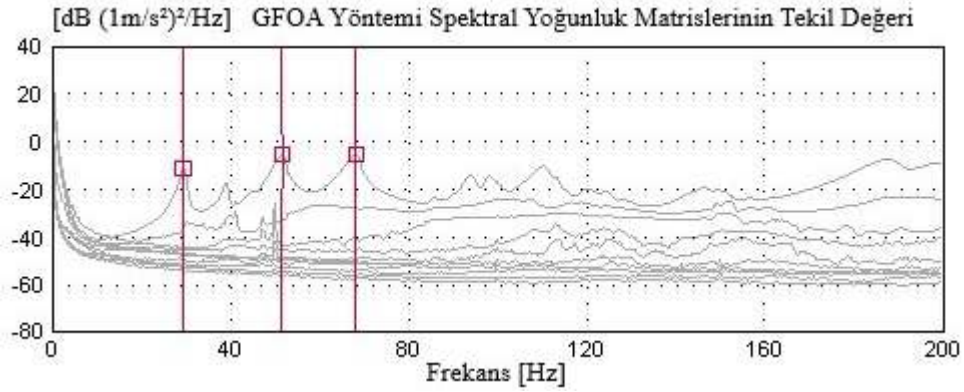
Yapılan deneysel modal analizler sonucunda Tablo 2.13’te Model-R’ye ait sıcaklık öncesi (hasarsız) ve sonrası (hasarlı) durumlar için elde edilen frekans değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Model-R’ye hasar verilmesi durumunda frekansların düştüğü Tablo 2.13’te açıkça görülmektedir. Model-R’nin sıcaklık öncesi ve sonrası frekans değerleri arasındaki en büyük fark %48.23 olarak elde edilmiştir.

Tablo 2.13. Model-R’ye ait sıcaklık testi öncesi ve sonrası durumlar için deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

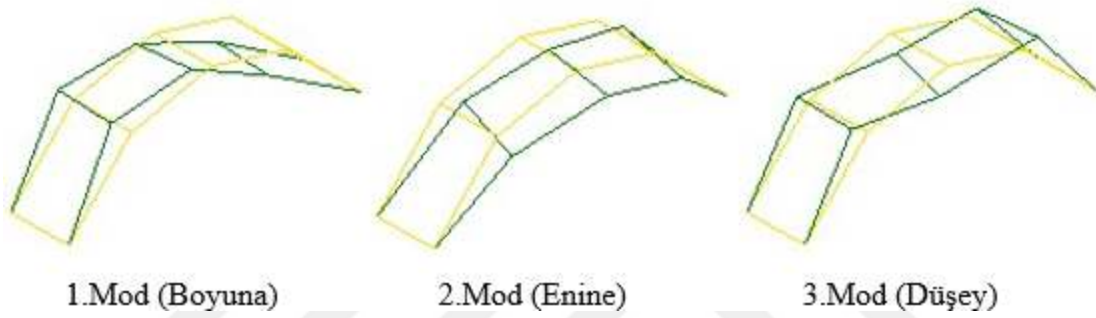
Mod	Frekans (Hz)		
	Sıcaklık Öncesi	Sıcaklık Sonrası	Fark (%)
1	60.46	33.26	44.99
2	87.40	45.25	48.23
2	127.5	68.10	46.59

2.2.7.2. Model-1’nin Sıcaklık Testi Sonrası Dinamik Karakteristikleri

Sıcaklık testi sonrası Model-1’in (açıklığı 100 cm, yüksekliği 50 cm, genişliği 30 cm ve kalınlığı 5 cm olan kemer modeli) dinamik karakteristiklerini elde etmek için çevresel titreşim testi yapılmıştır. Ölçümlerde toplanan sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri Şekil 2.36’da verilmektedir. Şekil 2.36’da görülen piklerin seçilmesiyle kemer modellinin doğal frekansları hesaplanır. Seçilen piklerin her biri yapısal moda karşılık gelmektedir. Model-1’in sıcaklık testi sonrası dinamik karakteristikleri ilk üç mod için elde edilmiştir. Model-1 için çevresel titreşim testlerinden elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.37’de verilmektedir.



Şekil 2.36. Model-1 için elde edilen spektral yoğunluk matrisi



Şekil 2.37. Model-1 için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Model-1 için GFOA yöntemine göre ilk üç doğal frekans 30.55-67.86 Hz arasında elde edilmiş olup değerleri Tablo 2.14’te verilmektedir.

Tablo 2.14. Sıcaklık testi sonrası Model-1 için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Mod Şekli
1	30.55	Boyuna
2	51.42	Enine
2	67.86	Düşey

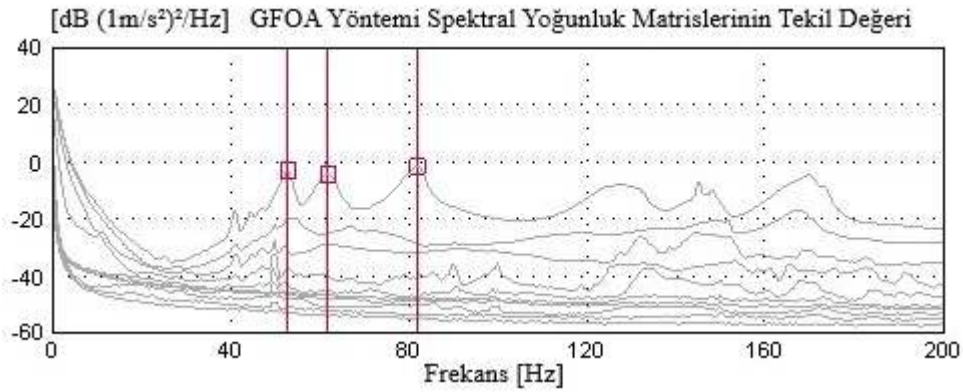
Yapılan deneysel modal analizler sonucunda Tablo 2.15’te Model-1’e ait sıcaklık öncesi (hasarsız) ve sıcaklık sonrası (hasarlı) durumlar için elde edilen frekans değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Model-1’e hasar verilmesi durumunda frekansların düştüğü Tablo 2.15’te açıkça görülmektedir. Model-1’in sıcaklık öncesi ve sonrası frekans değerleri arasındaki en büyük fark %55.34 olarak elde edilmiştir.

Tablo 2.15. Model-1'e ait sıcaklık testi öncesi ve sonrası durumlar için deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

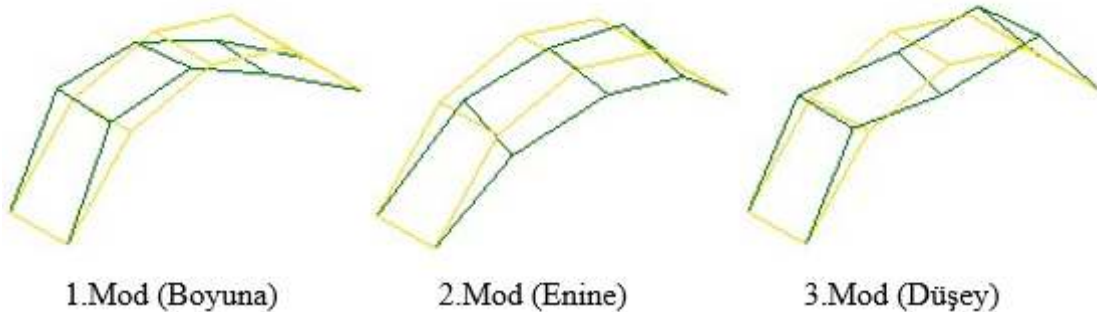
Mod	Frekans (Hz)		
	Sıcaklık Öncesi	Sıcaklık Sonrası	Fark (%)
1	68.40	30.55	55.34
2	100.7	51.42	48.94
2	127.3	67.86	46.69

2.2.7.3. Model-2'nin Sıcaklık Testi Sonrası Dinamik Karakteristikleri

Sıcaklık testi sonrası Model-2'nin (açıklığı 100 cm, yüksekliği 40 cm, genişliği 20 cm ve kalınlığı 5 cm olan kemer modeli) dinamik karakteristiklerini elde etmek için çevresel titreşim testi yapılmıştır. Ölçümlerde toplanan sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri Şekil 2.38'de verilmektedir. Şekil 2.38'de görülen piklerin seçilmesiyle kemer modelinin doğal frekansları hesaplanır. Seçilen piklerin her biri yapısal moda karşılık gelmektedir. Model-2'nin sıcaklık testi sonrası dinamik karakteristikleri ilk üç mod için elde edilmiştir. Model-2 için çevresel titreşim testlerinden elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.39'da verilmektedir.



Şekil 2.38. Model-2 için elde edilen spektral yoğunluk matrisi



Şekil 2.39. Model-2 için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Model-2 için GFOA yöntemine göre ilk üç doğal frekans 52.88-83.01 Hz arasında elde edilmiş olup değerleri Tablo 2.16’da verilmektedir.

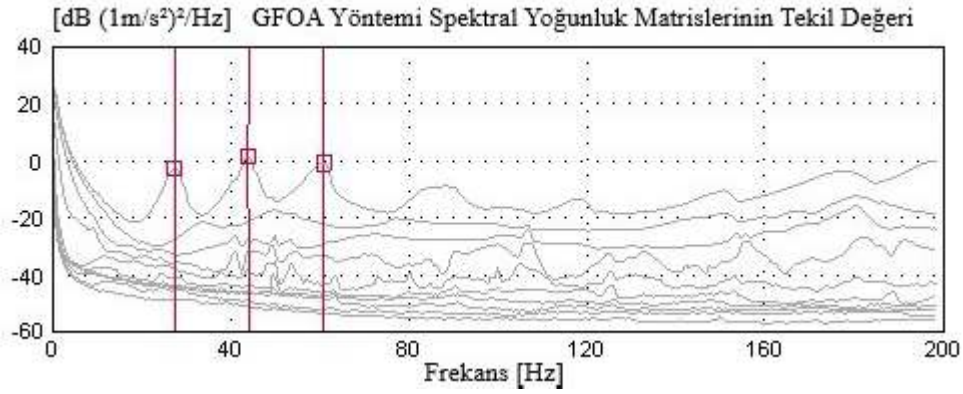
Tablo 2.16. Sıcaklık testi sonrası Model-2 için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Mod Şekli
1	52.88	Boyuna
2	61.65	Enine
2	83.01	Düşey

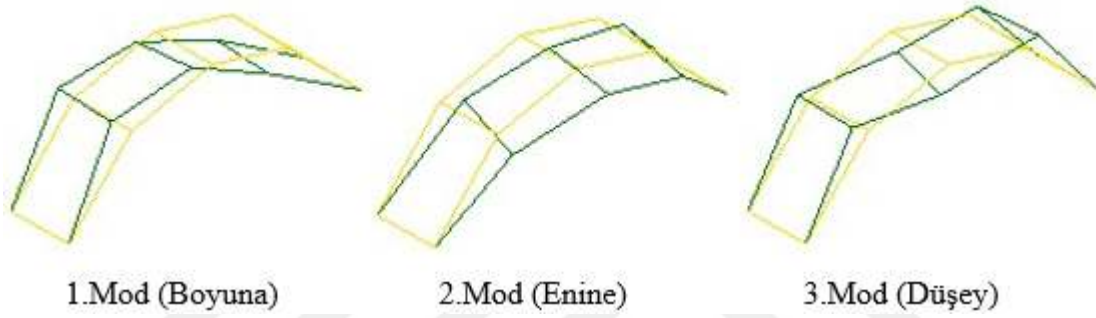
Yapılan çevresel titreşim testleri sonrasında Model-2’ye ait sıcaklık öncesi (hasarsız) durum için frekans değerleri elde edilemediğinden, sıcaklık öncesi (hasarsız) ve sonrası (hasarlı) durumlar için. frekans değerleri karşılaştırılamamıştır.

2.2.7.4. Model-3’ün Sıcaklık Testi Sonrası Dinamik Karakteristikleri

Sıcaklık testi sonrası Model-3’ün (açıklığı 120 cm, yüksekliği 50 cm, genişliği 20 cm ve kalınlığı 5 cm olan kemer modeli) dinamik karakteristiklerini elde etmek için çevresel titreşim testi yapılmıştır. Ölçümlerde toplanan sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri Şekil 2.40’ta verilmektedir. Şekil 2.40’ta görülen piklerin seçilmesiyle kemer modellinin doğal frekansları hesaplanır. Seçilen piklerin her biri yapısal moda karşılık gelmektedir. Model-3’ün sıcaklık testi sonrası dinamik karakteristikleri ilk üç mod için elde edilmiştir. Model-3 için çevresel titreşim testlerinden elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.41’de verilmektedir.



Şekil 2.40. Model-3 için elde edilen spektral yoğunluk matrisi



Şekil 2.41. Model-3 için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Model-3 için GFOA yöntemine göre ilk üç doğal frekans 29.59-60.71 Hz arasında elde edilmiş olup değerleri Tablo 2.17’de verilmektedir.

Tablo 2.17. Sıcaklık testi sonrası Model-3 için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Mod Şekli
1	29.59	Boyuna
2	44.16	Enine
2	60.71	Düşey

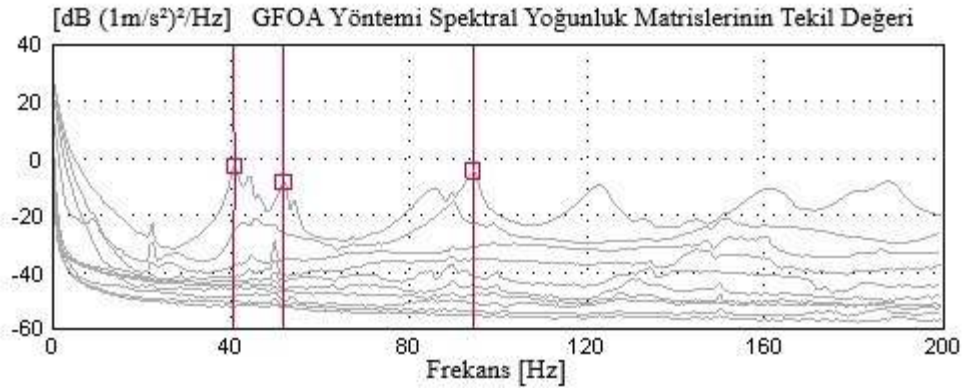
Yapılan deneysel modal analizler sonucunda Tablo 2.18’de Model-R’ye ait sıcaklık öncesi (hasarsız) ve sıcaklık sonrası (hasarlı) durumlar için elde edilen frekans değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Model-3’e hasar verilmesi durumunda frekansların düştüğü Tablo 2.18’de açıkça görülmektedir. Model-R’nin sıcaklık öncesi ve sonrası frekans değerleri arasındaki en büyük fark %48.29 olarak elde edilmiştir.

Tablo 2.18. Model-3'e ait sıcaklık testi öncesi ve sonrası durumlar için deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

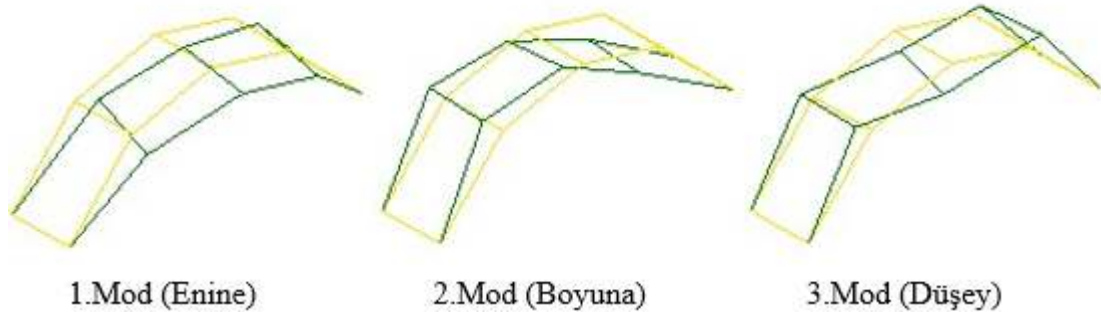
Mod	Frekans (Hz)		
	Sıcaklık Öncesi	Sıcaklık Sonrası	Fark (%)
1	57.22	29.59	48,29
2	75.72	44.16	41.68
2	111.4	60.71	45.50

2.2.7.5. Model-4'ün Sıcaklık Testi Sonrası Dinamik Karakteristikleri

Sıcaklık testi sonrası Model-4'ün (açıklığı 100 cm, yüksekliği 50 cm, genişliği 20 cm ve kalınlığı 10 cm olan kemer modeli) dinamik karakteristiklerini elde etmek için çevresel titreşim testi yapılmıştır. Ölçümlerde toplanan sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri Şekil 2.42'de verilmektedir. Şekil 2.42'de görülen piklerin seçilmesiyle kemer modelinin doğal frekansları hesaplanır. Seçilen piklerin her biri yapısal moda karşılık gelmektedir. Model-4'ün sıcaklık testi sonrası dinamik karakteristikleri ilk üç mod için elde edilmiştir. Model-4 için çevresel titreşim testlerinden elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.43'de verilmektedir.



Şekil 2.42. Model-4 için elde edilen spektral yoğunluk matrisi



Şekil 2.43. Model-4 için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Model-4 için GFOA yöntemine göre ilk üç doğal frekans 40.63-94.45 Hz arasında elde edilmiş olup değerleri Tablo 2.19’da verilmektedir.

Tablo 2.19. Sıcaklık testi sonrası Model-3 için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Mod Şekli
1	40.63	Enine
2	52.90	Boyuna
2	94.45	Düşey

Yapılan deneysel modal analizler sonucunda Tablo 2.20’de Model-4’e ait sıcaklık öncesi (hasarsız) ve sıcaklık sonrası (hasarlı) durumlar için elde edilen frekans değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Model-4’e hasar verilmesi durumunda frekansların düştüğü Tablo 2.20’de açıkça görülmektedir. Model-4’ün sıcaklık öncesi ve sonrası frekans değerleri arasındaki en büyük fark %53.19 olarak elde edilmiştir.

Tablo 2.20. Model-4’e ait sıcaklık testi öncesi ve sonrası durumlar için deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

Mod	Frekans (Hz)		
	Sıcaklık Öncesi	Sıcaklık Sonrası	Fark (%)
1	83.17	40.63	51.15
2	113.0	52.90	53.19
2	194.1	94.45	52.08

2.3. Sayısal Çalışmalar

Bu bölümde kemer modelleri üzerinde bir takım sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiş, kemer modellerin sıcaklık öncesi ve sonrası dinamik karakteristikleri sayısal olarak elde edilmiştir. Sayısal çalışmalarda Sonlu Eleman Yöntemi (SEY) kullanılmıştır.

Çalışmada öncelikle kemer modellerinin sıcaklık öncesi başlangıç sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve kemerlerin dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Kemer modellerinin sıcaklık öncesi durumu için deneysel ve sayısal olarak dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılarak aralarındaki farklılıklar incelenmiştir. İnceleme sonuçlarına göre başlangıç sonlu eleman modelleri deneysel sonuçlara göre iyileştirilmiştir.

Kemer modellerinin sıcaklık öncesi iyileştirilmiş sonlu eleman modelleri, sıcaklık sonrası başlangıç sonlu eleman modeli olarak kullanılmıştır. Sıcaklık sonrası kemer modelleri için deneysel ve sayısal olarak elde edilen dinamik karakteristikler birbiriyle karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlara göre sıcaklık sonrası başlangıç sonlu eleman modeli sıcaklık sonrası deneysel sonuçlara göre iyileştirilmiştir.

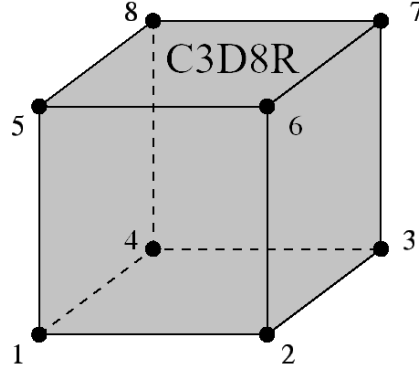
Yukarıda anlatılan problem aynı zamanda tez kapsamında, gerçekleştirilen çoklu analizler için de bir örnek niteliğindedir. Çoklu analizlerde kemer elemanlarının açıklığı, yüksekliği, genişliği ve kalınlığı gibi farklı kesit boyutları ve sıcaklık geçmişi gibi değişken parametreler kullanılmıştır. Çoklu analizlerin çözümlemelerden elde edilen sonuçlarla birlikte bir veri havuzu oluşturmuştur. Çalışmada, yangın etkisi nedeniyle meydana gelen rijitlik değişimlerinin pratik olarak belirlenmesi amacıyla, bu veri havuzundan yararlanılarak üretilen formülasyon, grafik/abaklar ve tablolar sunulmuştur.

Çalışmada dikkate alınan değişken parametreler ve gerçekleştirilen çoklu analizlerde kullanılan malzeme özellikleri ilerleyen bölümlerde detaylı olarak açıklanmaktadır.

2.3.1. Kemer Modellerinin Sıcaklık Öncesi Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması

Kemer modellerinin üç boyutlu sonlu eleman modelleri AUTOCAD (2017) programında oluşturulmuş ve ABAQUS programına aktarılmıştır. Kemer modellerinin hem temel hem de yığma kemer elemanlarının modellenmesinde, ABAQUS programının eleman kütüphanesinde bulunan ve gerilme şekil değiştirme analizlerinde kullanılan azaltılmış entegrasyona sahip C3D8R hacimsel elemanı kullanılmıştır. Şekil 2.43'te verilen C3D8R

elemanı sekiz düğüm noktasına ve her düğüm noktasında üç öteleme serbestlik derecesine sahiptir.



Şekil 2.44. Sonlu eleman analizlerinde kullanılan eleman modeli

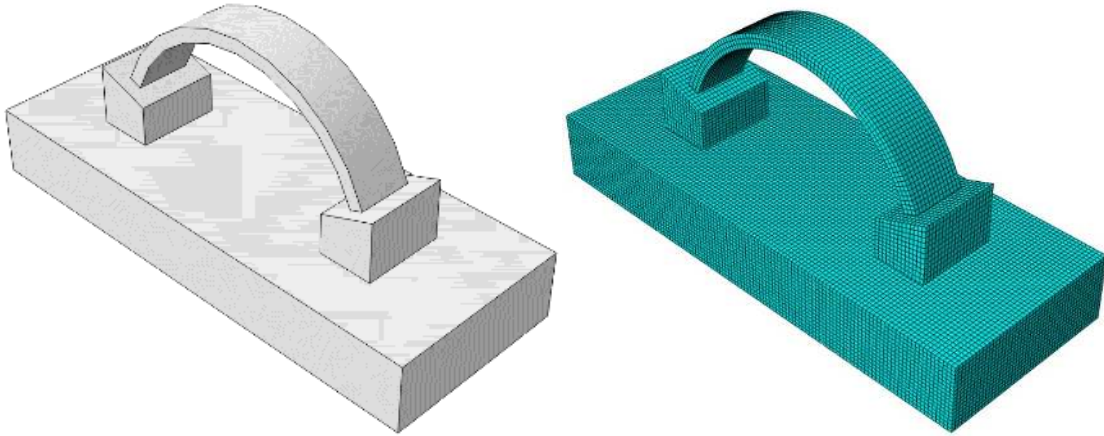
Sonlu eleman modelinin oluşturulmasında kemer modellerde kullanılan malzemelerin özelliklerinin programa tanıtılması gerekmektedir. Kemer modeller, beton temel ve ayaklar arasına inşa edilen yığma taş kemer elemanlardan oluşmaktadır. Modellerde kullanılan hedef beton dayanımı C45/55 MPa olarak önceden belirtilmiş ve beton dökümü esnasında alınan beton numuneleri üzerinde yapılan testler sonrası kullanılan betonun karakteristik küp basınç dayanımı 55.40 MPa olduğu bölüm 2.2.4.1’de verilmiştir. Bu beton sınıfına ait elastisite modülü TS 500’den 36 GPa olarak alınmıştır. Taş ve harcın birleşiminden oluşan yığma taş kemer elemanları ise makro modelleme yöntemi kullanılarak tek bir malzeme olarak modellenmiştir. Çeşitli çalışmalarda ve tasarım standartlarında, yığma malzemenin elastisite modülünü hesaplamak için farklı ampirik formüller kullanılmaktadır (Mustafaraj ve Yardım, 2017). Bu çalışma için yığma malzemenin elastisite modülü, taş ve harcın basınç dayanımına bağlı bu ampirik formüller kullanılarak 1.8-6.1 GPa arasında bulunmuş olup, 3 GPa olarak dikkate alınmıştır. Kemer elemanlarının başlangıç sonlu eleman modelinde dikkate alınan malzeme özellikleri Tablo 2.21’de verilmiştir.

Tablo 2.21. Kemer Modellerinin başlangıç sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri

Eleman	Malzeme Özellikleri		
	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)
Temel	36	0.2	2400
Kemer	3	0.2	2300

2.3.1.1. Model-R'nin Sıcaklık Öncesi Başlangıç Sonlu Eleman Modeli

Model-R'nin sonlu eleman modeli 70x180x25 cm temel üzerine ölçüleri önceki bölümlerde verilmiş kemer elemanların AUTOCAD programında modellenmesi ile elde edilmiş ve ABAQUS programına aktarılmıştır. Model-R'nin sonlu eleman modeli şekil 2.45'te verilmiştir.

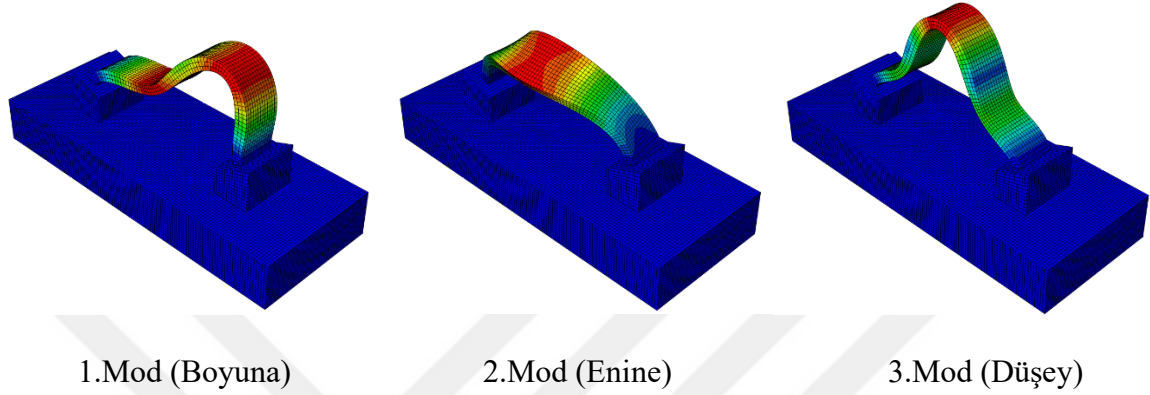


Şekil 2.45. Model-R'nin sonlu eleman modeli

Model-R'nin sonlu eleman modeline, Tablo 2.21'de verilen temel ve kemer elemanların ayrı ayrı malzeme özellikleri tanıtılmıştır. Daha sonra sonlu eleman yönteminin önemli bir aşaması olan sonlu eleman ağı seçilmiştir. Modeldeki tüm elemanlar; 15x15x15 mm'lik dikdörtgen prizma şeklinde 104876 tane sonlu elemene bölünmüştür. Sonlu eleman ağı seçilmiş sonlu eleman modeli Şekil 2.45'te verilmektedir. Sonlu eleman modelindeki sınır şartları olarak temelin alt bölgesindeki tüm hareket serbestlikleri tutulmuş ve temelin yere ankastre bağlandığı varsayılmıştır.

Model-R'nin ABAQUS programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizlerinden elde edilen ilk üç doğal frekans değerleri sırasıyla; 72.32Hz, 93.37Hz ve 142.0Hz'dir. Modal

analiz sonucu elde edilen ilk üç moda ait mod şekilleri Şekil 2.46’da verilmektedir. Şekil 2.46 incelendiğinde; ilk üç modun sırasıyla; boyuna, enine ve düşey ötelenme, şeklinde elde edildiği görülmektedir. Model-R için deneysel ve sayısal olarak elde edilen mod şekilleri, Şekil 2.24 ve 2.46’da görüldüğü gibi birbiriyle uyumludur.



Şekil 2.46. Model-R'nin sıcaklık öncesi sayısal mod şekilleri

Model-R’nin sıcaklık öncesi hali için deneysel ve sayısal olarak elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması Tablo 2.22’de verilmektedir. Model-R’nin deneysel ve sayısal mod şekillerinin birbiriyle uyumlu olduğu, fakat deneysel ve sayısal doğal frekans değerleri arasında farklılıkların olduğu Tablo 2.22’de görülmektedir. Deneysel doğal frekans değerleri sayısal doğal frekans değerlerinden daha küçük ve aralarındaki en büyük fark %19.62 elde edilmiştir.

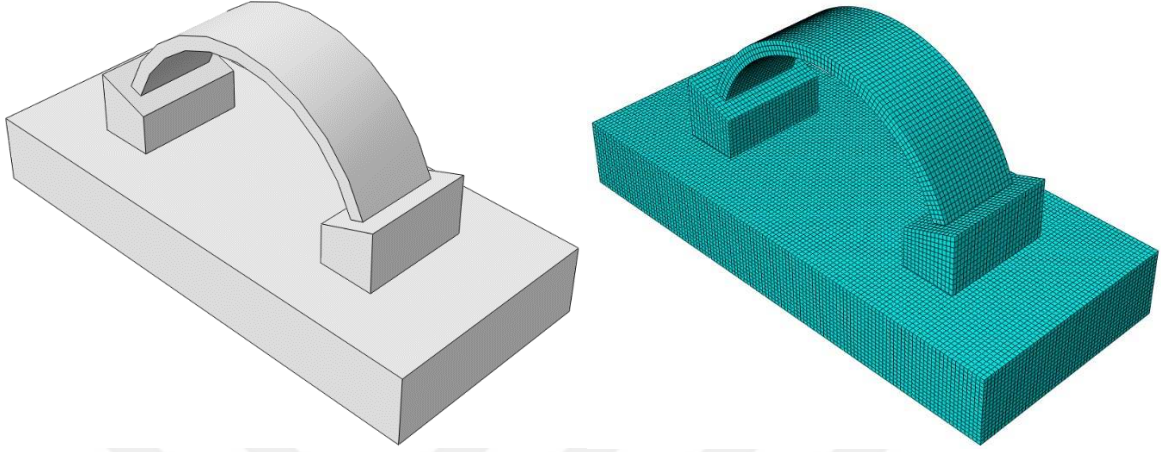
Tablo 2.22. Model-R'nin sıcaklık öncesi elde edilen deneysel ve sayısal dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması

Mod	Frekans (Hz)			Mod Şekli
	Sayısal (SEY)	Deneysel (GFOA)	Fark (%)	
1	72.32	60.46	19.62	Boyuna
2	93.37	87.40	6.830	Enine
3	127.5	127.5	11.37	Düşey

2.3.1.2. Model-1’in Sıcaklık Öncesi Başlangıç Sonlu Eleman Modeli

Model-1’nin sonlu eleman modeli AUTOCAD programında 80x180x25 cm temel üzerine ölçüleri önceki bölümlerde verilmiş kemer elemanların modellenmesi ile elde

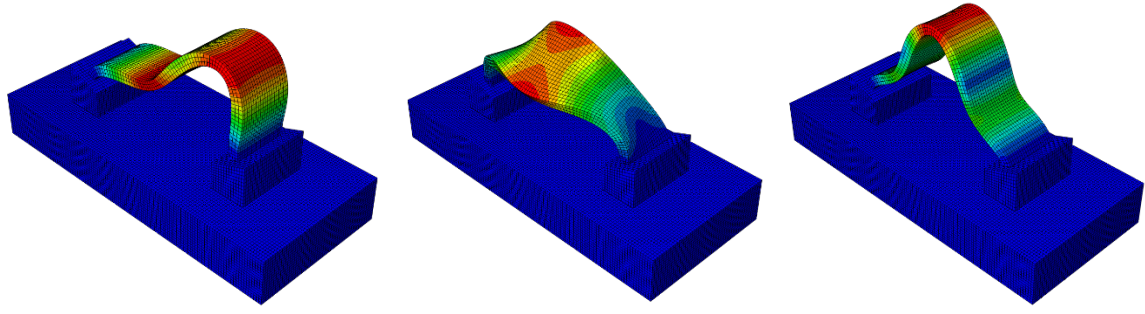
edilmiş ve ABAQUS programına aktarılmıştır. Model-1'in sonlu eleman modeli şekil 2.48'da verilmiştir.



Şekil 2.47. Model-1'in sonlu eleman modeli

Model-1'in sonlu eleman modeline, Tablo 2.21'de verilen temel ve kemer elemanların ayrı ayrı malzeme özellikleri tanıtılmıştır. Daha sonra sonlu eleman yönteminin önemli bir aşaması olan sonlu eleman ağı seçilmiştir. Modeldeki tüm elemanlar; 15x15x15 mm'lik dikdörtgen prizma şeklinde 120882 tane sonlu elemana bölünmüştür. Sonlu eleman ağı seçilmiş sonlu eleman modeli Şekil 2.48'de verilmektedir. Sonlu eleman modelindeki sınır şartları olarak temelin alt bölgesindeki tüm hareket serbestlikleri tutulmuş ve temelin yere ankastre bağlandığı varsayılmıştır.

Model-1'in ABAQUS programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizlerinden elde edilen ilk üç doğal frekans değerleri sırasıyla; 72.50Hz, 116.6Hz ve 142.2Hz'dir. Modal analiz sonucu elde edilen ilk üç moda ait mod şekilleri Şekil 2.49'da verilmektedir. Şekil 2.49 incelendiğinde; ilk üç modun sırasıyla; boyuna, enine ve düşey ötelenme, şeklinde elde edildiği görülmektedir. Model-1 için deneysel ve sayısal olarak elde edilen mod şekilleri, Şekil 2.26 ve 2.49'da görüldüğü gibi birbirleriyle uyumludur.



1.Mod (Boyuna)

2.Mod (Enine)

3.Mod (Düşey)

Şekil 2.48. Model-1'in sıcaklık öncesi sayısal mod şekilleri

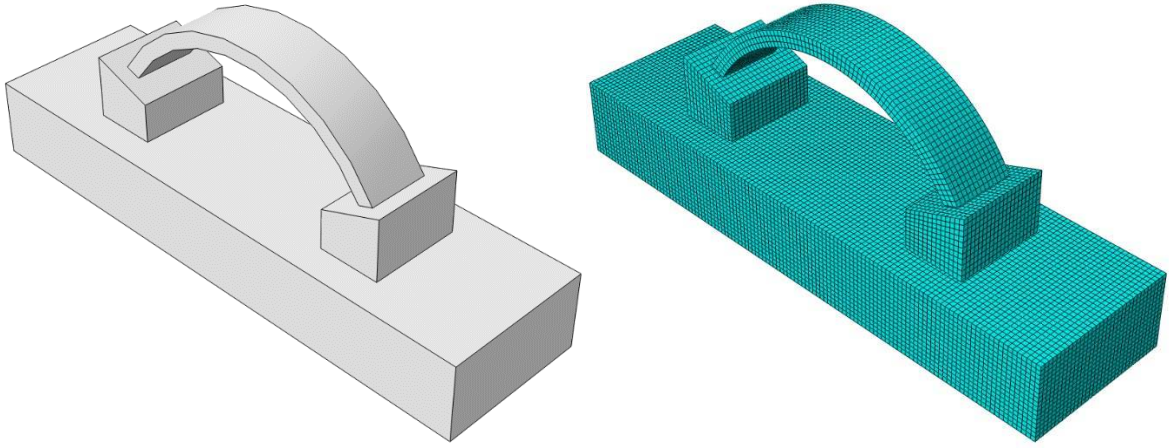
Model-1'in sıcaklık öncesi hali için deneysel ve sayısal olarak elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması Tablo 2.23'te verilmektedir. Model-1'in deneysel ve sayısal mod şekillerinin birbiriyle uyumlu olduğu, fakat deneysel ve sayısal doğal frekans değerleri arasında farklılıkların olduğu Tablo 2.23'de görülmektedir. Deneysel doğal frekans değerleri sayısal doğal frekans değerlerinden daha küçük ve aralarındaki en büyük fark %15.75 olarak elde edilmiştir.

Tablo 2.23. Model-1'in sıcaklık öncesi durumu için elde edilen deneysel ve sayısal dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması

Mod	Frekans (Hz)			Mod Şekli
	Sayısal (SEY)	Deneysel (GFOA)	Fark (%)	
1	72.50	68.40	5.99	Boyuna
2	116.6	100.7	15.76	Enine
3	142.2	127.3	11.73	Düşey

2.3.1.3. Model-2'nin Sıcaklık Öncesi Başlangıç Sonlu Eleman Modeli

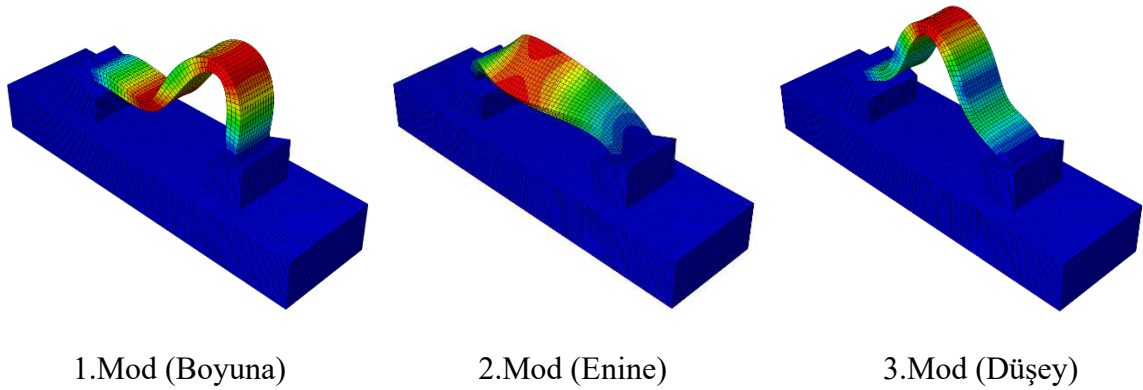
Model-2'nin sonlu eleman modeli AUTOCAD programında 50x180x25 cm temel üzerine ölçüleri önceki bölümlerde verilmiş kemer elemanların modellenmesi ile elde edilmiş ve ABAQUS programına aktarılmıştır. Model-2'in sonlu eleman modeli şekil 2.50'de verilmiştir.



Şekil 2.49. Model-2'nin sonlu eleman modeli

Model-2'nin sonlu eleman modeline, Tablo 2.21'de verilen temel ve kemer elemanların ayrı ayrı malzeme özellikleri tanıtılmıştır ve sonlu eleman ağı seçilmiştir. Modeldeki tüm elemanlar; 15x15x15 mm'lik dikdörtgen prizma şeklinde 77581 tane sonlu elemana bölünmüştür. Sonlu eleman ağı seçilmiş sonlu eleman modeli Şekil 2.50'de verilmiştir. Sonlu eleman modelindeki sınır şartları olarak temelin alt bölgesindeki tüm hareket serbestlikleri tutulmuş ve temelin yere ankastre bağlandığı varsayılmıştır.

Model-2'nin ABAQUS programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizlerinden elde edilen ilk üç doğal frekans değerleri sırasıyla; 104.0Hz, 127.9Hz ve 128.7Hz'dir. Modal analiz sonucu elde edilen ilk üç moda ait mod şekilleri Şekil 2.51'de verilmektedir. Şekil 2.51 incelendiğinde; ilk üç modun sırasıyla; boyuna, enine ve düşey ötelenme, şeklinde elde edildiği görülmektedir. Model-2'nin sıcaklık öncesi hali için sayısal olarak elde edilen doğal frekans değerleri Tablo 2.24'te verilmektedir.



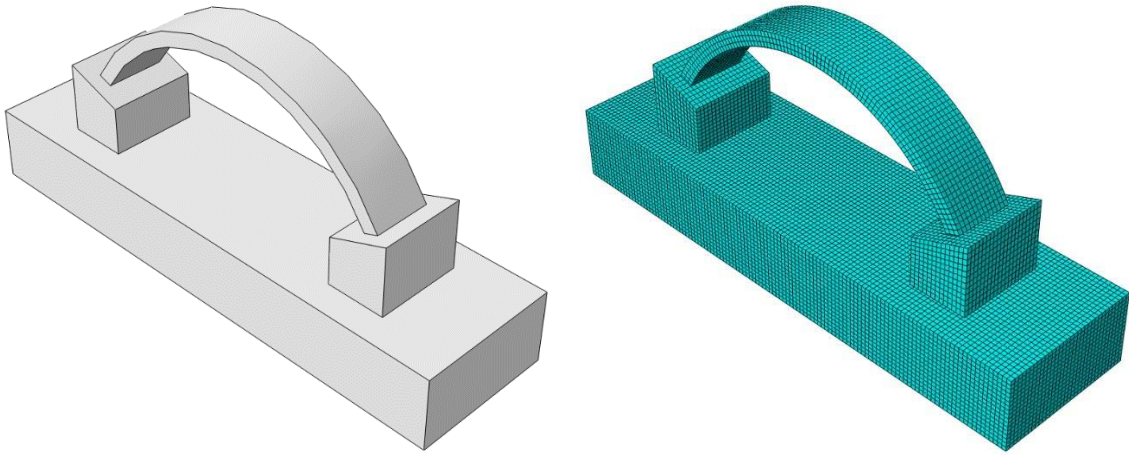
Şekil 2.50. Model-2'nin sıcaklık öncesi sayısal mod şekilleri

Tablo 2.24. Model-2'nin sıcaklık öncesi durumu için elde edilen sayısal dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Mod Şekli
1	104.0	Boyuna
2	127.9	Enine
2	187.0	Düşey

2.3.1.4. Model-3'ün Sıcaklık Öncesi Başlangıç Sonlu Eleman Modeli

Model-3'ün sonlu eleman modeli AUTOCAD programında 50x180x25 cm temel üzerine ölçüleri önceki bölümlerde verilmiş kemer elemanların modellenmesi ile elde edilmiş ve ABAQUS programına aktarılmıştır. Model-3'ün sonlu eleman modeli şekil 2.52'de verilmiştir.

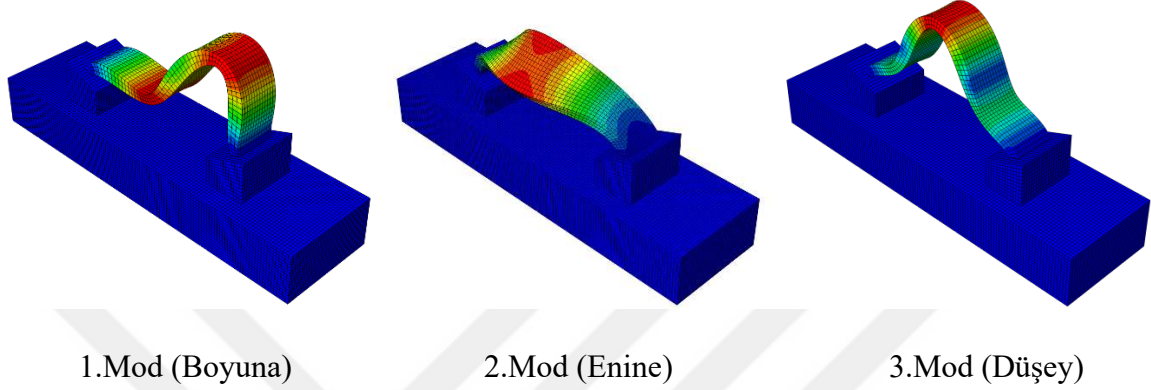


Şekil 2.51. Model-3'ün sonlu eleman modeli

Model-3'in sonlu eleman modeline, Tablo 2.21'de verilen temel ve kemer elemanların ayrı ayrı malzeme özellikleri tanıtılmış ve sonlu eleman ağı seçilmiştir. Modeldeki tüm elemanlar, 15x15x15 mm'lik dikdörtgen prizma şeklinde 77031 tane sonlu elemana bölünmüştür. Sonlu eleman ağı seçilmiş sonlu eleman modeli Şekil 2.52'de verilmektedir. Sonlu eleman modelindeki sınır şartları olarak temelin alt bölgesindeki tüm hareket serbestlikleri tutulmuş ve temelin yere ankastre bağlandığı varsayılmıştır.

Model-3'ün ABAQUS programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizlerinden elde edilen ilk üç doğal frekans değerleri sırasıyla; 69.59Hz, 88.59Hz ve 131.1Hz'dir. Modal

analiz sonucu elde edilen ilk üç moda ait mod şekilleri Şekil 2.53'te verilmektedir. Şekil 2.53 incelendiğinde; ilk üç modun sırasıyla; boyuna, enine ve düşey ötelenme, şeklinde elde edildiği görülmektedir. Model-3 için deneysel ve sayısal olarak elde edilen mod şekilleri, Şekil 2.28 ve 2.49'da görüldüğü gibi birbiriyle uyumludur.



Şekil 2.52. Model-3'ün sıcaklık öncesi sayısal mod şekilleri

Tablo 2.25. Model-3'üne sıcaklık öncesi durumu için elde edilen deneysel ve sayısal dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması

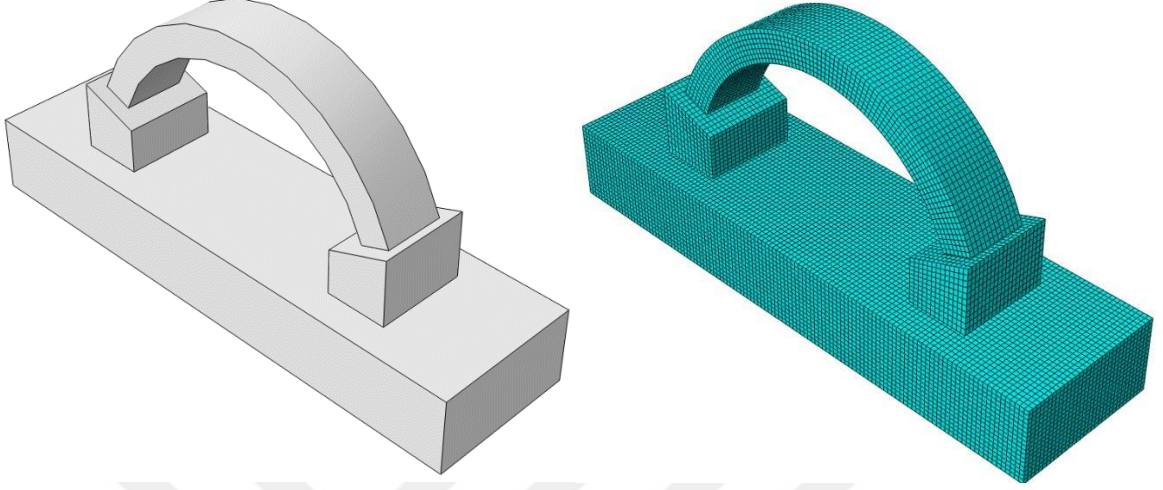
Mod	Frekans (Hz)			Mod Şekli
	Sayısal (SEY)	Deneysel (GFOA)	Fark (%)	
1	69.59	57.22	21.62	Boyuna
2	88.59	75.72	17.00	Enine
3	131.1	111.4	17.00	Düşey

Model-3'ün sıcaklık öncesi hali için deneysel ve sayısal olarak elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması Tablo 2.25'te verilmektedir. Model-3'in deneysel ve sayısal mod şekillerinin birbiriyle uyumlu olduğu, fakat deneysel ve sayısal doğal frekans değerleri arasında farklılıkların olduğu Tablo 2.25'te görülmektedir. Deneysel doğal frekans değerleri sayısal doğal frekans değerlerinden daha büyük ve aralarındaki en büyük fark %21.62 olarak elde edilmiştir.

2.3.1.5. Model-4'ün Sıcaklık Öncesi Başlangıç Sonlu Eleman Modeli

Model-4'ün sonlu eleman modeli AUTOCAD programında 50x180x25 cm temel üzerine ölçüleri önceki bölümlerde verilmiş kemer elemanların modellenmesi ile elde

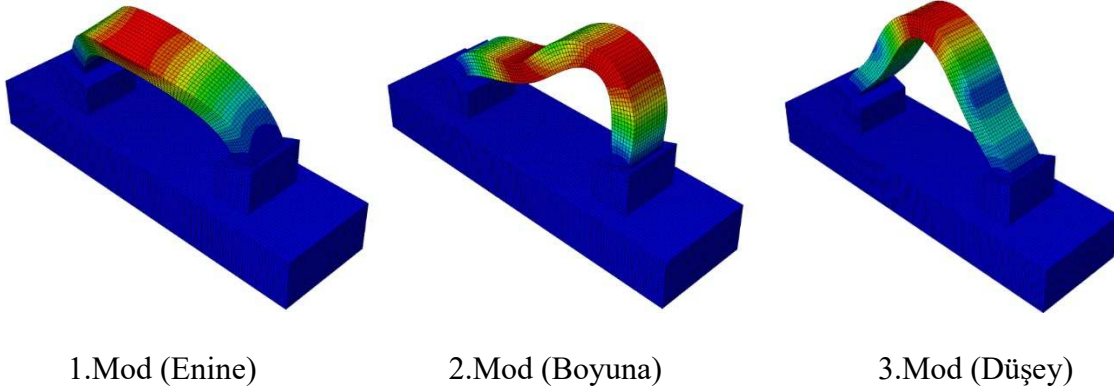
edilmiş ve ABAQUS programına aktarılmıştır. Model-4'ün sonlu eleman modeli şekil 2.54'te verilmiştir.



Şekil 2.53. Model-4'ün sonlu eleman modeli

Model-4'in sonlu eleman modeline, Tablo 2.21'de verilen temel ve kemer elemanların ayrı ayrı malzeme özellikleri tanıtılmış ve sonlu eleman ağı seçilmiştir. Modeldeki tüm elemanlar; 15x15x15 mm'lik dikdörtgen prizma şeklinde 81139 tane sonlu elemana bölünmüştür. Sonlu eleman ağı seçilmiş sonlu eleman modeli Şekil 2.54'te verilmektedir. Sonlu eleman modelindeki sınır şartları olarak temelin alt bölgesindeki tüm hareket serbestlikleri tutulmuş ve temelin yere ankastre bağlandığı varsayılmıştır.

Model-4'ün ABAQUS programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizlerinden elde edilen ilk üç doğal frekans değerleri sırasıyla; 92.76Hz, 126.6Hz ve 212.1Hz'dir. Modal analiz sonucu elde edilen ilk üç moda ait mod şekilleri Şekil 2.55'te verilmektedir. Şekil 2.55 incelendiğinde; ilk üç modun sırasıyla; enine, boyuna ve düşey ötelenme, şeklinde elde edildiği görülmektedir. Model-4 için deneysel ve sayısal olarak elde edilen mod şekilleri, Şekil 2.30 ve 2.55'te görüldüğü gibi birbiriyle uyumludur.



Şekil 2.54. Model-4'ün sıcaklık öncesi sayısal mod şekilleri

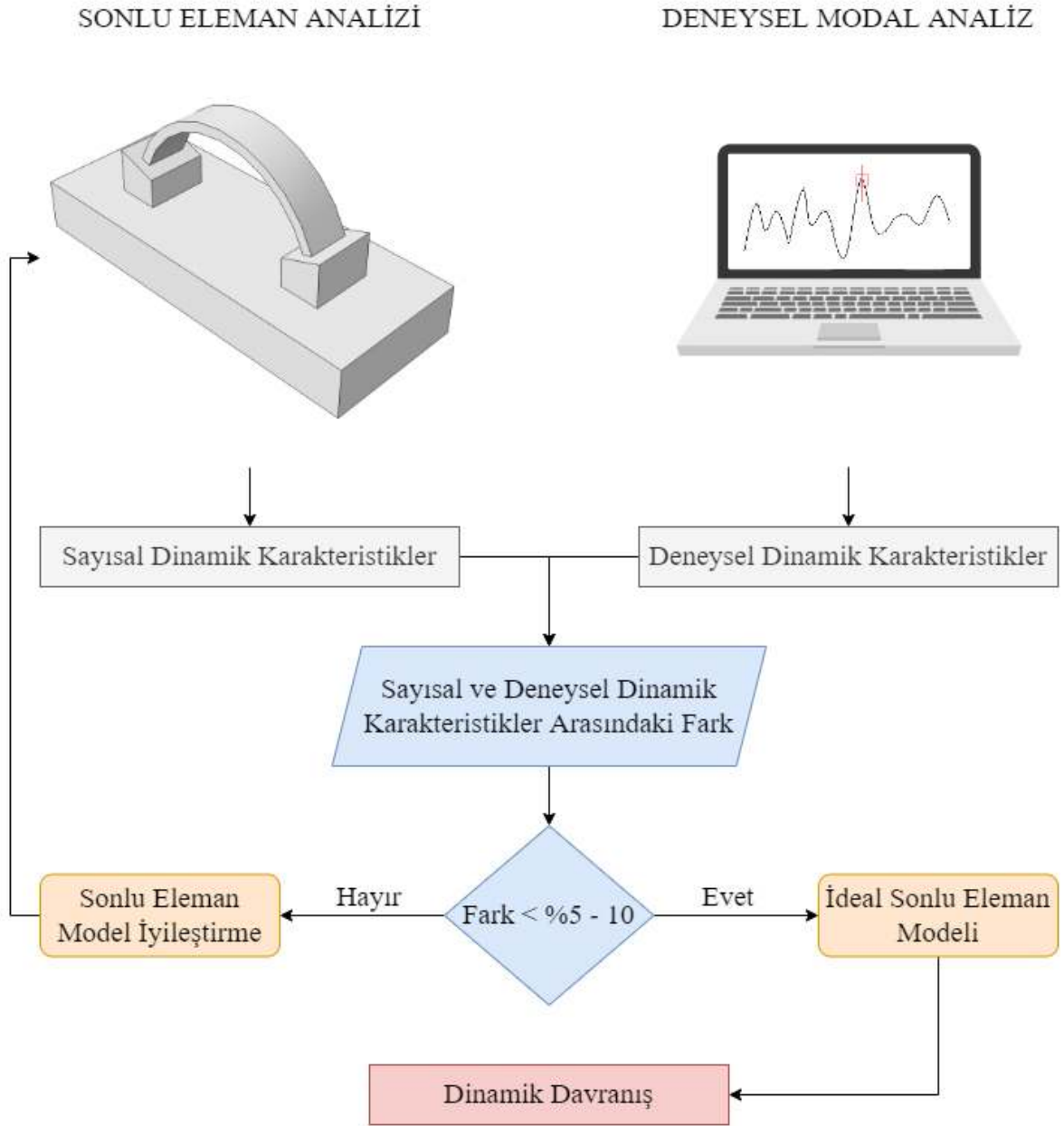
Model-4'ün sıcaklık öncesi hali için deneysel ve sayısal olarak elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması Tablo 2.26'da verilmektedir. Model-4'ün deneysel ve sayısal mod şekillerinin birbiriyle uyumlu olduğu, fakat deneysel ve sayısal doğal frekans değerleri arasında farklılıkların olduğu Tablo 2.26'da görülmektedir. Deneysel doğal frekans değerleri sayısal doğal frekans değerlerinden daha büyük ve aralarındaki en büyük fark %12.04 olarak elde edilmiştir

Tablo 2.26. Model-4'ün sıcaklık öncesi durumu için elde edilen deneysel ve sayısal dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması

Mod	Frekans (Hz)			Mod Şekli
	Sayısal (SEY)	Deneysel (GFOA)	Fark (%)	
1	92.76	83.17	11.53	Enine
2	126.6	113.0	12.04	Boyuna
3	212.1	197.1	7.610	Düşey

2.3.2. Kemer Modellerinin Sıcaklık Öncesi Sonlu Eleman Modellerinin İyileştirilmesi

Bölüm 2.3.1 incelendiğinde kemer modellerinin deneysel ve sayısal mod şekillerinin birbiriyle uyumlu olduğu, fakat deneysel ve sayısal doğal frekans değerleri arasında farklılıkların olduğu görülmektedir. Kemer modellerinin deneysel doğal frekans değerleri sayısal doğal frekans değerlerinden daha küçük ve aralarındaki en büyük fark %21.62'dir. Bu farklar başlangıç sonlu eleman modelinde bazı belirsiz parametre kabullerinden meydana gelebilmektedir. Doğal frekanslar arasındaki farkların giderilmesi için kemer modellerinin başlangıç sonlu eleman modelleri deneysel sonuçlara göre iyileştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.55. Sonlu eleman modeli iyileştirme akış şeması

Sonlu eleman modelinde iyileştirme; analizlerde kullanılan malzeme özellikleri, kesit özellikleri veya sınır şartları gibi doğruluğu tam olarak bilinmeyen parametrelerin kabul edilebilir sınırlar içerisinde değiştirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Sonlu eleman iyileştirilmesinde, doğruluğu büyük oranda bilinen parametrelerin belirsiz parametre olarak seçilmemesine dikkat edilmelidir. Diğer dikkat edilmesi gereken bir adım ise, deneysel ve sayısal doğal frekanslar arasındaki kabul edilebilir farkın belirlenmesidir. Sayısal dinamik karakteristiklerin yapının mevcut durumunu yansıttığı kabulü için bu farkın en fazla %5-10

değerlerine yakın olması gerekmektedir. Bu farkın daha büyük olması durumunda sayısal dinamik karakteristiklerin yapının mevcut durumunu yansıtmadığı kabul edilmekte ve yapının sonlu eleman modelinin deneysel ölçüm verilerine göre iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki kabul edilebilir fark %5-10 olarak seçilmiştir (Şekil 2.55).

Yapıların kütlesi ve rijitliği, yapıların dinamik karakteristiklerini etkileyen önemli parametrelerdir. Bu yüzden çalışmada kütle ve rijitlikle alakalı olan; malzeme özellikleri, kesit özellikleri ve sınır şartları olası iyileştirme parametreleri olarak dikkate alınmıştır. Bu parametrelerden kesit özellikleri ve sınır şartlarının kesinliği diğer parametreye oranla daha fazla olduğu için iyileştirme parametresi olarak malzeme özellikleri kullanılmıştır. Malzeme özelliklerinden (Elastisite modülü, yoğunluk ve poisson oranı) değişken parametre olarak yığma kemerlerin elastisite modülü seçilmiştir.

Yığma kemer modellerde, kemer elemanlara tanımlanan elastisite modülü değeri değiştirilerek kemer modellerin sonlu eleman modelleri iyileştirilmiştir. Sonlu eleman modellerinde iyileştirme deneysel ve sayısal doğal frekans değerleri arasındaki farkın %8'den daha az olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle elastisite modülü %23.33 oranında azaltılarak 2.3 GPa olarak elde edilmiş ve kemer modellerinin sonlu eleman modelleri iyileştirilmiştir. Kemer modellerinin iyileştirilmiş sonlu eleman modellerinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.27'de verilmektedir.

Tablo 2.27. Kemer Modellerinin iyileştirilmiş sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri

Eleman	Malzeme Özellikleri		
	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)
Temel	36	0.2	2400
Kemer	2.3	0.2	2300

Kemer modellerinin oda sıcaklığındaki sayısal ve deneysel doğal frekanslarının iyileştirme öncesi ve sonrası değerleri Tablo 2.28'de verilmektedir. Tablo 2.28'de görüldüğü gibi sonlu eleman model iyileştirmeyle sayısal ve deneysel doğal frekanslar arasındaki farklar %8'in altına düşmüştür. Tabloda sayısal ve deneysel olarak elde edilen doğal frekanslar arasındaki en büyük farkın %21.62'den %6.97'ye düştüğü görülmektedir.

Tablo 2.28. Kemer modellerinin sıcaklık öncesi deneysel ve sayısal dinamik karakteristikleri

Mod	Frekans (Hz)				İyileştirme Sonrası Sayısal	Mod Şekli
	İyileştirme Öncesi Sayısal	Fark (%)	Deneysel	Fark (%)		
Model-R						
1	72.32	19.62	60.46	4.95	63.45	Boyuna
2	93.37	6.830	87.40	-6.09	82.08	Enine
3	142.0	11.37	127.2	-2.27	124.6	Düşey
Model-1						
1	72.50	5.990	68.40	-6.97	63.63	Boyuna
2	116.6	15.76	100.7	1.79	102.5	Enine
3	142.2	11.73	127.3	-1.89	124.9	Düşey
Model-2						
1	104.0	-	-	-	91.23	Boyuna
2	127.9	-	-	-	112.5	Enine
3	128.7	-	-	-	164.3	Düşey
Model-3						
1	69.59	21.62	57.22	6.68	61.04	Boyuna
2	88.59	17.00	75.72	2.89	77.91	Enine
3	131.1	17.66	111.4	3.32	115.1	Düşey
Model-4						
1	92.76	11.53	83.17	-1.60	81.84	Enine
2	126.6	12.04	113.0	-1.15	111.70	Boyuna
3	212.1	7.610	197.1	-4.82	187.60	Düşey

2.3.3. Kemer Modellerinin Sıcaklık Sonrası Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması ve İyileştirilmesi

Kemer modellerinin dinamik karakteristiklerini sayısal olarak elde etmek için öncelikle modeller üzerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ısı transfer analizleri yapılmış ardından ısı transfer analizlerinin sonuçları kullanılarak modal analizler yapılmıştır.

Yüksel sıcaklık fırınında 600 °C sıcaklığa maruz kalan kemer modellerinin sayısal dinamik karakteristiklerinin elde edilebilmesi için, bölüm 2.3.1’de kemer modellerinin sıcaklık öncesi durum için AUTOCAD programında oluşturulan ve ABQUS programına aktarılan sonlu eleman modelleri kullanılmıştır. Kemer modellerinin sıcaklık öncesi ve sonrası durum için oluşturulan sonlu eleman modellerinin, geometrik özellikleri, sınır şartları ve sonlu eleman ağı aynı olup sadece malzeme özellikleri değiştirilmiştir. Temel ve kemer ayaklarında kullanılan betonun 600 °C’deki yoğunluğu EN 1992-1-2’de (2004) verilen denklemler yardımıyla 2238 kg/m³ olarak hesaplanmış; elastisite modülü ise Batami

vd. (2010) tarafından önerilen elastisite modülünün sıcaklıkla değişimini dikkate alan denklem kullanılarak 8.6 GPa olarak hesaplanmıştır. Kemer elemanlarda yoğunluk değeri, bölüm 2.2.4.4'de 600 °C sıcaklığa maruz bırakılmış duvar numulerinin hesaplanan yoğunluk değeri 2099 kg/m³ kullanılmıştır. Kemer elemanların elastisite modülü olarak ise sıcaklık öncesi iyileştirilmiş sonlu eleman modellerinde kullanılan elastisite modülü kullanılmıştır. Kemer modellerinin sıcaklık sonrası başlangıç sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.29'da verilmektedir.

Tablo 2.29. Kemer Modellerinin başlangıç sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri

Eleman	Malzeme Özellikleri		
	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)
Temel	8.6	0.2	2238
Kemer	2.3	0.2	2099

Kemer modellerinin sıcaklık öncesi iyileştirilmiş sonlu eleman modellerinin malzeme özellikleri değiştirilerek, sıcaklık sonrası başlangıç sonlu eleman modeli oluşturulmuştur ve kemer modellerinin sıcaklık sonrası dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Sıcaklık sonrası kemer modelleri için deneysel ve sayısal olarak elde edilen dinamik karakteristikler Tablo 2.30'da birbiriyle karşılaştırılmıştır.

Model-R, Model-1, Model-2 ve Model-3'ün ABAQUS programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizlerinden elde edilen ilk üç mod şekli sırasıyla; boyuna, enine ve düşey ötelenmedir (Şekil 2.46, Şekil 2.48, Şekil 2.50 ve Şekil 2.52). Model-4'ün modal analizlerden elde edilen ilk üç mod şekli ise sırasıyla; enine, boyuna ve düşey ötelenmedir (Şekil 2.54). Sıcaklık sonrası kemer modelleri için elde edilen sayısal mod şekilleri, bölüm 2.2.7'de elde edilen deneysel mod şekilleri ile uyumludur. Fakat kemer modellerinin deneysel ve sayısal doğal frekanslarında farklılıklar vardır. Bu yüzden kemer modellerinin sıcaklık sonrası başlangıç sonlu eleman modelleri bölüm 2.2.7'de elde edilen deneysel sonuçlara göre iyileştirilmiştir.

Tablo 2.30. Kemer modellerinin sıcaklık sonrası deneysel ve sayısal dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması

Mod	Frekans (Hz)			Mod Şekli
	Sayısal (SEY)	Fark (%)	Deneysel (GFOA)	
Model-R				
1	63.45	90.77	33.26	Boyuna
2	82.08	81.39	45.24	Enine
3	124.6	82.97	68.10	Düşey
Model-1				
1	63.63	108.3	30.55	Boyuna
2	102.5	99.34	51.42	Enine
3	124.9	84.06	67.86	Düşey
Model-2				
1	104.0	96.67	52.88	Boyuna
2	127.9	107.5	61.65	Enine
3	187.0	125.3	83.01	Düşey
Model-3				
1	61.04	106.3	29.59	Boyuna
2	77.91	76.43	44.16	Enine
3	115.1	89.59	60.71	Düşey
Model-4				
1	81.84	101.4	40.63	Enine
2	111.7	111.2	52.90	Boyuna
3	187.6	98.62	94.45	Düşey

Sonlu eleman model iyileştirme bölüm 2.3.2’de açıklanmış ve sonlu eleman model iyileştirme akış şeması Şekil 2.47’de verilmiştir. Sıcaklık öncesi sonlu eleman modeli iyileştirmede dikkate alınan parametreler, sıcaklık sonrası sonlu eleman modeli iyileştirmede de dikkate alınmış ve iyileştirme parametresi olarak malzeme özellikleri kullanılmıştır. Malzeme özelliklerinden (Elastisite modülü, yoğunluk ve poisson oranı) değişken parametre olarak yığma kemerlerin elastisite modülü seçilmiştir.

600 °C sıcaklığa maruz kalan kemer modellerde, kemer elemanlara tanımlanan elastisite modülü değeri değiştirilerek kemer modellerin sıcaklık sonrası sonlu eleman modelleri iyileştirilmiştir. Sonlu eleman modellerinde iyileştirme, deneysel ve sayısal doğal frekans değerleri arasındaki farkın %8’den daha az olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle kemer elemanlara tanımlanan elastisite modülü %70 oranında azaltılarak 0,69 GPa olarak elde edilmiş ve kemer modellerinin sonlu eleman modelleri iyileştirilmiştir. Çalışma

kapsamında bölüm 2.2.4.4’de laboratuvar ortamında üretilen farklı sıcaklıklara maruz bırakılmış duvar numuların üzerinde basınç testi yapılmış ve duvar numularının basınç dayanımlarında düşüşler olmuştur. Basınç dayanımlarında ki bu düşüşler 600 °C ve 800 °C’de sırasıyla, yaklaşık %65-70 ve %75-80’dir.Yapılan bazı çalışmalarda ve yönetmeliklerde basınç dayanımı ile elastisite modülü arasında direk ilişki kurulmakta ve elastisite modülü basınç dayanımının belirli bir katı olarak hesaplanabilmektedir. Bu sebeple duvar numunelerindeki bu düşüşler elastisite modülündeki düşüşlerle ilişkilendirilebilir. Bu sebepten dolayı elastisite modülündeki düşüş kabul edilebilir bir değerdir. Kemer modellerinin iyileştirilmiş sonlu eleman modellerinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.27’de verilmektedir.

Tablo 2.31. Kemer Modellerinin sıcaklık sonrası iyileştirilmiş sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri

Eleman	Malzeme Özellikleri		
	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)
Temel	8.6	0.2	2238
Kemer	0,69	0.2	2099

600 °C sıcaklığa maruz kalan kemer modellerinin deneysel olarak elde edilen doğal frekans değerleri ile sonlu eleman iyileştirme öncesi ve sonrası sayısal olarak elde edilen doğal frekans değerleri Tablo 2.32’de verilmektedir. Tablo 2.32’de görüldüğü gibi sonlu eleman model iyileştirmeyeyle sayısal ve deneysel doğal frekanslar arasındaki farklar %8’in altına düşmüştür. Tabloda sayısal ve deneysel olarak elde edilen doğal frekanslar arasındaki en büyük farkın %125.3’ten %7.93’e düştüğü görülmektedir.

Tablo 2.32. Kemer modellerinin sıcaklık sonrası durum için elde edilen deneysel ve sayısal dinamik karakteristikleri

Mod	Frekans (Hz)					Mod Şekli
	İyileştirme Öncesi Sayısal	Fark (%)	Deneysel	Fark (%)	İyileştirme Sonrası Sayısal	
Model-R						
1	63.45	90.77	33.26	3.73	34.50	Boyuna
2	82.08	81.39	45.24	-1.04	44.78	Enine
3	124.6	82.97	68.10	-0.31	67.89	Düşey
Model-1						
1	63.63	108.3	30.55	6.91	32.66	Boyuna
2	102.5	99.34	51.42	2.99	52.96	Enine
3	124.9	84.06	67.86	-5.36	64.22	Düşey
Model-2						
1	104.0	96.67	52.88	-6.11	49.65	Boyuna
2	127.9	107.5	61.65	-0.19	61.53	Enine
3	187.0	125.3	83.01	6.99	88.81	Düşey
Model-3						
1	61.04	106.3	29.59	7.27	31.74	Boyuna
2	77.91	76.43	44.16	-7.93	40.66	Enine
3	115.1	89.59	60.71	-1.17	60.00	Düşey
Model-4						
1	81.84	101.4	40.63	6.03	43.08	Enine
2	111.7	111.2	52.90	7.35	56.79	Boyuna
3	187.6	98.62	94.45	5.12	99.29	Düşey

2.3.4. Kemer Modellerin Sıcaklık Öncesi ve Sonrası Durum İçin Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması

Bu tez kapsamında, laboratuvar ortamında farklı geometrik boyutlarda imalatı gerçekleştirilen beş adet yığma kemer modellerinin sıcaklık değişimi ile dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişim incelemiştir. Kemer modellerinin dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişimler ÇTY kullanılarak deneysel olarak elde edildikten sonra SEY kullanılarak sayısal olarak da belirlenmiştir. Kemer modellerde gerek enkesit özelliklerindeki değişimden gerekse sıcaklık değişiminden kaynaklanan dinamik karakteristiklerindeki değişimler (doğal frekans değerlerinde artma veya azalma, mod şekillerinde değişim) Tablo 2.33'te verilmektedir.

Tablo 2.33. Kemer modellerinin sıcaklık öncesi ve sonrası durum için dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması

Mod	Frekans (Hz)						Mod Şekli
	Deneysel (GFOA)			Sayısal (SEY)			
	Sıcaklık Öncesi	Fark (%)	Sıcaklık Sonrası	Sıcaklık Öncesi	Fark (%)	Sıcaklık Sonrası	
Model-R							
1	60.46	-44.99	33.26	63.45	-45.63	34.50	Boyuna
2	87.40	-48.23	45.24	82.08	-45.44	44.78	Enine
3	127.2	-46.59	68.10	124.6	-45.51	67.89	Düşey
Model-1							
1	68.40	-55.34	30.55	63.63	-48.67	32.66	Boyuna
2	100.7	-48.94	51.42	102.5	-48.33	52.96	Enine
3	127.3	-46.69	67.86	124.9	-48.58	64.22	Düşey
Model-2							
1	-	-	52.88	91.23	-45.58	49.65	Boyuna
2	-	-	61.65	112.5	-45.33	61.53	Enine
3	-	-	83.01	164.3	-45.95	88.81	Düşey
Model-3							
1	57.22	-48.29	29.59	61.04	-48.00	31.74	Boyuna
2	75.72	-41.68	44.16	77.91	-47.81	40.66	Enine
3	111.4	-45.50	60.71	115.1	-47.87	60.00	Düşey
Model-4							
1	83.17	-51.15	40.63	81.84	-47.36	43.08	Enine
2	113.0	-53.19	52.90	111.70	-48.16	56.79	Boyuna
3	197.1	-52.08	94.45	187.60	-47.07	99.29	Düşey

Tablo 2.33’de görüldüğü gibi 600 °C sıcaklığa maruz kalan tüm kemer modellerinin deneysel olarak belirlenen mod şekillerinde herhangi bir değişim olmazken doğal frekanslarında %41.68 ile %55.34 oranında azalma olmuştur. Bu kemer modellerinin sıcaklık değişimi sonrası sayısal olarak elde edilen mod şekillerindeki ve doğal frekans değerlerindeki değişim ise deneysel verilere benzer olup doğal frekanslardaki azalma oranı %45.44 ile %48.67’dir.

Referans model olan Model-R ile referans modele göre genişlik parametresi artırılan Model-1’in, yükseklik parametresi azaltılan Model-2’nin ve açıklık parametresi artırılan Model-3’ün gerek sıcaklık öncesi gerekse sıcaklık sonrası elde edilen ilk üç mod şekli aynı olup sırasıyla; boyuna, enine ve düşeydir. Bunlardan farklı olarak referans modele göre kalınlık parametresi artırılan Model-4’ün ilk üç mod şekli ise enine boyuna ve düşey olarak elde edilmiştir.

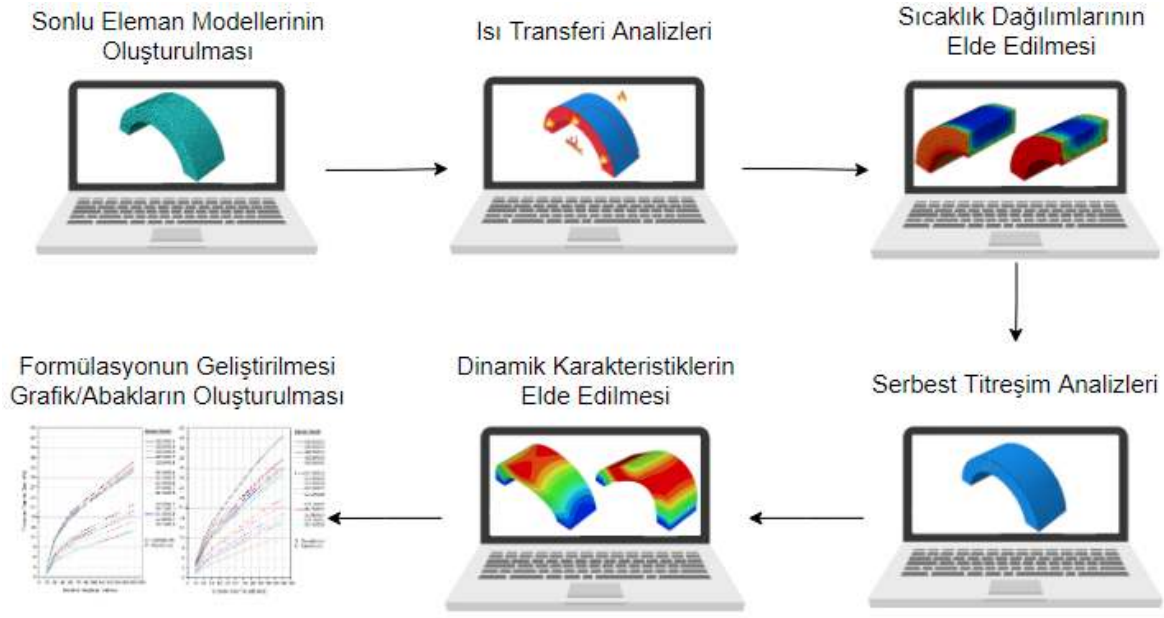
Tablo 2.33'e göre hem sıcaklık öncesi hem de sıcaklık sonrası durum için referans modele (Model-R) göre,

- ✓ Model-1'in elde edilen ikinci doğal frekans değerinde artış,
- ✓ Model-2'nin elde edilen ilk üç doğal frekans değerinde artış,
- ✓ Model-3'ün elde edilen ilk üç doğal frekans değerinde azalış,
- ✓ Model-4'ün elde edilen ilk üç doğal frekans değerinde ise artış gözlenmiştir.

2.4. Kemer Elemanlar Üzerinde Gerçekleştirilen Çoklu Analizler

Yangın gibi yüksek sıcaklık etkisine maruz mühendislik yapılarının dinamik davranışlarında veya rijitliğinde değişimler meydana gelmektedir. Bu değişimler incelenerek ilgili yapıdaki hasarlar belirlenebilir. Çalışmanın bu kısmında, yüksek sıcaklık etkisine maruz farklı kesit boyutlarındaki yığma kemer elemanların yapısal davranışlarının, bu elemanların dinamik karakteristikleri üzerindeki etkisinin sıcaklık geçmişi de dikkate alınarak sayısal yöntemlerle elde edilmesi hedeflenmiştir. Kemer elemanların rijitlik değişimlerinin belirlenmesi için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ısı transferi ve serbest titreşim (modal) analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında dikkate alınan değişken parametrelerden dolayı birçok sayısal çözümleme yapılmış ve elde edilen sonuçlarla bir veri havuzu oluşturulmuştur. Daha sonra bu veri havuzundan faydalanılarak formülasyon ve grafik abaklar oluşturulmuştur. Şekil 2.56'da yapılan çalışmanın iş akış özeti verilmiştir.

Gerçekleştirilecek çoklu analizlerde öncelikle, farklı enkesit özelliklerine sahip kemer elemanların sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Yüksek sıcaklık etkisindeki bu kemer elemanların enkesitleri boyunca oluşan sıcaklık dağılımlarının belirlenmesi için, öncelikle oluşturulan sonlu eleman modelleri üzerinde geçici rejim dikkate alınarak ısı transferi analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu analizlerin sonuçlarına bağlı olarak serbest titreşim analizleri gerçekleştirilmiştir. ABAQUS sonlu elemanlar paket programı kullanılarak gerçekleştirilen her iki analizde de aynı sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Bunun sebebi, modal analizlerde sıcaklıkla değişen malzeme özelliklerinin, ısı transferi analizleri sonucunda belirlenen elemanın her bir düğüm noktasındaki sıcaklığa bağlı olarak seçilebilmesidir.



Şekil 2.56. Gerçekleştirilen çoklu analizlere ait akış diyagramı

Yapılan ısı transferi analizlerinin tamamında ISO 834 yangın eğrisi kullanılmış ve yangının kemer karnına ve altına (kemer alt ve yan yüzeylerine) etkidiği kabul edilmiştir. Belirlenen maruz kalma sürelerinde gerçekleştirilen serbest titreşim analiz sonuçları değerlendirilerek, kemer elemanların doğal frekans ve mod şekillerinde meydana gelen değişimler elde edilmiştir.

2.4.1. Dikkate Alınan Değişken Parametreler

Çalışma kapsamında, yangına maruz kalan kemer elemanlar üzerinde gerçekleştirilecek çoklu analizlerde, dikkate alınan değişken parametreler, çeşitli kemer boyutları ve sıcaklık geçmişi.

2.4.1.1. Kemer Boyutları

Mühendislik yapılarının rijitliği etkileyen eleman boyutları, yapının dinamik davranışlarının değişimi üzerinde de önemli bir rol oynamaktadır. Bu sebeple, çalışma kapsamında yangın etkisi altındaki farklı geometrik özelliklere sahip kemer elemanlar dikkate alınmış ve ilgili kemer boyutlarının dinamik karakteristikleri nasıl etkilendiği incelenmiştir. Çalışmada dikkate alınan kemer boyutları sırasıyla; kemer açıklığı, kemer

yüksekliği, kemer genişliği ve kemer kalınlığıdır. Dikkate alınan bu kemer boyutları 2.34’te ayrıntılı bir şekilde verilmektedir.

Tablo 2.34. Çoklu analizlerde dikkate alınan kemer boyutları

Grup	Kemer Boyutları (m)								
	Açıklık (a)	Yükseklik (y)		Genişlik (g)			Kalınlık (k)		
1.	1-3						0.2	0.3	0.4
2.	4-7	$\frac{a}{2}$	$\frac{a}{2} \times 0.8$	0.5	1.0	1.5	0.4	0.5	0.6
3.	8-11	$\frac{a}{2}$	$\frac{a}{2} \times 0.8$	0.5	1.0	1.5	0.6	0.7	0.8
4.	12-15						0.8	0.9	1.0

Tablo 2.34’te görüldüğü gibi dikkate alınan kemer boyutlarında açıklık parametresi 1 m’den 15m’ye kadar birer metre aralıklarla değişmektedir. Yükseklik parametresi ilgili açıklığın yarısı ve yarısından %20 eksik olacak şekilde iki farklı değer olarak dikkate alınırken genişlik parametresi 0.5, 1.0 ve 1.5 m olacak şekilde üç farklı değer olarak dikkate alınmıştır. Kemer kalınlığı ise farklı açıklık aralıklarında 0.2 m ile 1.2 m arasında değişmektedir. Bu durumda 450 adet farklı boyuttaki kemer elemanların her biri için ısı transferi ve modal analiz gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında analizi gerçekleştirilecek farklı kemer boyutları a-y-g-k (açıklık-yükseklik-genişlik-kalınlık) şeklinde ifade edilmektedir. Örneğin en küçük ve en büyük boyutlu kemerler sırasıyla, 1-0.4-0.5-0.2 ve 15-7.5-1.5-1.2 şeklinde ifade edilmektedir.

2.4.1.2. Sıcaklık Geçmişi

Analizlerde dikkate alınan bir diğer parametre olan sıcaklık geçmişi, yangına maruz kalma süresini temsil etmektedir. Yangın gibi yüksek sıcaklık etkisindeki kemer elemanlardaki sıcaklık dağılımlarının belirlenmesi için gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinde, ISO 834 standart sıcaklık zaman grafiğinin 180 dakikalık dilimi dikkate alınmıştır. İlgili kemer elemanların ısı transfer analizlerinin sonucuna bağlı olarak 180 dakikalık sürenin 15’er dakikalık zaman aralıkları için modal analizler gerçekleştirilmiş ve her bir süreye ait doğal frekans değerleri ve mod şekilleri elde edilmiştir.

Boyutları Tablo 2.34’te verilen her bir kemer modeli için; 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165 ve 180 dakikalık maruz kalma süreleri ile birlikte, sıcaklık geçmişi parametresine ait toplam 13 farklı durum dikkate alınmıştır.

2.4.2. Kemer Elemanlarının Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Yangın gibi yüksek sıcaklığa maruz yığma kemerlerin dinamik karakteristiklerinin elde edilebilmesi için, kemer enkesitleri boyunca sıcaklık dağılımlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple öncelikle ısı transfer analizleri gerçekleştirilerek kemerin sıcaklık dağılımlarının elde edilmiştir.

Sonlu elemanlar yönteminden faydalanılarak gerçekleştirilen ısıl çözümlemelerde, kemerin sonlu eleman modelleri üzerinde bulunan düğüm noktalarının tamamına ait sıcaklıklar elde edilmiştir. Isı transferi analizleri sonucunda elde edilen veri dosyasında (termal.inp), ilgili kemer modeline ait düğüm noktalarının tamamındaki sıcaklıkların zamana bağlı değişimi yer almaktadır.

Daha sonra ilgili kemerlere ait sonlu eleman modelleri üzerinde serbest titreşim analizlerinin gerçekleştirilmesi için gerekli olan malzeme özelliklerinden birim hacim ağırlığın ve elastisite modülünün sıcaklığa bağlı değişimi programa tanıtılmıştır.

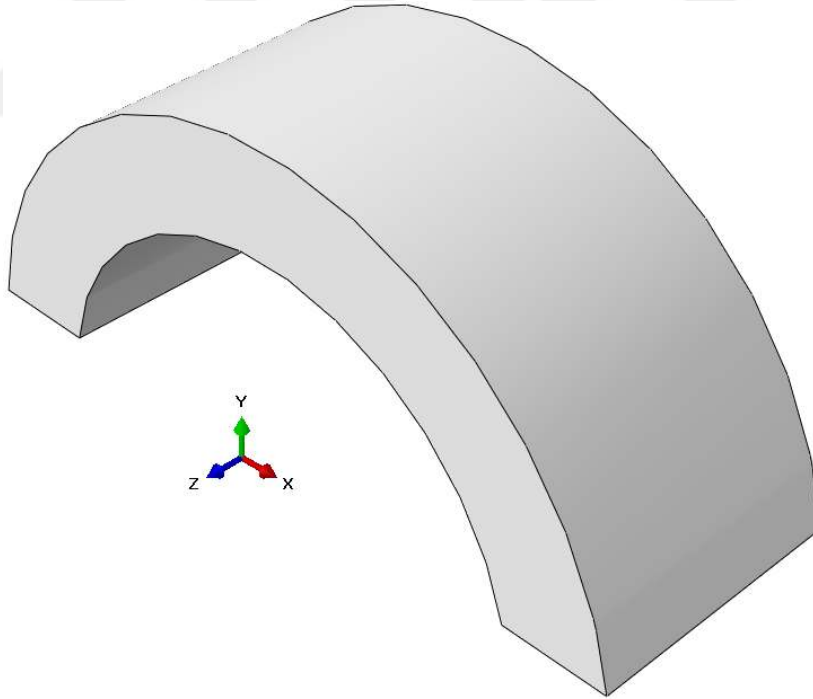
Sıcaklığa bağlı değişen dinamik karakteristiklerin elde edilmesi için gerçekleştirilen serbest titreşim analizlerinde, sıcaklık dağılımlarının elde edildiği ısı transferi analizlerinin sonuçları kullanılmıştır. Bu şekilde malzeme özellikleri, ilgili süreler için bütün düğüm noktalarına karşılık gelen malzeme sıcaklıklarına bağlı olarak dikkate alınmıştır. Bunun için gerek ısı transferi analizlerinde gerekse serbest titreşim analizlerinde kullanılan sonlu eleman modellerinin mesh aralıkları ve geometrik özellikleri aynı olması gerekmektedir. Ancak her iki analizde kullanılan sonlu eleman tipi farklı olup kullanılan eleman tipleri ait ayrıntılı bilgi bölüm 2.4.3'te verilmektedir.

Bu çalışma kapsamında dikkate alınan değişken parametreler bölüm 2.4.1'de belirtildiği gibi; farklı açıklık, yükseklik, genişlik, kalınlık gibi kemer boyutları ve sıcaklık geçmişi. En küçük boyutu 1-0.4-0.5-0.2 olan kemer ile en büyük boyutu 15-7.5-1.5-1.2 olan kemer modelleri üzerinden gerçekleştirilen analizler, 13 farklı sıcaklık geçmişi durumu için tekrarlanmıştır. Yani farklı boyutlara kemer modelleri için 450 adet ısı transferi analizi gerçekleştirilmiş olup daha sonra bu ısı transfer analizlerinin sonuçlarına bağlı 13 farklı sıcaklık geçmişi için 5850 adet serbest titreşim analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kapsamında; 450 adeti ısı transferi, 5850 adeti serbest titreşim analizi olmak üzere toplam 6300 adet sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir.

2.4.2.1. Kemerler Elemanların Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması

Yangını temsil etmek için kullanılan ISO 834 sıcaklık-zaman eğrisi ile temsil edilen yangına maruz kalan kemer modellerinin dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişimlerin sayısal olarak belirlenebilmesi için öncelikle modeller üzerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ısı transferi analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ısı transfer analizlerinin sonuçları kullanılarak modal analizler gerçekleştirilmiştir.

Isı transferi analizlerinde kullanılan sonlu eleman modelleri, ölçüleri Tablo 2.34’te verilen kemerlerin AUTOCAD (2017) çizim programı kullanılarak modellenmesinden sonra ABAQUS programına aktarılması ile elde edilmiştir. Örnek olması amacıyla Şekil 2.57’de 1-0.4-0.5-0.2 kemerine ait katı model verilmektedir. Oluşturulan sonlu eleman modellerinde, ABAQUS programının eleman kütüphanesinde bulunan ve ısı transfer analizlerinde kullanılan DC3D8 hacimsel elemanı kullanılmıştır. Şekil 2.43’de verilen C3D8R elemanı ile birebir aynı DC3D8 elemanı sekiz düğüm noktasına sahiptir.



Şekil 2.57. 1-0.4-0.5-0.2 kemerine ait katı model

Isı transfer analizlerinin sonlu eleman modellerinin oluşturulmasında kemer modellerde kullanılan yığma malzemelerin termal özelliklerinin (ısı iletkenlik ve özgül ısı) ve özgül ağırlıklarının belirli sıcaklıklara karşılık gelen değerlerinin programa tanıtılması

gerekmektedir. Isı transfer analizlerinde kullanılan özelliklerinden termal iletkenlik (k), bir malzemenin ısıyı iletme kabiliyetini ifade ederken; özgül ısı (c), sıcaklığı bir birim artırmak için gereken enerji miktarını temsil eder. Yapılan literatür araştırması sonucunda; yığma duvar malzemelerinin termal özelliklerine ilişkin deneysel verilerin sınırlı ve eksik olduğu görülmüştür. Ayrıca yapı malzemeleri arasındaki benzerliklerden dolayı duvar ve betonun karşılaştırılabilir termal özelliklere sahip olduğu yaygın olarak kabul edildiği görülmüştür (Daware ve Naser, 2021). Bu nedenle çalışma kapsamında taş ve harçtan oluşan yığma kemerlerin ısı iletkenlik ve özgül ısı gibi termal malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimi, beton için EN 1992-1-2’de (2004) verilen denklemler yardımıyla hesaplanmış ve değerleri Tablo 2.35’te verilmiştir. Yığma kemerlerin sıcaklığa bağlı değişen özgül ağırlık değeri için Bölüm 2.2.4.4’te farklı sıcaklıklara maruz kalmış yığma duvar numuneleri üzerine gerçekleştirilen birim hacim ağırlık testlerinin sonuçları kullanılmıştır (Tablo 2.36).

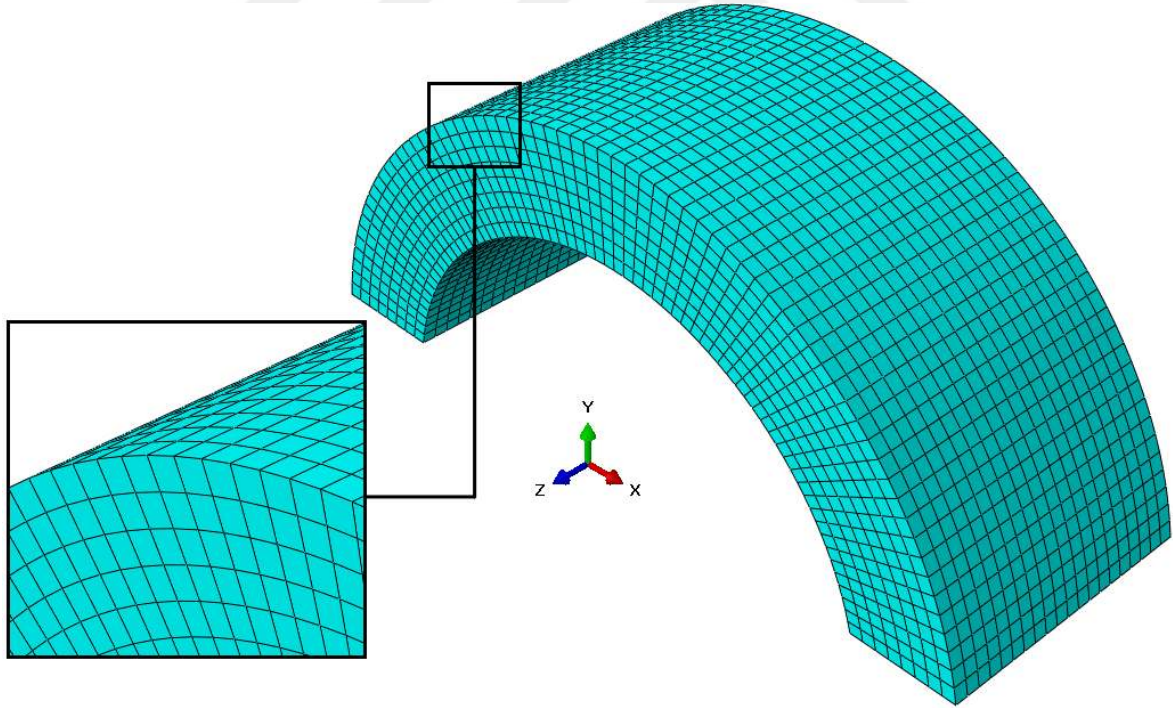
Tablo 2.35. Kemer modellerinin ısı transfer analizleri için sonlu eleman modelinde kullanılacak termal malzeme özellikleri

Sıcaklık (°C)	Termal Malzeme Özellikleri	
	Özgül Isı Katsayısı (J/kgK)	Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)
0	900	2.000
20	900	1.951
100	900	1.766
115	1470	1.732
200	1470	1.553
300	1000	1.361
400	1050	1.191
500	1100	1.042
600	1100	0.915
700	1100	0.809
800	1100	0.724
900	1100	0.661
1000	1100	0.619
1100	1100	0.599
1200	1100	0.600

Farklı geometrik özelliklere sahip kemerlerin sonlu eleman modeline, Tablo 2.35’te verilen termal malzeme özellikleri ile Tablo 2.36’da verilen birim hacim ağırlık değerleri tanıtılmıştır. Daha sonra sonlu elemanlar yönteminin önemli bir aşaması olan sonlu eleman

ağı seçilmiştir. Kemer boyutlarına göre; sonlu eleman boyutları 25x25x25 mm ile 65x65x65 mm arasında, sonlu eleman sayıları ise 10720 ile 233280 arasında değişim göstermektedir. Gerçekleştirilen ısı transferi analizleri ile bu sonlu elemanlara ait düğüm noktalarındaki sıcaklık değerleri belirlenmektedir. Şekil 2.58’de sonlu eleman ağı seçilen 1-0.4-0.5-0.2 kemer modeline ait sonlu eleman modeli verilmektedir.

Üç boyutlu modellemenin kullanıldığı ısı transferi analizlerinde kemer modellerindeki sıcaklık dağılımları geçici rejimde ısı iletimi probleminin çözülmesiyle belirlenmektedir. Model sınırlarını oluşturan yüzeylerin ısı şartları ilgili problemin çözülmesinde önemli bir etkiye sahiptir. Çalışma kapsamında, farklı boyutlarda elde edilen kemer modellerinin başlangıç sıcaklıkları 20 °C (oda sıcaklığı) olarak tanımlanmış ve ısı transferi analizleri yangının kemer modellerinin alt ve yan yüzeylerine etkidiği durumlar için gerçekleştirilmiştir. Yapılan ısı transferi analizlerinin tamamında yangın, ISO 834 standart sıcaklık zaman eğrisi kullanılarak temsil edilmiş ve analizlerde bu eğrinin 180 dakikalık kısmı dikkate alınmıştır.



Şekil 2.58. 1-0.4-0.5-0.2 kemerinin sonlu eleman modeli

Kemer modellerinin serbest titreşim analizlerinde, ısı transfer analizlerinde kullanılan katı modellerin aynısı kullanılmıştır. Serbest titreşim analizleri gerçekleştirilecek kemerin sonlu eleman modelinde, ABAQUS programının eleman kütüphanesinde bulunan ve

gerilme şekil değiştirme analizlerinde kullanılan azaltılmış entegrasyona sahip C3D8R hacimsel elemanı kullanılmıştır. Şekil 2.43’de verilen 8 düğüm noktasına sahip C3D8R hacimsel elemanı, her düğüm noktasında üç öteleme serbestlik derecesine sahiptir.

Serbest titreşim analizlerinde kullanılan sonlu eleman modellerinin oluşturulmasında elastisite modülü, poisson oranı, birim hacim ağırlığı gibi malzeme özelliklerinin programa tanıtılması gerekmektedir. Gerçekleştirilen serbest titreşim analizlerinde; kemerlerin elastisite modülünün ve birim hacim ağırlığının sıcaklığa bağlı değişimi dikkate alınırken, poisson oranının sıcaklığa bağlı değişimi ihmal edilmiştir. Poisson oranı tüm sıcaklık değerleri için 0.2 olarak dikkate alınmıştır. Yığma kemerlerin sıcaklığa bağlı değişen özgül ağırlık değeri için, Bölüm 2.2.4.4’te farklı sıcaklıklara maruz kalmış yığma duvar numuneleri üzerine gerçekleştirilen birim hacim ağırlık testlerinin sonuçları kullanılmıştır. Ayrıca bu duvar numuneleri üzerinde basınç testi gerçekleştirilmiş ve duvar numunelerinin basınç dayanımlarında değişimler elde edilmiştir. Yapılan bazı çalışmalarda ve yönetmeliklerde basınç dayanımı ile elastisite modülü arasında direk ilişki kurulmakta ve elastisite modülü basınç dayanımının belirli bir katı olarak hesaplanabilmektedir. Dahası bu çalışma kapsamında; laboratuvar ortamında üretilen kemer modeli üzerinde gerçekleştirilen gerek deneysel gerekse sayısal çalışmalarda dikkate alınan elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi, bu duvar numunelerindeki basınç değişimi ile orantılı olduğu görülmüştür. Bu sebeple duvar numunelerindeki bu değişimler elastisite modülündeki değişimle ilişkilendirilebilmektedir. Kemer modellerinin serbest titreşim analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.36’da verilmektedir.

Serbest titreşim analizleri gerçekleştirilecek kemerlerin sonlu eleman modeline, Tablo2.36’da verilen malzeme özellikleri tanıtılmıştır. Daha sonra sonlu eleman yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinde seçilen sonlu eleman ağı aynı şekilde serbest titreşim analizlerinde de seçilmiştir. Böylece ısıl çözümlemeler için oluşturulan sonlu eleman modelindeki düğüm noktalarının tamamındaki sıcaklıklar değerlendirilerek, gerçekleştirilen serbest titreşim analizlerinde bu düğüm noktalarındaki sıcaklığa karşılık gelen malzeme özellikleri kullanılmıştır. Şekil 2.58’de sonlu eleman ağı seçilen 1-0.4-0.5-0.2 kemer modeline ait sonlu eleman modeli verilmektedir.

Tablo 2.36. Serbest titreşim analizi gerçekleştirilecek kemerlerin sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri

Sıcaklık (°C)	Kullanılan Malzeme Özellikleri		
	Poisson Oranı (-)	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (GPa)
0	0.2	2302	2.300
20	0.2	2302	2.300
200	0.2	2235	2.323
400	0.2	2124	1.426
600	0.2	2099	0.690
800	0.2	2038	0.460
1000	0.2	1976	0.001

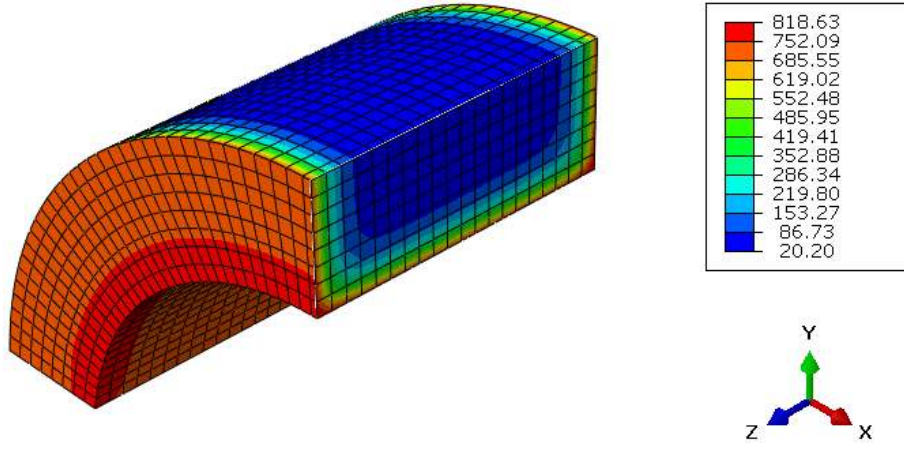
Serbest titreşim analizlerinde kemer elemanların zemine ankastre olarak bağlandığı kabul edilmiştir. Ancak sonlu eleman modelindeki diğer düğüm noktalarının tüm hareketleri serbest bırakılmıştır.

2.4.2.2. Kemer Elemanlar Üzerinde Gerçekleştirilen Isı Transferi ve Serbest Titreşim Analizleri

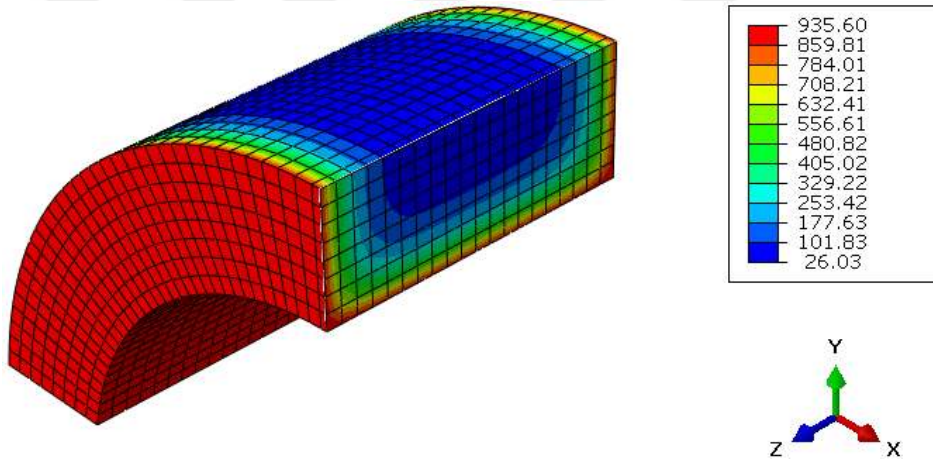
Yangın etkisi altındaki farklı boyutlara sahip kemer modelleri üzerinde gerçekleştirilen geçici rejimdeki ısıl çözümlemeler, 180 dakikalık yangın süresince 15 dakika zaman aralıklarıyla toplam 12 adımda gerçekleştirilmiştir. Adımların her biri için gerçekleştirilen ısı transferi analizleri sonucunda, kemerlerin sonlu eleman modeli üzerinde bulunan bütün düğüm noktalarına ait sıcaklık değerleri ve kemer modellerinin enkesitleri boyunca oluşan sıcaklık dağılımları belirlenmiştir.

Standart ISO 834 sıcaklık-zaman eğrisi ile temsil edilen yangına maruz kalan farklı boyutlardaki kemer modellerinin sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Örnek teşkil etmesi amacıyla Şekil 2.59’de bu kemer modellerinden 1-0.4-0.5-0.2 modelinin kesiti içinde belirli zamana aralıkları sonunda (30, 60, 90, 120 dakika) oluşan sıcaklık dağılımları verilmektedir. Kemer elemanların alt (karın) ve yan (alın) yüzeylerinin sıcaklığa maruz kalması nedeniyle bu yüzeyler doğrultusundaki düğüm noktalarında sıcaklık farklılıkları meydana gelmiştir. Fakat elemanların üst (sırt) yüzeyinde herhangi bir sıcaklık etkisine tanımlanmadığı için bu doğrultudaki düğüm noktaları arasında sıcaklık farkı oluşmamıştır.

Yüksek sıcaklık etkisi altındaki kemer modellerinin dinamik karakteristiklerindeki değişim; ısıl çözümlemeler sonucunda oluşan veriler kullanılarak gerçekleştirilen serbest titreşim analizleri sonucunda sıcaklık geçmişine bağlı olarak elde edilmiştir.



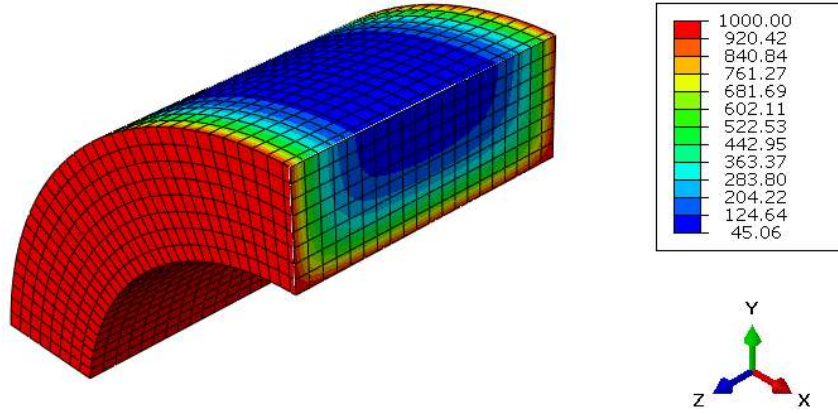
a) R30



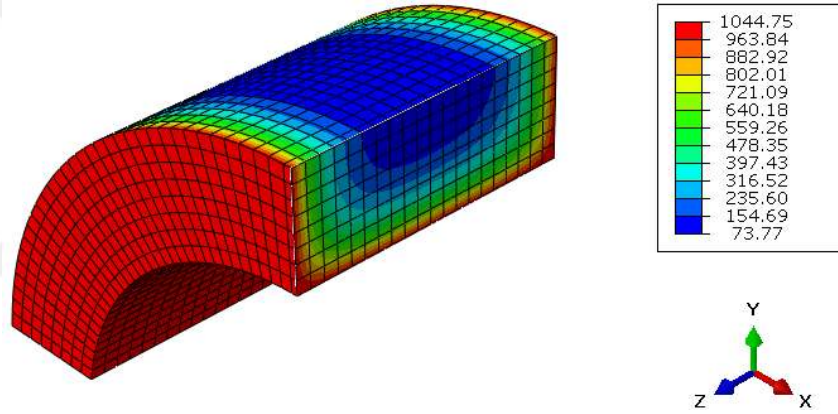
b) R60

Şekil 2.59. Yüksek sıcaklığa maruz kalan 1-0.4-0.5-0.2 kemer modelinin enkesiti içerisinde meydana gelen sıcaklık dağılımları

Şekil 2.59'un devamı,



c) R90



d) R120

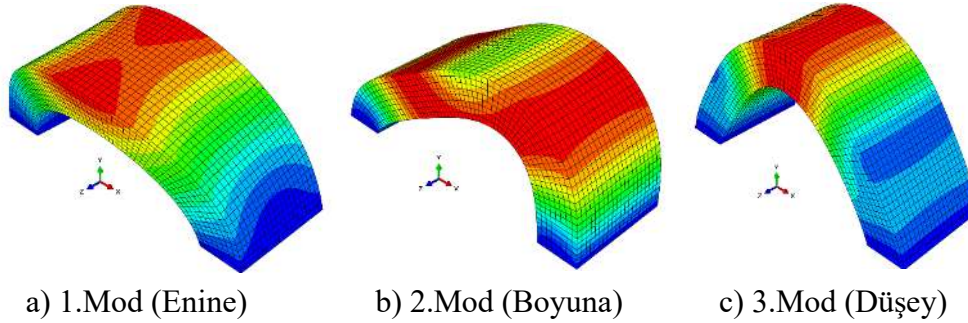
Farklı boyutlardaki kemer modellerinin dinamik karakteristikleri; herhangi bir sıcaklığa maruz kalmadığı oda sıcaklığındaki duruma ek olarak, standart yangınına 15 dakikadan 180 dakikaya kadar 15'er dakikalık maruz kalma durumları için belirlenmiştir. Örnek teşkil etmesi açısından 1-0.4-0.5-0.2 kemer modelinin ilk üç modu için sıcaklık geçmişine ait farklı durumlar dikkate alınarak elde edilen doğal frekans değerleri Tablo 2.37'de verilmektedir.

Tablo 2.37. 1-0.4-0.5-0.2 kemer modelinin ilk üç modu için sıcaklık geçmişine ait farklı durumlar dikkate alınarak elde edilen doğal frekans değerleri

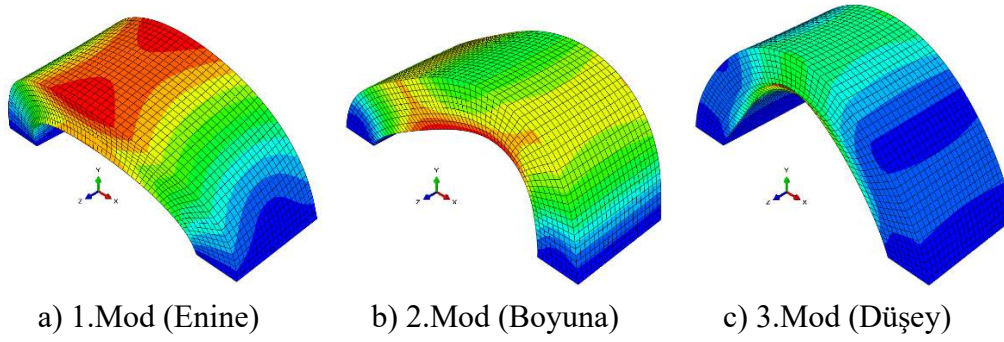
Sıcaklığa Maruz Kalma Süresi (dakika)	Doğal Frekans Değeri (Hz)		
	1.	2.	3.
0	104.48	122.79	188.90
15	100.07	117.78	182.47
30	93.23	109.28	171.51
45	88.55	103.28	163.64
60	85.27	99.71	158.61
75	82.07	96.17	153.45
90	79.00	92.90	148.63
105	75.93	89.63	143.78
130	72.90	86.21	138.67
145	70.09	82.92	133.83
160	67.49	79.77	129.19
175	65.03	76.79	124.30
180	62.72	74.14	120.18

Tablo 2.37 incelendiğinde ilgili kemer elemanın sıcaklığa maruz kalma süresindeki artışın elemanın doğal frekans değerlerinde azalmaya neden olduğu açıkça görülmektedir. ISO 834 standart yangınına 180 dakika maruz kalan bu kemer elemanın ilk üç moduna ait doğal frekanslarında meydana gelen azalma sırasıyla; %39.97, %39.62 ve %36.38'dir.

İlgili kemer modeli için gerçekleştirilen serbest titreşim analizi sonucunda belirlenen mod şekilleri, sıcaklığa maruz kalmadan önceki durum için Şekil 2.60'ta verilmektedir. Buna ek olarak bu kemer modelinin ISO 834 standart yangınına 180 dakika maruz kalması durumu için belirlenen mod şekilleri Şekil 2.61'de verilmektedir.



Şekil 2.60. Sıcaklığa maruz kalmayan 1-0.4-0.5-0.2 kemer modeline ait mod şekilleri



Şekil 2.61. Yüksek sıcaklığa maruz kalan 1-0.4-0.5-0.2 kemer modeline ait mod şekilleri

Örnek kemer modelinin her iki durum içinde elde edilen mod şekilleri aynı olup Şekil 2.60 ve 2.61’de verilmiştir. Dolayısıyla, yüksek sıcaklık etkisine maruz 1-0.4-0.5-0.2 kemer modelinin mod şekillerinde değişim olmadığı sonucuna varılmıştır.

2.4.3. Dikkate Alınan Değişken Parametrelerin Dinamik Karakteristikler Üzerindeki Etkisi

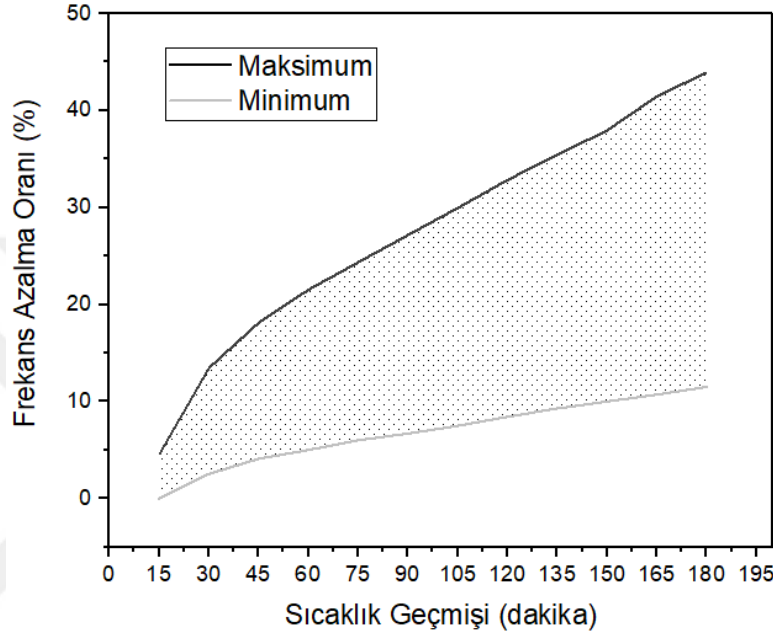
Mühendislik yapılarında kullanılan taşıyıcı sistem elemanların kütle ve rijitliği doğal frekansları etkilediği bilinmektedir. Bu elemanların rijitliği eleman boyutlarına ve elemanda kullanılan elastisite modülüne göre değişmektedir. Buna bağlı olarak, yüksek sıcaklığa maruz kalan yapı elemanlarının kütle ve rijitliklerinde meydana gelen azalmalar bu yapı elemanlarının doğal frekanslarında değişimlere neden olmaktadır. Çalışma kapsamında seçilen değişken parametrelerde bu durum önemli bir rol oynamıştır.

Yüksek sıcaklık etkisindeki kemer elemanlarda kullanılan yığma malzemenin birim hacim ağırlığındaki azalmadan kaynaklanan kütle kaybı meydana gelmektedir. Bu sebeple çalışmada; kemer elemanlarda sıcaklık değişimine bağlı olarak meydana gelen kütle azalması birim hacim ağırlıktaki azalmayla, rijitliklerinde meydana gelen azalma ise elastisite modülündeki azalma ile temsil edilmektedir. Bu elemanların kütle ve rijitliklerinde meydana gelen azalmalar sırasıyla doğal frekanslarda artışa ve azalmaya sebep olmaktadır.

ISO 834 standart yangın eğrisi ile temsil edilen yangın etkisindeki farklı boyutlara sahip 450 adet kemer modeli üzerinde; 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165 ve 180 dakikalık maruz kalma durumları dikkate alınarak toplam 5850 adet serbest titreşim analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda sıcaklık geçmişindeki artışa bağlı olarak

kemer elemanların doğal frekans değerlerinde azalma olurken mod şekillerinde herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir.

Farklı boyutlardaki kemer elemanların sıcaklık geçmişlerine bağlı olarak 1.doğal frekanslarında meydana gelen azalmaların maksimum ve minimum değerleri Şekil 2.62’de verilmektedir.



Şekil 2.62. Farklı boyutlara sahip kemerlerin sıcaklık geçmişine bağlı 1. doğal frekans değerlerindeki maksimum ve minimum azalama oranları

Şekil 2.62 incelendiğinde kemerlerin 1. doğal frekanslarında ISO 834 standart yangın eğrisi ile temsil edilen yangının ilk 15 dakikasında meydana gelen azalma %0.01-4.6 arasında olurken yangının 180. dakikasında bu azalma %11.5-44 arasında olmuştur. Maksimum minimum değerler arasında bu denli farkın olması analizlerde dikkate alınan kemer boyutu parametrelerinden kaynaklanmaktadır.

Çalışma kapsamında kemer boyutu parametrelerinden açıklık, 1-15 m arasında olup yükseklik ise bu açıklıkların yarısı ve yarısından %20 eksik olacak şekilde dikkate alınmıştır. Böylece farklı açıklıklara sahip yarım daire ve basık kemerler elde edilmiş ve bu kemerlerin yüksek sıcaklık etkisinde dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Sıcaklık geçmişi dikkate alınmadan gerçekleştirilen çoklu analizlerde farklı açıklığa, aynı kalınlık ve genişliğe sahip yarım daire kemerlerin doğal frekansları, basık kemerlerin doğal frekanslarına göre düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca bu farklı iki forma

sahip kemerlerin mod şekillerinin aynı olduğu görülmüştür. Yani, yükseklik parametresinin azalması kemerlerin doğal frekanslarında artışa neden olurken mod şekillerinde herhangi bir değişikliğe neden olmamıştır. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan bu kemerlerin ısı transferi ve sıcaklık geçmişi durumu dikkate alınarak gerçekleştirilen serbest titreşim analizi sonucu 1. moduna ait yapılan değerlendirmede, frekans değerlerinde meydana gelen azalma oranının benzer olduğu ve mod şeklinde bir değişim olmadığı sadece genliklerinde bazı değişimlerin olduğu görülmüştür. Bu sebeple oluşturulacak grafik ve abaklarda yükseklik parametresi kullanılmamıştır.

Analizlerde kullanılan genişlik parametresi her açıklık için 0.5-1-1.5 m olarak dikkate alınmıştır. Bir diğer parametre olan kalınlık ise Tablo 2.34'te belirli açıklıklara göre oluşturulan kemer gruplarına göre 0,2-1.2 m arasında değerler almaktadır. Herhangi bir sıcaklık geçmişi olmadan gerçekleştirilen serbest titreşim analizlerinde; bu parametrelerin değişimi kemerin doğal frekanslarında ve mod şekillerinde değişimlere neden olmuştur. Kemerlerin 1.moduna karşılık gelen enine mod şekli bu parametrelere bağlı olarak sadece 1., ve 2. Grupta yer alan bazı kemerlerde boyuna olarak elde edilmiş olup bu kemerler Tablo 2.38'de verilmektedir.

Tablo 2.38. 1. ve 2. grupta yer alan kemerlerden kalınlık ve genişlik parametresinden kaynaklı 1. mod şekli boyuna olan kemerler

Grup	Açıklık	Genişlik	Kalınlık	1.Mod Şekli
1.	1	1,5	0.2/0.3/0.4	Boyuna
	2	1	0.2/0.3	
	3	1,5	0.2/0.3/0.4	
	4	1	0.2/0.3	
2.	5	1,5	0.2/0.3/0.4	
	6-7	1.5	0.4/0.5	

Genişlik parametresinin artması Tablo 2.38'de verilen kemerler hariç diğer aynı açıklığa ve yüksekliğe sahip kemerlerin 1. Moduna karşılık gelen doğal frekans değerlerinde artışa neden olmuştur. Buna karşılık kalınlık parametresindeki artış, aynı kemerlere ait 1. Doğal frekanslarda azalmaya neden olmuştur. Aynı kemerlerin sıcaklık geçmişi dikkate alınarak gerçekleştirilen serbest titreşim analizleri sonucunda, mod şekillerinde herhangi bir değişiklik olmazken 1. Doğal frekanslarında azalmalar meydana gelmiştir. Aynı açıklığa ve yüksekliğe sahip kemerlerde genişlik parametresinin artmasıyla bu kemerlerin frekanslarında meydana gelen azalma oranlarında düşüş gözlenmiştir. Aynı durum kalınlık

parametresinin artışında da gözlenmiştir. Farklı açıklık, genişlik ve kalınlığa sahip kemerlerin sıcaklık geçmişiyle ilgili elde edilen frekanslarındaki bu azalma oranları sonraki bölümde verilen grafik/abaklarda sayısal olarak gösterilmiştir.

2.4.4. Formülasyonun Geliştirilmesi ve Grafik/Abakların Oluşturulması

Çalışma kapsamında, sıcaklık etkisi altında farklı geometrik ve sıcaklık geçmişi parametrelerine sahip yığma kemerlerin sıcaklık etkisi altında dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Bu sebeple farklı boyutlara sahip 450 adet kemer üzerinde ısı transfer analizleri gerçekleştirilmiş daha sonra bu analiz sonuçlarına bağlı 5850 adet serbest titreşim analizleri yapılmıştır. Yapılan bütün bu analizler sonucu büyük bir veri havuzu oluşturulmuştur. Daha sonra bu veri havuzundan faydalanılarak sıcaklık geçmişiyle sahip bu kemerlerin, dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişimlerin hızlı bir şekilde tespiti, rijitlik değişimlerinin ve oluşan hasarın belirlenebilmesi için formülasyon geliştirilmesi ve grafik/abakların oluşturulması amaçlanmıştır.

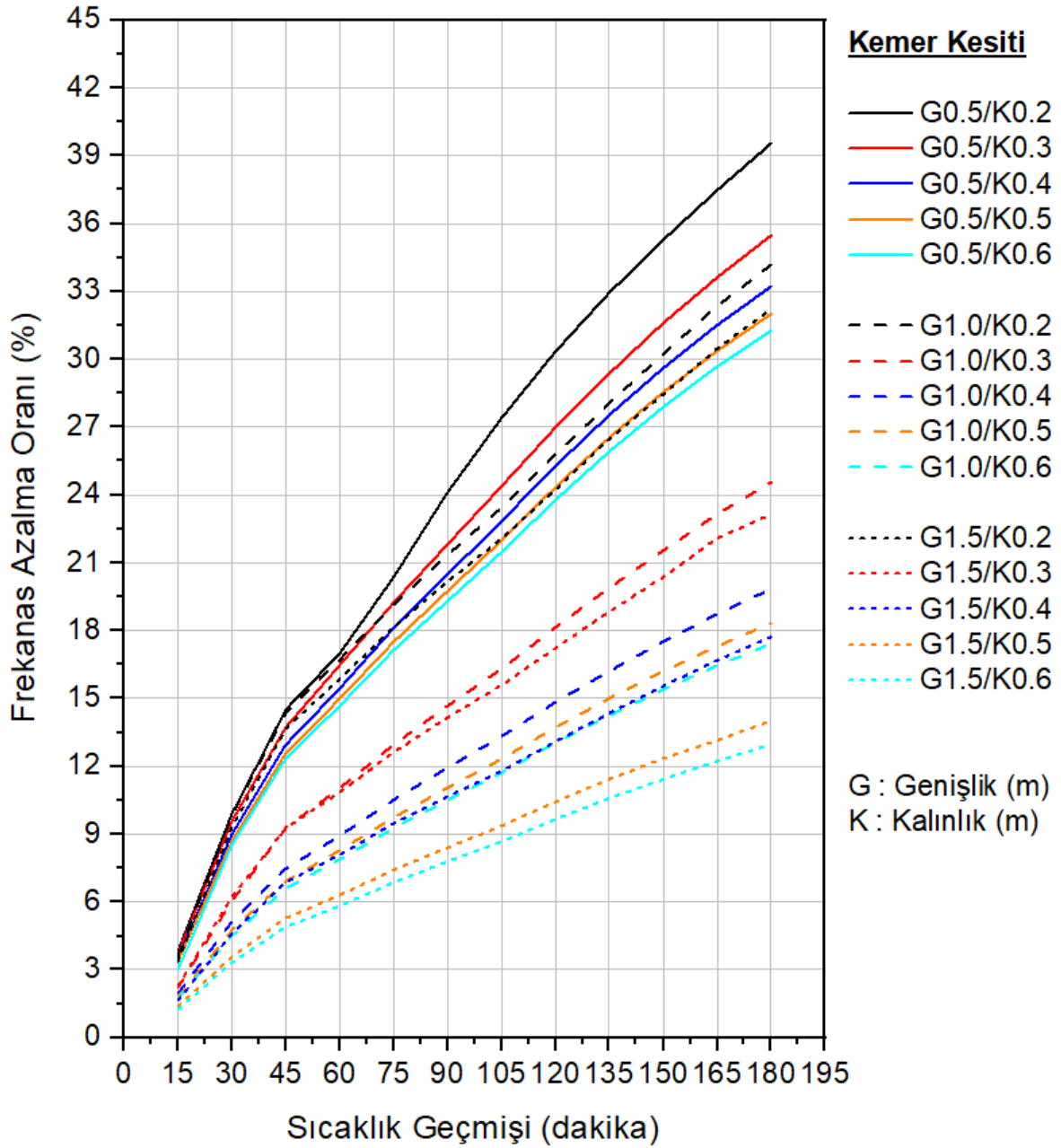
Geliştirilecek olan formülasyon için 6300 analiz sonuçlarının yer aldığı veri havuzu kullanılmıştır. Formülasyon, farklı boyutlara ve sıcaklık geçmişiyle sahip kemerlerin ilk moduna ait doğal frekans değerlerinin belirlenmesi amacıyla regresyon analizleri yapılarak geliştirilmiştir. Regresyon analizlerinde veri havuzundaki verilerin %70'i kullanılmış olup kalan %30 ile de doğrulama yapılmıştır. Kemerlerin sıcaklık geçmişiyle ve boyutlarına bağlı ilk modlarına ait frekansları veren formülasyon denklem (2.1)'de verilmektedir.

$$f_1 = 0,117 + \exp(0,779 + 10,277A - 25,684Y + 0,8231G - 0,949K - 0,001T) \quad (2.1)$$

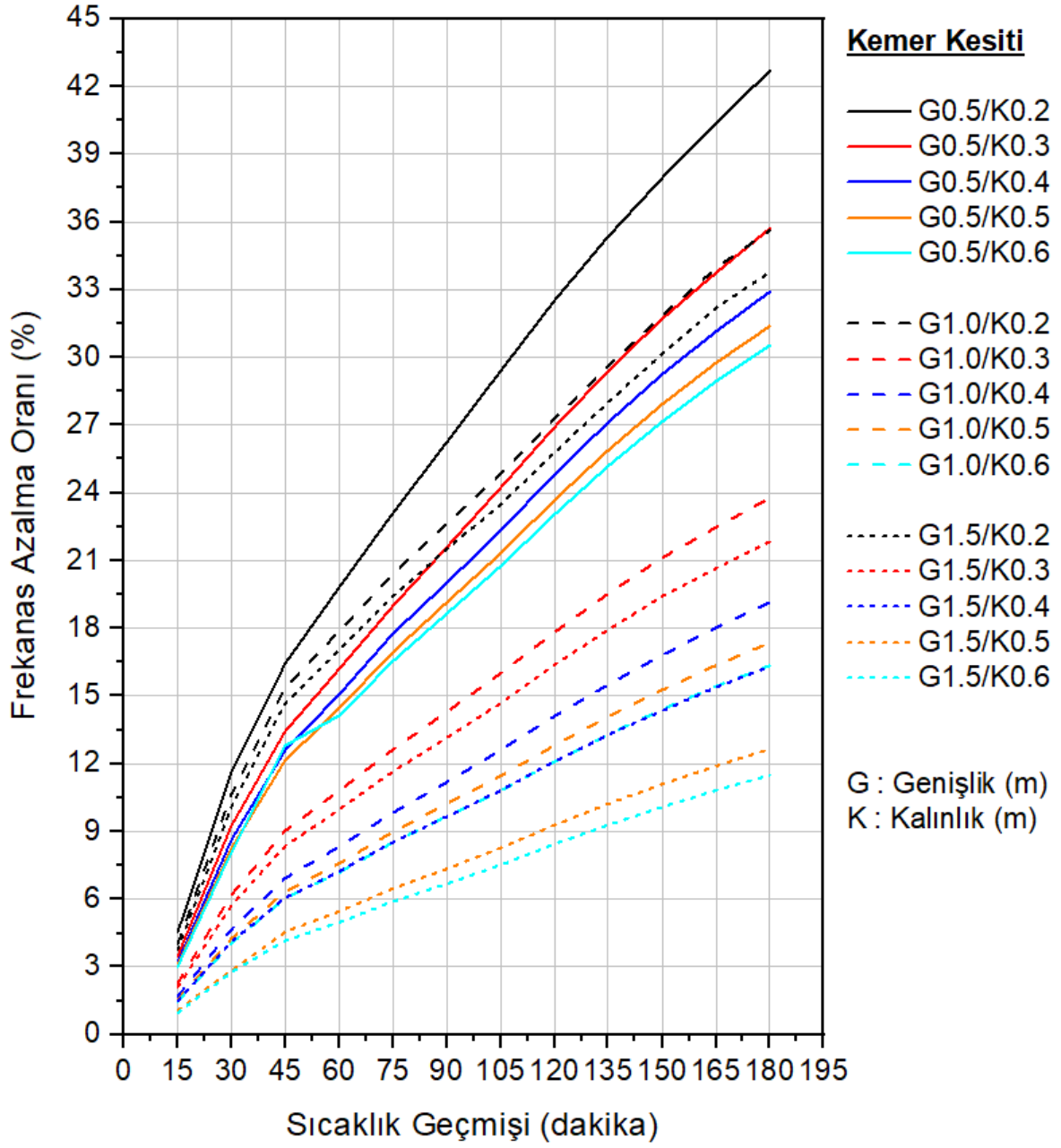
Bu 5 değişkene sahip üstel fonksiyonda; A, Y, G ve K sırasıyla kemer açıklığını, yüksekliğini, genişliğini ve kalınlığını (m), T ise maruz kaldığı sıcaklık süresini (dakika) ifade etmektedir.

Çalışma kapsamında sunulan grafik/abaklarda, yüksek sıcaklığa maruz farklı boyutlara sahip kemerlerin sıcaklık geçmişiyle ilgili 1.moduna ait doğal frekans değerlerinde meydana gelen azalma oranları yer almaktadır. 5850 adet analiz sonucundan yararlanılarak oluşturulan bu grafik/abaklarda, açıklık, genişlik, kalınlık parametreleri dikkate alınmış olup önceki bölümde açıklandığı gibi yükseklik parametresi dikkate alınmamıştır.

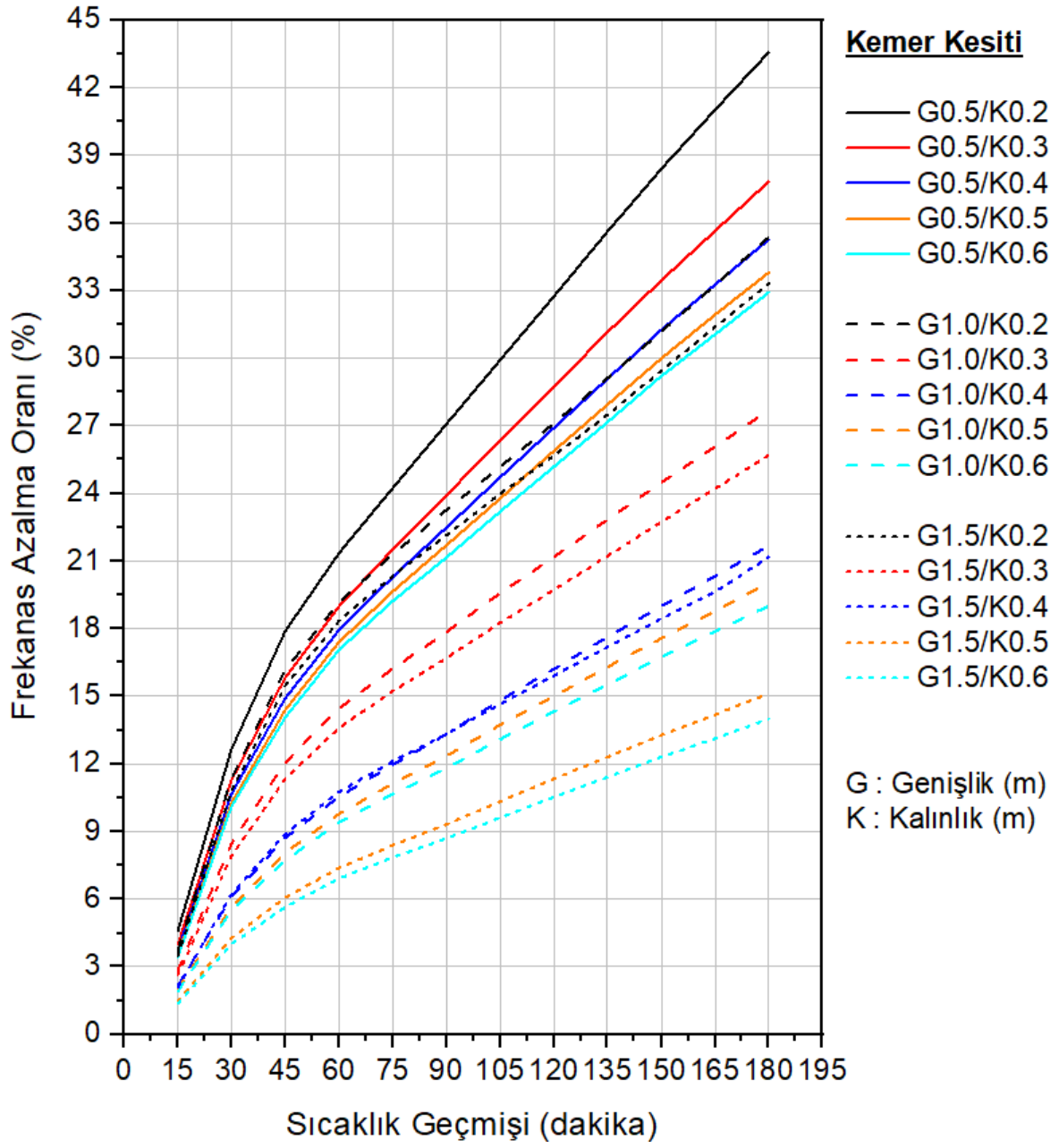
Grafik/abaklarda 1-15 m arasında 1'er metre arayla değişen her açıklık parametresi için üç genişlik parametresi (0.5, 1.0 ve 1.5 m) ve kemer grubuna göre 0.2-1.2 m arasında değişen beş kalınlık parametresi kullanılmıştır. Yani, sunulan grafik/abaklarda aynı açıklığa sahip 15 farklı kemerin, herhangi bir sıcaklık geçmişi olmayan durumu referans alınarak sıcaklık geçmişiyle ilgili 1. Doğal frekans değerinde meydana gelen azalma oranları gösterilmektedir.



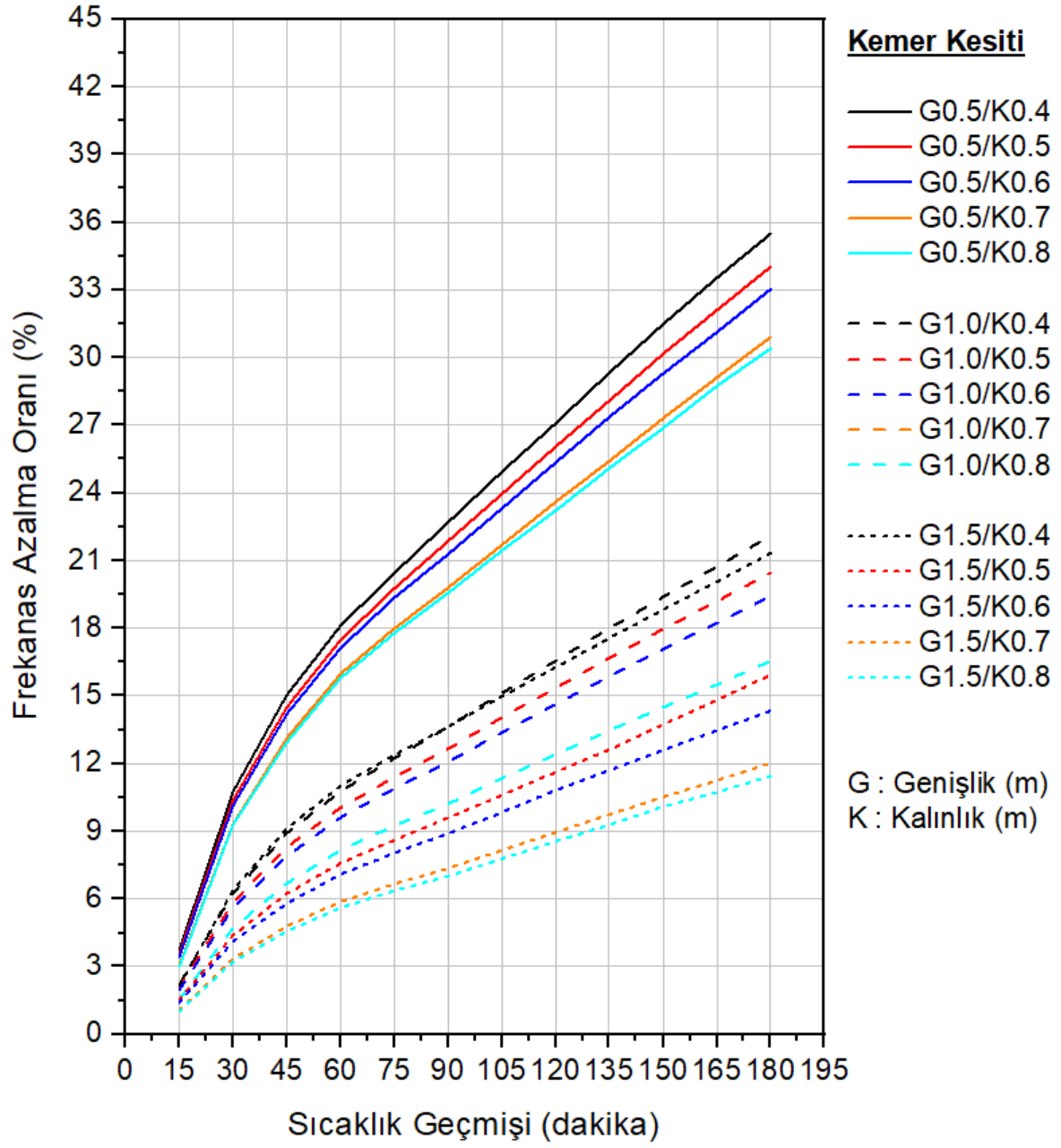
Şekil 2.63. 1 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı



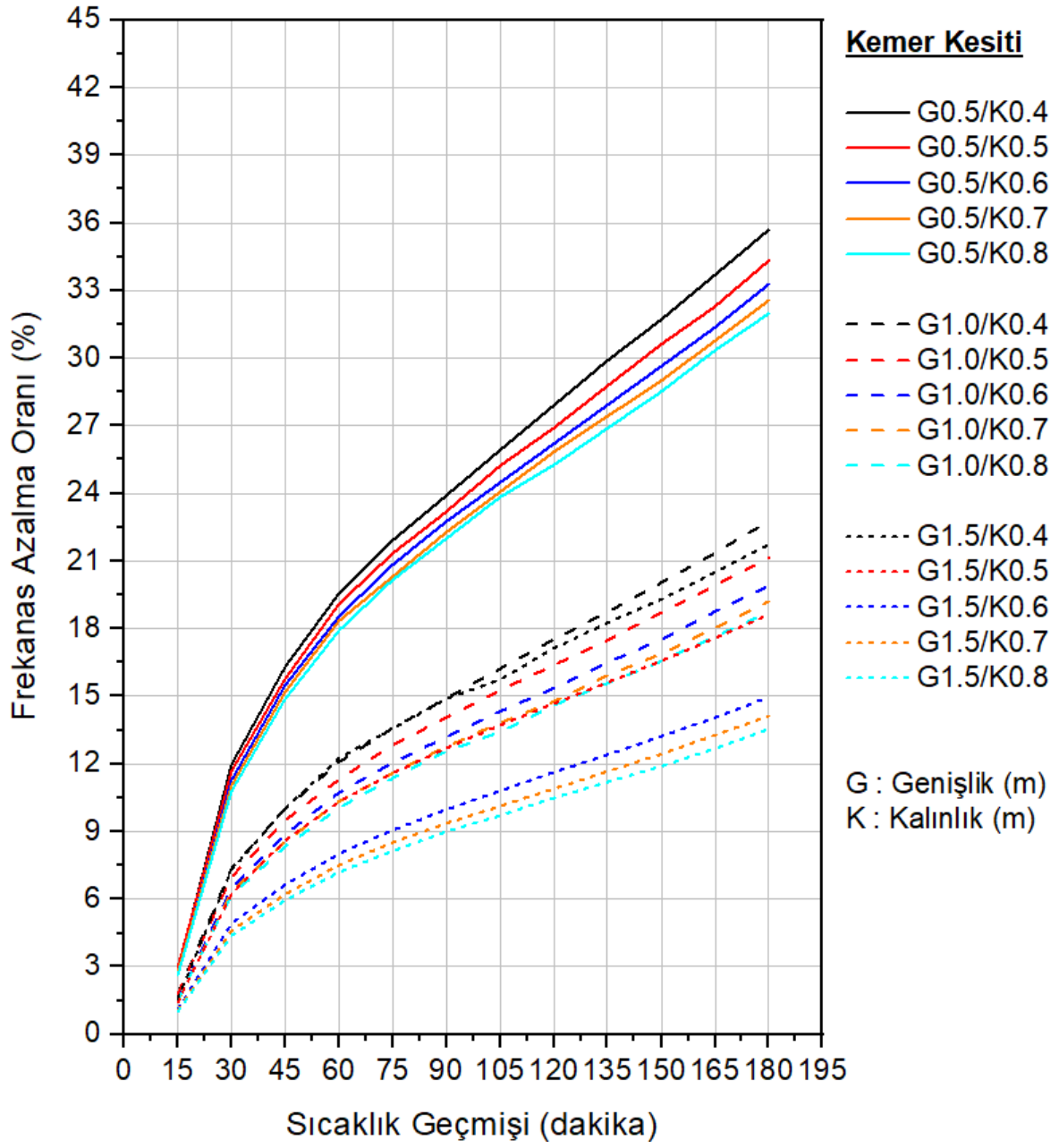
Şekil 2.64. 2 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı



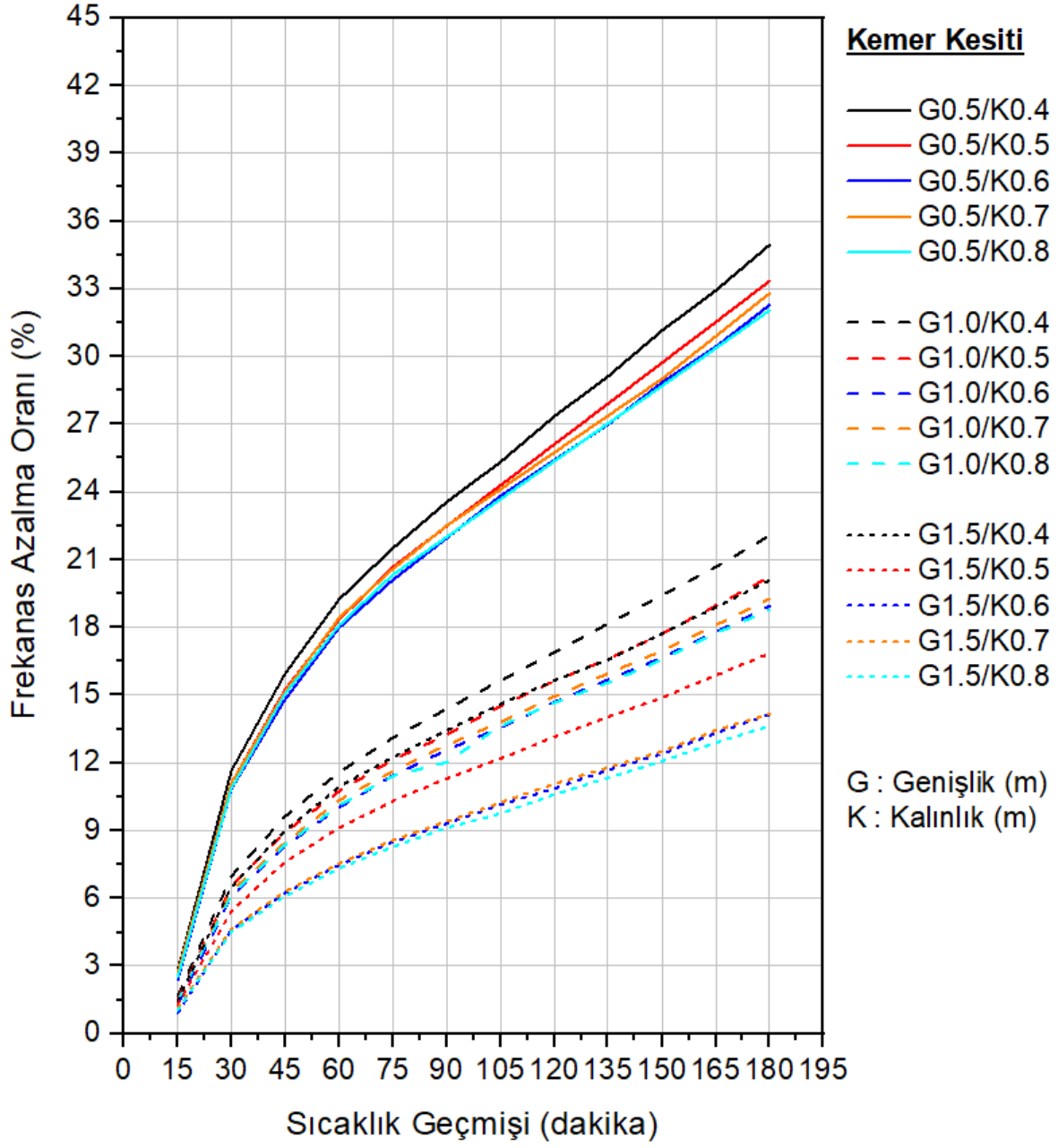
Şekil 2.65. 3 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı



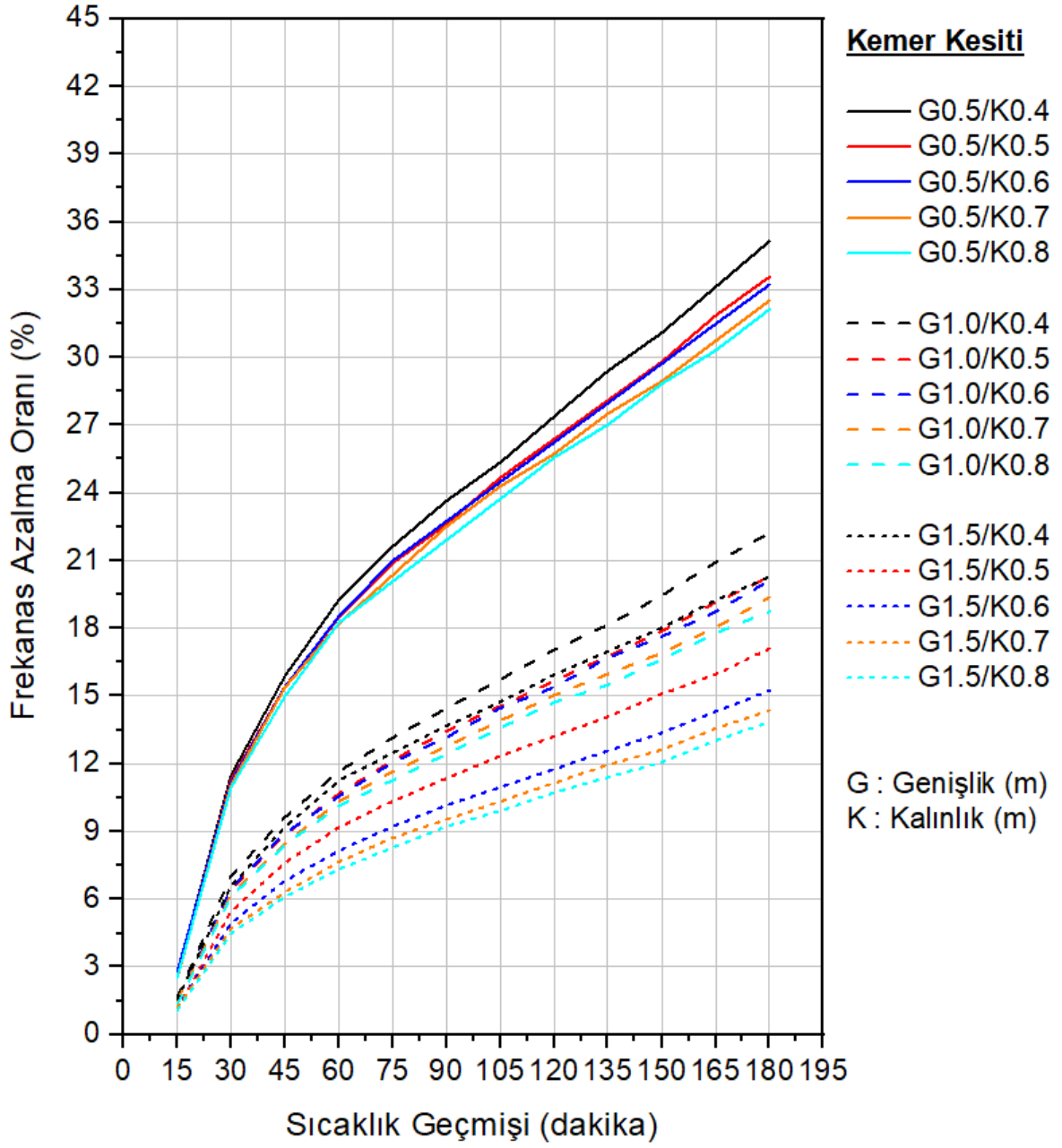
Şekil 2.66. 4 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı



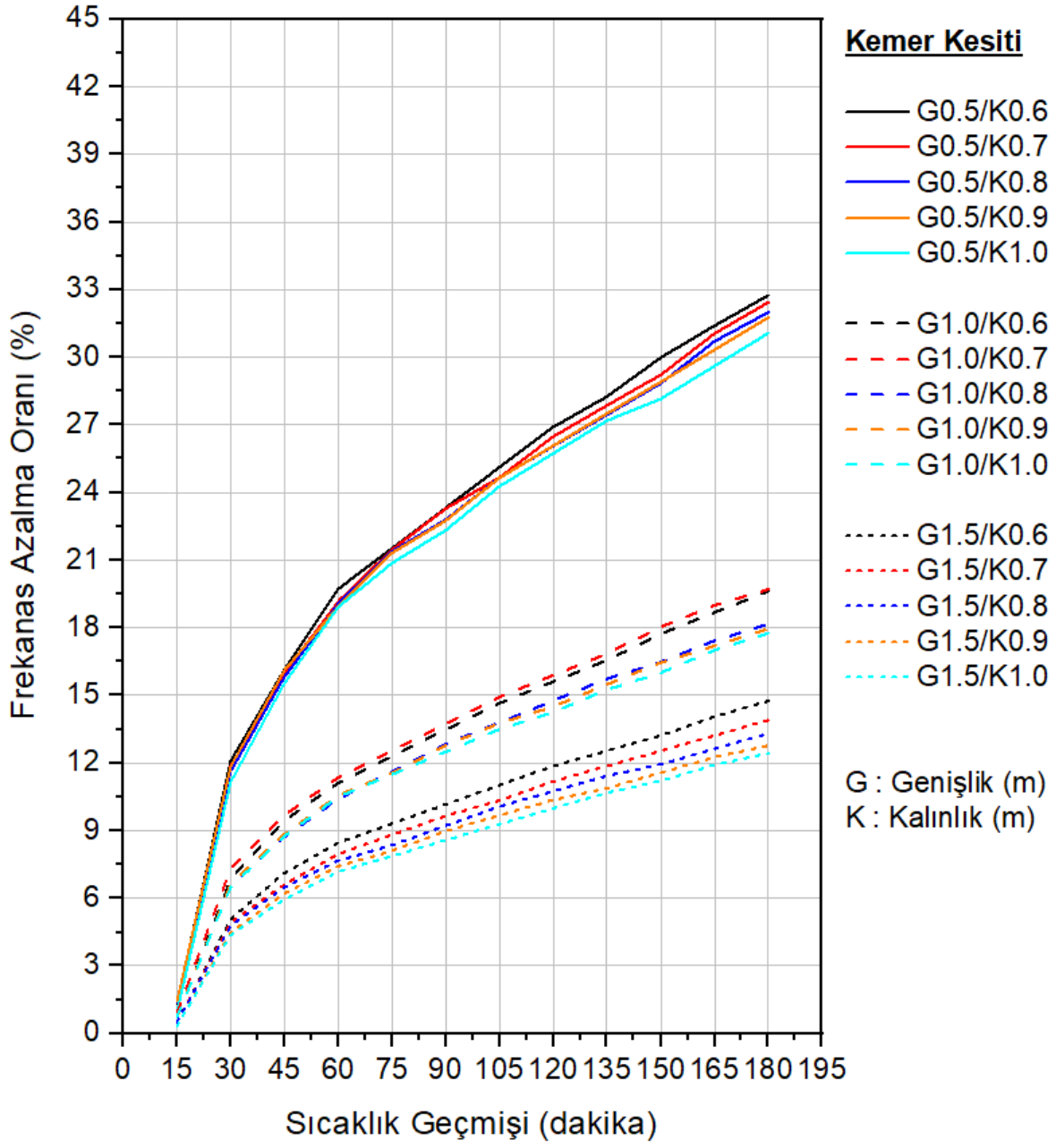
Şekil 2.67. 5 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı



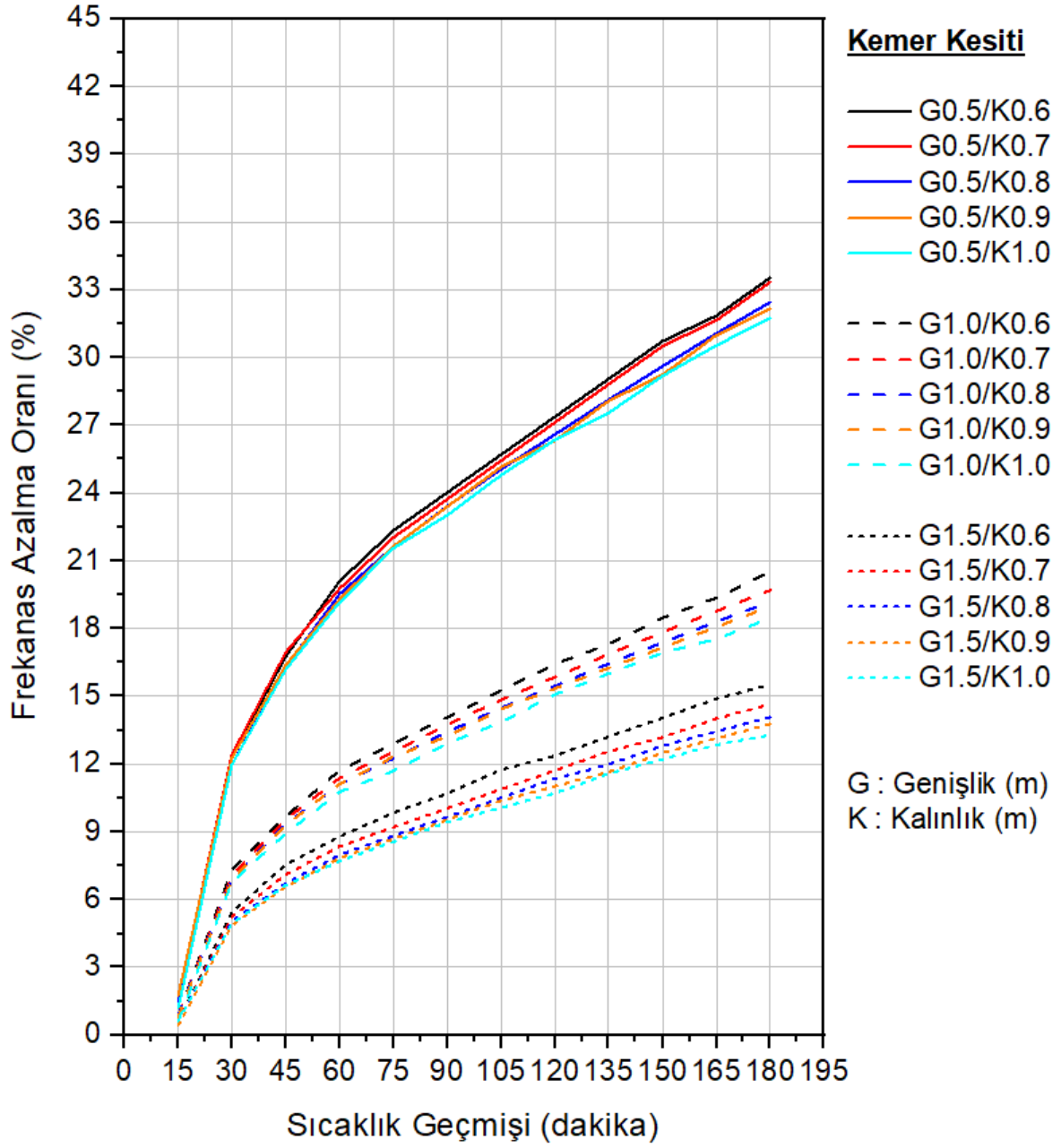
Şekil 2.68. 6 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı



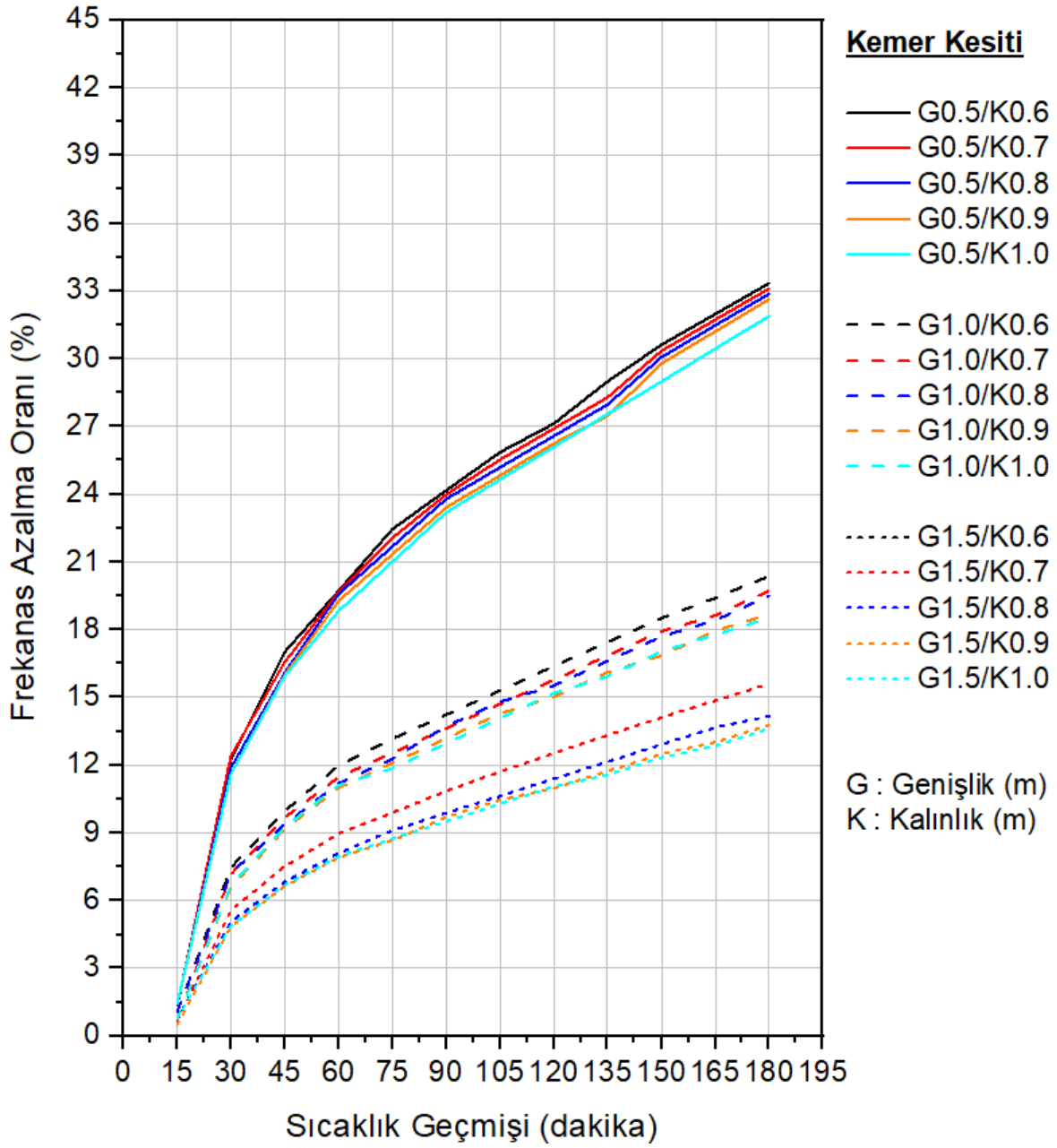
şekil 2.69. 7 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı



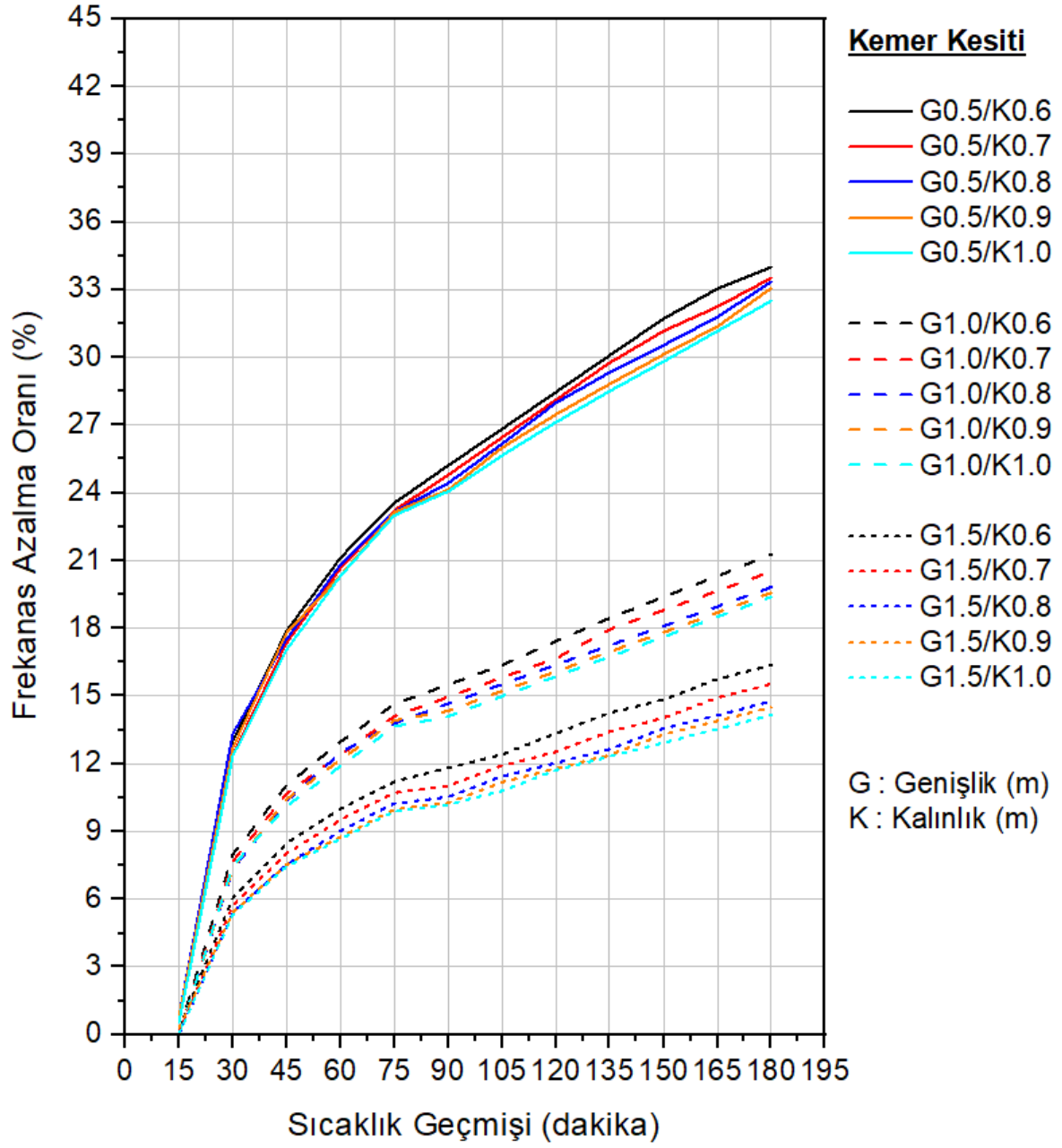
şekil 2.70. 8 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı



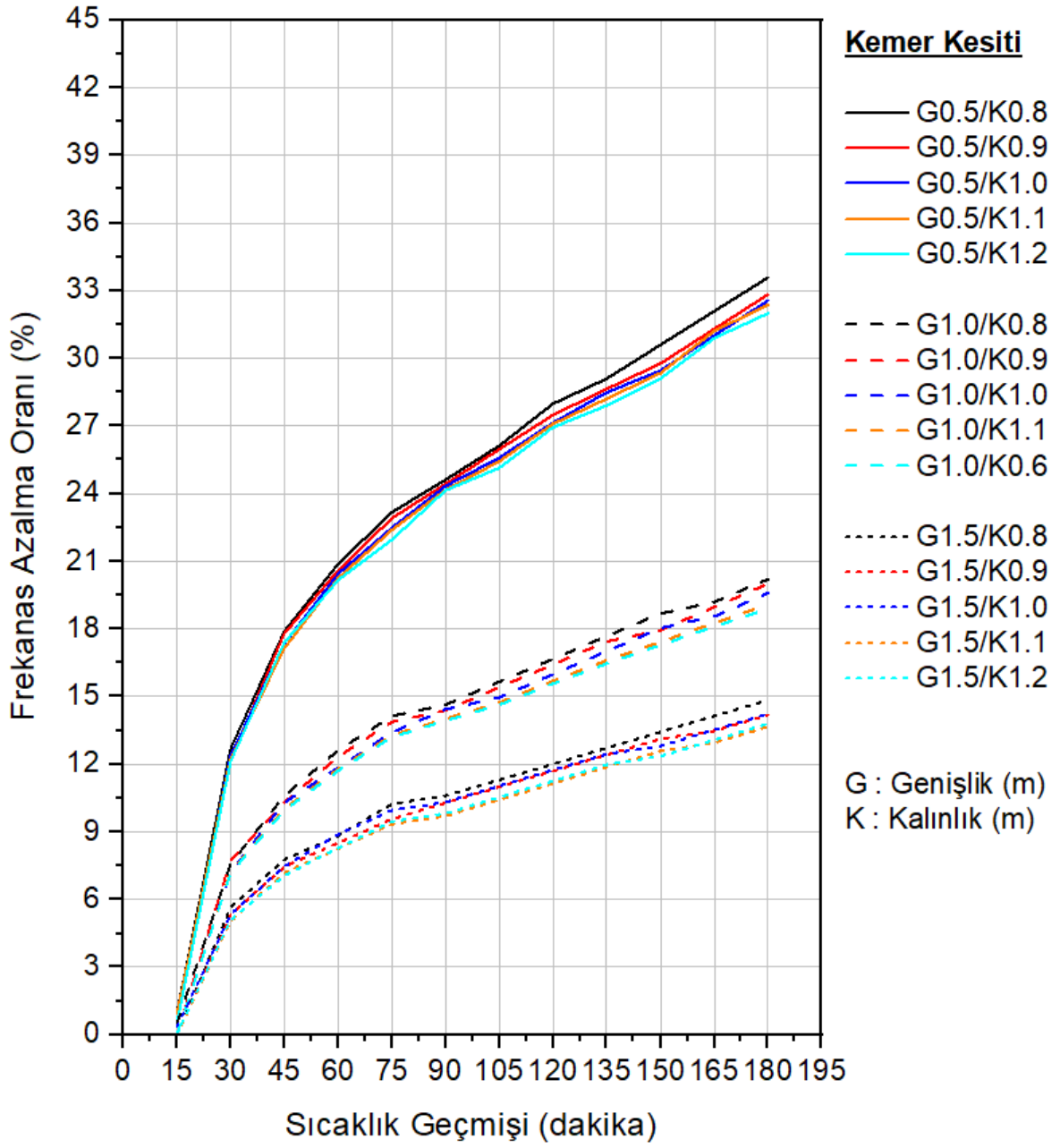
Şekil 2.71. 9 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı



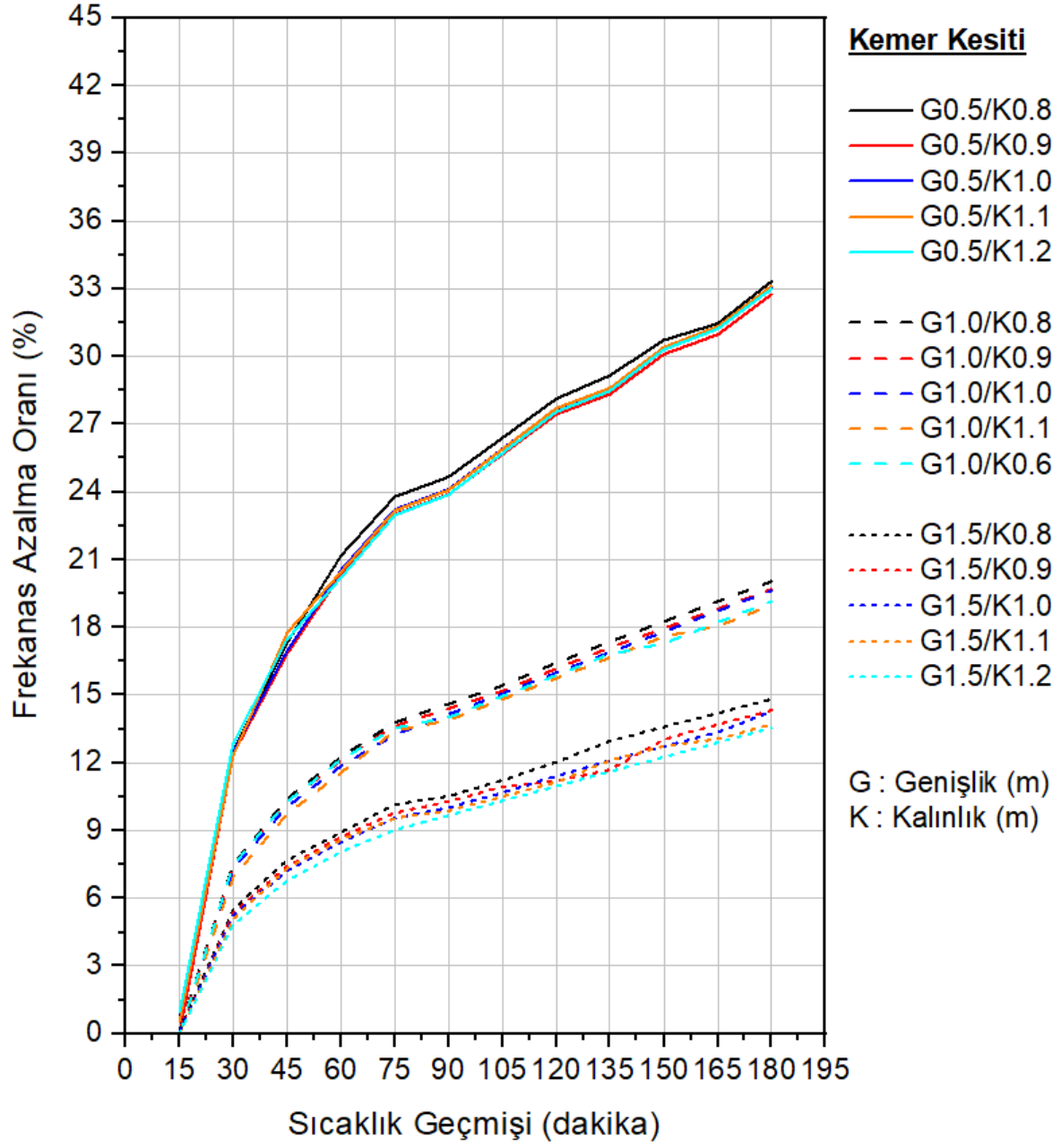
Şekil 2.72. 10 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı



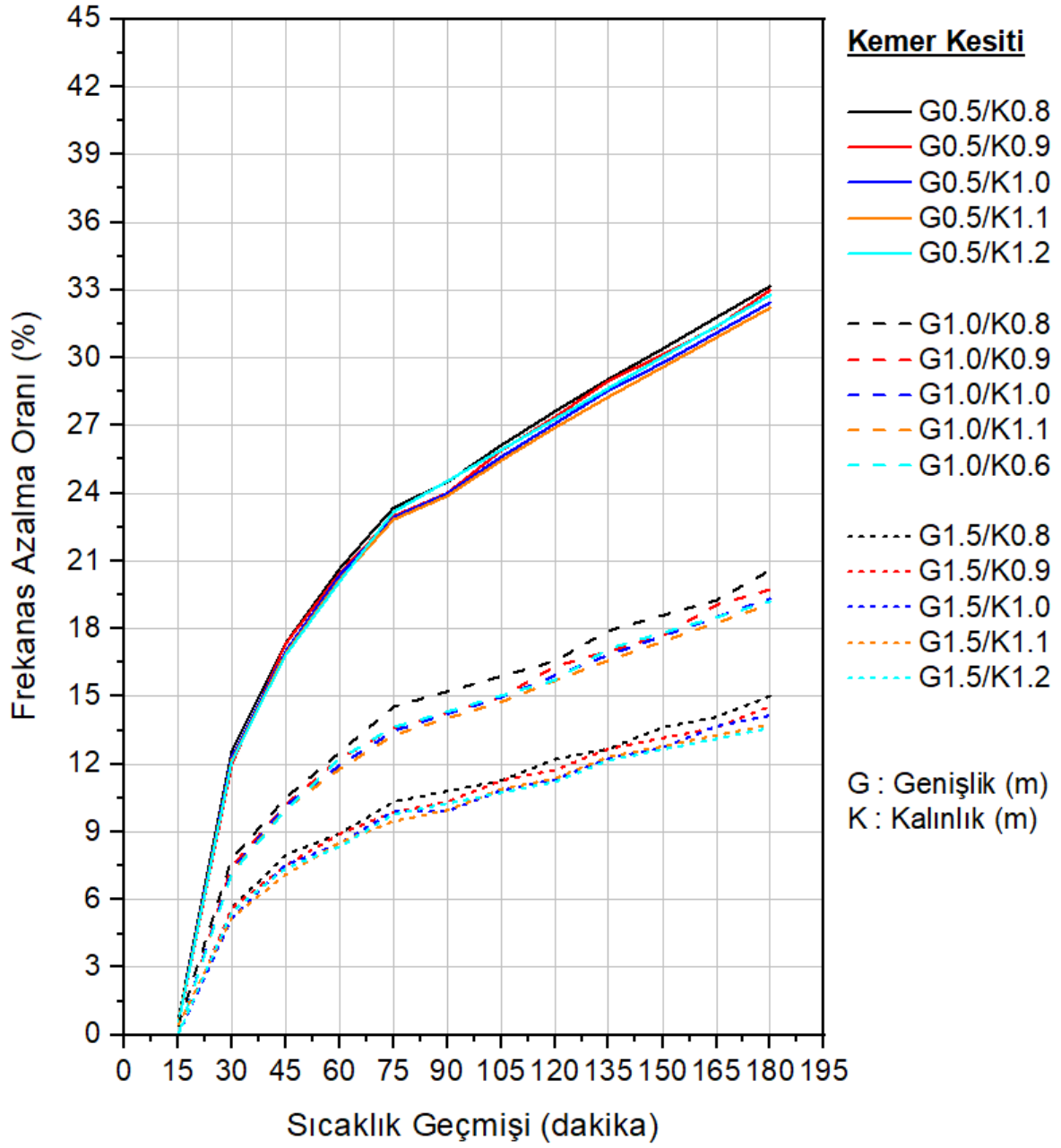
Şekil 2.73. 11 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı



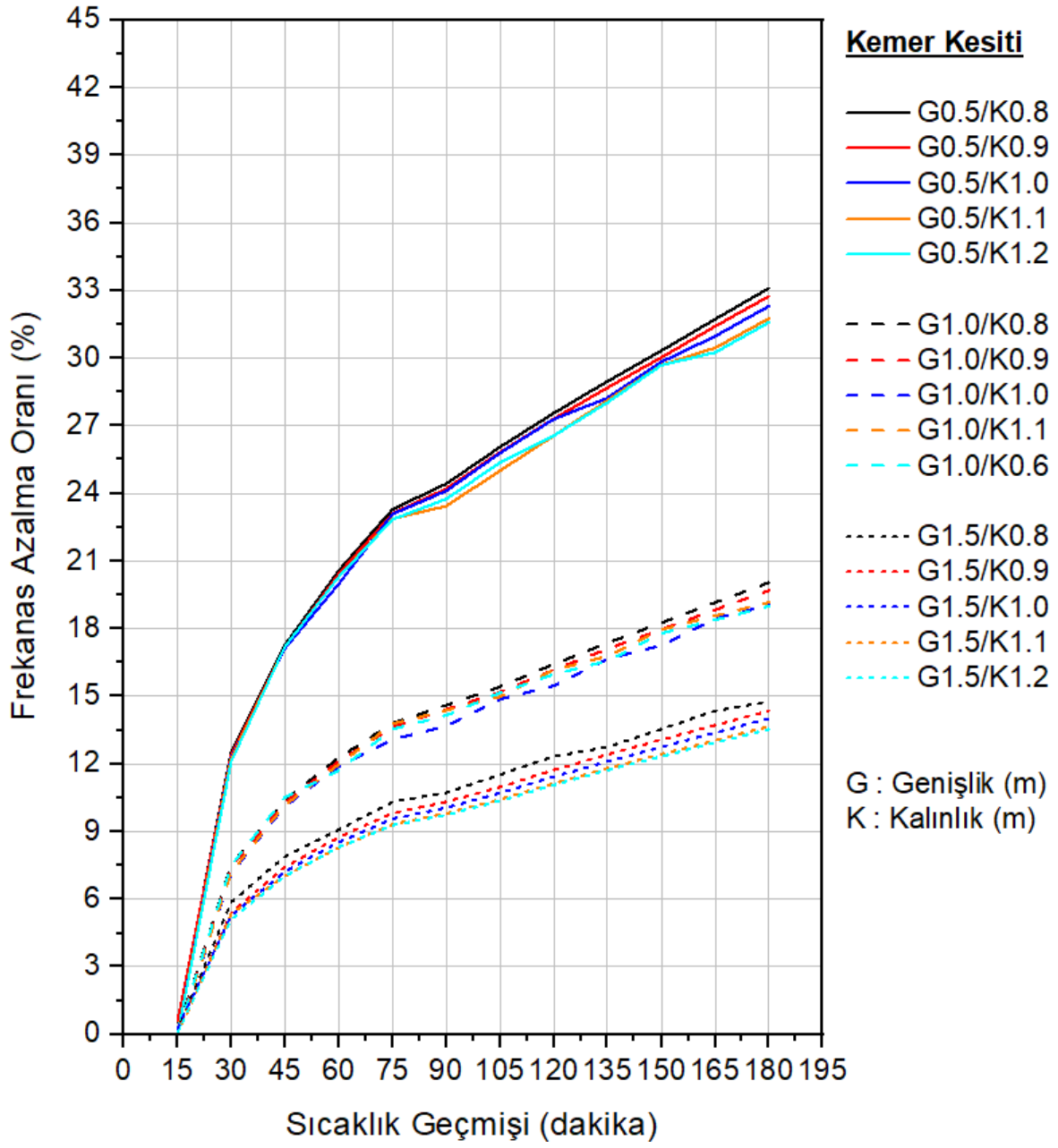
Şekil 2.74. 12 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı



Şekil 2.75. 13 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı



Şekil 2.76. 14 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı



Şekil 2.77. 15 m açıklığına, farklı enkesit özelliklerine sahip 15 kemer modelinin sıcaklığa bağlı doğal frekanslarındaki azalma oranı

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yüksek sıcaklık etkisine maruz yığma taş kemerlerin dinamik davranışlarında meydana gelen değişimler gerek deneysel gerekse sayısal yöntemler kullanılarak elde edilmiştir. Bu amaçla, laboratuvar koşullarında imalatı gerçekleştirilen farklı boyutlardaki kemer modelleri üzerinde deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar üç kısma ayrılmıştır. İlk kısımda, öncelikler laboratuvar ortamında imalatı gerçekleştirilen beş kemer modeli üzerinde çevresel titreşim testleri yapılmış ve oda sıcaklığında bulunan kemer modellere ait dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Daha sonra 600 °C sıcaklığa maruz bırakılan kemer modelleri üzerinde gerçekleştirilen çevresel titreşim testleriyle kemer modellerin sıcaklık sonrası dinamik karakteristikleri elde edilmiş ve aradaki farklılıklar incelenmiştir. İkinci kısımda öncelikle, sıcaklık öncesi ve sonrası durum için sonlu eleman modelleri oluşturulmuş kemerlerin dinamik karakteristikleri sonlu eleman analizleriyle yaklaşık olarak belirlenmiştir. Daha sonra çevresel titreşim testleri ve sonlu eleman analizleri ile elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırılmış ve aradaki farklılıklar incelenmiştir. Bu farklılıklardan hareketle kemerlere ait sonlu eleman modelleri deneysel verilere göre iyileştirilmiştir. Son kısımda ise, iyileştirilmiş sonlu eleman modellerinden faydalanılarak farklı açıklığa, yüksekliğe, genişliğe ve kalınlığa sahip kemerin dinamik karakteristikleri farklı sıcaklık geçmişi durumları dikkate alınarak elde edilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisine maruz bu kemerlerin dinamik karakteristiklerinin belirlemek için öncelikler sonlu eleman yöntemlerinden faydalanılarak ısı transferi analizleri gerçekleştirilmiş ve kemer modellerinin enkesitleri içinde meydana gelen sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Daha sonra, yüksek sıcaklık etkisindeki kemer modellerinin farklı parametrelerle değişen dinamik karakteristikleri, sıcaklık analizlerinin sonuçlarına bağlı olarak gerçekleştirilen modal analizler ile belirlenmiştir. Farklı geometrik özelliğe sahip 450 adet kemer modeli üzerinde gerçekleştirilen sıcaklık analizlerinin sonuç dosyaları kullanılarak 5850 modal analiz yapılmış ve tüm bu analiz sonuçlarıyla bir veri havuzu oluşturulmuştur. Daha sonra bu havuzdan faydalanılarak bir formülasyon geliştirilmiş ve grafik/abaklar oluşturulmuştur. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmektedir:

❖ Kemer modellerin inşası için kullanılan andezit taşının oda sıcaklığındaki (20 °C) ve 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımı

sırasıyla 30.58, 36.25, 34.07, 26.36 ve 17.84 MPa olarak elde edilmiştir. Öncelikle andezit taşının basınç dayanımı 200 °C'ye kadar yaklaşık %19 artmış, daha sonra azalmaya başlamış ve 800 °C'de basınç dayanımı oda sıcaklığına oranla yaklaşık %42 azalmıştır.

❖ Taşların birbirine bağlanması için kullanılan hidrolik kireç esaslı harçların basınç dayanımları sıcaklığın artmasıyla azalmaya başlamıştır. Harçların oda sıcaklığındaki (20 °C) ve 200 °C, 400 °C, 600 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımı sırasıyla 2.06, 1.97, 1.68 ve 1.44 MPa olarak elde edilmiştir. 800 °C sıcaklığa maruz kalan harç numunelerinde meydana gelen kavlanma ve dağılmalar nedeniyle ölçüm alınamamıştır.

❖ Andezit taşı ve hidrolik esaslı kireç harcından oluşan duvar numuneleri üzerinde oda sıcaklığında (20 °C) ve 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra gerçekleştirilen basınç dayanım testleri sonucunda numunelerin basınç dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir. TS-EN 1051-1 standardına uygun üretilen duvar numunelerinde basınç dayanımları sırasıyla 28.51, 28.12, 20.83, 10.37 ve 8.02 MPa olarak; ASTM standardına göre üretilen duvar numunelerinde ise basınç dayanımları sırasıyla 32.14, 33.06, 18.84, 11.97 ve 7.06 MPa olarak elde edilmiştir.

❖ Laboratuvar ortamında imalatı gerçekleştirilen kemer modelleri Model-R, Model-1, Model-3 ve Model-4'ün, çevresel titreşim testleriyle belirlenen ilk üç moduna ait doğal frekans değerleri sırasıyla 60.46-127.2, 68.40-127.3, 57.22-111.4 ve 83.17-197.1 Hz arasında; sonlu eleman analizleriyle belirlenen ilk üç moduna ait frekans değerleri ise sırasıyla 72.32-142.0, 72.50-142.2, 69.59-131.1 ve 92.76-212.1 Hz arasında elde edilmiştir.

❖ Kemer modellerinin çevresel titreşim testleri ve sonlu eleman analizleri ile belirlenen ilk üç mod şekli birbiri ile uyum içerisinde olup sırasıyla Model-R, Model-1, Model-3 için boyuna, enine ve düşey; Model-4 için ise enine, boyuna ve düşey olarak elde edilmiştir.

❖ Kemer modellerinin deneysel ve sayısal çalışmalar ile elde edilen ilk üç moduna ait frekanslar karşılaştırıldığında aralarında farkın yaklaşık %22 olduğu görülmüş ve bu farkın en aza indirgenebilmesi için kemerlerin sonlu eleman modellerinde iyileştirme yapılmıştır. İyileştirme, kemerlerin sonlu eleman modelindeki bazı belirsiz değişkenlerin (değişken parametre olarak elastisite modülü seçilmiştir) deneysel verilere göre kabul edilebilir sınırlar içerisinde değiştirilmesiyle yapılmış ve doğal frekanslar arasındaki fark %6.97'e indirilmiştir.

❖ İyileştirme sonrası Model-R, Model-1, Model-3 ve Model-4'ün, doğal frekans değerleri sırasıyla 63.45-124.6, 63.63-124.9, 61.04-115.1 ve 81.84-187.60 Hz arasında belirlenmiş olup kemer modellerinin mod şekillerinde bir değişiklik tespit edilmemiştir.

❖ 600 °C sıcaklığa maruz bırakılan Model-R, Model-1, Model-2, Model-3 ve Model-4'ün çevresel titreşim testleriyle belirlenen ilk üç moduna ait doğal frekans değerleri sırasıyla 33.26-68.10, 30.55-67.86, 52.88-83.01, 29.59-60.71 ve 40.63-94.45 Hz arasında; sonlu eleman analizleriyle belirlenen ilk üç moduna ait frekans değerleri ise sırasıyla 63.45-124.6, 63.63-124.9, 61.04-115.1 ve 81.84-187.60 Hz arasında elde edilmiştir.

❖ Sıcaklık sonrası kemer modellerinin çevresel titreşim testleri ve sonlu eleman analizleri ile belirlenen ilk üç mod şekli birbiri ile uyum içerisinde olup sırasıyla Model-R, Model-1, Model-2, Model-3 için boyuna, enine ve düşey; Model-4 için ise enine, boyuna ve düşey olarak elde edilmiştir.

❖ Gerçekleştirilen deneysel çalışmada Model-R, Model-1, Model-2, Model-3 ve Model-4'ün sıcaklık öncesi ve sonrası doğal frekanslarında meydana gelen maksimum azalma sırasıyla %45.63, %55.34, %48.29 ve %53.19 olarak elde edilmiştir.

❖ Sıcaklığa maruz kalan kemer modellerinin deneysel ve sayısal çalışmalar ile elde edilen ilk üç moduna ait doğal frekanslar karşılaştırıldığında aralarındaki farkın en aza indirgenebilmesi için kemerlerin sonlu eleman modellerinde iyileştirme yapılmıştır. İyileştirme sonucunda frekanslar arasındaki en büyük fark %7.35'e düşürülmüştür.

❖ Sıcaklığa maruz kalan kemerlerin sonlu eleman modelleri iyileştirildikten sonra Model-R, Model-1, Model-2, Model-3 ve Model-4'ün, doğal frekans değerleri sırasıyla 34.50-67.89, 32.66-64.22, 49.65-88.81, 31.74-60.00 ve 43.08-99.29 Hz arasında elde edilmiştir. Modellerinin mod şekillerinde bir değişiklik tespit edilmemiştir.

İyileştirilmiş sonlu eleman modeline ait malzeme özelliklerinden faydalanılarak farklı geometrik özelliklere ve sıcaklık geçmişine sahip kemer modellerinin dinamik karakteristikleri gerçekleştirilen sayısal çalışmalarla elde edilmiştir. Bunun için öncelikle karın ve alın yüzeylerinden ISO 834 standart yangına maruz kalan çeşitli boyutlardaki kemerlerin kesitlerinde oluşan sıcaklık dağılımları ısı transferi analizleri ile belirlenmiştir. Daha sonra bu analizlerin sonuç dosyası kullanılarak gerçekleştirilen modal analizlerle, farklı boyutlara ve sıcaklık geçmişine sahip kemerlerin dinamik karakteristikleri elde edilmiştir.

❖ Gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinde farklı boyutlara sahip kemer elemanların en kesitleri boyunca oluşan sıcaklık dağılımları zamana bağlı olarak elde edilmiştir.

❖ Ortam sıcaklığının artması ile kemer elemanların bu sıcaklığa maruz kalan yüzeylerinde ve kemer enkesiti içerisinde sıcaklığın arttığı görülmüştür. Yani, kemer enkesiti içerisindeki sıcaklıklarda, yangına ve/veya yüksek sıcaklık etkisine maruz yüzeyler boyunca artış olurken bu etkiye maruz kalamayan yüzeylerde ve derinliklerinde herhangi bir artış olmamıştır.

❖ Örnek olarak seçilen 1-0.4-0.5-0.2 kemer modelinde maksimum sıcaklık artışı, yangının her iki yüzeyden direk etkideği kemer köşelerinde bulunan düğüm noktalarında meydana gelmiştir.

❖ Sürekli ve geçici rejim dikkate alınarak gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinde gelişmiş bilgisayar programları kullanılmaktadır. Belirli bir sıcaklık geçmişi için eleman kesiti içindeki düğüm noktalarında oluşan sıcaklık değeri, sürekli rejimin dikkate alındığı durumlarda eşit değerler almış fakat geçici rejimin dikkate alındığı durumlarda farklı değerler almıştır. Yani ısı transferi analizlerinde geçici rejimin kullanılması durumunda eleman kesiti içerisinde eşit olmayan sıcaklık dağılımlarının oluştuğu görülmüştür.

❖ Gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinde seçilecek sonlu eleman ağının, model içerisinde oluşan sıcaklık dağılımlarının düzgün bir şekilde elde edilebilmesinde önemli bir rol oynadığı görülmüştür.

❖ Çoklu analiz sonuçlarının tamamının yer aldığı bir veri havuzu faydalanarak farklı boyutlara sahip kemerlerin sıcaklık geçmişine bağlı 1. doğal frekans değerlerini veren bir formülasyon geliştirilmiş ayrıca bu kemerlerin doğal frekans değerlerindeki azalmayı gösteren grafik/abaklar oluşturulmuştur.

❖ Yüksek sıcaklığa maruz kalan farklı boyutlara sahip kemerlerin sıcaklık geçmişine bağlı doğal frekanslarında azalmalar görülmüştür. Bu kemerlerin mod şekillerinde herhangi bir değişiklik görülmezken genliklerinde azalmalar görülmüştür.

❖ Analizlerde dikkate alınana yükseklik parametresindeki %20 azalma aynı açıklık genişlik ve kalınlığa sahip kemerlerin 1.doğal frekans değerlerinde artışa sebep olmuştur. Ayrıca yükseklik açıklığın yarısı olan yarım daire kemerlerle yükseklik parametresi %20 azaltılan basık bu kemerlerin sıcaklığa bağlı 1.doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranının benzer görülmüştür.

❖ Aynı açıklığa, yüksekliğe ve kalınlığa sahip kemerlerde genellikle genişlik parametresinin artması, kemerlerin 1. Moduna karşılık gelen doğal frekans değerlerinde artışa neden olmuştur. Ayrıca sıcaklığa maruz kalan bu kemerlerin genişlik parametresindeki artış kemerlerin sıcaklık geçmişiyle ilgili frekanslarında meydana gelen azalma oranlarında düşüslere neden olmuştur.

❖ Aynı açıklığa, yüksekliğe ve genişliğe sahip kemerlerde genellikle kalınlık parametresinin artması, kemerlerin 1. Moduna karşılık gelen doğal frekans değerlerinde azalışa neden olmuştur. Ayrıca sıcaklığa maruz kalan bu kemerlerin kalınlık parametresindeki artış kemerlerin sıcaklık geçmişiyle ilgili frekanslarında meydana gelen azalma oranlarında düşüslere neden olmuştur.

❖ Analizlerde dikkate alınan bir diğer parametre olan açıklık parametresinin artışı aynı yükseklik, genişlik ve kalınlığa sahip kemerlerin doğal frekans değerlerinde düşüslere neden olurken bu kemerlerin sıcaklık geçmişi parametresine ilgili 1.doğal frekans değerlerinde meydana gelen düşüş oranlarının benzer olduğu görülmüştür.

❖ Yüksek sıcaklığa maruz kalan kemerlerin sıcaklığa ilgili doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranı açıklık ve yükseklik parametrelerinin değişiminden çok fazla etkilenmezken açıklık ve kalınlık parametrelerinin artması bu oranı düşürdüğü görülmüştür.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar doğrultusunda yapılan öneriler maddeler halinde aşağıda verilmektedir:

- Yığma yapıların inşasında kullanılan harman tuğlası, ateş tuğlası, kireç taşı gibi farklı yığma birimlerinin yangın gibi yüksek sıcaklık etkisi altındaki fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler araştırılabilir.

- Çeşitli yığma birimlerinden ve harçlarından üretilen duvar numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışları gerek deneysel yöntemler gerekse sayısal yöntemler kullanılarak incelenebilir.

- Çalışma kapsamında gerçekleştirilen farklı boyutlara ve sıcaklık geçmişiyle sahip kemerlerde kullanılan malzeme değiştirilebilir. Yangın gibi yüksek sıcaklığa maruz kalan kemer elemanlarda kullanılan farklı malzemelerin, kemerlerin dinamik davranışları üzerindeki etkisi araştırılabilir.

- Günümüzde kullanım alanı oldukça genişleyen derin öğrenme ve yapay sinir ağı gibi yöntemler kullanılarak çoklu analizler sonucu elde edilen veriler çoğaltılabilir ve kullanım alanları genişletilebilir.

- Büyük açıklıklara sahip kemerlerde tam gelişmiş oda yangını yerine lokal yangın durumu için dinamik karakteristiklerde meydana gelen değişimler incelenebilir.



4. KAYNAKLAR

- ABAQUS, 2016. Dassault Systèmes Simulia Corporation, Providence, Rhode Island.
- Akbulut, Y.E., 2018. “Betonarme Kolonların Yüksek Sıcaklık Etkisi Altındaki Dinamik Karakteristik Değişimlerinin Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- Akbulut, Y.E., Altunisik, A.C., Basaga, H.B., Mostofi, S., Mosallam, A., ve Wafa, L.F., 2021. Numerical investigation on dynamic characteristics changes of RC columns and frames under elevated temperature, Computers and Concrete, 28, 2, 149-187.
- Altunışık, A.C., 2010. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Akıncıtürk, N., 2000. Yapılarda Yangın Güvenliği Kapsamında Taşıyıcı Sistem ve Malzemeye Yönelik Sorunların Mimari Açından İncelenmesi, Yangın Güvenlik Kongresi, 85-90.
- Altunışık, A.C., Kanbur, B., ve Genc, A.F., 2015. The effect of arch geometry on the structural behavior of masonry bridges, Smart Struct. Syst, 16, 6, 1069-1089.
- Al Nahhas, F., Saada, R.A., Bonnet, G., ve Delmotte, P., 2007. Resistance to fire of walls constituted by hollow blocks: Experiments and thermal modeling, Applied Thermal Engineering, 27, 1, 258-267.
- Al-Sibahy, A., ve Edwards, R., 2013. Behaviour of masonry wallettes made from a new concrete formulation under combination of axial compression load and heat exposure: Experimental approach, Engineering Structures, 48, 193-204.
- Andreini, M., ve Sassu, M., 2011. Mechanical behaviour of full unit masonry panels under fire action, Fire Safety Journal, 46 ,7, 440-450.
- Andreini, M., De Falco, A., ve Sassu, M., 2014. Stress–strain curves for masonry materials exposed to fire action, Fire Safety Journal, 69, 43-56.
- Armağan, K., 2012. Tarihi Yapılarında Kullanılan Fonksiyonelliğin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.
- Askegaard, V., ve Mossing, P., 1988. Long Term Observation of RC-Bridge using Changes in Natural Frequency, Nordic Concrete Federation, 7, 20-27.

- Bayraktar, A., Altunişik, A.C., Sevim, B., Türker, T., Akköse, M., ve Çoşkun, N., 2008. Modal analysis, experimental validation, and calibration of a historical masonry minaret, Journal of Testing and Evaluation, 36, 6, 516-524.
- Bendat, J.S., ve Piersol, A.G., 2004. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 3th Edition, John Wiley and Sons, USA.
- Biró, A., Hlavička, V., ve Lublőy, É., 2019. Effect of fire-related temperatures on natural Stones, Construction and Building Materials, 212, 92-101.
- Brincker, R., Zhang, L., ve Andersen, P., 2000. Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, 18th International Modal Analysis Conference, San Antonio, USA, 4062, 2, 625-630.
- Brincker, R., Ventura, C.E., ve Andersen, P., 2003. Why Output-Only Modal Testing is a Desirable Tool for a Wide Range of Practical Applications, Proceedings of 21st International Modal Analysis Conference on Structural Dynamics, Kissimmee, Orlando, USA.
- Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., ve Alarcón, J.C., 2013. Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's calcarenite, Engineering Geology, 167, 117-127.
- Bošnjak, J., Serena G.S., Akanshu S.A., ve Meškovic, A., 2020. Experimental and numerical studies on masonry after exposure to elevated temperatures, Construction and Building Materials, 230.
- Buchanan, A.H., ve Abu, A.K., 2017. Structural Design for Fire Safety, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, United Kingdom.
- Chakrabarti, B., Yates, T., ve Lewry, A., 1996. Effect of fire damage on natural stonework in buildings, Construction and Building Materials, 10, 7, 539-544.
- Çakır, F., 2011. Assessment of Structural Integrity and Seismic Retrofit of Masonry Bridges Using Micropile, Yüksek Lisans Tezi, Illinois Institute of Technology, Chicago, II, ABD.
- Çakır, F., Uysal, H., ve Acar, V., 2016. Experimental modal analysis of masonry arches strengthened with graphene nanoplatelets reinforced prepreg composites, Measurement, 90, 233-241.
- Çılı, F., ve Sesigür, H., 2007. Tarihi Yapıların Onarımı/Güçlendirilmesi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Seminer Notları.
- Daware, A., ve Naser, M.Z., 2021. Fire performance of masonry under various testing methods, Construction and Building Materials, 289, 123183.
- Demirel, F., ve Altındaş, S., 2006. Yapı Malzemelerinin Avrupa Yangına Tepki Sınıfları, Konunun Türkiye-Avrupa Geneline İrdelenmesi ve Ulusal Sınıfların Yeni

Avrupa Sınıflarına Uyarlanması, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 21, 1, 39-54.

Desjardins, S.L., Londono, N.A., Lau, D.T., ve Khoo, H., 2006. Real-Time Data Processing, Analysis and Visualization for Structural Monitoring of the Confederation Bridge, Advances in Structural Engineering, 9, 141-157.

De Wit, A., 2011. Behaviour and Structural Design of Concrete Structures Exposed to Fire, MSc Thesis, Stockholm, Sweden.

Emberley, R.L., 2013. A Study into the Behavior of Reinforced-Concrete Columns under Fire Exposures using a Spreadsheet-Based Numerical Mode, PhD Thesis, Worcester Polytechnic Institute.

Eriç, M., 2002. Yapı Fiziği ve Malzemesi, Literatür Yayıncılık, 64-330.

Ersoy, H., Kolaylı, H., Karahan, M., Karahan, H.H., ve Sünnetçi, M.O., 2019. Effect of thermal damage on mineralogical and strength properties of basic volcanic rocks exposed to high temperatures, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78, 3, 1515-1525.

Günaydin, M., 2016. Onarılmış ve lifli polimer kompozit malzemelerle güçlendirilmiş betonarme binaların dinamik davranışlarının deneysel ve analitik yöntemlerle incelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.

Hacıemiroğlu, M., 2014. Yangın geçirmiş betonarme bir yapının deprem performansının değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

Heylen, W., Lammens, S., ve Sas, P., 2007. Modal Analysis Theory and Testing, Leuven Katholieke Universiteit, Department of Mechanical Engineering, Leuven, Belgium.

Jacobsen, N.J., Andersen, P., ve Brincker, R., 2006. Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis, Proceedings of ISMA2006: International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium.

Kara, H.G., 2009. Tarihi Yığma Yapıların Taşıyıcı Sistemleri, Güvenliğinin İncelenmesi, Onarımı ve Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

Karadağ, M.Ç., 2021. Tarihi sosyokültürel yapıların günümüze uyarlanmasında yangın güvenliğinin sağlanması, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye.

Koca, M.Y., Özden, G., Yavuz, A., B., Kincal, C., Onargan, T., ve Kucuk, K., 2006. Changes in the engineering properties of marble in fire-exposed columns, International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences, 43, 4, 520-530.

- Kodur, V.K.R., ve Harmathy, T.Z., 2016. Properties of building materials. In SFPE handbook of fire protection engineering, Springer, New York.
- Küçükaya, A.G., 2004. Taşların Bozulma Nedenleri Koruma Yöntemleri, Birsen Yayınevi, 1-60.
- Li, Z., Fortin, J., Nicolas, A., Deldicque, D., ve Guéguen, Y., 2019. Physical and mechanical properties of thermally cracked andesite under pressure, Rock Mechanics and Rock Engineering, 52, 10, 3509-3529.
- Liu, S., ve Xu, J., 2015. An experimental study on the physico-mechanical properties of two post-high-temperature rocks, Engineering Geology, 185, 63-70.
- Lourenço, P.B., 1998. Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behaviour of masonry, Structural Analysis of Historical Constructions II, Barcelona.
- Morgan, W., 1970. The Elements of Structure an Introduction to the principles of Building and Structural Engineering, Pitman Publishing, New York, ABD.
- Mustafaraj, E., ve Yardim, Y., 2017. Review of Strengthening Techniques and Mechanical Testing for Unreinforced Masonry, MATTER: International Journal of Science and Technology, 3, 2, 33-50.
- Nadjai, A., O'Garra, M., ve Ali F., 2003. Finite element modelling of compartment masonry walls in fire, Computers and Structures, 81, 1923–1930.
- Nadjai, A., O'Garra, M., Ali F., ve Jurgen, R., 2006. Compartment Masonry Walls in Fire Situations, Fire Technology, 42, 211–231.
- Naser, M.Z., 2019. Properties and material models for common construction materials at elevated temperatures. Construction and Building Materials, 215, 192-206.
- Nguyen, T.D., Meftah, F., Chammas, R., ve Mebarki, A., 2008. The behaviour of masonry wall subjected to fire Modelling and parametrical studies in the case of hollow burnt-clay bricks, Fire Safety Journal, 44, 629–641.
- Nguyen, T.D., ve Meftah, F., 2011. Behavior of clay hollow-brick masonry walls during fire Part-1, Experimental analysis, Fire Safety Journal, 52, 55–64.
- Oliveira, R.G., Rodrigues, J.P.C., Pereira, J.M., Lourenço, P.B., ve Lopes, R.F., 2021. Experimental and numerical analysis on the structural fire behaviour of three-cell hollowed concrete masonry walls. Engineering Structures, 228, 111439.
- Özgüven, A., ve Özçelik, Y., 2013. Investigation of some property changes of natural building stones exposed to fire and high heat, Construction and Building Materials, 38, 813-821.

- Öztürk, T., ve Mahberel, H.A., 2006. Tarihi Yapıların Mevcut Güvenliğinin Belirlenmesi Onarım ve Güçlendirilmesi, 7. Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Konferansı, İstanbul.
- Pachta, V., Triantafyllaki, S., ve Stefanidou, M., 2018. Performance of lime-based mortars at elevated temperatures, Construction and Building Materials, 189, 576-584.
- Pachta, V., Konopisi, S., ve Stefanidou, M., 2021. The influence of brick dust and crushed brick on the properties of lime-based mortars exposed at elevated temperatures, Construction and Building Materials, 296, 123743.
- Purkiss, J.A., 2007. Fire Safety Engineering, Second Edition: Design of Structures, Butterworth-Heinemann publications, United Kingdom.
- Ramos, J.L.F.S., 2007. Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, Doktora Tezi, University of Minho, Portugal.
- Ramos, L.F., De Roeck, G., Lourenço, P.B., ve Campos-Costa, A., 2010. Damage identification on arched masonry structures using ambient and random impact vibrations, Engineering Structures, 32, 1, 146-162.
- Russo, S., ve Sciarretta, F., 2012. Experimental and theoretical investigation on masonry after high temperature exposure, Experimental Mechanics, 52, 4, 341-359.
- Russo, S., ve Sciarretta, F., 2015. Numerical investigation on the residual behaviour of masonry walls damaged by fire exposure, Key Engineering Materials, 624, 230-237.
- Saraç, M.M., 2003. Tarihi Yığma Kagir Yapıların Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, İstanbul, Türkiye.
- Schwarz, B.J., ve Richardson, M.H., 1999. Experimental Modal Analysis, CSI Reliability Week, Orlando, USA
- Sevim, B., 2010. Kemer Barajların Dinamik Davranışlarının Sonlu Eleman ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Surbhi, S., Difference between conduction, convection and radiation.
<https://keydifferences.com/difference-between-conduction-convection-and-radiation.html>, 25.04.2022
- Şahin, A., 2009. Yapıların Deneysel ve Operasyonel Modal Analizleri için Sayısal Sinyal İşleme, Dinamik Karakteristik Belirleme ve Sonlu Eleman Model İyileştirilme Yazılımları: SignalCAD-ModalCAD- FemUP, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Tulunay, S., 2019. Tarihi Yapılarda Yangın Tehlikesine Bağlı Gelişen Risklerin Yönetimi Üzerine Bir Değerlendirme, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- TS704, 1979. Harman Tuğlası (Duvarlar için)
- URL-1, <https://www.bksv.com/en/transducers/vibration/impact-hammers/8210?tab=specifications>, 29.04.2022.
- URL-2, <http://mechatronics.colostate.edu/figures/9-50.jpg>, 15.12.2016.
- Ural, A., Oruç, S., Doğangün, A., ve Tuluk, Ö.İ., 2008. Turkish Historical Arch Bridges and Their Deteriorations and Failures, Engineering Failure Analysis, 15, 43–53.
- Ünal, M., Berber, E., Yatağan, İ., ve Akkurt S., 2007. Yüksek Sıcaklığın Yapı Taşlarının Dayanımı Üzerindeki Etkisinin Ultrasonik Ölçümler ile Kestirilmesi, Selçuk Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23, 1-2.
- Xia, Y., Hao, H., Zanardo, G., ve Deeks, A., 2006. Long term vibration monitoring of an RC slab: temperature and humidity effect, Engineering structures, 28, 3, 441-452.
- Zhang, L., Brincker, R., ve Andersen, P., 2002. An Overview of Operational Modal Analysis: Major Development and Issues, B&K Technical Paper, 152-161.
- Zhang, J., Ma, H., Li, C., Xu, Q., ve Li, W., 2018. Experimental study on seismic performance of fire-exposed perforated brick masonry Wall, Construction and Building Materials, 180, 77-91.

ÖZGEMİŞ

Muhammed Mustafa ÖZTÜRK, İlkokulu Elâzığ Bahçelievler İlköğretim Okulu'nda, ortaokulu Tokat'ın Turhal ilçesinde Alparslan Ortaokulu'nda tamamladıktan sonra lise öğrenimini Zile Dinçerler Lisesi'nde gördü. 2011 yılında girdiği Öğrenci Seçme Sınavı'nda gösterdiği başarı sonucu Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat mühendisliği Bölümü'nde "Lisans" eğitimi almaya hak kazandı. Bir yıl İngilizce Hazırlık eğitimini alarak 2016 yılında Mühendislik Fakültesi'nden birincilik ile mezun oldu. 2017 senesinde 1 yıl zorunlu askerlik görevini "Yedek Subay" olarak tamamladı ve 2018 senesinde Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda "Yüksek Lisans" eğitimine başladı. 2019 senesinde Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde "Araştırma Görevlisi" olarak çalışmaya başladı. Evli ve bir çocuk babasıdır.